



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



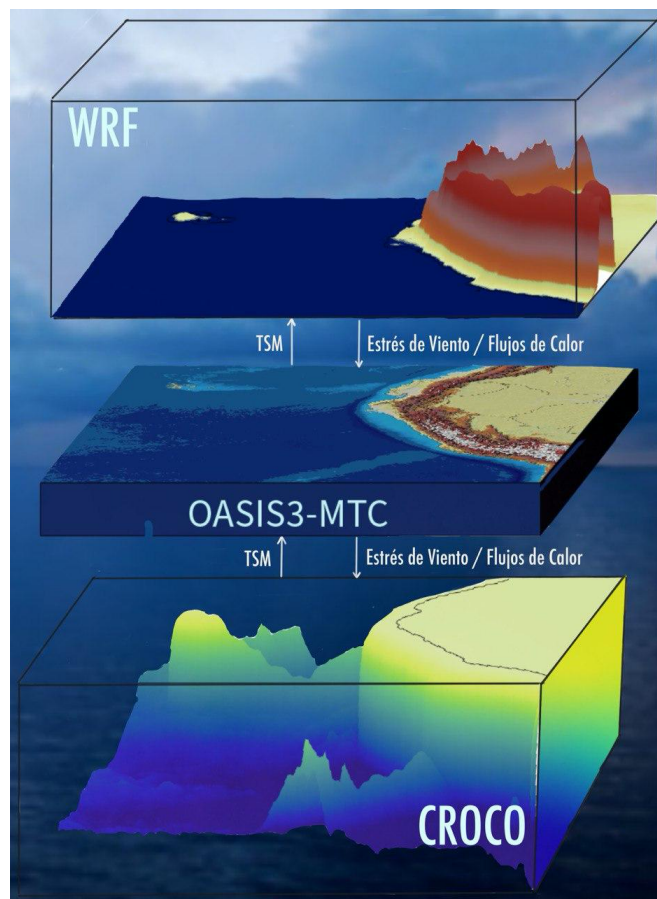
IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

Pronósticos experimentales del posible FEN para la Comisión ENFEN con un modelo de Sistema Tierra de alta resolución para el territorio nacional y el Pacífico oriental

Informe Técnico

Ivonne Montes, Berlín Segura, Fiorela Castellón, Roger Manay, Kobi Mosquera, Ken Takahashi



Diciembre 2023

Tabla de Contenido

1. Resumen.....	3
2. Introducción	3
3. Implementación.....	4
4. Pronóstico diciembre 2023 - junio 2024.....	10
5. Conclusiones	11
6. Perspectivas	11
7. Referencias.....	11

1. Resumen

Se reporta la implementación en modo pronóstico del modelo de Sistema Tierra regional 'IGP Regional Earth System Model CROCO-OASIS-WRF v.1' (IGP RESM-COW v1) y los pronósticos experimentales del posible FEN 2024, conforme al Plan multisectorial ante la ocurrencia del Fenómeno El Niño 2023 - 2024 (D.S. N.º 101-2023-PCM).

El modelo IGP RESM-COW v1 tiene una resolución de 12 km para el océano y 30 km para la atmósfera y contempla todo el territorio peruano y parte del Pacífico oriental. La implementación actual toma como insumo los pronósticos del modelo climático global NOAA CFSv2, cuyos sesgos promedio son corregidos usando datos observacionales (MERCATOR y FNL), los promedios climatológicos del CFSv2 y una simulación de 22 años del modelo IGP RESM-COW v1. Esto permite realizar pronósticos de las condiciones oceánicas y atmosféricas con hasta 7 meses de anticipación.

El pronóstico experimental con el modelo IGP RESM-COW v1 inicializado con datos de diciembre de 2023 indica que El Niño costero 2023-24 se extendería solo hasta enero de 2024 y las precipitaciones pronosticadas no serían como las que se desarrollaron a fines de verano e inicios-mediados de otoño de 2023 frente a la costa norte.

2. Introducción

El Niño, caracterizado por el calentamiento anómalo del mar en el Pacífico ecuatorial, es un evento climático que puede generar fuertes impactos en el Perú, principalmente por las lluvias intensas, inundaciones y movimientos en masa en la costa, así como las sequías en los Andes y Amazonía. En el Perú, la fase cálida del ENSO, El Niño, es la que causa mayores impactos, no solo afectando las precipitaciones en la costa norte, sino también en los Andes y la Amazonía (Takahashi, 2022). Esto impacta enormemente el ámbito socioeconómico (Cai et al., 2020), ya que provoca daños a la infraestructura (Machuca et al., 2014), la agricultura (Heino et al., 2018), la pesca (Bertrand et al., 2020) y la salud (Yglesias-González et al., 2023), por mencionar algunos.

Los eventos El Niño, así como la fase fría conocida como La Niña, presentan diversidad de manifestaciones y procesos (Capotondi et al., 2020), entre los que destacan, por sus impactos en el Perú, los eventos El Niño globales extremos en el Pacífico oriental como los observados en 1982-1983 y 1997-1998, así como los eventos El Niño exclusivamente costeros extremos como los de los años 1925 y 2017. Desde un punto de vista físico, los eventos El Niño globales se enmarcan en El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el cual es uno de los modos de variabilidad climática más importante y que depende fundamentalmente de la interacción entre el océano y la atmósfera en todo el Océano Pacífico tropical (Dewitte et al., 2014), pero los eventos extremos presentan mecanismos de interacción amplificados en el Pacífico oriental (Takahashi y Dewitte, 2016; Takahashi et al., 2018). Por otro lado, los eventos costeros de 1925 y 2017 dependen principalmente de los procesos de interacción océano-atmósfera a escala regional en el Pacífico oriental frente a la costa de Sudamérica, por lo que tienen una escala temporal más corta (Takahashi y Martinez, 2017; Echevin et al., 2018; Peng et al., 2018).

La predicción de los eventos El Niño y La Niña, particularmente en la costa peruana, entonces requiere una adecuada representación de los procesos de interacción océano-atmósfera en el Pacífico oriental pero, en general, la exactitud de los pronósticos para el Pacífico oriental con modelos climáticos globales tienen es menor que para el Pacífico central (Rivera-Tello et al., 2023; Orihuela et al., en preparación), probablemente debido al menos en parte a los fuertes sesgos climatológicos cálidos y lluviosos que estos modelos tienen para nuestra costa (ej. Ding et al., 2020). Por lo tanto, con el objetivo de incrementar la exactitud de los pronósticos con mayor tiempo de anticipación, particularmente de los eventos El Niño globales extremos como los de 1982-1983 y 1997-1998, así como de los eventos El Niño exclusivamente costeros extremos como los de 1925 y 2017, es necesario contar con modelos que representen adecuadamente los procesos de interacción océano-atmósfera a escala regional en el Pacífico oriental, particularmente frente a la costa de Perú.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar los peligros naturales, especialmente respecto al Niño, establece el Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 068 "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres". El Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN),

participa en este PPR con el producto denominado “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”. Este producto consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permita la toma de decisiones de las autoridades a nivel nacional y regional. Para este fin, el IGP aporta con resultados de modelos de pronóstico, tanto generados internacionalmente como es el caso de los modelos climáticos globales, como de modelos propios como el de predicción de ondas oceánicas ecuatoriales y el modelo de inteligencia artificial para el pronóstico de El Niño (Rivera-Tello et al., 2023).

