

9

Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú

Dewitte B.^{1,2}

Takahashi K.³

Goubanova K.^{1,2,3}

Montecinos A.⁴

Mosquera K.³

Illig S.^{1,2}

Montes I.³

Paulmier A.^{1,2}

Garçon V.²

Purca S.⁵

Flores R.⁵

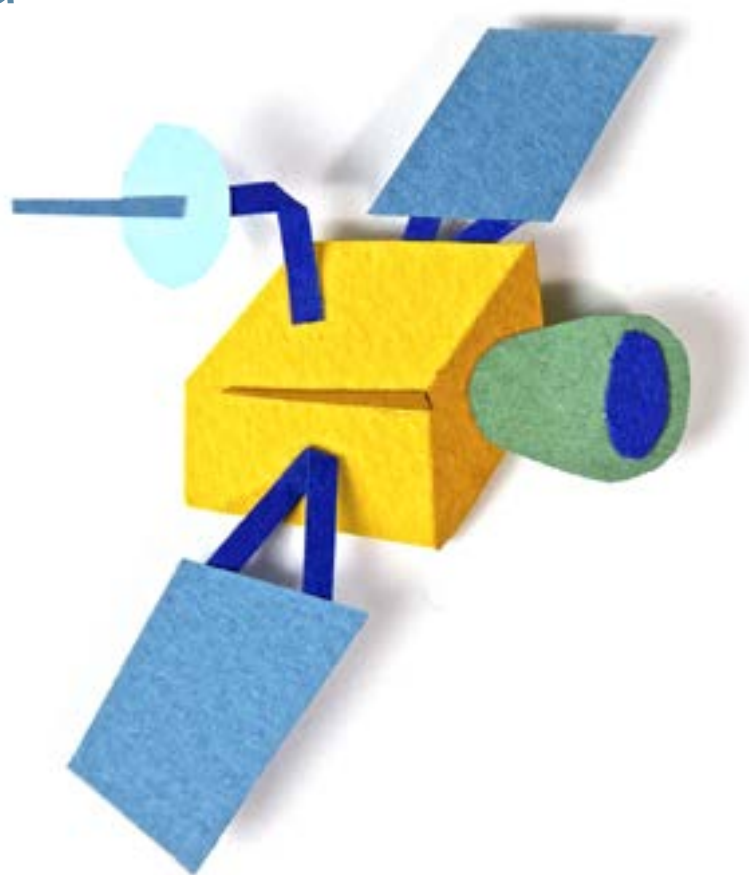
Bourrel L.⁶

Rau P.⁶

Labat D.⁶

Lavado W.⁷

Espinoza J. C.³



¹ Institut de Recherche pour le Développement - IRD

² Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS (CNES, CNRS, IRD, Université Toulouse 3), Toulouse, France

³ Instituto Geofísico del Perú - IGP, Lima, Perú

⁴ Universidad de Concepción – UdeC, Concepción, Chile

⁵ Instituto del Mar del Perú - IMARPE, Callao, Perú

⁶ Géosciences Environnement Toulouse - GET (CNRS, IRD, Observatoire Midi-Pyrénées, Université Toulouse 3), Toulouse, France

⁷ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, Lima, Perú

RESÚMENES

Español

El fenómeno El Niño es el modo dominante de la variabilidad interanual en el Océano Pacífico, resultando de un proceso de interacción entre el océano y la atmósfera en el Pacífico Tropical. Las últimas investigaciones demuestran que existen varias facetas de este fenómeno que varían según las modalidades de interacción entre el océano y la atmósfera así como sus ubicaciones. Existen por lo menos dos tipos de El Niño, con expresiones diferentes sobre la Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico Tropical y en la costa de Perú: uno que se desarrolla en el Pacífico Central (tiende a estar asociado a condiciones oceánicas más frías que favorecen el estado árido de la costa peruana y condiciones oceánicas hipóxicas), y otro que se desarrolla en el Pacífico Este (que transforma la costa peruana en una "típica" zona tropical, caracterizada por aguas costeras calientes y oxigenadas, y una lluvia intensa). Hoy en día, los esfuerzos de investigación para entender los mecanismos involucrados en los diferentes tipos de El Niño han sido reforzados, dado que, en las últimas décadas, se ha incrementado la frecuencia de ocurrencia de estos eventos en el Pacífico Central, sugiriéndose que podría ser una consecuencia del cambio climático. El perfeccionamiento de los modelos regionales acoplados tanto océano-atmósfera como océano-biogeoquímico, tiene como objetivo mejorar la comprensión de la vulnerabilidad de la biosfera peruana al cambio climático y proponer un paradigma que represente la bimodalidad de la variabilidad interanual en el Pacífico Tropical.

Francés

Les différentes facettes de El Niño et ses effets sur la côte péruvienne

El Niño est le mode dominant de la variabilité interannuelle dans l'océan Pacifique, résultant d'un processus d'interaction entre l'océan et l'atmosphère dans le Pacifique tropical. Les recherches récentes montrent qu'il existe plusieurs facettes de ce phénomène qui varient selon les modalités d'interaction entre l'océan et l'atmosphère et leurs emplacements. Il y a au moins deux types de El Niño, avec des expressions différentes sur la Température de surface dans le Pacifique tropical et le long de la côte du Pérou: un qui se déroule dans le Pacifique central (associé à des conditions océaniques froides qui favorisent l'état aride de la côte péruvienne et des conditions océaniques d'hypoxie), et un autre qui a lieu dans le Pacifique oriental (qui transforme la côte péruvienne en une zone tropicale «typique», caractérisé par des eaux côtières chaudes et oxygénées, et de fortes pluies). Aujourd'hui, les efforts de recherche pour comprendre les mécanismes impliqués dans les différents types de El Niño ont été renforcés, en raison de l'accroissement de la fréquence d'occurrence de ces événements dans le Pacifique central au cours des dernières décennies accrue, suggérant qu'il pourrait s'agir d'une conséquence du changement climatique. L'optimisation des modèles régionaux couplés océan - atmosphère et océan - biogéochimiques, vise à améliorer la compréhension de la vulnérabilité de la biosphère péruvienne au changement climatique et de proposer un paradigme qui représente la bimodalité de la variabilité interannuelle dans le Pacifique tropical.

