

INFORME SOBRE EL PRONÓSTICO DE EFECTOS DE ENOS SOBRE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS FRENTE A LA COSTA PERUANA EN BASE A FORZANTES DEL PACÍFICO ECUATORIAL Y SUDESTE

Febrero 2019

Carlos Quispe, Jorge Tam, Cinthia Arellano, Adolfo Chamorro, Dante Espinoza, Carlos Yván Romero y Jorge Ramos

LABORATORIO DE MODELADO OCEANOGRÁFICO, ECOSISTEMICO Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO (LMOECC)

1. Resumen

Durante el trimestre DEF 2018-19, el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) presentó una condición neutra y desplazado al sur de su posición habitual, el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) presentó una condición cálida, el Índice del Área de Afloramiento (IAA) presentó una condición baja y el Índice de Clorofila a Superficial (ICS) presentó una condición alta.

Según el modelo oceánico se identificó la propagación de dos ondas Kelvin ecuatoriales: una onda Kelvin cálida (modo 1) que llegaría a las costas de Sudamérica en marzo 2019, y dos ondas Kelvin cálidas (modo 2) que llegaría en marzo y abril 2019, respectivamente.

Se usaron 3 modelos de pronóstico de efectos térmicos de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) frente a la costa peruana y la variable pronosticada fue el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP): el modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial y el Anticiclón del Pacífico Sur pronosticó valores dentro de las condiciones cálidas entre marzo y junio 2019, por otro lado, el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia basado en forzantes del Pacífico Ecuatorial Tropical pronosticó valores dentro de las condiciones cálidas entre marzo y junio 2019 para el ITCP; finalmente el modelo probabilístico espacial muestra que para el trimestre MAM 2019 la condición más probable en la región norte-centro frente a la costa peruana será neutra (probabilidad: 63%) mientras que en la región sur serán neutras (probabilidad: 59%).

2. Indicadores oceanográficos y atmosféricos del Pacífico Sudeste.

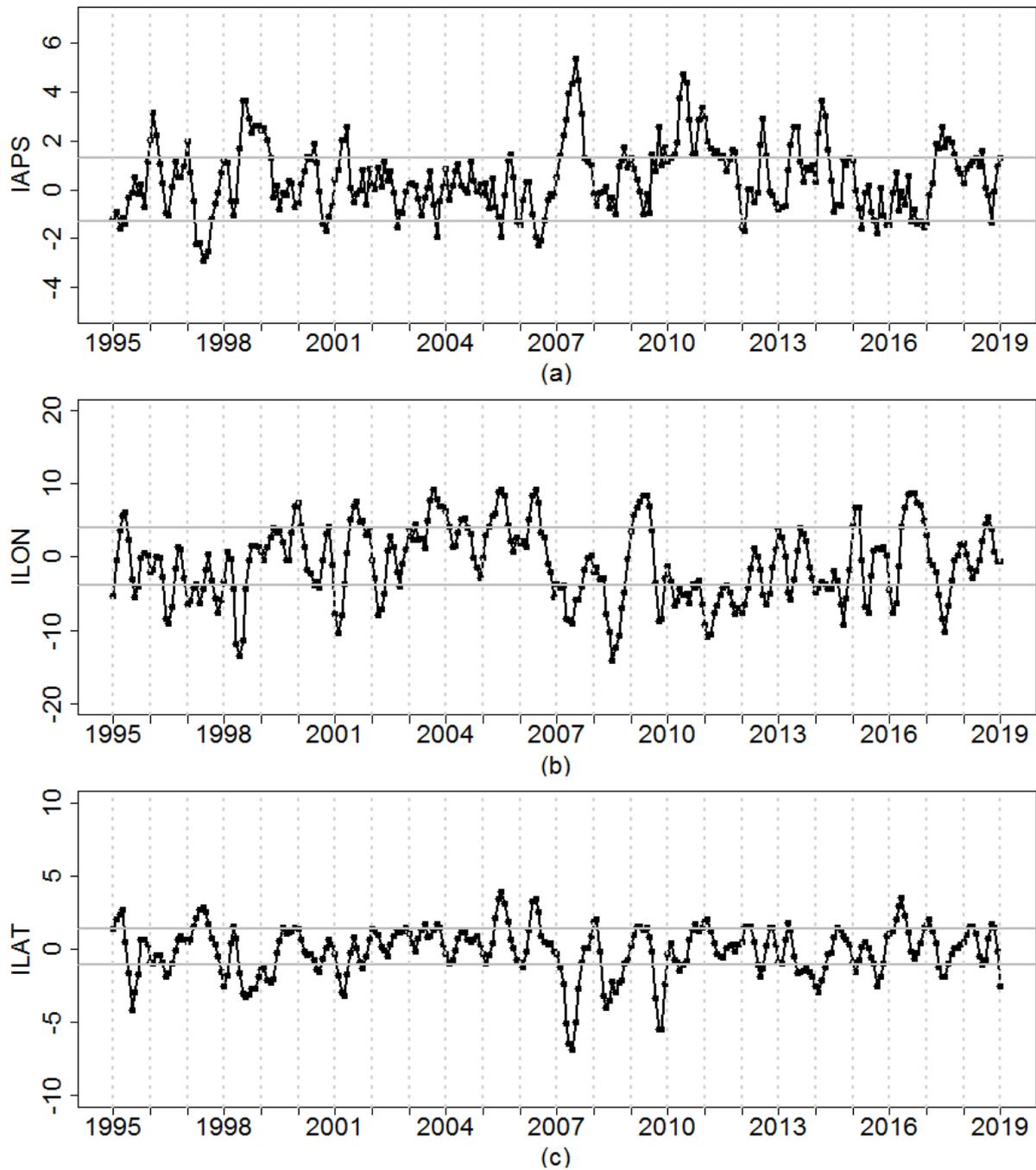
Índice del APS (IAPS)