El IGP, pionero en el modelado numérico en el Perú y como parte del producto antes mencionado, ha implementado el modelo regional de Sistema Tierra acoplado océano-atmósfera (Segura & Montes, 2021), denominado ‘IGP RESM-COW v1’, haciendo uso del sistema computacional de alto rendimiento HPC-Linux-Clúster (Montes et al., 2016) del IGP; cuyo fin último es su utilización como herramienta de pronóstico para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño - ENFEN. Este modelo regional es alimentado por datos globales y simula adecuadamente los procesos físicos regionales, como por ejemplo durante El Niño costero 2017, y tiene la potencialidad de generar mejores pronósticos de El Niño y La Niña en el Pacífico oriental y el territorio peruano, usando como insumo las predicciones producidas con modelos globales.

Es así que en el marco del Plan multisectorial ante la ocurrencia del Fenómeno El Niño 2023 - 2024, aprobado mediante el Decreto Supremo N.º 101-2023-PCM, el IGP quedó encomendado de ejecutar la intervención de “Pronósticos experimentales del posible FEN para la Comisión ENFEN con un modelo de Sistema Tierra de alta resolución para el territorio nacional y el Pacífico oriental”.

A continuación, se presenta la implementación del modelo de Sistema Tierra regional ‘IGP RESM-COW v1’ en modo pronóstico y sus resultados experimentales generados por este del posible FEN 2024 para el territorio nacional y el Pacífico oriental.

3. Implementación

El componente acoplado océano-atmósfera se construye en base al modelo oceánico regional CROCO (Coastal and Regional Ocean CCommunity model; Debreu et al., 2012), el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting model; Skamarock et al., 2019) y el acoplador OASIS (Ocean Atmosphere Sea Ice Surface; Valcke, 2013).

CROCO es el nuevo modelo oceánico construido en base a ROMS (Sistema Regional de Modelado Oceánico, Shchepetkin y McWilliams, 2005) diseñado para simular la circulación a escalas espaciales muy finas y su interacción con escalas mayores. WRF está diseñado para ser un sistema de simulación atmosférica flexible, portátil y eficiente en una plataforma de cálculo paralela (Skamarock et al., 2019). OASIS tiene como función principal el intercambiar e interpolar los campos de acoplamiento entre los modelos CROCO y WRF. El WRF envía al CROCO, cada hora, los promedios de las simulaciones horarias del esfuerzo de viento zonal y meridional, de los flujos radiativos de onda corta y larga, así como de los flujos de agua dulce (evaporación-precipitación); mientras que CROCO envía al WRF, cada hora, el promedio horario de la temperatura superficial del mar (TSM, Figura 1).

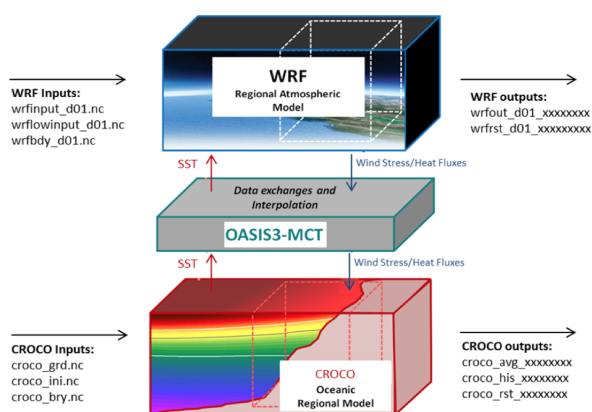


Figura 1. Esquema del acoplamiento regional IGP RESM-COW, extraído de Cambon et al. (2014): el modelo WRF usa datos de entrada y frontera (WRF Inputs: wrfinput, wrflowinput, wrfbry) envía el esfuerzo de viento y flujo de calor al acoplador OASIS, donde se interpola y lo envía al modelo CROCO, que utiliza datos de entrada y frontera (CROCO Inputs: croco_grd, croco_ini, croco_bry) y envía la TSM (SST, por siglas en inglés) al acoplador que lo interpola y lo envía al modelo WRF, luego genera los datos de salida y reinicio (WRF Outputs: wrfout y wrfst), y envía el esfuerzo de viento y flujo de calor al acoplador que interpola y lo envía al modelo CROCO que genera los datos de salida (CROCO Outputs: croco_avg, croco_rst). Extraído de Segura & Montes (2021).



3.1 Configuraciones

La configuración del modelo acoplado IGP RESM-COW se realiza bajo dos modos, denominados ‘diagnóstico’ y ‘pronóstico’. El modo de diagnóstico se refiere a una corrida histórica que abarca el periodo 2000 - 2022 (ver simulación de diagnóstico). Mientras que el modo de pronóstico se refiere a una corrida futura con un horizonte de 7 meses, que hace uso de los datos provenientes de la proyección de un modelo de pronóstico global (ver simulación de pronóstico). Estas dos simulaciones son necesarias, ya que la salida del último mes de la simulación de diagnóstico es usada como condiciones iniciales de la simulación de pronóstico.

3.1.1 Simulación de diagnóstico

Modelo oceánico CROCO

El dominio del modelo cubre el océano Pacífico tropical este desde 22° S a 4° N y desde 94° O hasta la costa de América del Sur. La resolución espacial es de 1/9° (~12 km) con 32 niveles verticales que siguen el terreno (con una resolución más alta en la capa superior del océano). La topografía del fondo se deriva del conjunto de datos ETOPO2 (resolución 2') (Smith y Sandwell, 1997). El modelo se configura para cubrir el periodo 2000-2022, partiendo de la solución de Montes et al. (2011). Como condiciones de frontera se utilizan 4 fuentes de datos de modelos globales: el reanálisis del Programa Oceánico Paralelo de Asimilación de Datos Oceánicos Simples (SODA-POP versión 2.4.3, Carton y Giese, 2008) durante el periodo 2000-2015, MERCATOR GLORYS12V1 para el periodo 2016-2019, MERCATOR PSY4V2 para el periodo 2020-2022 y MERCATOR PSY4V3R1 para el periodo 2023. Cabe señalar que todos los productos utilizados son modelos globales de asimilación de datos oceánicos.

Modelo atmosférico WRF

El dominio del modelo cubre la región entre 23° S y 4° N y desde 97° O hasta 66° O, con una resolución espacial de 30 km. WRF está utilizando datos del NCEP FNL (Análisis Troposférico Global del Modelo Operacional) cada 6 horas en el periodo 2000 - 2022. Cabe señalar que WRF utiliza el esquema de Nakanishi y Niino (2006) para la capa límite planetaria (PBL5), Hong y Lim (2006) para el esquema de microfísica (MP6) y Kain-Fritsch (Kain, 2004) para las nubes tipo cúmulos.

Validación preliminar

La validación preliminar realizada del componente atmosférico (precipitación, temperatura del aire y velocidad del viento) para el modo diagnóstico (Castillón et al., 2023) indica que el modelo acoplado es suficientemente realista para ser usado en investigación y, por tanto, para implementar el modo pronóstico. Ello se evidencia en la Figura 2, donde se ha hecho uso de los datos de precipitación del GPM (Global Precipitation Mission) y PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations; Huerta et al., 2022) entre el periodo 2001-2020 para comparar con las salidas del modelo acoplado. Los productos utilizados han sido regrillados a la resolución espacial del componente atmosférico del modelo acoplado (30 km) y, tanto el modelo como los datos de los diferentes productos, han sido trabajados a escala mensual.