Inglés

The various facets of El Niño and its effects on the coast of Peru

The El Niño phenomenon is the dominant mode of inter-annual variability in the Pacific Ocean, which results from the interaction between the ocean and atmosphere in the tropical Pacific. Recent research shows that there are several facets of this phenomenon, which vary according to the modalities of interaction between the ocean and atmosphere, as well as their locations. There are at least two types of El Niño with different expressions on the sea surface temperature in the tropical Pacific and on the coast of Peru: one that takes place in the Central Pacific (which tends to be associated with colder oceanic conditions who favoring the aridity of the Peruvian coast and the ocean conditions hypoxic), and another that takes place in the Eastern Pacific (which transforms the Peruvian coast in a "typical" tropical zone, with warm and oxygenated coastal waters, and heavy rain). Nowadays, research efforts to understand the mechanisms involved in the different types of El Niño have been strengthened, since in recent decades has increased the frequency of these events in the Central Pacific, suggesting that it might be a result of climate change. The improvement of both regional models coupled ocean - atmosphere and ocean - biogeochemical aims to improve the understanding of the vulnerability of the Peruvian biosphere to climate change, and propose a paradigm that represents the bimodality of the inter-annual variability in the tropical Pacific.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno El Niño es una fluctuación climática que ocurre en el Océano Pacífico con una periodicidad de 2 a 7 años. El Niño corresponde a la componente oceánica de un proceso de interacción entre el océano y la atmósfera a escala global. La componente atmosférica de esta interacción se conoce como la Oscilación del Sur: una fluctuación de la presión atmosférica, de tendencia opuesta, entre el centro de alta presión del Pacífico sudeste y el de baja presión de Indonesia. Por este motivo, el fenómeno se denomina en la comunidad científica “El Niño-Oscilación del Sur” (ENOS): es el modo dominante de la variabilidad climática en el Océano Pacífico, el cual impacta a muchos países adyacentes, como a nivel global por medio de las teleconexiones atmosféricas y oceánicas, en diferentes actividades productivas y sectores socio-económicos. Para el caso particular del Perú, se observan, mayormente, impactos negativos tanto en sus recursos marinos como en la agricultura, los cuales fueron especialmente drásticos durante los eventos fuertes de El Niño, como los que tuvieron lugar en los periodos 1982-1983 y 1997-1998.

Si bien el ENOS ha sido estudiado ampliamente desde hace cuatro décadas, existe últimamente un interés renovado en la comunidad científica. En efecto, las observaciones realizadas en los últimos años, han evidenciado que El Niño no tiene una sola “faceta” y que podría experimentar cambios en sus propiedades debido al calentamiento global [1,2]. Mientras que El Niño extremo de 1997-1998, que marcó con sus fuertes impactos a

varios países durante muchos años, particularmente a los de la costa oeste de Sudamérica, ha sido considerado como el arquetipo de El Niño (tal vez en parte porque fue, sin duda, el evento mejor observado del siglo 20, ahora se reconoce que este tipo de El Niño ha sido más escaso que su contraparte, El Niño del Pacífico Central (CPEl Niño, por sus siglas en inglés o El Niño Modoki) durante las últimas cinco décadas [3]. La comunidad científica se enfrenta, por lo tanto, a nuevos retos, que van desde la propuesta de nuevos modelos para explicar la diversidad del ENOS hasta establecer una mejor comprensión que permita predecir sus impactos, lo que significa entender sus teleconexiones. Las teleconexiones corresponden a las relaciones existentes entre las anomalías climáticas de dos zonas distantes entre sí. A pesar de las largas distancias existentes entre estos lugares y las diferencias en los tiempos de ocurrencia de las anomalías, las interrelaciones existen: una anomalía pueda influir en el comportamiento de la otra.

Este artículo revisa los recientes avances en nuestro entendimiento del ENOS y sus impactos en la circulación oceánica y el ciclo hidrológico a lo largo de la costa del Perú, llevado a cabo en colaboración entre científicos franceses y peruanos en los últimos 5 años. También presenta algunos aspectos de los esfuerzos actuales de investigación en colaboración entre el Perú y Francia en el estudio de la relación entre la variabilidad ecuatorial y la circulación oceánica, biogeoquímica marina y el ciclo hidrológico a lo largo de la costa del Perú. El documento ofrece una visión general sobre cómo se puede utilizar nuestro conocimiento actual de El Niño y la variabilidad

oceánica ecuatorial para una mejor comprensión y la posible reducción de la vulnerabilidad de la biósfera peruana al cambio climático.

¿El Niño o Los Niños?

La historia de las investigaciones sobre El Niño como fenómeno de gran escala es bastante reciente y se ha incrementado gracias a los sistemas de observación en el Pacífico Tropical. El último de los grandes avances se produjo durante los años 1980s con la implementación de 70 boyas del proyecto TAO (Tropical Atmosphere Ocean project, [4]) localizadas entre los paralelos 8°S y 8°N a lo largo del Pacífico Ecuatorial.

Desde finales de los años 1980s, los sistemas de observación fueron complementados por observaciones satelitales, las cuales permitieron una visión general y simultánea de la dinámica de El Niño (como su influencia en el nivel de mar por ejemplo). Este sistema de observación permitió la descripción completa de El Niño 1997-1998, el cual ha sido extensamente estudiado por la comunidad científica y ha sido considerado como el arquetipo del evento El Niño, proveyendo una línea base para varias de las teorías sobre El Niño. Estudios previos ya habían

Los eventos El Niño del Pacífico Este son conocidos por producir fuertes precipitaciones e inundaciones en la costa norte y central del Perú. Por otro lado, los eventos El Niño del Pacífico Central favorecen el estado árido de la región.

reportado que El Niño no siempre se desarrollaba en la misma región del Pacífico Ecuatorial y se presentaba en otra región con la misma amplitud que El Niño 1997-1998 [5,6]. Sin embargo, es sólo hacia finales del año 2000, que se identificaron realmente diferentes tipos de El Niño, los cuales parecen tener características particulares [7,8].