Se usó el Índice del APS (IAPS) para caracterizar la intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur (APS), el cual se calculó mediante la media móvil trimestral de la anomalía de la presión atmosférica mensual máxima en el núcleo del APS con datos de la base de datos Reanálisis NCEP/NOAA (Kalnay et al. 1996). El IAPS fue clasificado en 3 condiciones: débil, neutro e intenso (Fig. 1a). Durante el trimestre DEF 2018-19 el IAPS (+1.32) presentó una condición neutra.

Índices de la posición del APS (ILON e ILAT)

Se usaron los índices de posición longitudinal (ILON) y latitudinal (ILAT) del APS para caracterizar la posición del núcleo del APS, los cuales se calcularon mediante la media móvil trimestral de las anomalías de la posición longitudinal y latitudinal de la presión atmosférica mensual máxima en el núcleo del APS con datos del Reanálisis NCEP/NOAA (Kalnay et al. 1996). Valores positivos (negativos) de los índices ILON e ILAT representan un desplazamiento al este y al norte (al oeste y al sur) del núcleo del APS, respectivamente.

Durante el trimestre DEF 2018-19 los índices ILON e ILAT presentaron valores de -0.62 y -2.55 respectivamente, indicando que el núcleo del APS estuvo desplazado al sur de su posición habitual (Fig. 1c y 1b).



