



Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

PP 068 "Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencia por Desastres"

Producto: "Estudios para la estimación de los riesgos de desastres"

Actividad: "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño"

Instituto Geofísico del Perú

INFORME TÉCNICO N° PpR/El Niño-IGP/2023-05

16/06/2023

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

Resumen

Para abril, según el valor de Índice Costero El Niño (ICEN), se presentó la condición climática cálida fuerte (2.19 °C). Los valores del ICEN temporal (ICEN-tmp) de mayo (2.51 °C) y junio (2.43 °C) coinciden en indicar condiciones cálidas fuertes. Por otro lado, en el Pacífico central, el valor del Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de abril (0.14 °C) indica la condición neutra. Los valores temporales (ONI-tmp) de mayo (0.48 °C) y junio (0.91 °C) indican condiciones neutras y cálidas débiles, respectivamente. Según las observaciones, *in situ* y satelital, se siguen observando ondas de Kelvin cálidas. A la fecha, ya habría iniciado su arribo un nuevo paquete de ondas de Kelvin cálidas hacia la costa peruana. Asimismo, se observa la presencia de otro paquete de ondas de Kelvin cálidas que arribaría entre julio y agosto.

El promedio de las predicciones de los seis modelos climáticos de NMME —inicializados con la información de junio de 2023— para el Pacífico oriental indica condiciones de cálidas fuertes a cálidas débiles hasta abril de 2024. Por otro lado, para el Pacífico central, se esperarían condiciones cálidas desde débiles a moderadas entre junio a agosto, condiciones cálidas fuertes a condiciones cálidas moderadas para los meses de setiembre a abril.

Los resultados del modelo de Inteligencia Artificial del IGP pronostican un evento El Niño extremo (índice E superior a 1.5) para los siguientes meses, aunque no de la magnitud de El Niño 1997-1998. Esto estaría influenciado por el actual patrón espacial de la anomalía de la TSM frente a la costa peruana, así como del nivel del mar en el extremo occidental.

A pesar de los resultados de los modelos, en base a la información observada y actual, aún no es clara la presencia de un acoplamiento entre el océano y la atmósfera que pueda mantener el calentamiento hasta el verano de 2024.





Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Introducción

Empezando el año 2016, en el marco del programa presupuestal 068 "Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencia por Desastres", algunas instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN), bajo la coordinación del Instituto del Mar del Perú (IMARPE), participan en el producto "Estudios para la estimación de los riesgos de desastres", en el cual el IGP contribuye con la actividad denominada "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño". El presente informe técnico se genera en el marco de esta actividad, el cual se entrega al IMARPE, como coordinador de la actividad y encargado de la presidencia de la comisión multisectorial, para contribuir a la evaluación periódica que dicha comisión realiza. El informe técnico, generado posteriormente por la comisión multisectorial, será el documento oficial sobre el monitoreo y pronóstico del fenómeno El Niño/La Niña en el Perú.

Índice Costero El Niño

Utilizando la versión 5 de la información reconstruida y extendida de la temperatura superficial del mar (TSM), denominada ERSSTv5, se calculó el valor del ICEN (región Niño 1+2) para abril de 2023, el cual indica la condición cálida fuerte (Tabla 1). Para el cálculo del ICEN se utilizan los datos que son denominados como "datos en tiempo real", los que son actualizados en el transcurso de los siguientes meses. Por este motivo, existirán pequeñas discrepancias en el valor del ICEN para los meses anteriores cuando se use la data actualizada.

Hay que tener en cuenta que para indicar, de manera operacional, la presencia de El Niño (La Niña) costero (costera), las condiciones deben ser cálidas (frías) por al menos 3 meses consecutivos (ENFEN, 2012). Por lo tanto, basado en este protocolo operacional, se establece la presencia de un evento El Niño Costero, que hasta el momento, por definición, tendría una magnitud débil.

Tabla 1. Valores recientes del ICEN y sus respectivas categoría (columnas 3 y 4).

Año	Mes	ICEN	Categoría
2023	Enero	-0.27	Neutro
2023	Febrero	0.42	Cálida Débil
2023	Marzo	1.51	Cálida Moderada
2023	Abril	2.19	Cálida Fuerte

Para los siguientes dos meses se generan valores preliminares y temporales del ICEN (ICENtmp), que se calculan usando el promedio de los pronósticos de la anomalía de la TSM de NMME de un mes y dos meses para el primer y segundo ICENtmp, respectivamente. Los valores del ICENtmp de mayo y junio de 2023, coinciden en indicar condiciones cálidas fuertes (Tabla 2). De darse estas condiciones, El Niño costero de 2023 estaría alcanzando la magnitud Fuerte; sin embargo, hay que esperar los valores precisos del ICEN en los siguientes meses.





"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Tabla 2. ICEN temporales (ICENtmp) y sus categorías para mayo y junio 2023.

Año	Mes	ICENtmp	Categoría
2023	Mayo	2.51	Cálida Fuerte
2023	Junio	2.43	Cálida Fuerte

Índice Oceánico Niño (ONI)

Para el Pacífico central (región Niño 3.4), el valor del ONI (*Ocean Niño Index* en inglés) de abril de 2023, actualizado por la NOAA, es 0.14 °C, el que corresponde a una condición neutra¹.

Tabla 3. Valores recientes del ONI. Descarga: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii.txt> (se usan los últimos datos en tiempo real, por lo que puede haber discrepancias para los meses anteriores).

Índice Oceánico Niño			
Año	Mes	ONI (°C)	Categoría
2023	Enero	-0.71	Fría Débil
2023	Febrero	-0.45	Neutro
2023	Marzo	-0.16	Neutro
2023	Abril	0.14	Neutro

Los valores estimados del ONI (ONItmp) de mayo y junio de 2023, usando datos observados y de los pronósticos de NMME, indican condiciones neutras y cálida débil, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Estimados preliminares del ONI (ONItmp)

Índice Oceánico Niño temporales			
Año	Mes	ONItmp (°C)	Categoría
2023	Mayo	0.48	Neutra
2023	Junio	0.91	Cálida débil

Diagnóstico del Pacífico ecuatorial

En mayo, el valor del promedio de la anomalía de la TSM que se registró en la región Niño 3.4 estuvo en el rango neutral; sin embargo, para finales de mes alcanzó el rango de cálida débil. Por otro lado, en la región Niño 1+2, el valor promedio de la anomalía de la TSM estuvo dentro de la condición cálida fuerte, tal como se puede apreciar en la Figura 1. Según la información de los datos obtenidos de las boyas de TAO, los vientos alisios a lo largo de la franja ecuatorial estuvieron anómalamente débiles entre 160°W y 115°W (Figura 2a). Con respecto a la anomalía de la TSM, esta mostró una tendencia

¹ Los 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).





Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

hacia valores positivos en toda la franja ecuatorial (Figura 2b) y con relación a la profundidad de la termoclina, esta tiene valores positivos en toda la región ecuatorial pero con un núcleo al oeste de 140°W (Figura 2c). Según la información de los datos de vientos observados (ASCAT- METOP B), se observó, principalmente en la tercera semana del mes, el desarrollo de un pulso de viento intenso del oeste (120°E - 155°E); asimismo, se observaron pulsos del este de baja intensidad entre 120°W y 95°W . Finalmente, a inicios de junio se desarrolló un débil pulso de viento del oeste alrededor de 135°W (Figura 3).

Según la información diaria de los datos de TAO, la inclinación de la termoclina se muestra alrededor de su rango promedio (Figura 5a). Por otro lado, se aprecia que el contenido de calor se mantiene positivo (Figura 5b). En la región oriental (boya TAO en 110°W), el valor de la anomalía promedio de la profundidad de la termoclina fue superior a su climatología, para finales de mes se observa una tendencia negativa (Figura 6).

Los valores de OLR (Outgoing Longwave Radiation) en marzo, tanto en la zona occidental (170°E - 140°W , 5°S - 5°N) como la oriental (170°W - 100°W , 5°S - 5°N), fueron superiores a su climatología. Esto se puede apreciar en la Figura 7 (zona occidental) y la Figura 8 (zona oriental).

Conforme a la información de altimetría satelital y de los resultados de los modelos numéricos de ondas, se observa la presencia de ondas de Kelvin cálidas. Actualmente, ya habría iniciado su arribo un nuevo paquete de ondas de Kelvin cálidas a la costa peruana. Asimismo, se sigue observando la presencia de otro paquete de ondas de Kelvin cálidas alrededor de 150°W . Si bien los datos no son claros en mostrar ondas de Kelvin frías, los modelos sí lo hacen, pero serían ondas poco intensas para ser observadas en el escenario actual que tiene anomalías positivas (Figura 4, 12 y 13).

Ondas de Kelvin a lo largo de la costa peruana

Frente a la costa peruana y dentro de las 200 millas náuticas, el promedio de los últimos 30 días indica que los vientos alisios frente a la costa peruana estuvieron con valores superiores a su climatología al norte de los 16°S . Los valores de la TSM, según OSTIA, se mantuvieron, en promedio, por encima de sus normales. Según el producto DUACS, el nivel del mar promedio mantiene valores por encima de lo normal en toda la costa, más intenso al norte de 15°S (ver Figura 10). La información de los flotadores ARGO, los cuales se ubican principalmente más allá de las 50 millas náuticas indican anomalías positivas por encima de los 75 metros de profundidad en promedio. Sin embargo, se observan anomalías negativas entre 400 y 780 metros de profundidad entre 6°S y 4°S .