La característica básica de una primera clasificación de las diferentes facetas de El Niño se basa en el patrón de la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico:

1. El Niño del Pacífico Central, llamado también “El Niño de la Línea de Fecha” (Dateline El Niño), “El Niño Modoki” (palabra japonesa que significa “parece ser, pero no es”) o “El Niño de la Piscina Cálida” (Warm Pool El Niño), tiene un máximo de anomalías de Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico Central, entre las regiones Niño 4 y 3 centrados en la región de la piscina cálida, presentando temperaturas sobre 28°C (ver Fig. 1).
2. El Niño del Pacífico Este (o Cold Tongue El Niño) que se caracteriza por presentar un máximo de anomalías de Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico Ecuatorial Este (región Niño 3) y la costa de Sudamérica (Fig. 1). El Niño 1997-1998 responde a este patrón.

El Niño del Pacífico Central tiende a afectar la temperatura de la piscina cálida donde se concentran las tormentas intensas y, por lo tanto, la rama ascendente de la celda de circulación atmosférica conocida como la

9 Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú

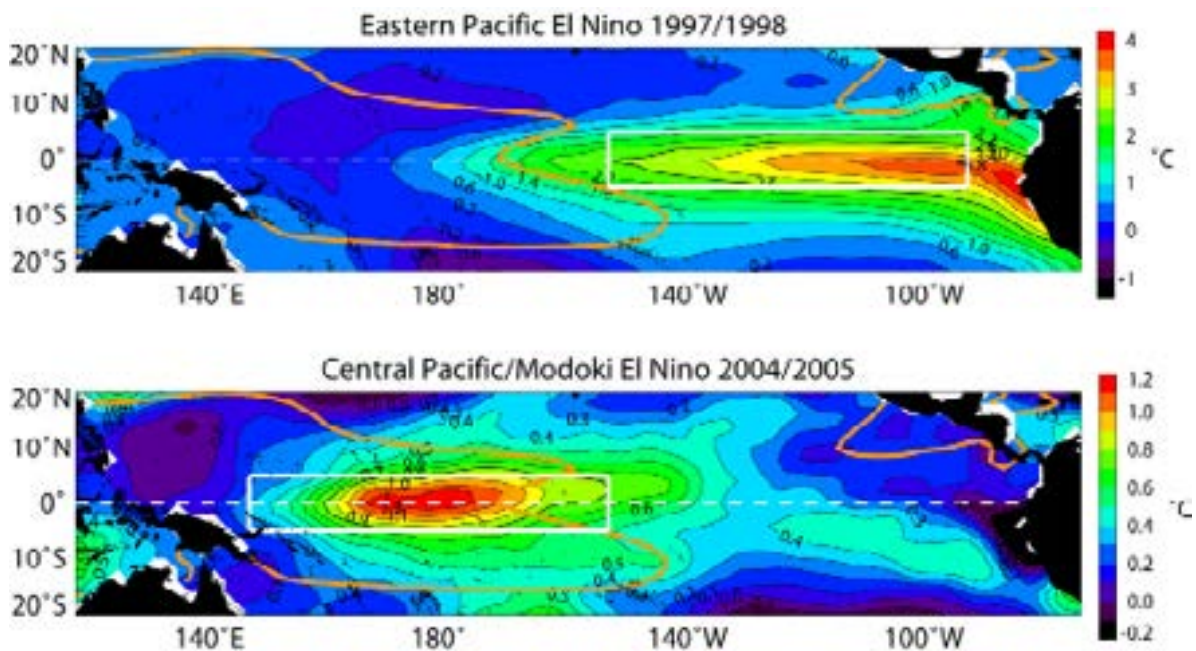


Figura 1: Anomalías de Temperatura Superficial del Mar durante los eventos El Niño del Pacífico Este de 1997-1998 (panel superior) y El Niño del Pacífico Central de 2004-2005 (panel inferior). Las anomalías son para el periodo de verano (diciembre a febrero). La ubicación promedio de la piscina cálida se indica por la línea gruesa naranja y los rectángulos (línea blanca) muestran las regiones Niño históricas que corresponden a los centros de acción de los diferentes tipos de El Niño, es decir la región Niño 3 (rectángulo blanco en el panel superior) y la región Niño 4 (rectángulo blanco en el panel inferior). Los intervalos de los contornos son diferentes para cada panel (0,4°C para el panel superior y 0,2°C para el panel inferior - ver la escala de colores en el borde derecho de cada panel).

Circulación de Walker (caracterizada por un ascenso del aire en el Pacífico Ecuatorial Occidental y descenso en el Oriental). Por lo tanto, existe una mayor probabilidad de impactar la circulación atmosférica global ya que pequeños cambios de temperatura desarrollados en la superficie de la piscina cálida pueden llevar a cambios sustanciales en la Circulación de Walker. Ha sido también observado que la ocurrencia de estos tipos de El Niño ha incrementado sobre las últimas dos décadas [9], lo cual ha sido sugerido que es un resultado del calentamiento global [1].

Dos regímenes de El Niño

Si existen dos facetas de El Niño, una pregunta básica es si ambos fenómenos se deben a dos procesos dinámicos o regímenes distintos. Esto tiene por supuesto implicancia en las predicciones estacionales, ya que el conocimiento de los procesos físicos subyacentes de un evento es un paso preliminar hacia el diseño de una estrategia de monitoreo y predicción relevante. Este tema ha sido un enfoque importante de la comunidad internacional en los últimos años [10]. Mientras que

el registro de observaciones actual (últimos 50 años) es demasiado corto para concluir sobre este tema, las simulaciones numéricas de los modelos del clima a largo plazo han aportado material para aclarar este aspecto de la dinámica del ENOS. Takahashi et al. [3] sugirieron por primera vez que existen dos tipos de El Niño que pertenecen a dos regímenes diferentes de variabilidad pero que no necesariamente coinciden con la diferenciación entre CP y EP. Mas bien, propusieron que existe un régimen que abarca los eventos El Niño moderados, tanto CP como EP, junto con La Niña, y otro régimen correspondiente a la ocurrencia de El Niño extraordinario, que presenta un calentamiento extremo en el Pacífico oriental y de los cuales solo se registran los eventos de 1982/83 y 1997/98.