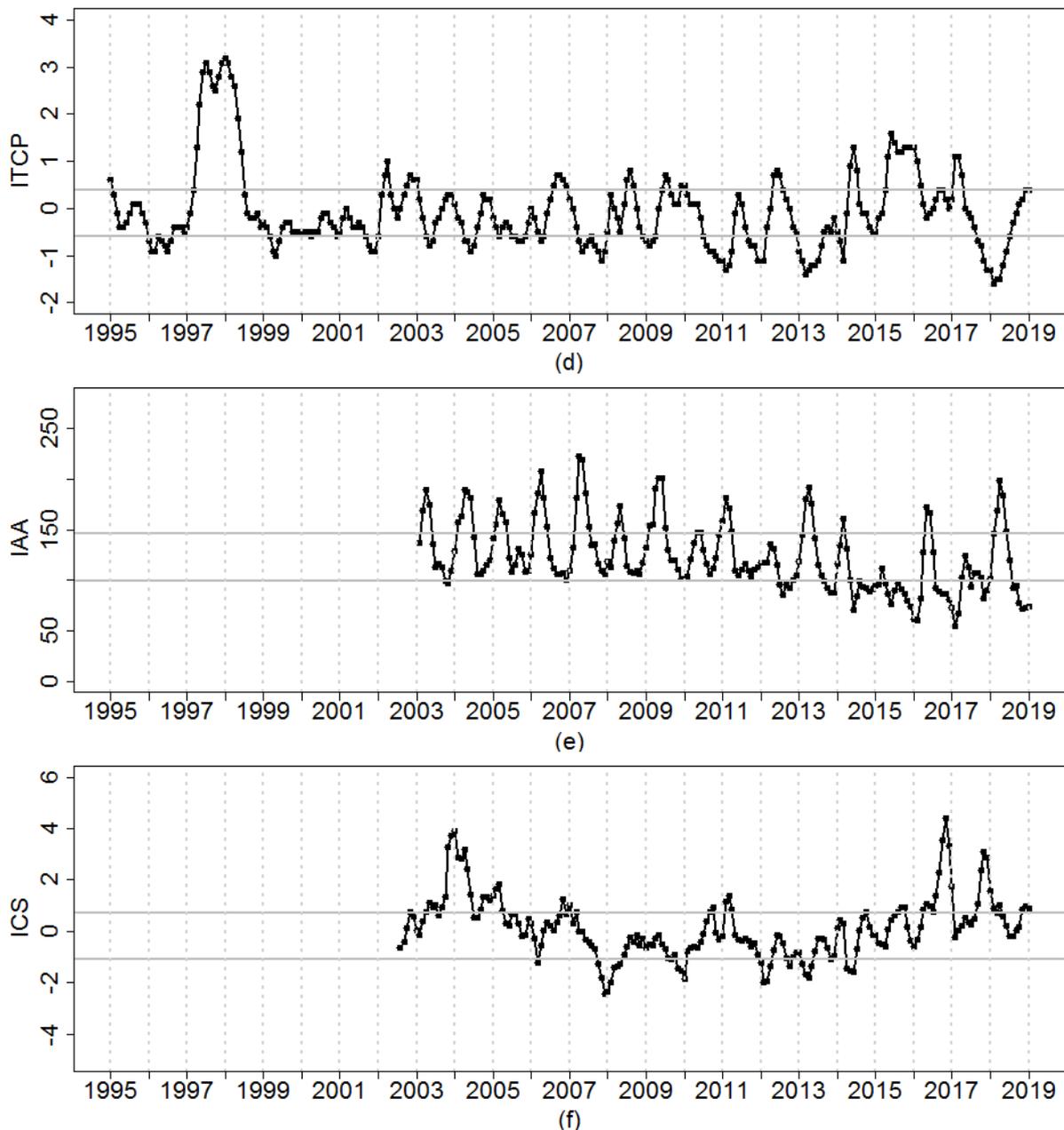


Figura 1. Variación interanual de: (a) Índice del APS (IAPS), (b) Índice de desplazamiento longitudinal del APS (ILON), (c) Índice de desplazamiento latitudinal del APS (ILAT), (d) Índice Térmico Costero Peruano (ITCP), (e) Índice del área de afloramiento (IAA) y (f) Índice de Clorofila a Superficial (ICS).

Índice Térmico Costero Peruano (ITCP)

Se usó el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) (Quispe-CCalluari, et al. 2018) para caracterizar la variabilidad interanual oceánica frente a la costa peruana, el cual se calculó mediante la media móvil trimestral de la primera componente principal de las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) de las aguas costeras a partir de la base de datos de Reynolds (2007), que explicó el 87.7 % de la varianza. El ITCP fue clasificado en 3 condiciones: frío, neutro y cálido (Fig.1d). Durante el trimestre DEF 2018-19, el valor del ITCP presentó un valor al borde de una condición cálida (+0.4).

Índice del área de afloramiento (IAA)

Se calculó el Índice del Área de Afloramiento (IAA) para caracterizar el área costera limitada por el frente térmico (en 10^3 km^2) entre los 05°S y 14°S en la franja de 300 km frente al litoral, y puede ser empleado como un indicador del avance o repliegue de las aguas del afloramiento costero. Este indicador ha sido desarrollado en base al frente térmico (Romero et al. 2014) construido a partir de datos de TSM satelital de nivel 4 (Multiscale UltraHigh Resolution MUR, JPL-NASA) a 1 km de resolución. El IAA fue clasificado en 3 condiciones: baja, media y alta. Durante el trimestre DEF 2018-19, el IAA presentó un valor asociado a la condición baja (74.2 km^2) (Fig. 1e).

Índice de Clorofila a Superficial (ICS)

Para el análisis de la clorofila-a superficial se utilizó información proveniente del satélite SeaWiFS (1997-2010) y del satélite MODIS corregido siguiendo la metodología de Demarcq y Benazzouz (2015) con una resolución espacial de 4 km dentro de los 100 km a la costa y los 4°S - 16°S . Se construyó una climatología tomando en cuenta información del 1998 al 2015 y se obtuvieron las anomalías promedio de la clorofila-a superficial ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). El ICS se calculó como la media móvil trimestral de las anomalías promedio de la concentración de clorofila-a superficial ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) mensualmente (Espinoza et al. en prep.). El ICS fue clasificado en 3 condiciones: baja, media y alta. Durante el trimestre DEF 2018-19, el ICS presentó una condición alta (+0.87) (Fig. 1f).