Sin el promedio de los últimos 365 días de la información diaria del nivel del mar del producto DUACS (Figura 9b) y la data cada cinco días de los flotadores ARGO que se encuentran en el mar peruano (ver anomalía de la temperatura del mar obtenida del flotador No. 6903002 en Figura 11), se continúa observando el impacto de las ondas de Kelvin cálidas ecuatoriales frente a la costa peruana. Esto contribuye a mantener la temperatura superficial del mar por encima de sus valores normales y, en consecuencia, a El Niño costero 2023.





Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Pronóstico a corto plazo con modelo de ondas y observaciones

Según los datos *in situ* y los resultados de los modelos de ondas forzados con anomalías iguales a cero para el pronóstico, se espera que el paquete de ondas de Kelvin cálidas continúe afectando la costa peruana en las siguientes semanas. Luego arribaría una onda de Kelvin fría aparentemente débil a inicios de julio. Finalmente, se espera que otra onda cálida, formada por el pulso de viento del oeste de fines de mayo en la zona occidental, arribe durante julio e inicios de agosto (Figura 4 y 12). Sin embargo, no se descarta que esta onda cálida no tenga un impacto como las anteriores debido a la presencia de una onda de Kelvin fría que se estaría formando en la zona oriental en las siguientes semanas (de acuerdo al pronóstico de los vientos del modelo GFSv2) y que se proyectarían en una onda de Kelvin fría que arribaría en este mismo periodo (Figura 13).

Pronóstico estacional con modelos climáticos

Para la región Niño 1+2, los pronósticos de los seis modelos climáticos de NMME (CFSv2, CanCM4i-IC3, GEM5-NEMO, NASA-GEOSS2S, GFDL_SPEAR² y COLA-RSMAS-CCSM4), con condiciones iniciales de junio de 2023, indican, en promedio, condiciones cálidas fuertes hasta setiembre, cálidas moderadas entre octubre y marzo de 2024; y finalmente condición cálida débil para abril de 2024 (ver Tabla 5 y Figura 14). Esto significaría, según los resultados de estos modelos, que El Niño costero alcanzaría una magnitud fuerte en los siguientes meses.

Tabla 5. Pronósticos del ICEN de los modelos climáticos con condiciones iniciales de junio de 2023

Modelo	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE	DEF	EFM	FMA	MAM
CFS2	2.27	2.13	1.94	1.62	1.40	1.33	1.38	1.39	1.37	-----	-----
CanCM4i	2.32	2.28	2.20	1.98	1.73	1.54	1.44	1.40	1.33	1.22	1.13
GEM5_NEMO	2.13	1.89	1.69	1.43	1.24	1.15	1.07	0.93	0.75	0.61	0.58
NASA-GEOSS2S	2.77	2.93	2.75	2.20	1.56	0.98	0.44	-0.04	-----	-----	-----
GFDL_SPEARE	2.53	2.57	2.48	2.28	2.05	1.84	1.65	1.40	1.18	1.10	1.14
COLA-RMAS-CCSM4	2.22	2.23	2.28	2.30	2.17	2.09	1.94	1.72	1.44	1.23	1.04
Promedio											
NMME	2.37	2.34	2.22	1.97	1.69	1.49	1.32	1.13	1.21	1.04	0.97

Para el Pacífico central (región Niño 3.4), según los pronósticos de los mismos modelos del párrafo anterior, se esperaría la condición cálida débil para junio de 2023, seguida de la condición cálida moderada para julio y agosto; y, finalmente, de setiembre 2023 a marzo de 2024 se esperarían condiciones cálidas fuertes. Esto indica, según los modelos, el inicio de un evento El Niño en el Pacífico central desde junio, y de magnitud fuerte, que se extendería, por lo pronto, hasta el verano de 2024 (ver Tabla 6 y Figura 15).

² Desde febrero de 2021, el modelo GFDL_SPEARS (<https://www.gfdl.noaa.gov/spear/>) reemplazará a los modelos GFDL_CM2.1 y GFDL_FLOR.





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Tabla 6. Pronósticos del ONI de los modelos climáticos con condiciones iniciales de junio
de 2023

Modelo	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE	DEF	EFM	FMA	MAM
CFS2	0.77	1.12	1.44	1.66	1.79	1.81	1.76	1.65	1.50	----	----
CanCM4i	0.84	1.26	1.57	1.73	1.80	1.89	1.96	1.96	1.79	1.51	1.15
GEM5_NEMO	0.84	1.10	1.18	1.19	1.25	1.34	1.44	1.49	1.44	1.29	1.02
NASA-GEOS2S	0.91	1.25	1.32	1.20	1.04	0.94	0.88	0.73	----	----	----
GFDL_SPEARE	0.84	1.23	1.46	1.55	1.62	1.76	1.87	1.88	1.79	1.58	1.31
COLA-RMAS-CCSM4	0.86	1.30	1.72	2.02	2.21	2.26	2.21	2.03	1.75	1.45	1.27
Promedio											
NMME	0.84	1.21	1.45	1.56	1.62	1.67	1.69	1.62	1.65	1.46	1.19

El IGP viene desarrollando un modelo de inteligencia artificial para el pronóstico de El Niño del tipo extremo, tales como los eventos de 1982-1983 y 1997-1998, con 12 meses de antelación (Rivera et al., en preparación). Este modelo pronostica específicamente el índice "E" (Takahashi et al., 2011) y considera el valor de 1.5 como el límite para el desarrollo de un evento El Niño extremo. El entrenamiento básico del modelo se realizó con los resultados de 26 modelos globales del grupo CMIP6 (aquellos que representan mejor El Niño extremo en el Pacífico oriental) y se ajustó con datos observacionales. La evaluación final se realiza con información del periodo 1990-2022 (33 años), lo cual incluye el evento 1997-1998. En esta ocasión, usando condiciones iniciales de mayo de 2023, el modelo pronostica para los siguiente 12 meses el desarrollo de un evento El Niño extremo pero que no tendría la magnitud del evento de 1997-1998 (Figura 13). Según la "explicabilidad" (*explainability*) de la IA para el pronóstico de enero de 2024, por ejemplo, si bien existe una semejanza en el patrón de calentamiento frente a la costa peruana en mayo de 2023 con mayo de 1997, el patrón de viento zonal y nivel del mar son distintos para ambos periodos (Figura 14).





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Conclusiones

Según la información oceánica y atmosférica, en el mes de mayo los valores de la TSM estuvieron superiores a su climatología en casi toda la región ecuatorial. Por otro lado, los valores de precipitación en la región central y occidental del Pacífico se mantienen, en promedio, dentro de su rango normal.

Frente a costa norte y centro del Perú (región Niño 1+2), las anomalías diarias de la TSM se mantuvieron con valores positivos muy altos (alrededor de 2.5 °C). Como consecuencia de esto, el valor del ICEN para abril se incrementó a 2.19, alcanzando la condición cálida fuerte. Con este valor se habría alcanzado los tres meses con condiciones cálidas, por lo que operacionalmente se establece la presencia de un evento El Niño Costero, que hasta el momento, como parte de su evolución, ha alcanzado la magnitud débil. Por otro lado, el valor del ICEN temporal de mayo (2.51) y junio (2.43), coinciden en condiciones cálidas fuertes. De concretarse estos valores en los siguientes meses, se estaría hablando de un evento El Niño costero de magnitud fuerte.

En relación al Pacífico central el ONI de abril es neutro (0.14), los valores temporales del ONI para mayo y junio, serían condición neutra y cálida débil, respectivamente. Se mantiene una tendencia positiva del ONI que, de mantenerse, alcanzaría el escenario de un evento El Niño en el Pacífico central.

Según la información observada, *in situ* y satelital, así como los resultados de los modelos de ondas, durante mayo y hasta la fecha, se continúa observado el nivel del mar por encima de sus valores climatológicos a lo largo de la costa peruana en lo que va del evento El Niño costero. Esta anomalía estaría relacionada al paquete de ondas de Kelvin cálidas que habrían arribado a la costa peruana. Por otro lado, arribaría una onda de Kelvin fría, aparentemente, débil a inicios de julio. Finalmente, se espera que otra onda cálida, formada por el pulso de viento del oeste de fines de mayo, arribe durante julio e inicios de agosto.

Los pronósticos de los modelos numéricos de las agencias internacionales indican condiciones cálidas, de fuertes a débiles, por lo pronto, hasta abril de 2024 frente a la costa norte y centro del Perú. Esto significa la continuación de El Niño costero actual hasta, por lo menos, el verano de 2024.

En el Pacífico central, los mismos modelos descritos en el párrafo anterior, pronostican en el mes de junio el inicio de un evento El Niño que se extendería, por lo pronto, hasta marzo de 2024. Si bien los modelos en este periodo tienen un buen *skill* para pronosticar las condiciones del mar en dicha región, en la actualidad, aún no es clara la presencia de un acoplamiento entre el océano y la atmósfera que pueda mantener el calentamiento hasta el verano de 2024.

El modelo de Inteligencia Artificial del IGP, con condiciones iniciales de mayo, pronostica un evento extremo (el índice E supera el valor de 1.5) aunque no sería de la magnitud de El Niño 1997/1998. El modelo indica que si bien existen en mayo patrones similares en la TSM en la región oriental, los patrones de ANN y viento zonal son distintos en el Pacífico ecuatorial, esto podría estar influyendo en la magnitud de El Niño pronosticado.





Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

Bibliografía

- **Aparco J., K. Mosquera y K. Takahashi**, 2014: Flotadores Argo para el cálculo de la anomalía de la profundidad de la termoclina ecuatorial (Aplicación Operacional), Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, mayo, 1, 5.
- Cravatte, S., W. S. Kessler, N. Smith, S. E. Wijffels, Ando, K., Cronin, M., Farrar, T., Guilyardi, E., Kumar, A., Lee, T., Roemmich, D., Serra, Y., Sprintall, J., Strutton, P., Sutton, A., **Takahashi, K.** y Wittenberg, A., 2016: First Report of TPOS 2020. GOOS-215, 200 pp. [<http://tpos2020.org/first-report>]
- DiNezio, P., 2016: Desafíos en la predicción de La Niña, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, 3 (9), 4-8.
- ENFEN, 2012: Definición operacional de los eventos "El Niño" y "La Niña" y sus magnitudes en la costa del Perú. Nota Técnica ENFEN.
- ENFEN, 2015: Pronóstico probabilístico de la magnitud de El Niño costero en el verano 2015-2016. Nota Técnica ENFEN 02-2015.
- Huang, B., Thorne, P.W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Smith, T. M., Vose, R. S., Zhang, H.-M., 2017: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons, *J. Climate*, doi: [10.1175/JCLI-D-16-0836.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1)
- Kug, J.-S., Jin, F.-F., An, S.-I., 2009: Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J. Climate* 22, 6, 1499–1515, doi:10.1175/2008JCLI2624.1.
- Meehl G, Hu A, Teng H, 2016: Initialized decadal prediction for transition to positive phase of the Interdecadal Pacific Oscillation. *Nature Communications*, doi: [10.1038/ncomms11718](https://doi.org/10.1038/ncomms11718)
- **Morera, S. B.**, Condom, T., Crave, A., Steer, P., and Guyot, J. L., 2017: The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968-2012). *Scientific Reports*, v. 7, No. 1, p. 11947 DOI:10.1038/s41598-017-12220-x.
- **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, 4-7.
- Ramos, Y., 2015: El cambio climático y la lluvia en la costa norte. Boletín técnico: "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, 2(8), 4-8.
- **Reupo, J. 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", Inst. Geofísico del Perú, Enero, 1, 8-9.





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

- **Sulca, J., Takahashi, K.,** Espinoza, J.C., Vuille, M. and Lavado-Casimiro, W., 2017: Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. Int. J. Climatol. Doi:10.1002/joc.5185.
- **Takahashi, K.,** 2017: Verificación de los pronósticos probabilísticos de El Niño y La Niña costeros. Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, 4 (8), 8-9.
- **Takahashi, K.,** Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B., 2011: ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. Geophysical Research Letters, 38 (10). <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>
- **Takahashi, K., Martínez, A. G.,** 2016: The very strong El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. Climate Dynamics, doi: 10.1007/s00382-017-3702-1.
- Thoma M, Greatbatch R, Kadow C, Gerdes R, 2015: Decadal hindcasts initialized using observed surface wind stress: Evaluation and prediction out to 2024. Geophys. Res. Lett. doi:10.1002/2015GL064833
- **Urbina, B. y K. Mosquera,** 2020: Implementación y validación de un modelo oceánico multimodal para la región ecuatorial del océano Pacífico. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 7 N° 01, 13-20.
- Zuta, S., y O. Guillén, 1970: Oceanografía de las aguas costeras del Perú. Boletín Instituto Del Mar Del Perú, 2(5), 157-324. <https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/249>

Nota: Los Boletines Técnicos del IGP citados se pueden encontrar en:
<https://repositorio.igp.gob.pe/>

Equipo

Kobi Mosquera, Dr. (responsable)

Jorge Reupo, Lic.

Gerardo Rivera, Bach.

Brayan Urbina, Bach.

Agradecimientos

A la Dra. Emily Becker (NOAA) y al Dr. Ben Kirtman (RSMAS) por su apoyo con los datos del proyecto NMME





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

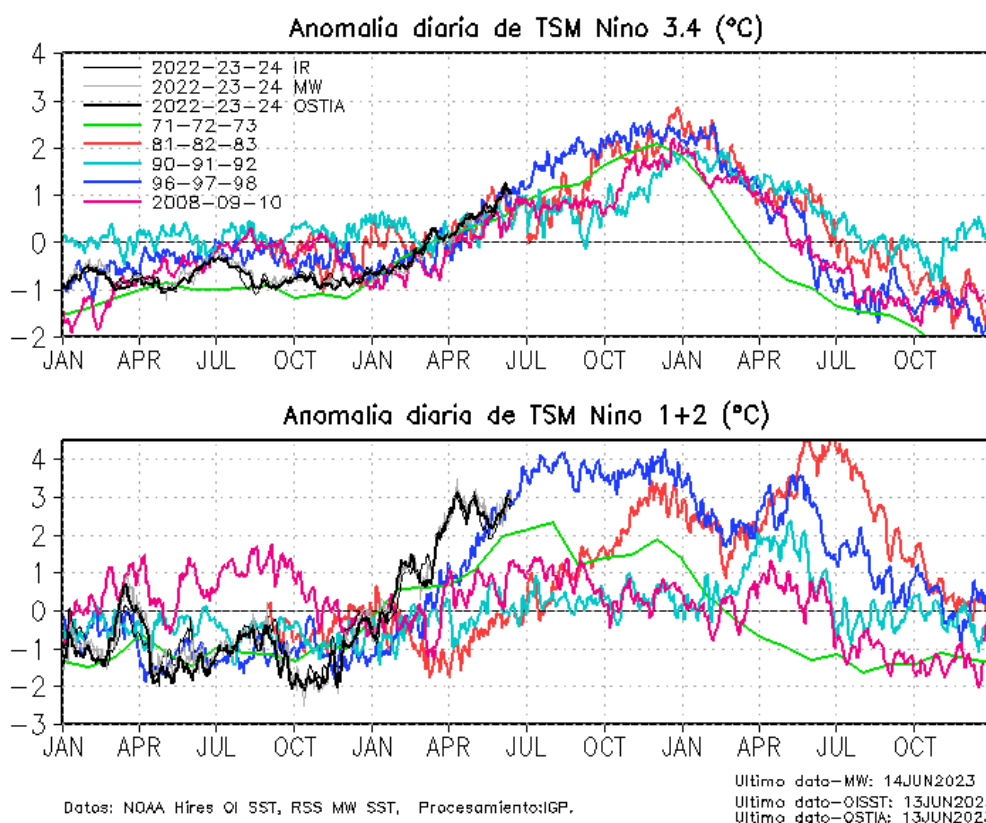


Figura 1. Series de tiempo de la anomalía diaria de la TSM en la región Niño 3.4 (arriba) y en la región Niño 1+2 (abajo). Las líneas en color negro (gruesa), gris y negro (fina) indican la evolución de la anomalía de la TSM en el presente año usando información infrarroja (IR), microondas (MW) y del producto OSTIA, respectivamente. Las líneas de color verde, rojo, celeste, azul y magenta indican la evolución de la anomalía de la TSM para los periodos 1973-1975, 1983-1985, 1992-1994, 1998-2000 y 2016-2018. Elaborado por el IGP.



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

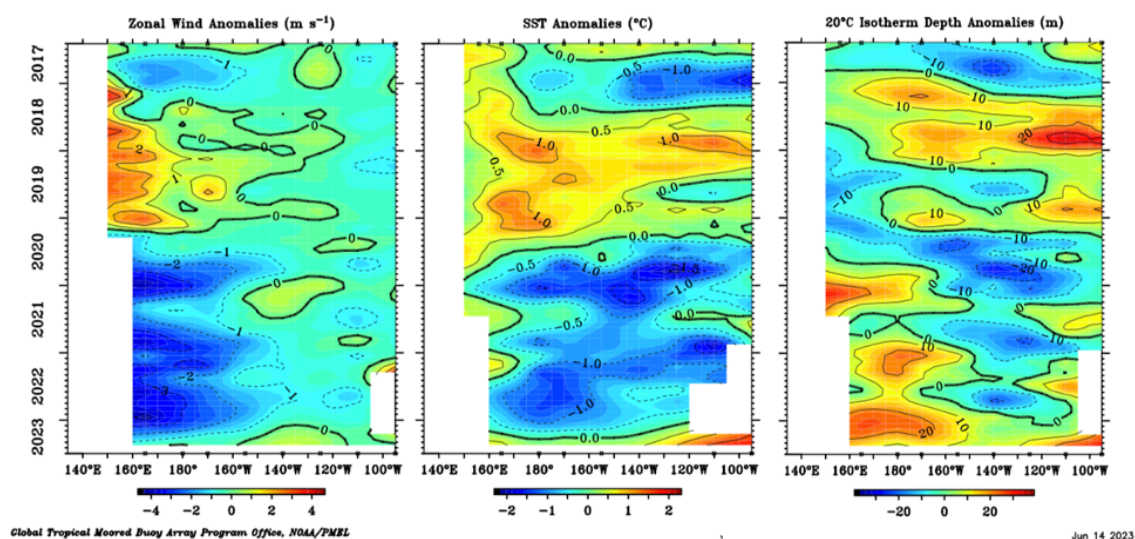


Figura 2. Promedio mensual de la anomalía del viento zonal (panel izquierdo), de la temperatura superficial del mar (panel central) y de la profundidad de la isoterma de 20 °C (panel derecho) y a lo largo de la franja ecuatorial del Pacífico (2°S-2°N). Esta imagen se elaboró de otras que se obtienen del proyecto TAO: www.pmel.noaa.gov/