La selección del régimen depende de las características de la variabilidad atmosférica en escala de unos días a algunos meses, antes del desarrollo de un evento, que pueden o no desencadenar una respuesta amplificada a través de un calentamiento suficientemente intenso que permite la activación de tormentas intensas en el normalmente frío Pacífico Oriental, lo cual favorece el desarrollo de un evento El Niño extraordinario. Esto se observa en una simulación numérica sobre 500 años, que pertenece a un modelo acoplado avanzado de circulación general (modelo numérico que incluye tanto el mar como el aire) ampliamente estudiado por la comunidad científica [11]. El resultado de esta última investigación revela dos regímenes dinámicos claros: uno asociado a los eventos débiles/moderados de El Niño, y el otro asociado al desencadenamiento de los eventos El Niño extraordinarios. El desencadenamiento surge cuando

el esfuerzo del viento zonal (de oeste a este) en el Pacífico Ecuatorial Central (eje horizontal en la Fig. 2) supera un cierto valor umbral, que hace que el sistema cambie drásticamente al régimen extraordinario, donde las anomalías de la Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico Ecuatorial Este puedan exceder 2-3°C (eje vertical en la Fig. 2). Tal cambio de régimen depende del momento en el cual las anomalías del esfuerzo del viento zonal se encuentran activas durante el año calendario, siendo más propicio el invierno austral.

Ondas Kelvin intraestacionales

La variabilidad atmosférica de alta frecuencia es un factor clave para que se produzca el desencadenamiento de un evento El Niño. En particular, existen las ráfagas de viento del oeste (en inglés Westerly Wind Bursts, WWB) que generan olas oceánicas planetarias (llamadas ondas Kelvin) a lo largo de la línea ecuatorial. Según su temperatura, estas ondas Kelvin profundizan o elevan la termoclina (una capa donde la temperatura disminuye abruptamente con la profundidad y que se encuentra a unos ~180m debajo de la superficie del mar en la región oeste del Pacífico ecuatorial y ~40m en su parte oriental). Las ondas Kelvin cálidas producen una profundización de la termoclina que se propaga hacia el este, iniciando así un calentamiento de la Temperatura Superficial del Mar [12]. Si la magnitud y la ubicación de este calentamiento inicial provoca una respuesta atmosférica, entonces existen condiciones para que un evento El Niño se desarrolle. Comprender cómo esas ráfagas de viento del oeste y su expresión oceánica, es decir las llamadas

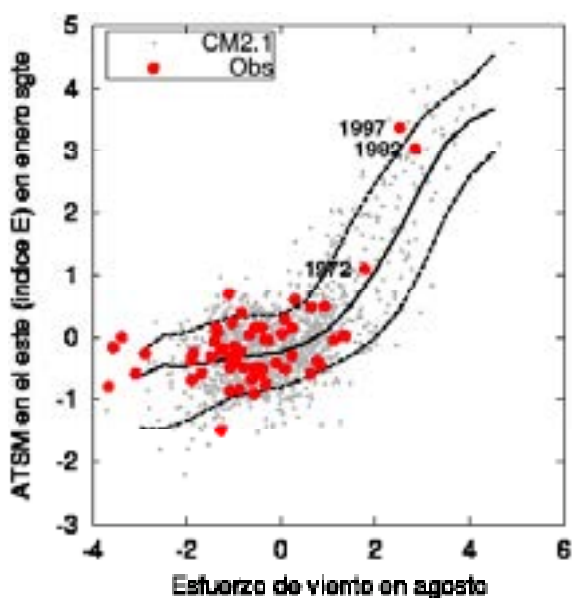


Figura 2: Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar en el extremo del Pacífico Este (región/índice E según la definición de Takahashi et al. [3]) en enero (Año 1) en función de las anomalías del esfuerzo del viento zonal en el Pacífico Ecuatorial Central en agosto (Año 0): simulación a largo plazo del modelo acoplado (CM2.1, puntos grises), observaciones (puntos rojos) [11]). Las observaciones indican sólo dos eventos fuertes de El Niño (1982 y 1997) y ambos presentaron anomalías de vientos del oeste fuertes en agosto.

ondas Kelvin intraestacionales, están conectadas con El Niño permitirá tener una mejor previsión del fenómeno. Este tópico ha sido estudiado ampliamente dentro del marco de colaboración entre el IGP (Instituto Geofísico del Perú) y el IRD. Los estudios han mostrado, en particular, que El Niño del Pacífico Central está fuertemente conectado a la actividad de las ondas Kelvin intraestacionales, tanto en el desarrollo del fenómeno como en el pico máximo de la Temperatura Superficial del Mar alcanzado durante dicho evento (ver Fig. 3).

Asimismo, las ondas Kelvin intraestacionales tienden a aumentar la persistencia de la Temperatura Superficial del Mar luego del pico máximo. La situación es muy diferente en el caso de un fenómeno El Niño del Pacífico Este: las anomalías de la Temperatura Superficial del Mar terminan abruptamente después del pico máximo (fase caliente del ciclo ENOS) para luego continuar con un evento La Niña (fase fría del ciclo ENOS) [13,14]. Este trabajo también subraya la necesidad de tener una mayor comprensión de los procesos de disipación de los fenómenos El Niño. En este sentido, es particularmente importante entender los procesos que modifican las características (amplitud, velocidad) de las ondas Kelvin, en particular los procesos asociados a la diferencia de estratificación vertical entre el Pacífico Oeste y Este, lo cual tiene implicancia para las teleconexiones oceánicas en la costa del Perú (ver Sección 3.1).

Teleconexiones

Si bien es importante descifrar los mecanismos de El Niño, lo cual en última instancia puede permitir mejorar los modelos y la predicción estacional, es también esencial entender cómo este fenómeno propaga sus efectos a lo largo de la costa peruana, considerando los impactos sociales así como los impactos sobre la agricultura y los recursos marinos. Este tema también es parte de los esfuerzos de investigación conjunta entre el IGP, el IMARPE, el SENAMHI y el IRD.