3. Pronóstico de ondas Kelvin ecuatoriales

Con el fin de detectar la propagación de las Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) hacia el Pacífico Oriental Ecuatorial, se simularon las ondas Kelvin en el Pacífico Tropical, siguiendo la metodología de Illig et al. (2004) y Dewitte et al. (2002), usando como forzante vientos NCEP actualizados hasta el 28 de febrero 2019 (Kalnay et al. 1996). El pronóstico de las OKE hasta el 30 de abril 2019 se realizó sin el forzante de vientos, y para el cálculo de las anomalías se usó el periodo 2000-2008. La correlación entre los valores de nivel del mar observado y pronosticado en el Pacífico Sudeste fue significativa ($r = 0.69$, $p < 0.05$) para el periodo 1993-2008 (Quispe et al. 2014). Se graficó la contribución de los modos baroclínicos 1 (flechas continuas) y 2 (flechas discontinuas) de las OKE a las anomalías del nivel del mar (cm) en el Pacífico Ecuatorial (Fig. 3) y la contribución conjunta de los modos baroclínicos 1+2 de las OKE (Fig. 2). Los valores positivos corresponden a OKE de hundimiento “cálidas” (flechas negras), y los valores negativos corresponden a OKE de afloramiento “frías” (flechas blancas). Con el fin de mostrar al paso de Ondas Atrapadas a la Costa (OAC) (flechas verdes) frente a la costa peruana asociadas a la llegada de la OKE, se empleó las anomalías del nivel del mar satelital, filtradas frente a la costa peruana, obtenidas de la base de datos de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS).

Según la simulación en el Pacífico Ecuatorial: en diciembre 2018 un pulso de vientos del oeste generó una onda Kelvin cálida (modo 2) en el Pacífico Ecuatorial Occidental que llegaría frente a las costas de Sudamérica en marzo 2019. Por otro lado, en febrero 2019 un pulso de viento del oeste generó una onda Kelvin cálida (modo 1) en el Pacífico Ecuatorial Occidental que llegaría frente a las costas de Sudamérica en marzo 2019. Asimismo, este mismo pulso de viento del oeste generó otra onda Kelvin cálida (modo 2) que llegaría en abril 2019.

Según el análisis frente a las costas del Perú: se observó que la llegada de una OKE fría en enero 2019 y se propagó a lo largo del litoral como una OAC fría en febrero 2019 (Fig. 2).

Figura 2. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo (izq.) de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas (contribución conjunta de los modos baroclínicos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en el Pacífico Ecuatorial (0°N). La línea discontinua horizontal indica el inicio del pronóstico. Diagrama Hovmöller (der.) de Ondas Atrapadas a la Costa observadas (Perú) en cm (Fuente: CMEMS). La longitud y latitud de ambos diagramas no están a la misma escala.

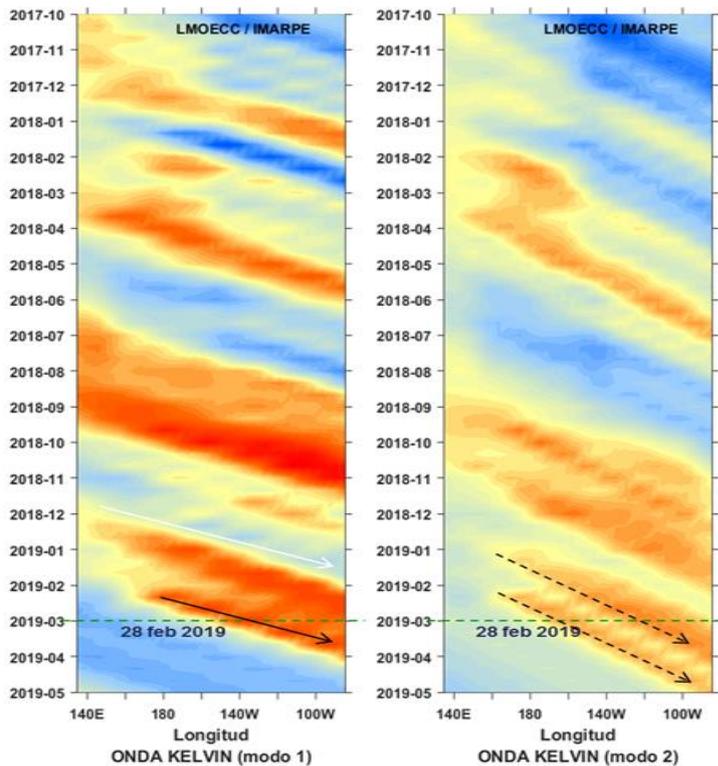
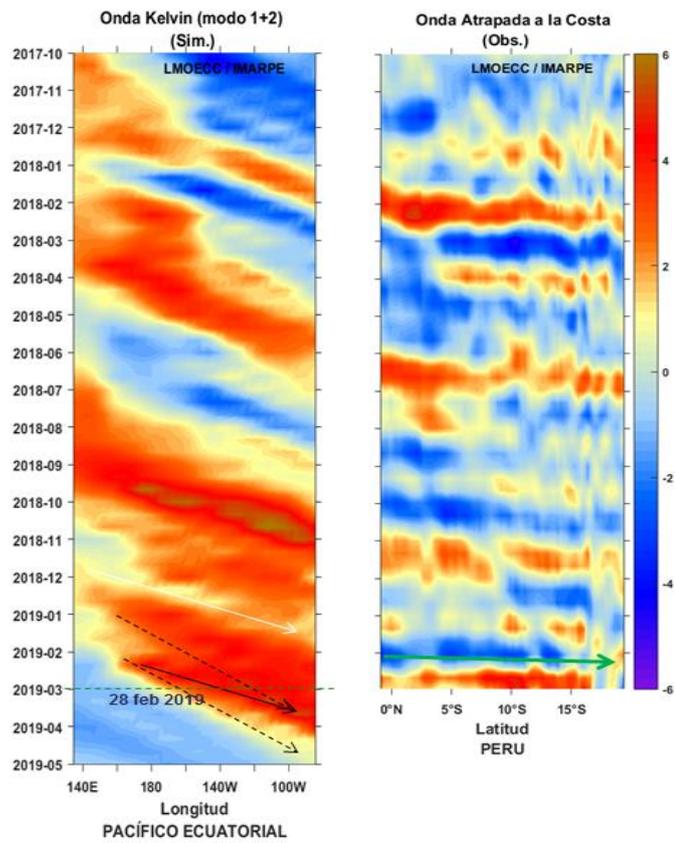