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

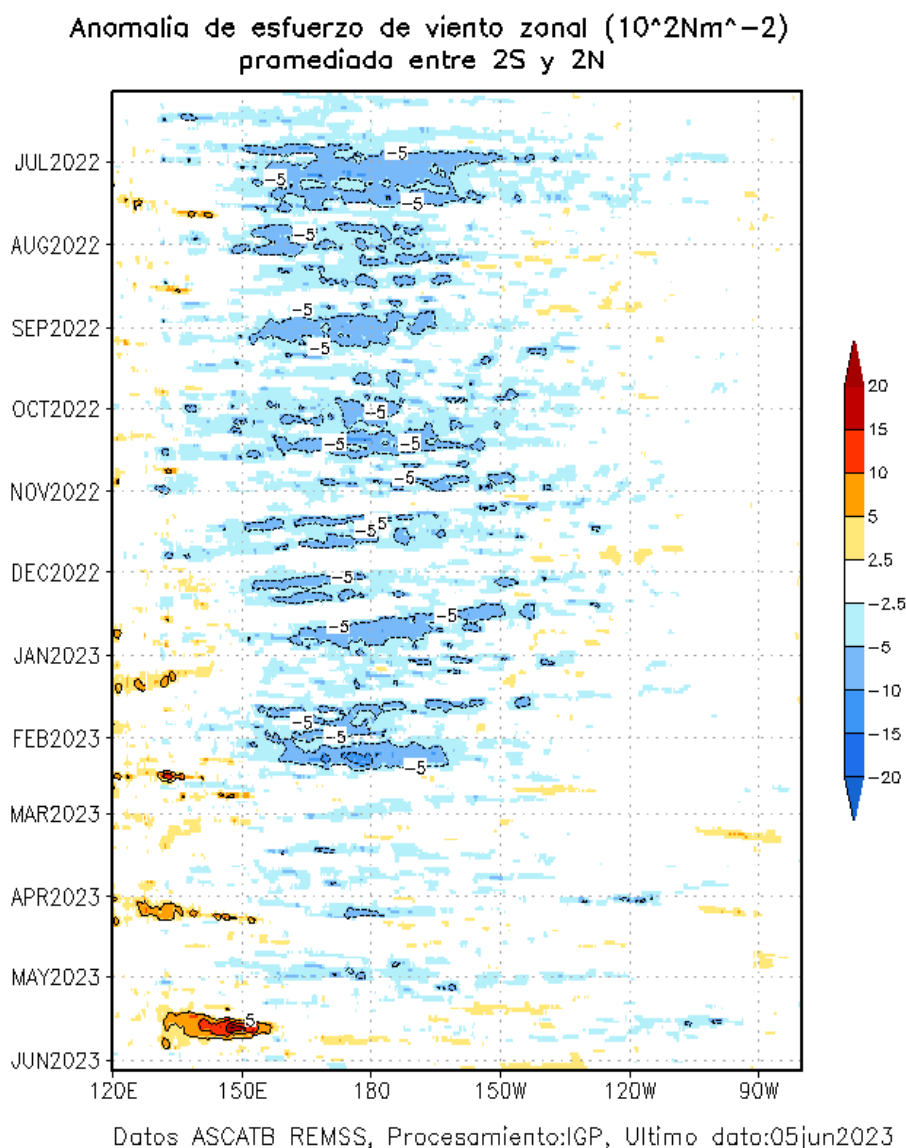


Figura 3. Diagrama longitud-tiempo de las anomalías del esfuerzo de viento zonal ecuatorial que se obtiene de los datos del producto ASCAT - METOP B hasta el 05 de junio de 2023. Elaborado por el IGP.



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

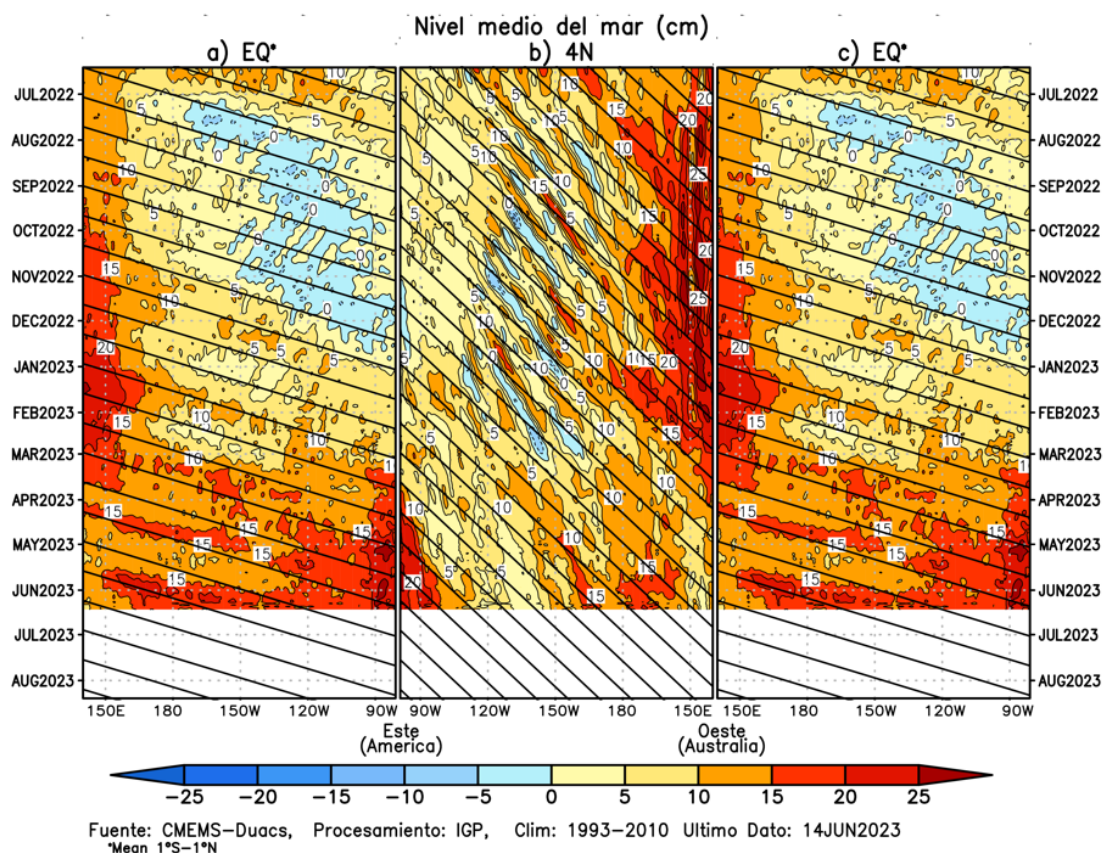


Figura 4. Diagramas longitud-tiempo de la anomalía del nivel medio del mar en el Pacífico ecuatorial usando el producto DUACS. Los paneles (a) y (c) son los mismos y representan la información a lo largo de la línea ecuatorial; mientras que (b), a lo largo de 4°N, pero con el eje zonal de este a oeste. Las líneas diagonales indican la trayectoria teórica de la onda de Kelvin (a y c) y Rossby (b) si tuvieran una velocidad aproximada de 2.6 m/s y 0.87 m/s, respectivamente. Elaborado por el IGP.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