Específicamente, se puede observar que el ciclo anual de la precipitación, calculada a partir de los datos simulados y observados (GPM y PISCO), es bien representado tanto en dos regiones oceánicas (O1: 85°-81.5° W/ 3.5°-7° S; O2: 80°-78° W/11°-13.5° S) como en tres regiones continentales (C1: 81°-79.3° W/4°-6° S; C2 : 75°-72° W/3.5°-5.5° S; C3 : 76°-74° W/11°-13.5° S). Cabe señalar que las regiones continentales seleccionadas cuentan con información del ciclo anual de precipitación obtenida mediante estaciones pluviométricas: C1 abarca la región Piura (Rau et al., 2017); C2, la Amazonía (Espinoza et al., 2010; Figueroa et al., 2020); C3, la cuenca del Mantaro (Giraldez et al., 2020).

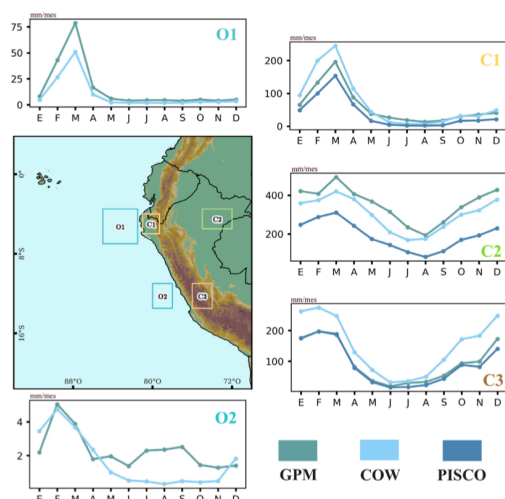


Figura 2. Ciclo anual de precipitación del período 2001-2020 calculado a partir de los datos simulados (IGP RESM-COW v,1) y observados del producto GPM y PISCO en cinco regiones: oceánica norte (O1), costa norte (C1), amazónica (C2), oceánica central (O2) y centro andino (C3). Extraído de Castellón et al. (2023).

La validación preliminar del componente oceanográfico (temperatura superficial del mar) para el modo diagnóstico (e.g., Segura & Montes, 2021) corrobora que el modelo acoplado es capaz de reproducir la dinámica de la región de estudio. Esto se observa en la Figura 3, donde se ha calculado el ICEN (Índice Costero El Niño; Takahashi et al., 2014) referido a la media móvil de tres meses de la anomalía de la TSM en la región Niño 1+2, obtenida de los datos de la TSM en tiempo real de la fuente ERSST v3b menos la climatología del periodo 1981-2010. Además, se ha utilizado el producto OISST AVHRR, es decir, la TSM de interpolación óptima diaria del satélite/sensor (NOAA/AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer) de resolución 25 km, para calcular el ICEN. El análisis comparativo de las series de tiempo calculadas a partir de los datos observados y del modelo acoplado muestra que todas las curvas se ajustan a los valores reales. Se muestra también que la anomalía de la TSM es sobreestimada para el 2002. Sin embargo, presenta una intensidad que se aproxima a lo observado para los fenómenos La Niña fuerte de 2007, 2010, 2013 y 2020-2022, El Niño fuerte del 2015, El Niño costero del 2017 y 2023 (Montes et al., *en preparación*).

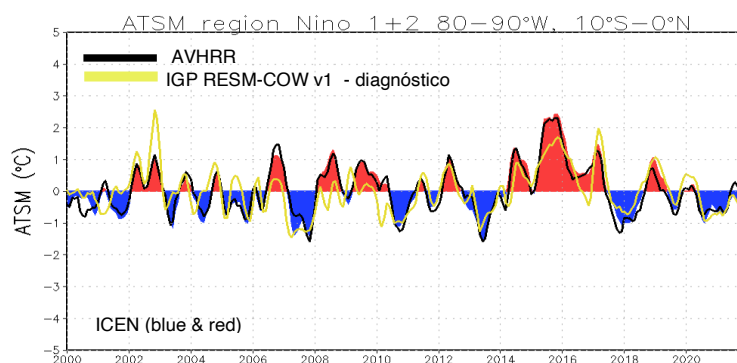


Figura 3. Serie de tiempo de la media móvil de 3 meses de la anomalía mensual de la TSM simulada por el modelo acoplado en modo diagnóstico 'IGP RESM-COW', así como observada de AVHRR e ICEN para la región Niño 1+2 en el periodo 2000-2022.

3.1.2 Simulación de pronóstico

El modelo acoplado en modo pronóstico es idéntico al modo diagnóstico en todos los aspectos, excepto en las condiciones de fronteras abiertas que emplea, tanto del océano como de la atmósfera, las cuales son derivadas del Sistema de Pronóstico Climático (*Climate Forecast System – CFS*¹). El CFS, producido por varias docenas de científicos bajo la dirección de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), modela las interacciones entre los océanos, la tierra/suelo y la atmósfera de la Tierra a escala global; proporcionando datos cada hora con una resolución horizontal de $\frac{1}{2}^\circ$ (aproximadamente 56 km).

Los datos del océano extraídos del CFS que son usados para forzar el modelo CROCO en modo pronóstico consisten en sólo 5 variables: la temperatura del mar, la salinidad, el nivel del mar y los campos de velocidad

¹ <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/climate-forecast-system>

zonal y meridional (Tabla N.º 1). Mientras que, los datos de la atmósfera extraídos del CFS para forzar el modelo WRF en modo pronóstico están compuestos por solo 6 variables: la temperatura, velocidad zonal y meridional, altura geopotencial, humedad relativa y presión a nivel del mar (Tabla N.º 1). Cabe señalar que los datos utilizados corresponden a los archivos rotativos CFS de 7 días (<https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/>) que se encuentran disponibles por una semana y que contienen datos completos de pronóstico de hasta 7 meses de anticipación para la atmósfera y el océano.

Tabla N.º 1. Variables extraídas del CFS utilizadas para forzar el modelo acoplado

Componente	Variable	Unidades
Atmósfera	Temperatura	K
	Velocidad zonal	m s ⁻¹
	Velocidad meridional	m s ⁻¹
	Altura geopotencial	m
	Humedad relativa	%
	Presión a nivel del mar	Pa
Océano	Temperatura	°C
	Salinidad	psu
	Velocidad zonal	m s ⁻¹
	Velocidad meridional	m s ⁻¹
	Nivel del mar	m

Método de corrección por sesgo o corrección climática

Cabe señalar que, previo a su utilización como condición de frontera del modelo acoplado regional, los datos de pronóstico del CFS (del océano y la atmósfera) deben pasar una corrección climatológica debido a que, para la región del océano Pacífico este, tienen un sesgo importante; mostrando una sobreestimación o subestimación de todos los valores dependiendo de la zona que se analice. Por ejemplo, para el caso de temperatura superficial del mar (Figura 4), la comparación de la climatología del CFS con la climatología del modelo MERCATOR² muestra una sobreestimación de entre 2 y 3 °C frente al mar peruano; aunque las características dinámicas, tal como el afloramiento costero y ecuatorial, pueden ser claramente visibles. Para el caso del viento superficial, la comparación entre el CFS y los datos satelitales de ASCAT (Advanced Scatterometer) muestran una sobreestimación de aproximadamente 2 ms⁻¹ (Figura 5b) acompañado de un patrón poco conocido del rotor del estrés o esfuerzo del viento (Figura 5a).