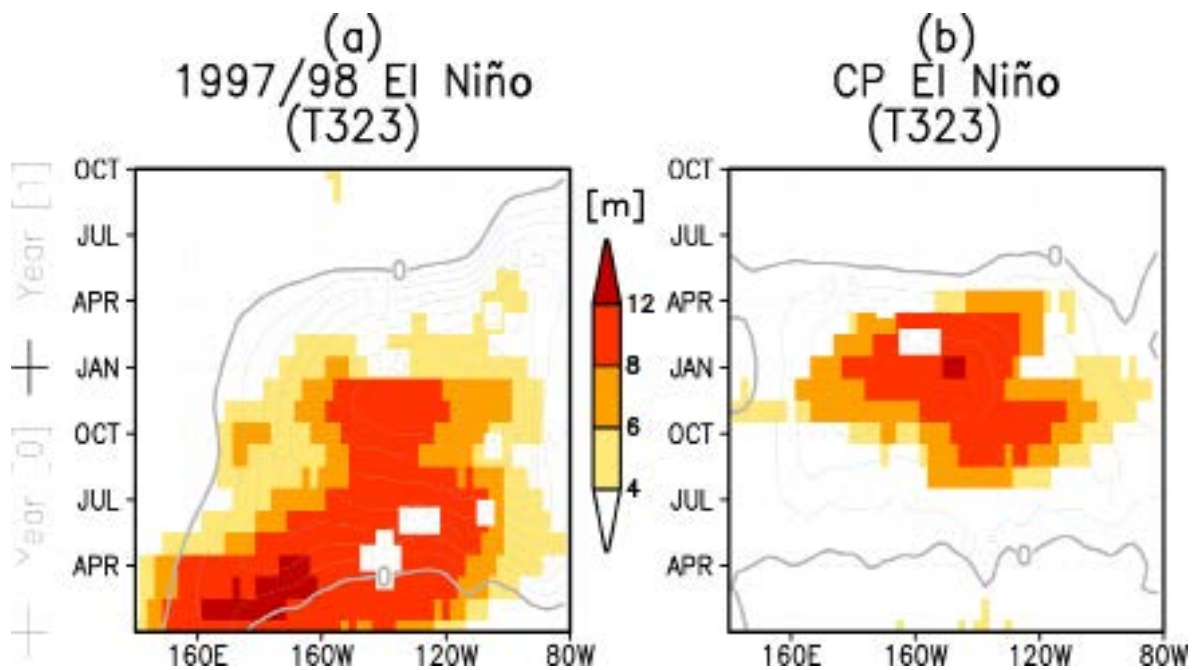


Figura 3: Diagrama longitud-tiempo de la actividad de la onda Kelvin intraestacionales (media cuadrática móvil de tres meses) obtenida del modelo oceánico T323: para El Niño del Pacífico Este 1997-1998 (panel del lado izquierdo (a)) y para el compuesto de El Niño del Pacífico Central (panel derecho (b)). Las unidades son en metros. El año [0] en el eje temporal de (a) se refiere a los años de la evolución de El Niño, en el cual se observa que el pico está alrededor de diciembre del año [0]. Las anomalías interanuales de la Temperatura Superficial del Mar correspondientes a los eventos El Niño del Pacífico Este 1997/1998 y El Niño del Pacífico Central son representadas en contornos grises. Los colores indican donde los valores son significantes por encima del 95%. Fuente: [14].

Teleconexiones oceánicas:

La costa del Perú se comporta como una extensión de la trayectoria de ondas ecuatoriales. Esto significa que la propagación de las perturbaciones del nivel del mar y de las corrientes, a lo largo de la línea ecuatorial, puede alcanzar la costa e influenciar la circulación oceánica así como la llamada Zona de Mínima de Oxígeno. Esta zona corresponde a un área del mar que tiene una muy baja concentración de oxígeno disuelto a escasa profundidad de la superficie. En esta zona, las corrientes ascendentes transportan

numerosos nutrientes, estimulando la producción primaria en la superficie por medio de la fotosíntesis (lo cual permite que haya un gran número de peces). La Zona de Mínima de Oxígeno es particularmente marcada en la región oceánica del Perú, haciendo que estas áreas sean productivas para la pesquería [15]. Durante un fuerte evento El Niño del Pacífico Este, las aguas cálidas de la región ecuatorial son transportadas dentro del sistema de afloramiento, el cual lleva a la superficie aguas subsuperficiales ricas en sales minerales (nitratos, fosfatos y silicatos) esenciales para el fitoplancton y para la productividad en base a la fotosíntesis. A la

9 Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú

par de interrumpir el sistema de afloramiento, las aguas cálidas que han sido transportadas también incrementan la Temperatura Superficial del Mar en unos cuantos grados ($\sim 3^{\circ}\text{C}$). Durante el evento El Niño del Pacífico Central, tal proceso no se lleva a cabo y la Temperatura Superficial del Mar es débilmente alterada frente al Perú. Esto ha sido estudiado a partir de las observaciones in situ realizadas por los cruceros del IMARPE, de observaciones satelitales y de modelos numéricos de alta resolución [16], proporcionando una descripción mixta de los dos tipos de El Niño a lo largo de la costa peruana (Fig. 4)

Dewitte et al. [16] mostraron que los dos tipos de El Niño son drásticamente diferentes en cuanto a su impacto sobre la Temperatura Superficial del Mar a lo largo de la costa del Perú, así como sobre la corriente vertical promedio a lo largo de la costa, cuyas características son claves para la dinámica del afloramiento.

En particular, la Corriente Subsuperficial de Perú-Chile, que fluye hacia el sur, trae aguas desoxigenadas desde la región ecuatorial que modifican las propiedades biogeoquímicas a lo largo de la costa. El trabajo de modelamiento numérico realizado en colaboración entre el IGP (Perú), GEOMAR (Alemania) y el LEGOS (Francia) ha permitido contar con la primera descripción de alta resolución de la Zona de Mínima de Oxígeno del Perú [17], así como proveer la primera estimación de los cambios en las propiedades biogeoquímicas a escala regional bajo las condiciones El Niño (Fig. 5). Los resultados sugieren que la Zona de Mínima de Oxígeno ubicada frente al mar peruano es altamente sensible a este fenómeno, tanto para el tipo El Niño del Pacífico Este como para El Niño del Pacífico Central. Sin embargo, las condiciones de hipoxia son favorecidas en el caso de los eventos de El Niño del Pacífico Central, una situación de alto riesgo para el ambiente marino.