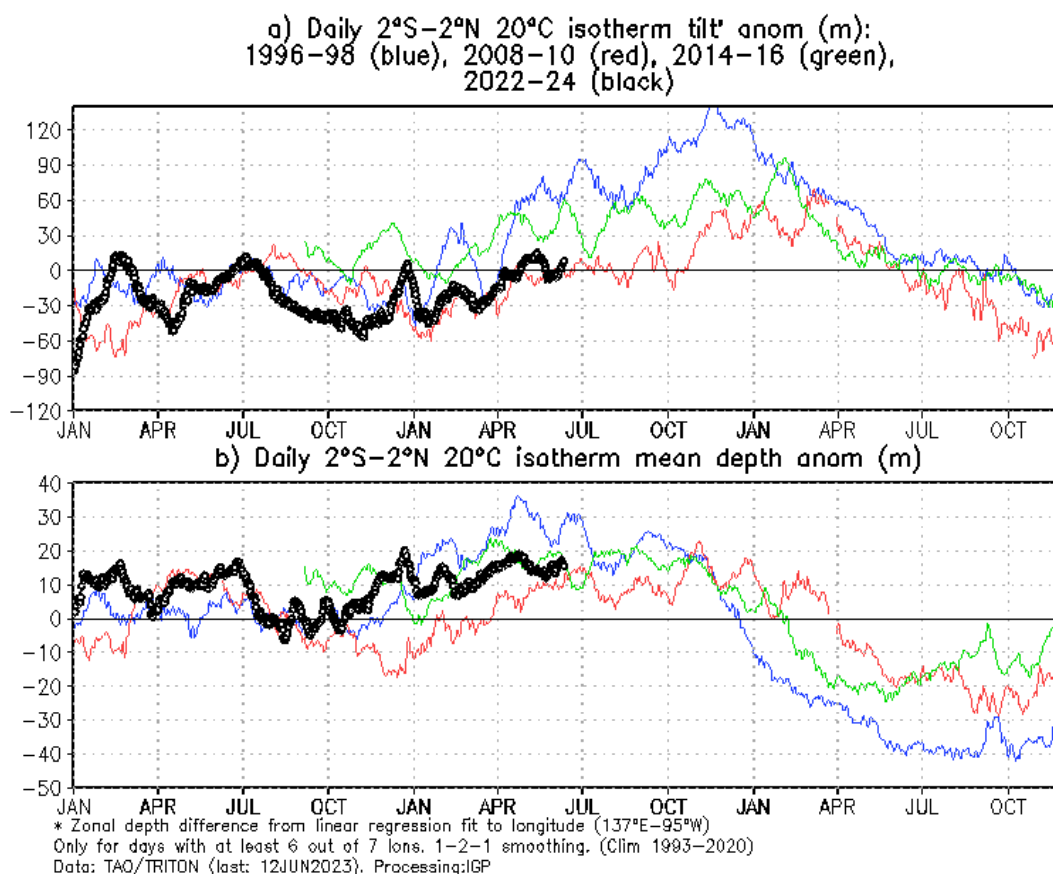


Figura 5. a) Inclínación de la termoclina y **b)** contenido de calor en el Pacífico ecuatorial (2°N y 2°S). La data usada para este cálculo proviene de las boyas TAO. Elaborado por el IGP.





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

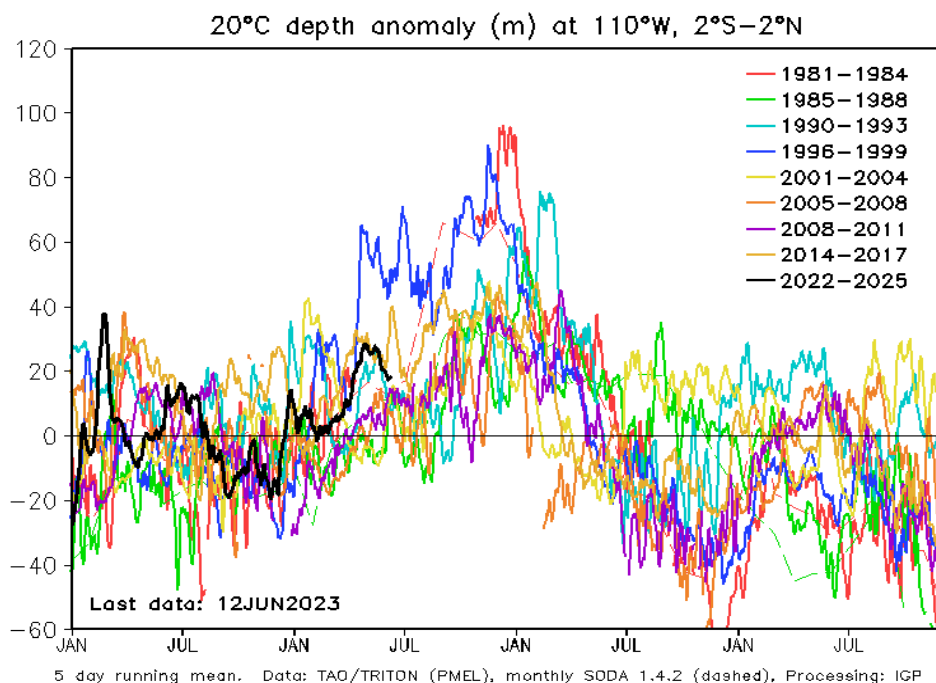


Figura 6. Anomalía de la profundidad de la isoterma de 20 °C (m) en 110°W y promediada entre 2°S y 2°N. La data usada para este calculo proviene de las boyas TAO. Elaborado por el IGP.





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

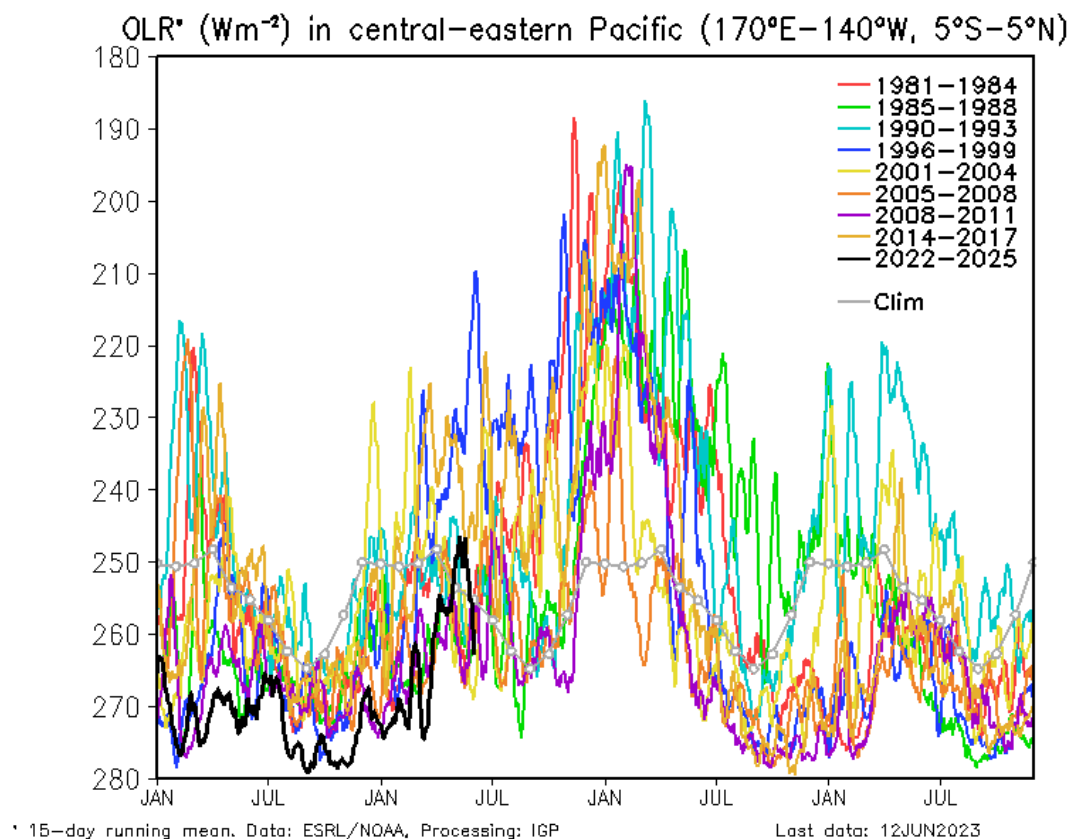


Figura 7. Actividad convectiva en el Pacífico central oriental (170°E – 140°W y 5°S – 5°N) en base a la información de OLR. Elaborado por el IGP.





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

OLR* (Wm^{-2}) in central-eastern Pacific (170°W – 100°W , 5°S – 5°N)

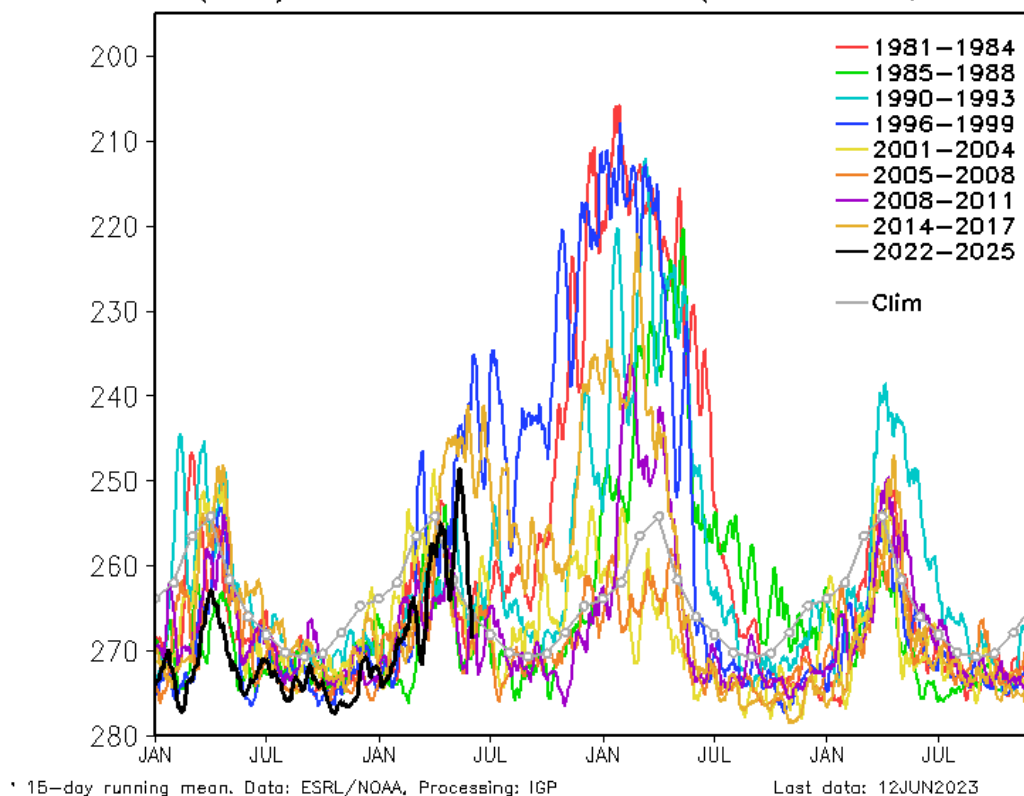


Figura 8. Actividad convectiva en el Pacífico central oriental (170°W – 100°W y 5°S – 5°N) en base a la información de OLR. Elaborado por el IGP.