Figura 3. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas: modo baroclínico 1 (líneas continuas) y modo baroclínico 2 (líneas punteadas), en el Pacífico Ecuatorial (0°N). La línea discontinua horizontal indica el inicio del pronóstico.

4. Pronóstico de efectos térmicos de ENOS sobre la costa peruana.

Con el fin de pronosticar los efectos del ENOS sobre la temperatura superficial del mar (TSM) frente a la costa peruana, representada por el índice ITCP, se utilizaron 2 modelos de simulación, basados en diferentes métodos matemáticos y estadísticos. En la Tab. 1 se comparan las características de cada modelo.

Tabla 1. Características de los modelos de pronóstico de efectos de ENOS frente a la costa peruana.

Modelo	EMPIRICO	OCEANO-ATMOSFERA	PROBABILISTICO ESPACIAL
Variable pronosticada	ITCP	ITCP	ITCP
Variabes Predictoras	VAC e IAPS	Vientos NCEP	ONI
Método	Modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial	Modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia	Modelo basado en tablas de contingencia
Relación funcional	Lineal	Lineal	Lineal
Horizonte de pronóstico	4 meses	4 meses	3 meses
Ventajas	Depende principalmente del comportamiento del volumen de agua cálida ecuatorial y de la intensidad del APS.	Depende de la interacción océano-atmósfera en el Pacífico Tropical.	Estima probabilidades espaciales
Desventajas	Alta variabilidad de las previsiones. Desfase funcional fijo.	Sensible a vientos del oeste.	Depende de la dinámica ecuatorial

Pronóstico del ITCP usando un modelo empírico

Se usó un modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial (VAC) (Matellini et al. 2007) con datos de las boyas TAO (TAO 2018) y en el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) (Chamorro et al., en prep.) para realizar el pronóstico del ITCP para un horizonte de 4 meses.

La correlación entre los valores del ITCP simulados y observados fue significativa ($r = 0.6$, $p < 0.05$) para el período 1982-2011, y la mediana absoluta de los errores entre los datos simulados y observados fue de 0.41 (6.59% del rango de valores ITCP).

Los pronósticos del ITCP con el modelo empírico indican condiciones cálidas entre marzo y junio 2019 (Tab. 2, Fig. 4). En este horizonte, el valor del ITCP simulado sería máximo en marzo 2019 (Tab. 2).