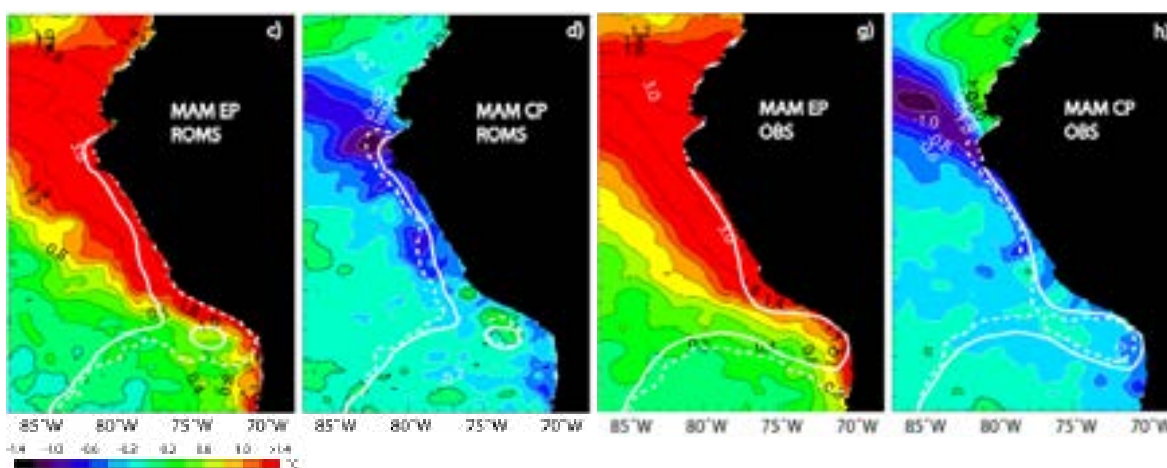


Figura 4: Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar para los eventos El Niño del Pacífico Este (EP, izquierda) y Pacífico Central (CP, derecha) durante la estación de Marzo-Abril-Mayo tras el pico de El Niño obtenidos de las observaciones satelitales (abajo) y de las simulaciones de modelos oceánicos de alta resolución (arriba) [16].

Ya que el El Niño del Pacífico Central está fuertemente ligado a las ondas de Kelvin ecuatoriales intraestacionales, es relevante investigar cómo dichas ondas impactan la circulación oceánica a lo largo de la costa del Perú. Esto ha sido un tema de intensa investigación dentro de la colaboración entre el IGP, el IMARPE y el LEGOS, lo cual llevó a estudios pioneros basados en observaciones satelitales [18], experimentación con un modelo oceánico regional [19] y la implementación de un sistema de pronóstico operacional de ondas de Kelvin Ecuatoriales tanto en el IGP [20] como en el IMARPE, este último basado en un modelo oceánico desarrollado en el LEGOS. Estos sistemas operacionales proveen datos al Comité Técnico del ENFEN (Estudio Nacional del

Fenómeno El Niño) para el diagnóstico y la previsión de las condiciones oceanográficas y atmosféricas frente a la costa del Perú. Es importante resaltar que estos resultados son divulgados mensualmente a la sociedad peruana por medio de un Comunicado Oficial y de un Informe Técnico

Teleconexiones Atmosféricas

Dado que El Niño modifica la estructura zonal de la región de la piscina de agua cálida (Warm Pool, ver línea naranja de la Fig. 1), tiene el potencial de modificar la amplia circulación atmosférica de gran escala a través de las celdas de circulación atmosférica de Walker y Hadley, principales caminos de la circulación atmosférica tridimensional en los trópicos. El clima de la región del Perú es especialmente sensible a los cambios inducidos por El Niño-Oscilación del Sur en la circulación atmosférica a gran escala. Durante un evento El Niño del Pacífico Este, el desplazamiento hacia el Este de la zona de convección asociado al calentamiento de la Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico Ecuatorial Oriental, transforma la costa del Perú - una región árida en general - en una "típica" zona tropical caracterizada por una intensa lluvia. Los eventos El Niño del Pacífico Este son conocidos por producir fuertes precipitaciones e inundaciones en la costa norte y central del Perú.

Por otro lado, los eventos El Niño del Pacífico Central no modifican significativamente la Temperatura Superficial del Mar en la costa y tienden a estar asociados a condiciones oceánicas más frías que favorecen el estado árido de la región y mejoran

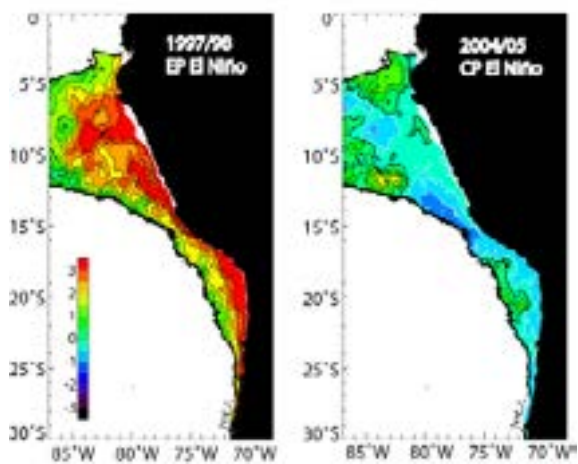


Figura 5: Anomalías de la concentración de oxígeno disuelto durante el evento El Niño del Pacífico Este 1997/98 y El Niño del Pacífico Central 2004/05 (meses de Diciembre-Enero-Febrero) a 100 m por debajo de la superficie, dentro de la Zona de Mínima de Oxígeno de acuerdo a la simulación de un modelo biogeoquímico de alta resolución (cf. [17] para la descripción y validación del modelo). La Zona de Mínima de Oxígeno es definida como la región donde la concentración de oxígeno disuelto es más baja que 1 mL/L.