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

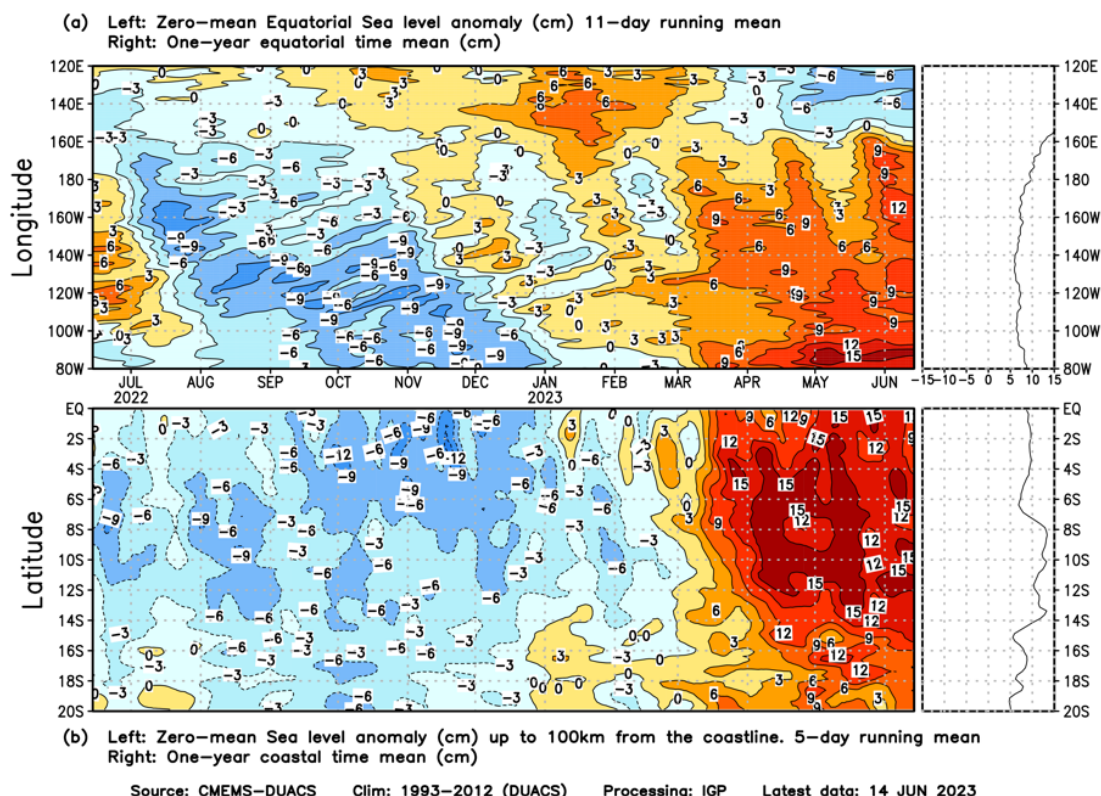


Figura 9. Anomalia centrada del nivel del mar a lo largo de la franja ecuatorial (Figura superior-izquierda) y a lo largo de la costa peruana (Figura inferior-izquierda). A la derecha se muestra el promedio de los últimos 365 días en la franja ecuatorial (superior) y a lo largo de la costa (inferior), que fueron sustraídos a las figuras de la izquierda, respectivamente. Las unidades están en centímetros. Elaborado por el IGP.

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

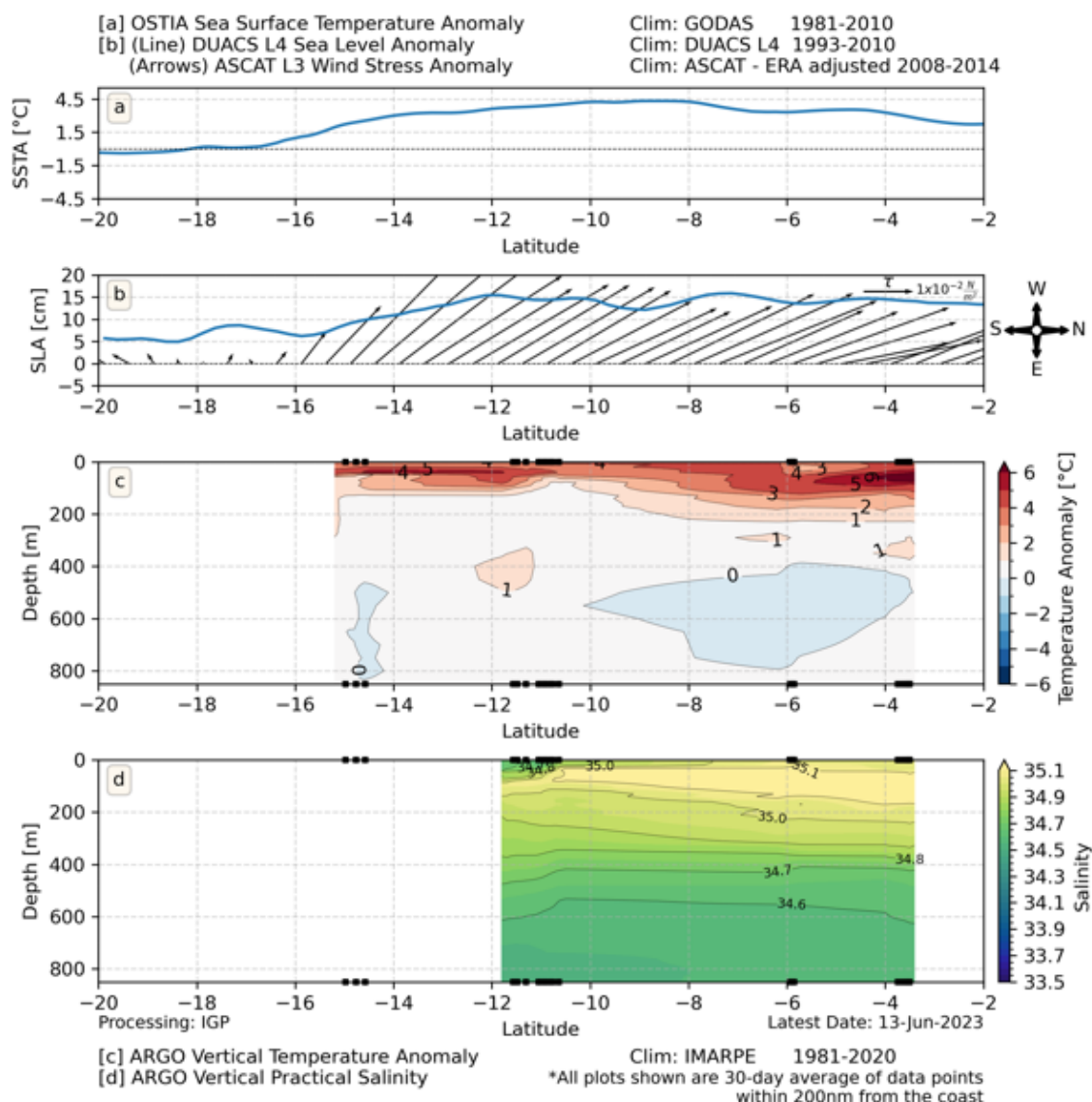


Figura 10. Variables a lo largo de la costa promediadas en los últimos 30 días y dentro de las 200 millas náuticas. De arriba abajo: 1) anomalía de la TSM obtenida del producto OSTIA; 2) anomalías del nivel del mar (línea azul) y esfuerzo de viento (vectores) de los productos DUACS y Blended, respectivamente, 3) anomalía de la temperatura del mar obtenida de los flotadores ARGO y 4) Salinidad obtenida de los flotadores ARGO. En el segundo panel, la relación entre el tamaño y la magnitud del vector se indica en el extremo superior izquierdo, mientras que la dirección y sentido se entienden por medio de los puntos cardinales que se localizan a la derecha.