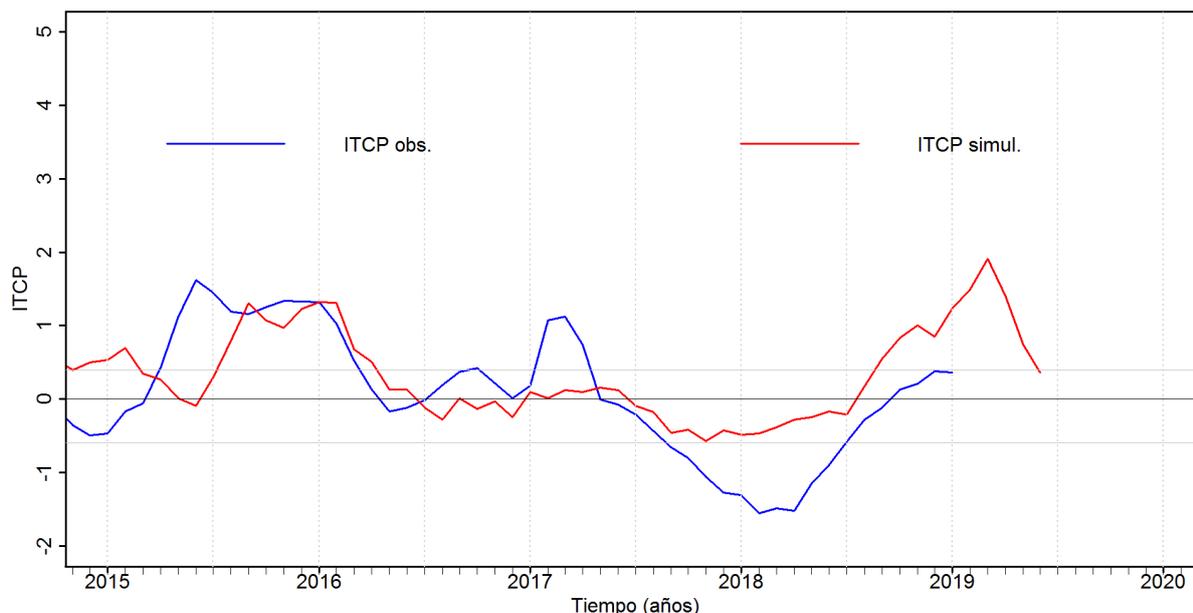


Figura 4. Pronóstico del ITCP mediante un modelo empírico, con datos actualizados hasta el mes de febrero del 2019.

Tabla 2. Condición mensual de los pronósticos del ITCP mediante un modelo empírico.

Mes / Año	ITCP simulada	Condición mensual
mar-19	+1.9	Cálida
abr-19	+1.4	Cálida
may-19	+0.8	Cálida
jun-19	+0.4	Cálida

Pronóstico del ITCP usando un modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia.

Se usó un modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia del Pacífico Tropical (Dewitte et al. 2002, Gushchina et al. 2000), usando un modelo atmosférico estadístico y una relación empírica entre la AN3.4 simulada y el ITCP, para realizar el pronóstico del ITCP para un horizonte de 4 meses.

Los pronósticos del ITCP indican condiciones cálidas entre marzo y junio 2019 (Tab. 3, Fig. 5). En este horizonte, el valor del ITCP simulado sería máximo en junio 2019 (Tab. 3). Cabe señalar que los pronósticos están basados en la variación temporal de las condiciones del Pacífico Ecuatorial.

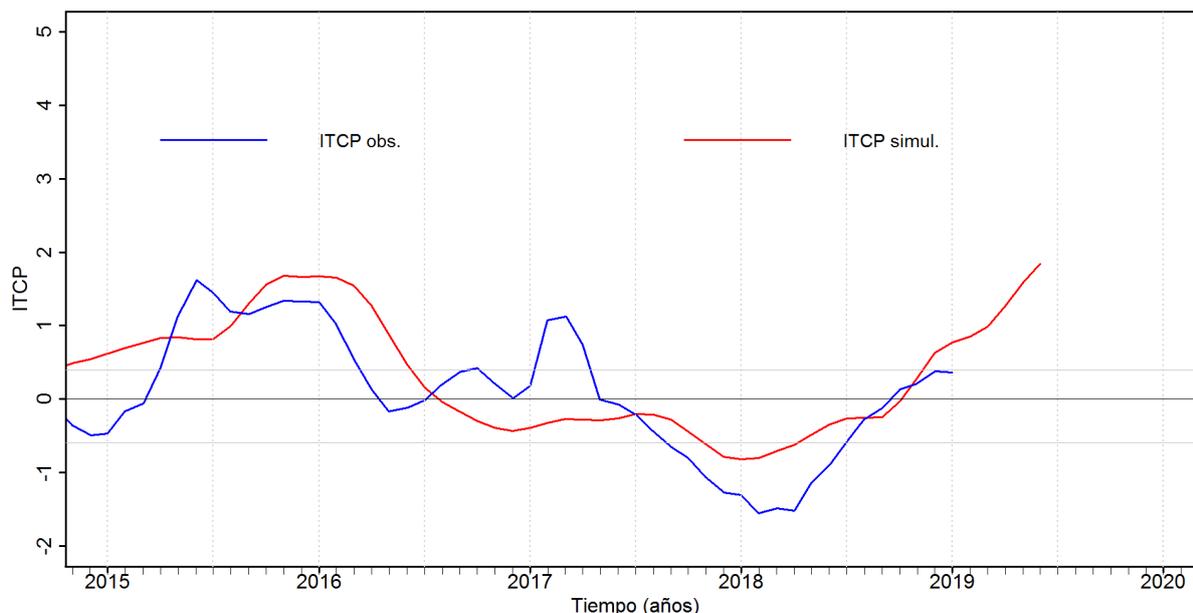


Figura 5. Pronóstico del ITCP mediante el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia con datos actualizados hasta el mes de febrero del 2019.