la sensibilidad del afloramiento costero a los cambios del esfuerzo del viento local. Una mejor comprensión de la circulación atmosférica regional durante los dos tipos de El Niño y sus impactos en la hidrología debería entonces proporcionar información clave para desarrollar estrategias de adaptación del sector económico. Trabajos recientes se han enfocado en la evaluación de un modelo atmosférico regional [21,22] y en la realización de observaciones de campo, tanto en el mar (VOCALS-Rex (Olaya - Octubre 2008), AMOP (Atalante - Enero-Febrero de 2014)), como en tierra (Paracas EX I, II, 2010; 2011). El uso combinado de modelos y observaciones permitirá adquirir conocimientos de los impactos de los dos tipos de El Niño sobre el ciclo hidrológico a lo largo de la costa del Perú. El estudio observacional reciente de Lavado y Espinoza [23], utilizando los índices E y C de El Niño de Takahashi et al. [3], mostró que los diferentes tipos de El Niño tienen una influencia distinta sobre las precipitaciones en el Perú según dónde se ubican las anomalías de Temperatura Superficial del Mar. En efecto, los resultados indican que los eventos El Niño del Pacífico Este están asociados a más lluvia de lo normal en toda la región costera y los Andes nor-occidentales, mientras que los eventos El Niño del Pacífico Central se relacionan con menos lluvia de lo normal en la región andina y amazónica. En términos de precipitación, los impactos de los dos tipos de evento El Niño son opuestos en los Andes nor-occidentales, por lo que el resultado neto de un evento El Niño dependerá del patrón espacial del calentamiento del mar. Por otro lado, las fluctuaciones de las precipitaciones en escalas de tiempos de baja frecuencia (decadal) dependen de la frecuencia relativa de ocurrencia entre los dos tipos

de eventos El Niño. En particular, es conocido que desde mediados de los años 1990s la ocurrencia de eventos El Niño del Pacífico Central ha aumentado, lo que ha cambiado la relación entre el ENOS y las precipitaciones (relación inversa) a lo largo de la costa del Perú, en comparación con el período anterior [24].

Una mejor comprensión de la circulación atmosférica regional frente al Perú es también parte de la preocupación de la comunidad internacional debido a que se piensa que el afloramiento costero del Perú sería una fuente de gases de efecto invernadero a través de los procesos biogeoquímicos inducidos por las condiciones de anoxia en la Zona de Mínima de Oxígeno. Este tema será una cuestión a abordar mediante el uso de las observaciones y de un modelo acoplado océano-atmósfera regional dentro de una cooperación entre el LEGOS y el IGP [25,26,27]. El tercer taller, que fue organizado en el IGP en Noviembre 2012, dentro del proyecto internacional SOLAS (Surface Ocean Lower Atmosphere Study) Mid-Term Strategy Initiative sobre "Air-sea gas fluxes at Eastern Boundary upwelling and Oxygen Minimum Zone (OMZ) systems"; fue la oportunidad para establecer vínculos entre la comunidad científica de CLIVAR (Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change) y SOLAS con el fin de alcanzar un enfoque de modelado integrado y observacional para una evaluación regional adecuada del impacto del cambio climático en la región oceánica frente al Perú.

CONCLUSIONES

En la actualidad existe un consenso de que el ENOS tiene varias expresiones (al menos dos) sobre la Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico tropical, existiendo por lo tanto diferentes “tipos de El Niño”. Considerando que el registro de observaciones es demasiado corto (50 últimos años) para establecer si los dos tipos de El Niño corresponden a diferentes regímenes (o dinámicas), los resultados de los modelos son más concluyentes [28]. Este tema requiere una mayor investigación de los mecanismos de los dos tipos de El Niño, con el fin de proponer un paradigma que representa tal bimodalidad. Actualmente, las teorías sobre el ENOS no permiten esto [29]. En paralelo es también importante comprender mejor los distintos patrones de teleconexión asociados a los dos tipos de El Niño, lo cual servirá de base para la interpretación de la variabilidad de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos y de los ecosistemas marinos del Perú. Estas cuestiones necesitan ser abordadas tomando en cuenta la preocupación de la sociedad sobre el cambio climático. Hay indicios de que el ENOS se modificará bajo el efecto del calentamiento global actual [1,2]. La comprensión de los impactos de este cambio sobre la biósfera (el conjunto de seres vivos) del Perú requiere necesariamente un mejor conocimiento de los mecanismos fundamentales de ENOS. El trabajo en colaboración entre instituciones peruanas y el IRD ha permitido avanzar sobre estos temas de investigación, tanto estimulando programas de observación regional (e.j. VOCAL-Rex, boya AMOP, Takahashi et al. [24]) como llamando la atención de la comunidad internacional sobre temas científicos relevantes [28] o desarrollando una plataforma de modelamiento regional que integra los componentes fundamentales de la biosfera del Perú (océano-atmósfera-hidrología-biogeoquímica) y que podría servir como un sistema de predicción regional a diferentes escalas de tiempo.

REFERENCIAS

- 1 - Yeh S.-W., S.-J. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. P. Kirtman and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate, *Nature*, 461, 511-514.
- 2 - Cai W, S Borlace, M Lengaigne, P van Rensch, M Collins, G Vecchi, A Timmermann, A Santoso, M J McPhaden, L Wu, M H England, G Wang, E Guilyardi, and FF Jin (2014) Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, doi: 10.1038/nclimate2100.
- 3 - Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova and B. Dewitte, 2011: ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.
- 4 - McPhaden, M. J., et al., 1998: The Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA) observing system: A decade of progress, *J. Geophys. Res.*, 103 (C7), 14,169–14,240, doi:10.1029/97JC02906.
- 5 - McPhaden, M. J., 2004: Evolution of the 2002/03 El Niño, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85, 677-695.
- 6 - Larkin, N. K., and D. E. Harrison, 2005: Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16705, doi:10.1029/2005GL022860.
- 7 - Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection, *J. Geophys. Res.*, 112, C11007, doi: 10.1029/2006JC003798.
- 8 - Kug, J.-S., F.-F. Jin, and S.-I. An, 2009: Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño, *J. Clim.*, 22, 1499–1515.
- 9 - Lee T. and M. J. McPhaden, 2010: Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific, *Geophys Res Lett* 37:L14603. doi:10.1029/2010GL044007
- 10 - Capotondi A., A. Wittenberg, M. Newman, E. Di Lorenzo, J.-Y. Yu, P. Braconnot, J. Cole, B. Dewitte, B. Giese, E. Guilyardi, F.-F. Jin, K. Karnauskas, B. Kirtman, T. Lee, N. Schneider, Y. Xue and S.-W. Yeh, 2014: Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Met. Soc.*, in press.
- 11 - Takahashi K. and B. Dewitte, 2014: Strong and Moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, submitted.