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

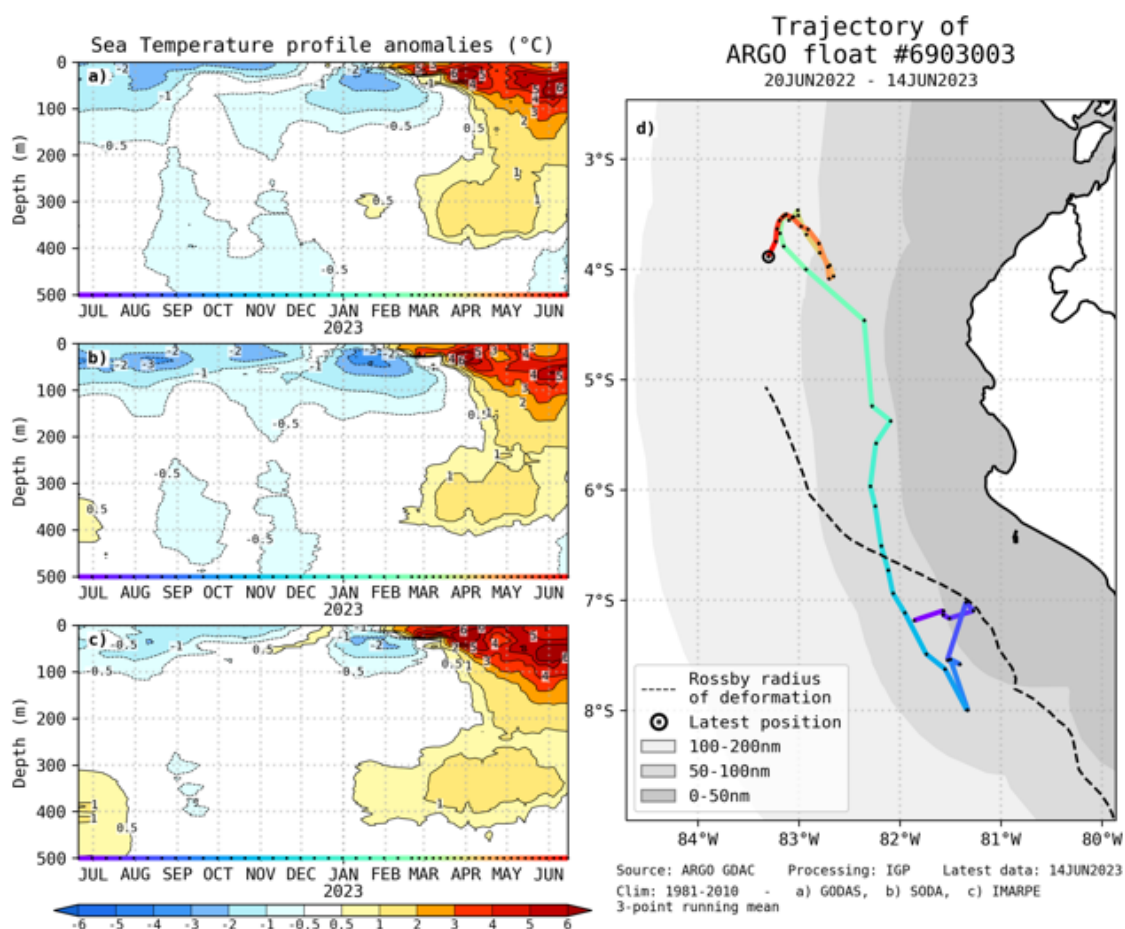


Figura 11. A la izquierda se aprecia la anomalía de la temperatura del mar hasta los 500 metros de profundidad, calculada de los datos del flotador ARGO No. 6903002. Esta anomalía se calcula en base a la climatología (1981-2010) de: (a) GODAS, (b) SODA e (c) IMARPE. A la derecha se aprecia la trayectoria del flotador en el último año. Cada color indica un periodo de aproximadamente 30 días y el círculo abierto representa la última posición del flotador. Elaborado por el GP.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

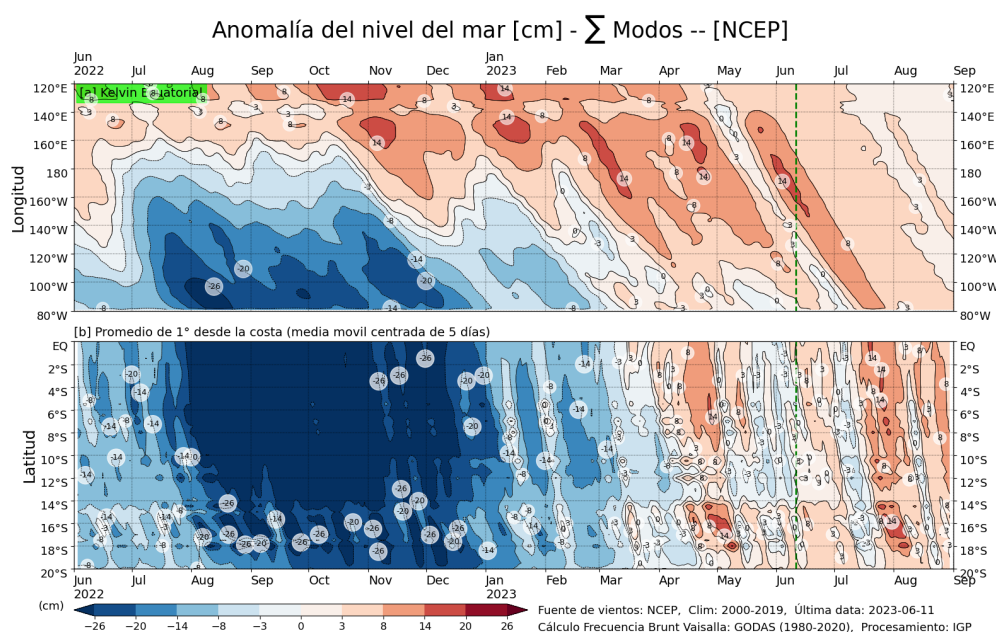


Figura 12. Simulación numérica de la anomalía del nivel del mar (cm) a lo largo de la franja ecuatorial del océano Pacífico (panel superior) y a lo largo de la costa peruana (panel inferior). Esta simulación se realizó con el modelo oceánico multimodal forzado con los vientos del *reanalysis* de NCEP. La línea verde entrecortada indica el inicio de la simulación del pronóstico. Elaborado por el IGP.



"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

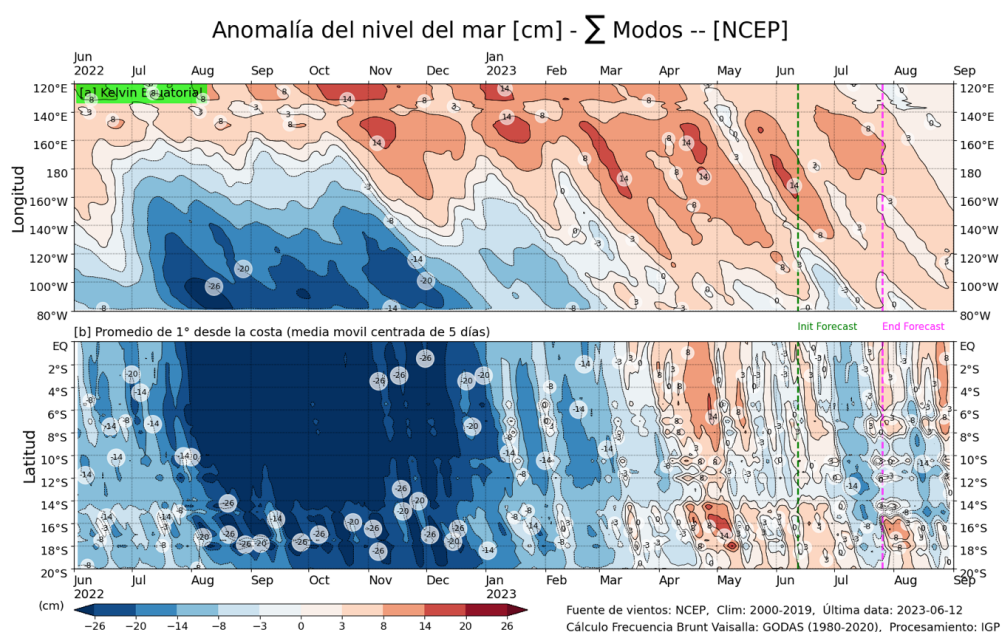


Figura 13. Simulación numérica de la anomalía del nivel del mar (cm) a lo largo de la franja ecuatorial del océano Pacífico (panel superior) y a lo largo de la costa peruana (panel inferior). Esta simulación se realizó con el modelo oceánico multimodal forzado con los vientos del *reanalysis* de NCEP para el diagnóstico y vientos de GFSv2 para el pronóstico de los siguientes 42 días. La línea verde entrecortada indica el inicio de la simulación del pronóstico. Elaborado por el IGP.

"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

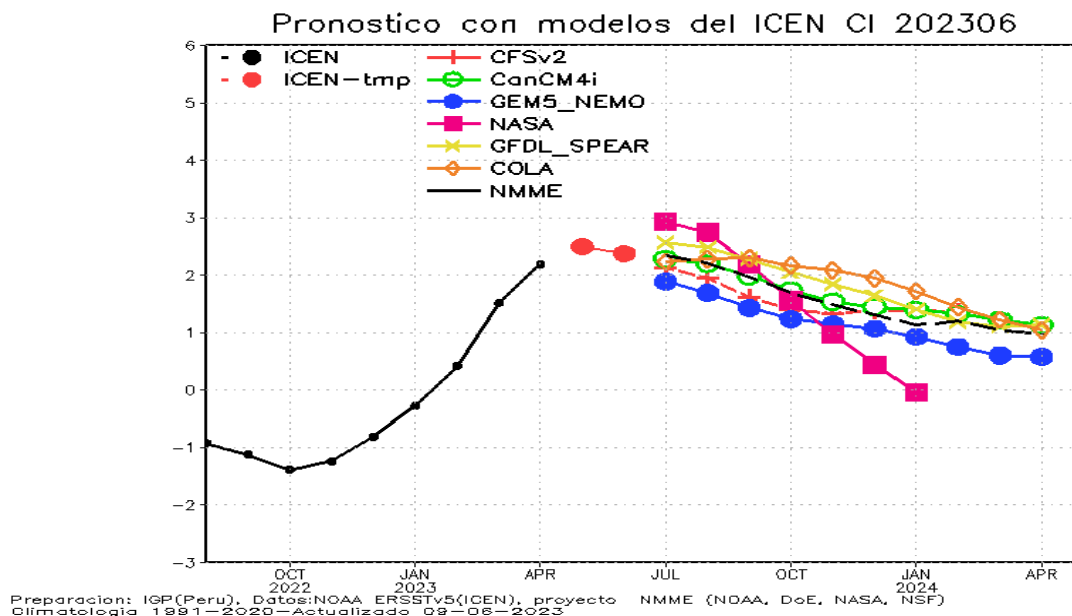


Figura 14. Índice Costero El Niño (ICEN, línea negra con círculos llenos, fuente ERSSTv5) y sus valores temporales (ICENv5tmp, rojo con círculo lleno). Además, pronósticos numéricos del ICEN (media móvil de 3 meses de las anomalías pronosticadas de TSM en Niño 1+2) por diferentes modelos climáticos. Los pronósticos de los modelos CFSv2, CanCM4i, GEM5_NEMO, NASA, GFDL_SPEAR y NCAR_CCSM4, COLA tienen como condición inicial de junio de 2023. Fuente: IGP, NOAA, NMME