² Para este análisis se emplearon los datos del modelo global de MERCATOR debido a que utiliza un sistema de asimilación de datos, lo que permite incorporar datos observados: anomalías del nivel del mar de los satélites Jason, Envisat y GFO, temperatura superficial del mar de CORIOLIS, perfiles de temperatura y salinidad de ARGO, y mediciones *in situ* tomadas por boyas a la deriva, barcos y cruceros de investigación globales y regionales.

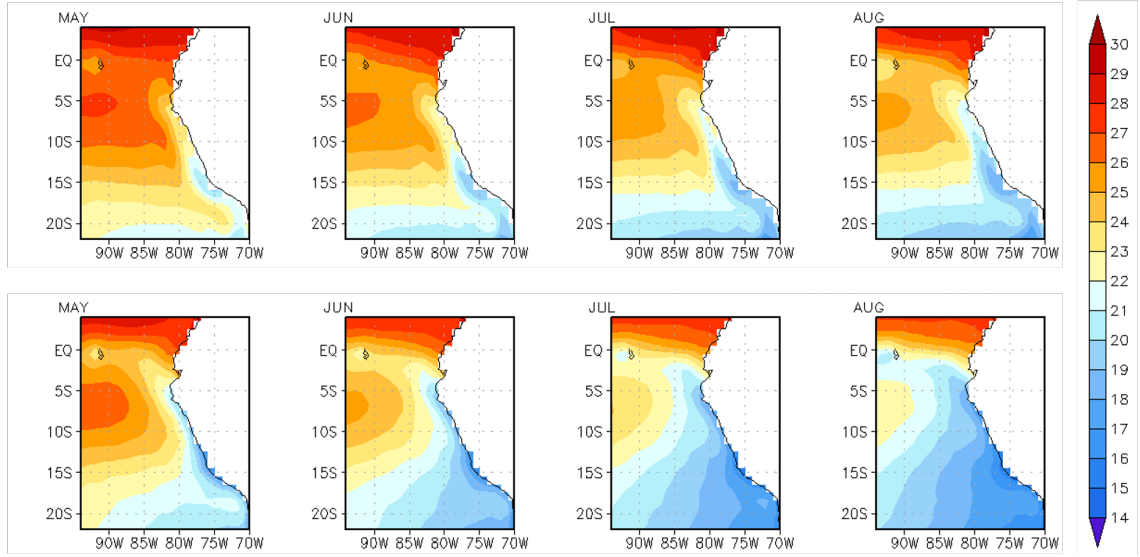


Figura 4. Variación de la Temperatura superficial del mar (°C) entre mayo y agosto calculada a partir de la climatología de los modelos CFS (paneles superiores) y de la climatología de MERCATOR (paneles inferiores).

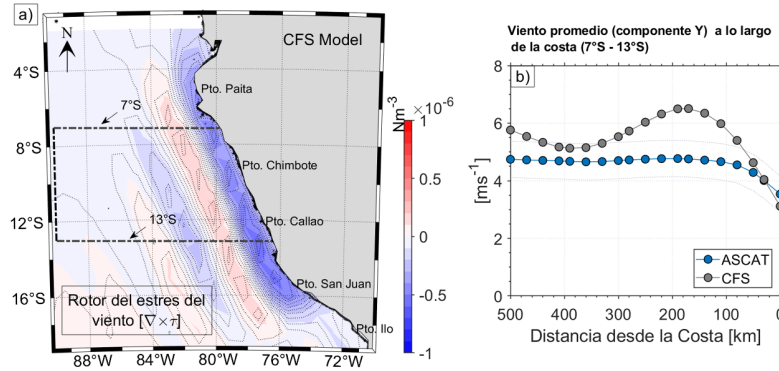


Figura 5. (a) Distribución horizontal del rotor del esfuerzo del viento calculado de la climatología del CFS. (b) Perfiles zonales promedio de la velocidad del viento obtenidos de la climatología del modelo CFS y las observaciones de ASCAT.

Por tanto, la corrección climatológica, también conocido como método de corrección por sesgos, trata de mejorar el ajuste de los datos del CFS con los datos observados mediante el cálculo de su diferencia bajo condiciones climatológicas, lo cual luego será sumado a los datos proyectados (Soriano et al., 2019), tal que:

$$T_{corr} = [T_{pronos} + (T_{clim-obs} - T_{clim-cfs})] \quad (1),$$

Donde T_{pronos} representa cada una de las variables proyectadas del CFS (según Tabla N.º 1, e.g., para la TSM, Figura 6 panel superior), $T_{clim-obs}$ es la climatología del dato observado (para el océano se utiliza la climatología de MERCATOR 1993-2019, y para la atmósfera se utiliza la climatología del FNL 2008-2022), $T_{clim-cfs}$ es la climatología del pronóstico del CFS 1982-2010, y T_{corr} es la variable corregida (Figura 6, panel inferior).

Una consideración importante es que el error del modelo CFS aumenta en el tiempo, dado que el CFS es inicializado con datos cercanos a lo real, así que el sesgo climático se va estableciendo conforme avanza el pronóstico. Por lo tanto, la corrección debe hacerse en forma diferenciada para cada mes de anticipación. Así, para estas correcciones, se ha calculado el error promedio climatológico de los datos retrospectivos del CFS para cada mes de condición inicial y de pronóstico (para 12 meses de condición inicial por año y hasta

7 meses de pronóstico por corrida, se tendría un total de $12 \times 7 = 84$ promedios), evitando que el modelo regional no se contamine con los sesgos de los datos de pronóstico del CFS.