12 - Dewitte B., S. Purca, S. Illig, L. Renault and B. Giese, 2008: Low frequency modulation of the intraseasonal equatorial Kelvin wave activity in the Pacific ocean from SODA: 1958-2001. *J. Climate*, 21, 6060-6069.

13 - Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, K. Takahashi and G. Garric, 2013: The 2002/03 El Niño: Equatorial wave sequence and their impact on Sea Surface Temperature. *J. Geophys. Res.-Oceans*, vol. 118, 346–357, doi:10.1029/2012JC008551.

14 - Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte and S. Illig, 2014: The Central Pacific El Niño Intraseasonal Kelvin wave, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, doi: 10.1002/2014JC010044.

15 - Paulmier, A. and D. Ruiz-Pino, 2009: Oxygen Minimum Zones (OMZs) in the Modern Ocean. *Progress In Oceanography*, doi:10.1016/j.pocean.2008.05.001.

16 - Dewitte B., J. Vazquez-Cuervo, K. Goubanova, S. Illig, K. Takahashi, G. Cambon, S. Purca, D. Correa, D. Gutierrez, A. Sifeddine and L. Ortlieb, 2012: Change in El Niño flavours over 1958-2008: Implications for the long-term trend of the upwelling off Peru. *Deep Sea Research II*, doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.011.

17 - Montes I., B. Dewitte, E. Gutknecht, A. Paulmier, I. Dadou, A. Oschlies and, V. Garçon, 2014: High-resolution modeling of the Eastern Tropical Pacific Oxygen Minimum Zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, doi:10.1002/2014JC009858.

18 - Dewitte B., S. Illig, L. Renault, K. Goubanova, K. Takahashi, D. Gushchina, K. Mosquera and S. Purca, 2011: Modes of covariability between sea surface temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of Peru from satellite observations (2000-2008). *J. Geophys. Research*, 116, C04028, doi:10.1029/2010JC006495.

19 - Illig S., B. Dewitte, K. Goubanova, G. Cambon, F. Monetti, C. Romero, S. Purca and R. Flores, 2014: Intraseasonal SST variability off Peru in 2000-2008: local versus remote forcings. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 119, doi:10.1002/2013JC009779.

20 - 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.

9 Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú

21 - Chamorro-Gómez A., Goubanova K, Tam J., y J. Ramos, 2012: Modelado de los procesos de intensificación del viento frente a la costa del Perú durante eventos El Niño usando WRF (Weather Research and Forecast). III Congreso de Ciencias del Mar del Perú, Lima, del 25 al 29 de junio 2012.

22 - Goubanova K., K. Takahashi, S. Illig and B. Segura, 2014: Evaluating the performance of a WRF physics ensemble in representing East Pacific Stratus Deck/Cold Tongue/ITCZ Complex. To be submitted to Climate Dynamics.

23 - Lavado W. and Espinoza J.C. 2014. Impact of El Niño and La Niña events on Rainfall in Peru. Revista Brasileira de Meteorologia, v.29, 171 – 182.

24 - Bourrel L., P. Rau, B. Dewitte, D. Labat, W. Lavado, A. Coutaud, A. Vera, A. Alvarado and J. Ordoñez, 2014: Low-frequency modulation and trend of the relationship between precipitation and ENSO along the Northern to Center Peruvian Pacific coast. Hydrological processes, DOI: 10.1002/hyp.10247.

25 - Takahashi K., B. Segura, J. Quijano, K. Goubanova and B. Dewitte, 2012a: Challenges in modeling ocean-atmosphere interactions in the Peru EBUS. SOLAS Mid Term Strategy Initiative “Air-sea gas fluxes at Eastern boundary upwelling and Oxygen Minimum Zone (OMZ) systems”, Workshop on Towards integrative regional coupling in the EBUS, 26-27th of November, 2012, Lima, Peru.

26 - Takahashi K., J. Macharé, E. Norabuena, A. Paulmier, B. Dewitte and M. Chlieh, 2012b: Rationale for a reference site off Peru (Hormigas Islands) as part of OCEAN SITES, 2012b: SOLAS Mid Term Strategy Initiative “Air-sea gas fluxes at Eastern boundary upwelling and Oxygen Minimum Zone (OMZ) systems”, Workshop on Towards integrative regional coupling in the EBUS, 26-27th of November, 2012, Lima, Peru.

27 - Goubanova K., 2013: Challenges in downscaling air-sea interactions along the West coast of South America, Invited Talk. WCRP VAMOS/CORDEX Workshop on Latin-America: Phase I - South America, Lima, Peru, 11-13 September 2013.

28 - Takahashi, K., R. Martínez, A. Montecinos, B. Dewitte, D. Gutiérrez and E. Rodríguez-Rubio, 2014: TPOS White Paper #8a - Regional applications of observations in the eastern Pacific: Western South America. In Proceedings of the Tropical Pacific Observing System 2020 Workshop, A Future Sustained Tropical Pacific Ocean Observing System for Research and Forecasting, WMO and Intergovernmental Oceanographic Commission, La Jolla, CA,

27–30 January 2014 (Available at: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-184_II.pdf)

9 Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú

29 - Dewitte B., K. Takahashi and K. Mosquera, 2014: Teorías simples del El Niño-Oscilación Sur: ¿Dónde nos encontramos? Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, Septiembre, xxx.