Tabla 3. Condición mensual de los pronósticos del ITCP mediante el modelo océano-atmósfera acoplado.

Mes / Año	ITCP simulada	Condición mensual
mar-19	+1.0	Cálida
abr-19	+1.3	Cálida
may-19	+1.6	Cálida
jun-19	+1.9	Cálida

Pronóstico probabilístico espacial basado en tablas de contingencia (TC).

Se realizó un pronóstico probabilístico espacial de las condiciones térmicas (fría, neutra, cálida) en el área de afloramiento peruano (hasta las 45 mn aproximadamente), usando un modelo basado en tablas de contingencia (Alfaro et al. 2003), usando como variable independiente el índice Niño 3.4 (NOAA 2018) y como dependiente las anomalías de temperatura superficial del mar en el área de afloramiento peruano (Reynolds et al. 2007). Las probabilidades de las condiciones mensuales se definieron usando quintiles de las anomalías de las temperaturas superficiales del mar.

El modelo probabilístico basado en tablas de contingencia (TC) actualizado hasta el mes de febrero 2019, indicó que las condiciones más probables en la región norte-centro frente a la costa peruana serán neutras (con una probabilidad de 63%, en promedio) mientras que en la región sur de la costa peruana serán neutras (con una probabilidad del 59% en promedio) para el trimestre MAM 2019 (Fig. 6).

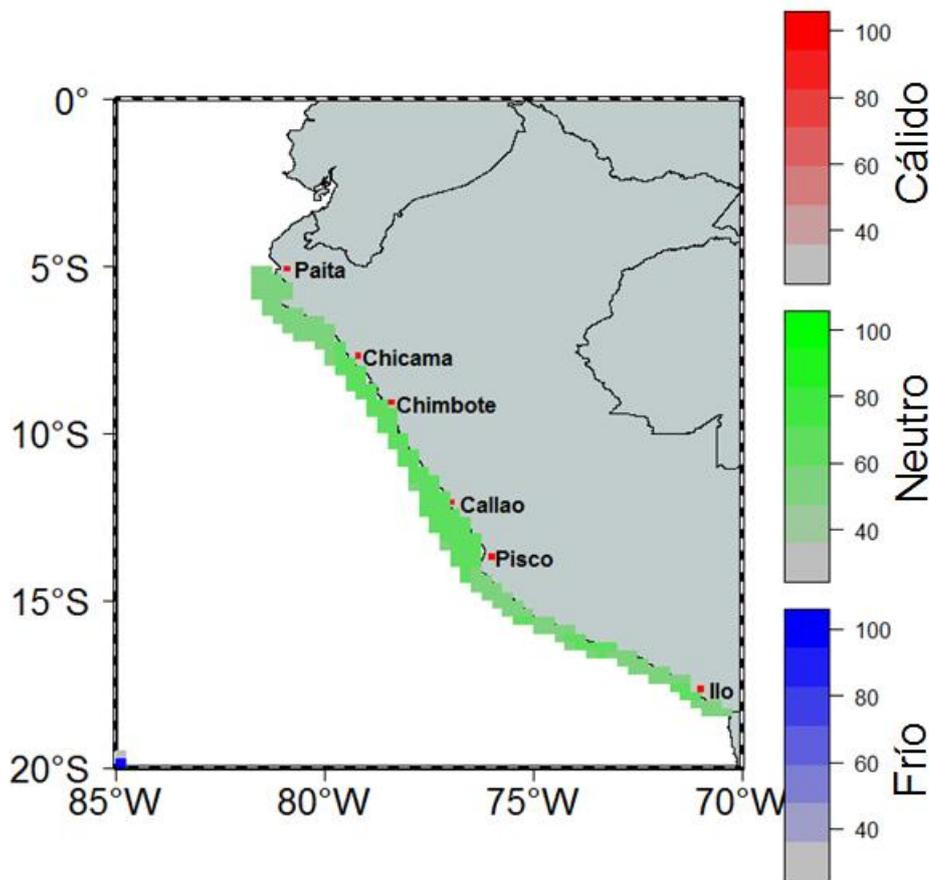


Figura 6. Pronóstico probabilístico espacial para el trimestre MAM 2019 usando un modelo basado en tablas de contingencia.

5. Conclusiones

Respecto a los indicadores oceanográficos y atmosféricos del Pacífico Sudeste, se observó que durante el trimestre DEF 2018-19, el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) presentó una condición neutra y un desplazamiento al sur de su posición habitual, el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) presentó una condición cálida, el índice del Área de Afloramiento (IAA) presentó una condición baja y el Índice de Clorofila a Superficial (ICS) presentó una condición alta.