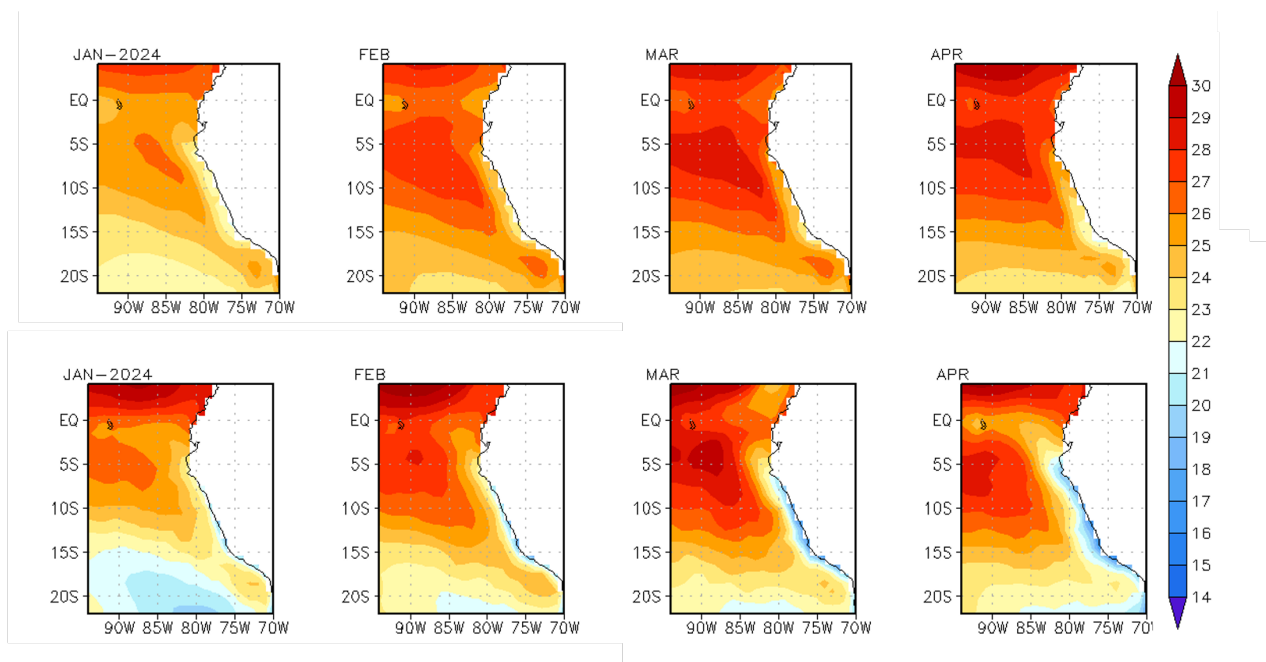


Figura 6. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar extraída de los datos proyectados del CFS (panel superior) sin aplicar la corrección climatológica y (panel inferior) aplicando la corrección climática, con condición inicial de diciembre 2023, para enero a abril 2024.

Validación del modo pronóstico enero – julio 2023

Se han efectuado corridas experimentales del modelo acoplado océano-atmósfera en modo pronóstico 'IGP RESM-COW v1' usando condiciones iniciales del CFS pronosticado, lo cual ha permitido (1) evaluar las técnicas necesarias (tanto de personal como computacionales) para completar la implementación, (2) aplicar la corrección climatológica a 11 variables que forman parte de las condiciones de frontera del modelo y (3) evaluar el realismo de la simulación ejecutada.

Para evaluar el realismo de la implementación en modo pronóstico, específicamente se ha realizado la configuración del modelo acoplado 'IGP RESM-COW v1' de pronóstico para el periodo enero-julio 2023. El resultado de la validación preliminar se resumen en la Figura 7, donde se muestra la temperatura superficial del mar (TSM) y la precipitación simuladas en la región Niño 1+2, con la TSM observada extraída del producto OISST AVHRR (es decir, la TSM de interpolación óptima diaria del satélite/sensor [NOAA/AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer] y con resolución de 25 km) y del GPM (Global Precipitation Mission). De la figura se desprende que, al comparar los datos pronosticados (líneas rojas) con lo observado (línea gris), el modelo acoplado en modo pronóstico es capaz de reproducir tanto la TSM como la precipitación para la región Niño 1+2. Mientras que, al comparar el dato observado (línea gris) con la salida del modelo acoplado en modo diagnóstico (línea negra) se observa una buena representación del ciclo estacional.

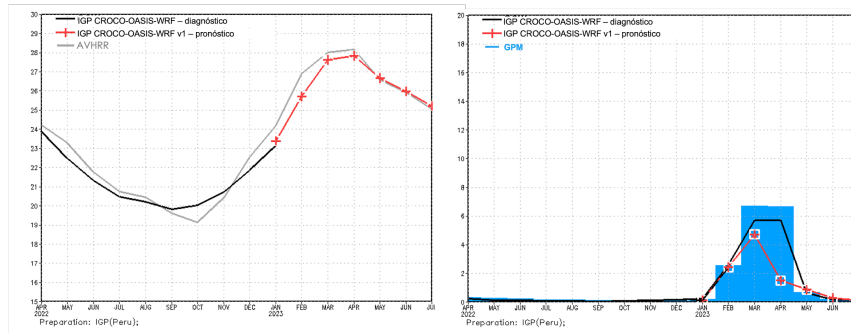


Figura 7. Series de tiempo del promedio mensual de la temperatura superficial del mar (panel derecha) y precipitación (panel izquierdo) en la región Niño 1+2 calculado con las salidas del modelo acoplado en modo diagnóstico periodo 2000-2022 (línea negra, que es usado como condición inicial para el modo pronóstico) y modo pronóstico periodo enero-julio 2023, con condiciones iniciales de enero 2023 (línea roja). Los datos observados del AVHRR (GPM) se presentan en línea gris (barra celeste).

4. Pronóstico diciembre 2023 - junio 2024

La Figura 8 muestra la evolución de las condiciones de la TSM y la precipitación para el pronóstico de 7 meses (diciembre 2023-junio 2024; correspondiente a la configuración del modelo acoplado 'IGP RESM-COW v1', el que utiliza las condiciones de frontera, así como la condición inicial de diciembre de 2023, de los datos provenientes de CFSv2 . El modelo pronostica principalmente la variación estacional de la TSM en la región Niño 1+2 (Figura 9a), en donde alcanza su máximo valor en febrero de 2024. Por otro lado, en base al Índice Costero El Niño (ICEN; ENFEN, 2012), el modelo indica que El Niño costero 2023-2024 se mantendría solo hasta enero de 2024 (Figura 9b), pasando luego a condiciones neutras en febrero y marzo . A partir de abril, las condiciones climáticas serían frías, consistentes con un evento La Niña costera. Hay que tener en cuenta que los pronósticos más allá de abril no son muy confiables debido a la barrera de predictibilidad y este modelo no estaría exento de este proceso. Además, solo se considera una corrida del modelo CFS, siendo necesario un mayor número de corridas (miembros de ensemble) y, eventualmente, incorporar datos de otros modelos globales para tener una mejor estimación de los posibles escenarios. En lo que respecta al pronóstico de la precipitación en la misma región, el modelo IGP RESM-COW v1 indica que si bien se darían algunas precipitaciones, estas no serían comparables a las que se registraron en fines de verano e inicios de otoño de 2023 en la región norte del país.

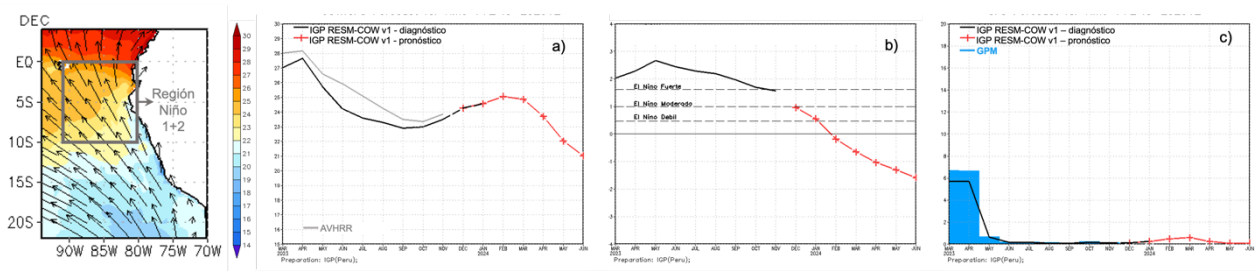


Figura 8. Series de tiempo del promedio mensual de la temperatura superficial del mar (TSM, a), ICEN (b) y la precipitación (c) para la región Niño 1+2 calculados a partir de las salidas del modelo acoplado en modo pronóstico 'IGP RESM-COW v1' periodo diciembre 2023 - junio 2024 (línea roja). Las líneas negras representan el cálculo de las variables previamente descritas con las salidas del modelo acoplado en modo diagnóstico del periodo 2000-2022, cuyo mes final es usado como condición inicial para el pronóstico. La línea gris y la barra celeste representan los datos observados del AVHRR y GPM, respectivamente. (Panel izquierdo) Promedio mensual de la TSM y vector de vientos a 10 m pronosticada para diciembre 2023 mostrando la región Niño 1+2.