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Atmósfera
e Hidrósfera - CAH



IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

“Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres”
“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

Condiciones Iniciales de Junio 2023

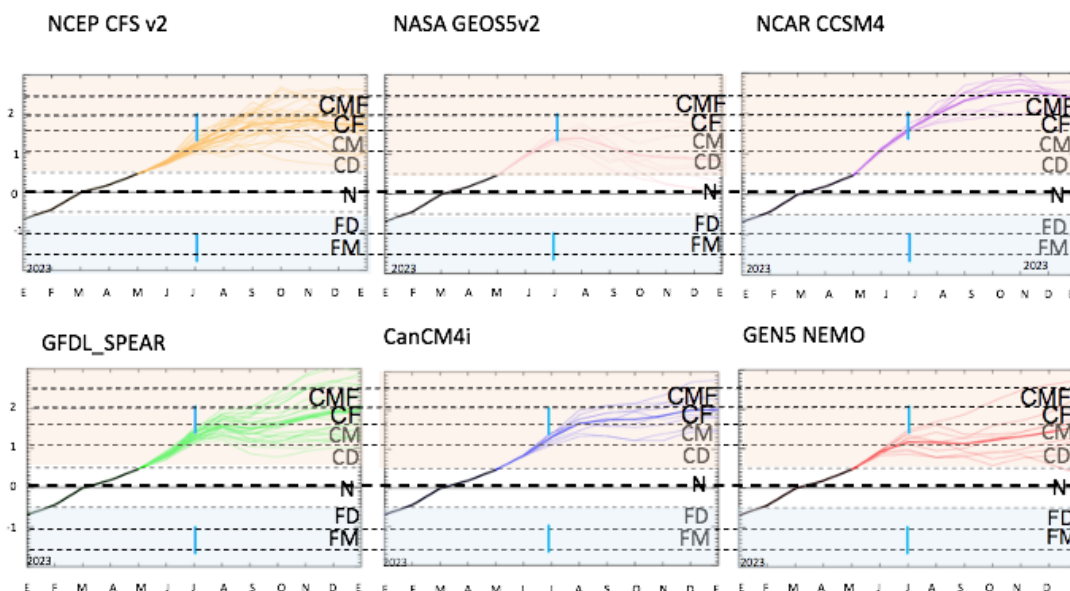


Figura 15. Índice Niño 3.4 mensual observado (líneas de color plomo) y pronosticado por los modelos de NMME (líneas de distintos colores). Fuente: NMME.



Pronósticos experimentales con inteligencia artificial

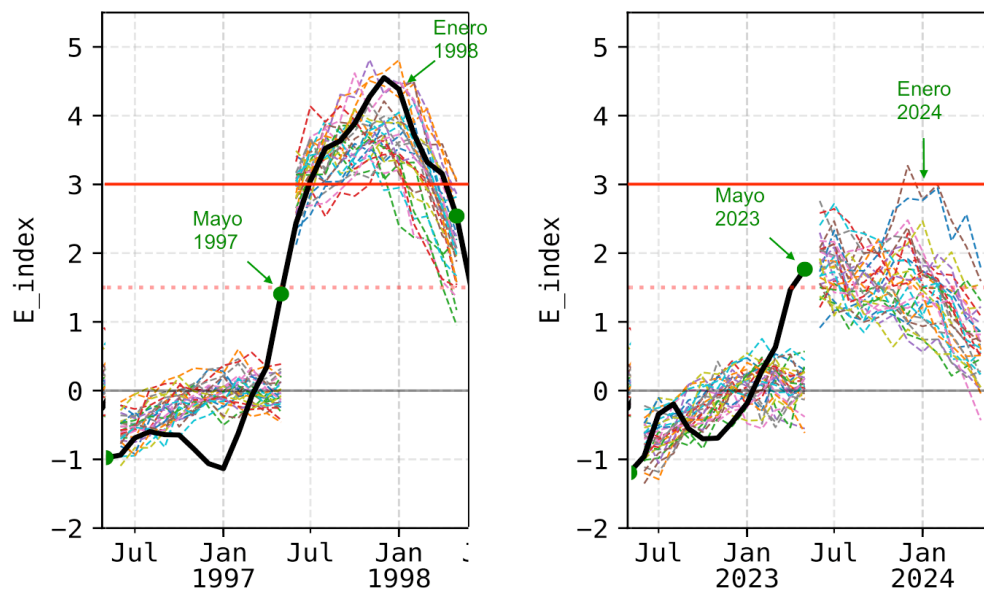
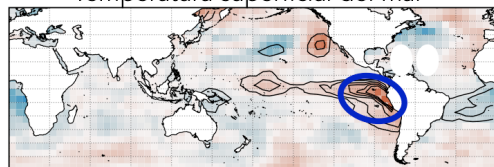


Figura 16. Pronóstico del índice E (Takahashi et al., 2011) a doce meses basado en un modelo de inteligencia artificial (Rivera et al., en preparación) para el pronóstico de El Niño extremo. El panel de la izquierda muestra la evolución del índice E, representado con una línea gruesa de color negro, desde mayo de 1996 a julio de 1998; el conjunto de líneas entrecortadas de colores indica el pronóstico del índice E a 12 meses para mayo de 1996 y mayo de 1997 (ver círculos de color verde). El panel de la derecha, al igual que el panel de la izquierda, muestra la evolución del índice E desde mayo de 2022 a mayo de 2023 y los pronósticos a 12 meses de E con condiciones iniciales de mayo de 2022 y mayo de 2023. La línea roja horizontal continua (entrecortas) indica el valor de 3 (1.5) para el índice E. Fuente: IGP.

“Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres”
“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

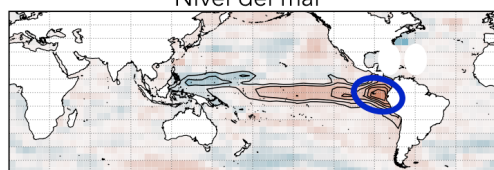
Mayo 1997

Temperatura superficial del mar



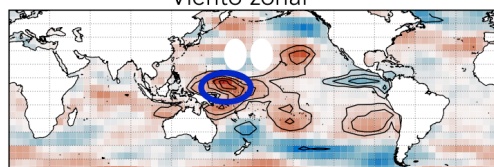
0° 30°E 90°E 150°E 150°W 90°W 30°W

Nivel del mar



0° 30°E 90°E 150°E 150°W 90°W 30°W

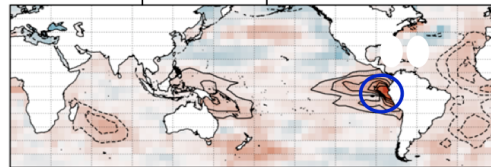
Viento zonal



0° 30°E 90°E 150°E 150°W 90°W 30°W

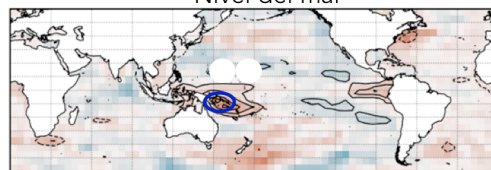
Mayo 2023

Temperatura superficial del mar



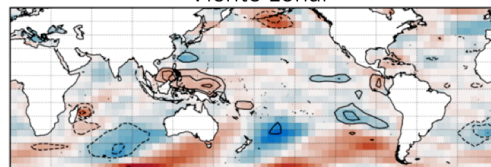
0° 30°E 90°E 150°E 150°W 90°W 30°W

Nivel del mar



0° 30°E 90°E 150°E 150°W 90°W 30°W

Viento zonal



0° 30°E 90°E 150°E 150°W 90°W 30°W

Figura 17. “Explicabilidad” (*explainability*) de tres variables relevantes (temperatura del mar, nivel del mar y viento zonal) para el pronóstico del índice E (Takahashi et al., 2011) para enero de 1998 (paneles de la izquierda) y enero de 2024 (paneles de la derecha) usando un modelo de IA con condiciones iniciales de mayo. Las líneas sólidas (punteadas) delimitan áreas con contribución positiva (negativa) al pronóstico. Los contornos azules gruesos indican las regiones que el modelo de IA consideró más importantes para el pronóstico. Fuente: IGP.