La simulación de la propagación de las Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) pronostica la llegada de dos ondas Kelvin: una onda Kelvin cálida (modo 1) en marzo 2019 y las otras dos ondas Kelvin cálida (modo 2) que llegaría en marzo y abril 2019, respectivamente. El análisis de Ondas Atrapadas a la Costa (OAC) identificó el paso de una OAC fría en febrero 2019, producto del arribo de una OKE fría en enero 2019.

Los pronósticos del Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) usando tres modelos: el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia, basado en forzantes del Pacífico Ecuatorial pronostican condiciones cálidas entre marzo y junio 2019; el modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial y el anticiclón del Pacífico Sur, pronostican condiciones cálidas entre marzo y junio 2019; el modelo probabilístico espacial basado en

tablas de contingencia (TC) pronostica que las condiciones más probables en la región norte-centro frente a la costa peruana serán neutras (con una probabilidad de 63%, en promedio) mientras que en la región sur de la costa peruana serán neutras (con una probabilidad del 59% en promedio) para el trimestre MAM 2019.

Cabe señalar que el Índice Oceánico de El Niño (ONI) presentó un valor de +0.8 °C en el trimestre DEF 2018-19, lo cual según criterio de la NOAA indica una “condición El Niño” en el Océano Pacífico Tropical, ya que el ONI ha tenido al menos 4 trimestres consecutivos por encima del umbral (+0.5).

El presente informe se elabora con fines de investigación, por lo que es de carácter referencial, sin garantías sobre su uso posterior. El Comunicado Oficial de la Comisión multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) puede encontrarse en el siguiente enlace:

<http://enfen.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-04-2019/?wpdmdl=1435&refresh=5c87f329b60b71552413481>

6. Referencias bibliográficas

- Demarcq, H. and A. Benazzouz (2015), Trends in phytoplankton and primary productivity off Northwest Africa. In: Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. Valdés, L. and Déniz-González, I. (eds). IOC-UNESCO, Paris. IOC Technical Series, No. 115, pp. 331-341.
- Dewitte B., D. Gushchina, Y. duPenhoat and S. Lakeev, 2002: On the importance of subsurface variability for ENSO simulation and prediction with intermediate coupled models of the Tropical Pacific: A case study for the 1997-1998 El Niño. *Geoph. Res. Lett.*, vol. 29, no. 14, 1666, 10.1029/2001GL014452.
- Gushchina D. Yu, B. Dewitte and M. A. Petrossiants, 2000: A coupled ocean-atmosphere model of tropical Pacific: The forecast of the 1997-1998 El Niño Southern Oscillation. *Izvestiya atmospheric and oceanic physics*. 36(5): 533-554.
- Illig, S., B. Dewitte, N. Ayoub, Y. du Penhoat, G. Reverdin, P. De Mey, F. Bonjean and G.S.E. Lagerloef. 2004. Interannual long equatorial waves in the Tropical Atlantic from a high resolution OGCM experiment in 1981–2000, *J. Geophys. Res.* 109 (C2): C02022.
- Kalnay et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- NOAA. 2003. NOAA gets U.S. consensus for El Niño/La Niña index, definitions. On-line: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories/s2095.htm>.
- NOAA. 2004. NOAA's new global climate forecast system increases confidence that weak El Niño conditions are developing. On-line: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories2004/s2302.htm>.
- Quispe C, Tam J, Chamorro A. 2014. Modelado y Pronóstico de ondas Kelvin ecuatoriales. p.97. *En: UPCH (Ed.). Libro de resúmenes del IV Congreso de Ciencias del Mar (IV CONCIMAR)*. 366 p
- Quispe-Ccalluari, C., J. Tam, H. Demarcq, A. Chamorro, D. Espinoza-Morriberón, C. Romero, N. Dominguez, J. Ramos y R. Oliveros-Ramos. 2018: An index of coastal thermal effects of El Niño Southern Oscillation on the Peruvian Upwelling Ecosystem. *Int. J. Climatol.*:1-11. <https://doi.org/10.1002/joc.5493>.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20, 5473-5496.
- Romero C, Chamorro A, Espinoza-Morriberon D, Tam J. 2014. Variación estacional e interanual de Indicadores de afloramiento frente a la costa central del Perú. p.191. *En: UPCH (Ed.). Libro de resúmenes del IV Congreso de Ciencias del Mar (IV CONCIMAR)*. 366 p.
- TAO (Tropical Atmosphere Ocean Project). 2018. Data Display. NOAA. Pacific Marine Environmental Laboratory. En línea: www.pmel.noaa.gov/tao/jsdisplay.