5. Conclusiones

El modelo acoplado 'IGP RESM-COW v1' es el primer modelo regional en el Perú que considera la fuerte interacción entre el océano y la atmósfera, la cual es necesaria para la adecuada representación de los eventos El Niño costeros y constituye una herramienta valiosa para predecir con mayor exactitud y más detalle las condiciones del océano y la atmósfera para el océano Pacífico sudeste y el territorio peruano.

La validación inicial del modelo, tanto en modo diagnóstico como pronóstico, indica un buen desempeño, aunque esta deberá ampliarse con más años de pronóstico retrospectivos y con los pronósticos en tiempo real futuros. Asimismo, es necesario ampliar el número de corridas del modelo, incluyendo más miembros de ensemble del CFS, así como de otros modelos globales, para una mayor representatividad.

El pronóstico experimental inicializado con datos de diciembre de 2023 indica que El Niño costero 2023-24 se extendería solo hasta enero de 2024 y las precipitaciones pronosticadas no serían como las que se desarrollaron a fines de verano e inicios-mediados de otoño de 2023 frente a la costa norte.

Los campos de las variables climáticas pronosticadas estarán disponibles en forma actualizada en la Infraestructura de Datos Espaciales del IGP (<https://www.igp.gob.pe/servicios/infraestructura-de-datos-espaciales/>).

6. Perspectivas

Algunos pasos siguientes a mediano plazo para la mejora del modelo IGP RESM-COW serían:

- Ampliar el número de corridas por cada pronóstico, incorporando más miembros de ensembles y otros modelos globales, para tener un conjunto más representativo de predicciones. Esto, sin embargo, requerirá fortalecer los recursos computacionales del IGP, incluyendo personal de soporte especializado y conectividad, entre otros,
- Utilizar condiciones de frontera oceánica con alta resolución temporal para una mejor representación de la variabilidad subestacional.
- Realizar pronósticos retrospectivos para validar con mayor certeza el nivel de desempeño del modelo
- Reiniciar la corrida en modo diagnóstico usando las condiciones de frontera provenientes del reanálisis completo de MERCATOR periodo 1993-2023.
- Analizar las diferencias de los productos MERCATOR bajo los periodos utilizados.
- Incorporar otras componentes del Sistema Tierra, particularmente la componente de biogeoquímica oceánica, para contar con mayor información de relevancia a los ecosistemas.

7. Referencias

- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 215-231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadí, A., Poulain, F. & Harrod, C. 2020. El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 660. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8348en>
- Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Kug, J., Takahashi, K., & McPhaden, M. J. (2020). *ENSO Diversity. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, 65–86. doi:10.1002/9781119548164.ch4
- Carton, J., Chepurin, G., & Chen, L. (2018). SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis. *Journal of Climate*, 31, 6967-6983, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1.
- Cambon et al. (2014). The ROW Coupled System, Workshops ROMS/TOMS, Croatia.
- Castillón, F., Segura, B., Montes, I. (2023), Validación de la componente atmosférica del sistema acoplado regional océano-atmósfera del Pacífico sudeste. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 10 n. o 01, págs. 9-12.

- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., y Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1–21.
- Dewitte, B., Takahashi, K., Goubanova, K., Montecinos, A., Mosquera, K., Illig, S., Montes, I., Paulmier, A., Garçon, V., Purca, S., Flores, R., Bourrel, L., Rau, P., Labat, D., Lavado, W., & Espinoza, J. C. (2014). 9. Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú. En S. González Molina & J.-J. Vacher (Eds.), *El Perú frente al cambio climático* (pp. 125-140). IRD Editions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.19877>
- Ding, Hui, Matthew Newman, Michael A. Alexander, and Andrew T. Wittenberg (2020) Relating CMIP5 Model Biases to Seasonal Forecast Skill in the Tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2019GL086765>.
- Echevin, V., F. Colas, D. Espinoza-Morriberon, L. Vasquez, T. Anculle, and D. Gutierrez (2018) Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño Off Northern Peru and Ecuador. *Frontiers in Marine Science* 5(367). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00367>.
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., Carranza, J., Cochonneau, G., De Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P., & Guyot, J. L. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina. Repositorio Institucional - SENAMHI. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1047>
- ENFEN (2012). Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú. Nota Técnica. 3 pp.
- Figueroa, M., Armijos, E., Espinoza, J. C., Ronchail, J., & Fraizy, P. (2020). On the relationship between reversal of the river stage (repiquetes), rainfall and low-level wind regimes over the western Amazon basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100752>
- Giraldez, L., Silva, Y., Zubieta, R., & Sulca, J. (2020). Change of the Rainfall Seasonality Over Central Peruvian Andes: Onset, End, Duration and Its Relationship With Large-Scale Atmospheric Circulation. *Climate*, 8. <https://doi.org/10.3390/cli8020023>
- Heino, M., Puma, M. J., Ward, P. J., Gerten, D., Heck, V., Siebert, S., & Kumm, M. (2018). Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations. *Nature Communications*, 9(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02071-5>
- Hong, S., y Lim, J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, 42, 129–151.
- Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., & Obando, F.O. (2022) High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp_h). Data in Brief, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340922007776>
- Jean-Michel, L., Eric, G., Romain, B. B., Gilles, G., Angélique, M., Marie, D., ... & Pierre-Yves, L. T. (2021). The Copernicus global 1/12 oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis. *Frontiers in Earth Science*, 9, 698876.
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 43, 170-181.
- Lellouche, J.-M., Greiner, E., Le Galloudec, O., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., et al. (2018). Recent Updates to the Copernicus Marine Service Global_Ocean Monitoring and Forecasting Real-Time 1/12° High-Resolution System. *Ocean Sci.* 14, 1093–1126. doi:10.5194/os-14-1093-2018
- Montes, I., Schneider, W., Colas, F., Blanke, B., y Echevin, V. (2011). Subsurface connections in the eastern tropical Pacific during La Niña 1999–2001 and El Niño 2002–2003. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C12), doi:10.1029/2011JC007624.
- Montes, I., Mosquera, K., Luna, M., Gilt, H., Gazen, D., & Woodman, R. (2016). Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 3(3). <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4663>
- Nakanishi, M., y Niino, H. (2006). An Improved Mellor-Yamada Level 3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397-407. <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>
- Peng, Q., Xie, S.-P., Wang, D., Zheng, X.-T., & Zhang, H. (2019). Coupled ocean-atmosphere dynamics of the 2017 extreme coastal El Niño. *Nature Communications*, 10(1).doi:10.1038/s41467-018-08258-8
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143-158. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>

- Rivera Tello, G. A., Takahashi, K., & Karamperidou, C. (2023). Explained Predictions of Strong Eastern Pacific El Niño Events Using Deep Learning. *Scientific Reports*, 13 (1), 21150. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45739-3>.
- Segura, B. y Montes, I. (2021). Análisis de sensibilidad del sistema acoplado regional COW para el Pacífico sudeste. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 8(2), 12-17.
- Shchepetkin, A., & McWilliams, J. (2005). The regional oceanic modeling system: a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modelling* 9, 347–404.
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J., Duda, M., Barker, D., y Huang, X. (2019). A Description of the *Advanced Research WRF Version 4*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Smith, W.H. and Sandwell, D.T. (1997) Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*, 277, 1956-1962. <http://dx.doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>
- Soriano, E., Mediero, L., & Garijo, C. (2019). Selection of Bias Correction Methods to Assess the Impact of Climate Change on Flood Frequency Curves. *Water*, 11(11), 2266. doi:10.3390/w11112266
- Takahashi, K. (2022). Avances en el conocimiento y la predicción de El Niño y su diversidad en el Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 9 (7), 5-13.
- Takahashi, K., & Martínez, A. G. (2017). The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-017-3702-1
- Takahashi, K., & Dewitte, B. (2015). Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 46(5-6), 1627–1645. doi:10.1007/s00382-015-2665-3
- Takahashi, K., Karamperidou, C., & Dewitte, B. (2018). A Theoretical Model of Strong and Moderate El Niño Regimes. *Climate Dynamics*, 52 (12), 7477–93. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4100-z>.
- Valcke, S. (2013). The OASIS3 coupler: A European climate modelling community software, *Geoscientific Model Development*, 6(2), 373–388, doi:10.5194/gmd-6-373-2013.
- Yglesias-González, M., Valdés-Velásquez, A., Hartinger, S.M., Takahashi, K., Salvatierra, G., Velarde, R., et al. (2023). Reflections on the impact and response to the Peruvian 2017 Coastal El Niño event: Looking to the past to prepare for the future. *PLoS ONE* 18(9): e0290767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290767>

Apéndice: Distribución espacio-temporal de la temperatura del aire, temperatura superficial del mar (TSM) y precipitación calculado a partir de las salidas del modelo IGP RESM-COW v1

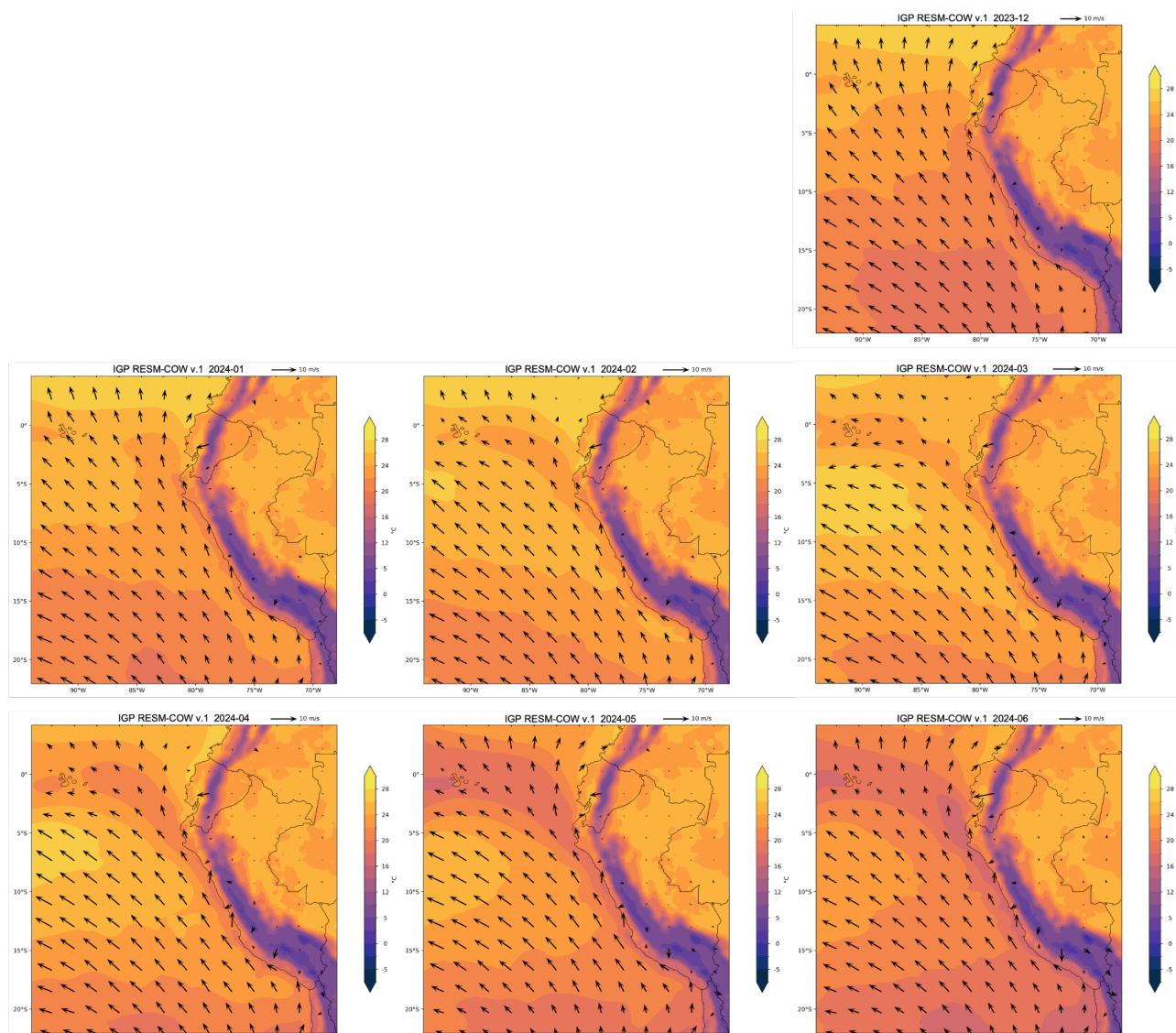


Figura A1. Promedio mensual de la temperatura del aire a 2 m y vector del viento a 10 m para todo el dominio del modelo IGP RESM-COW v1 pronóstico diciembre 2023-junio 2024 con condiciones iniciales de diciembre 2023.

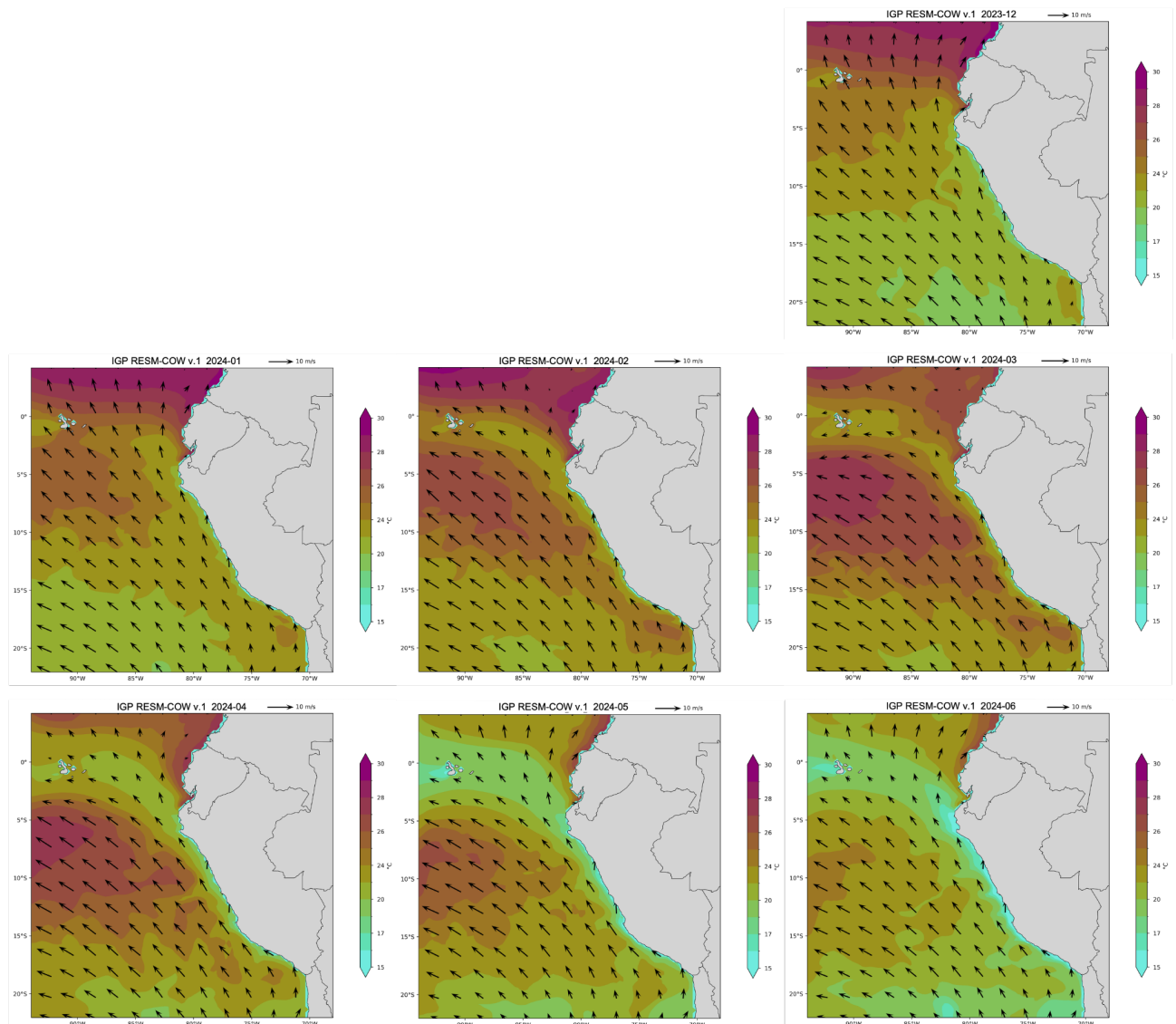


Figura A2. Promedio mensual de la temperatura superficial del mar y vector del viento a 10 m para todo el dominio del modelo IGP RESM-COW v1 pronóstico diciembre 2023-junio 2024 con condiciones iniciales de diciembre 2023.

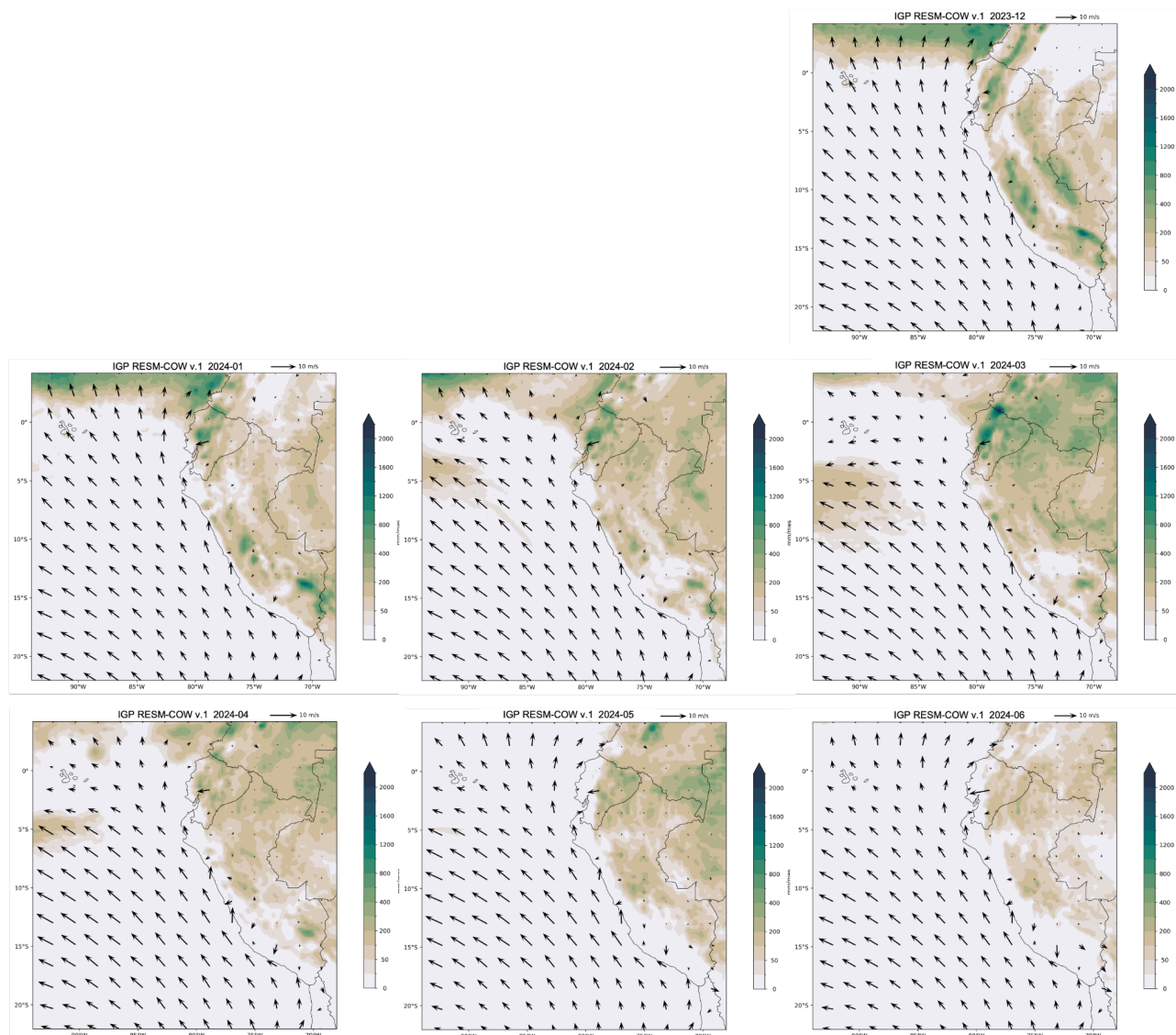


Figura A3. Promedio mensual de la precipitación y vector del viento a 10 m para todo el dominio del modelo IGP RESM-COW v1 pronóstico diciembre 2023-junio 2024 con condiciones iniciales de diciembre 2023.