

MODELADO BIOGEOQUÍMICO Y BIOLÓGICO BAJO. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ZONAS DE HUACHO Y MÁNCORA

PRODUCTO N°3

Descripción breve

Contiene el análisis del impacto del cambio climático en los nutrientes y el fitoplancton frente a las localidades de Huacho y Máncora.

Periodo de ejecución: 18º semana suscrito el contrato.

Presentación del producto: 13/04/2022

Claudia Durand – Hans Jara
AUTORES

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	02
II. MATERIALES Y METODOLOGÍA	06
II.1. Área de estudio	06
II.2. Modelo Físico-Biogeoquímico	07
II.3. Evaluación del modelo y análisis del impacto de Cambio climático	09
III. RESULTADOS	10
III.1. Evaluación de simulaciones regionales	10
III.2. Series de tiempo	12
III.3. Diferencias entre el presente y futuro	15
III.4. Tendencias espaciales	22
IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
V. CONCLUSIONES	29
VI. REFERENCIAS	30
VII. ANEXOS	33

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el océano se encuentra bajo un contexto de cambio climático en el que se ha observado un incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) y una notable pérdida de oxígeno en la columna de agua (Breitburg et al. 2018). Esto tiene consecuencias en la biota marina, provocando la migración de especies, así como, la mortalidad de muchas de ellas debido a la falta de oxigenación. Estas condiciones se espera que continúen en un contexto de cambio climático en el futuro.

En este contexto, para evaluar y simular los posibles escenarios futuros se ha formado el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), que es el organismo encargado de evaluar los potenciales impactos a futuro a causa de cambio climático, y actualmente se está utilizando los modelos de escenarios del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados de la fase 6 a escala global. Se han planteado cuatro escenarios llamados “vías representativas de concentración” (RCP, por sus siglas en inglés). Los escenarios RCP toman en cuenta los gases de efecto invernadero y varían según el nivel de forzamiento radiativo (2.6, 4.5, 6 y 8.5 W m⁻³) (Moss et al., 2010).

El escenario con niveles de forzamiento bajo es el RCP 2.6 (también llamado escenario optimista), el cual, se caracteriza porque la temperatura global aumenta 2° C y el nivel de CO₂ global llega a 490 ppm. Este escenario, se conoce como el escenario de “pico y declive” ya que, tiene la opción a la mitigación (Van Vuuren et al., 2011); mientras que, los escenarios intermedios son RCP 4.5 y RCP 6, donde los niveles de CO₂ llegan a 650 y 850 ppm, respectivamente. Finalmente, el escenario de riesgo o alto impacto, es el escenario RCP 8.5 (también conocido como escenario pesimista), en el cual, la temperatura global aumenta en 4° C y el nivel de CO₂ es mayor a los 1370 ppm (Figura 1) (Riahi et al., 2011). Como se mencionó, bajo estos escenarios de cambio climático (escenarios RCP), específicamente en el escenario RCP 8.5, a nivel global se espera un aumento de temperatura, pero también la disminución del oxígeno, nutrientes y la productividad, que se prolongaría hasta el año 2100 (Figura 2) (Bopp et al., 2013).

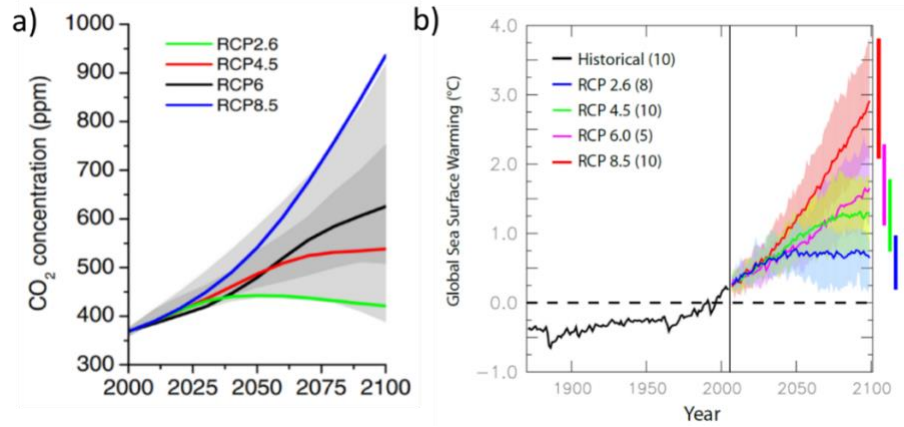


Figura 1. a) Proyecciones de la concentración de CO₂ y la b) temperatura superficial del mar global bajo escenarios de cambio climático (Bopp et al., 2013).

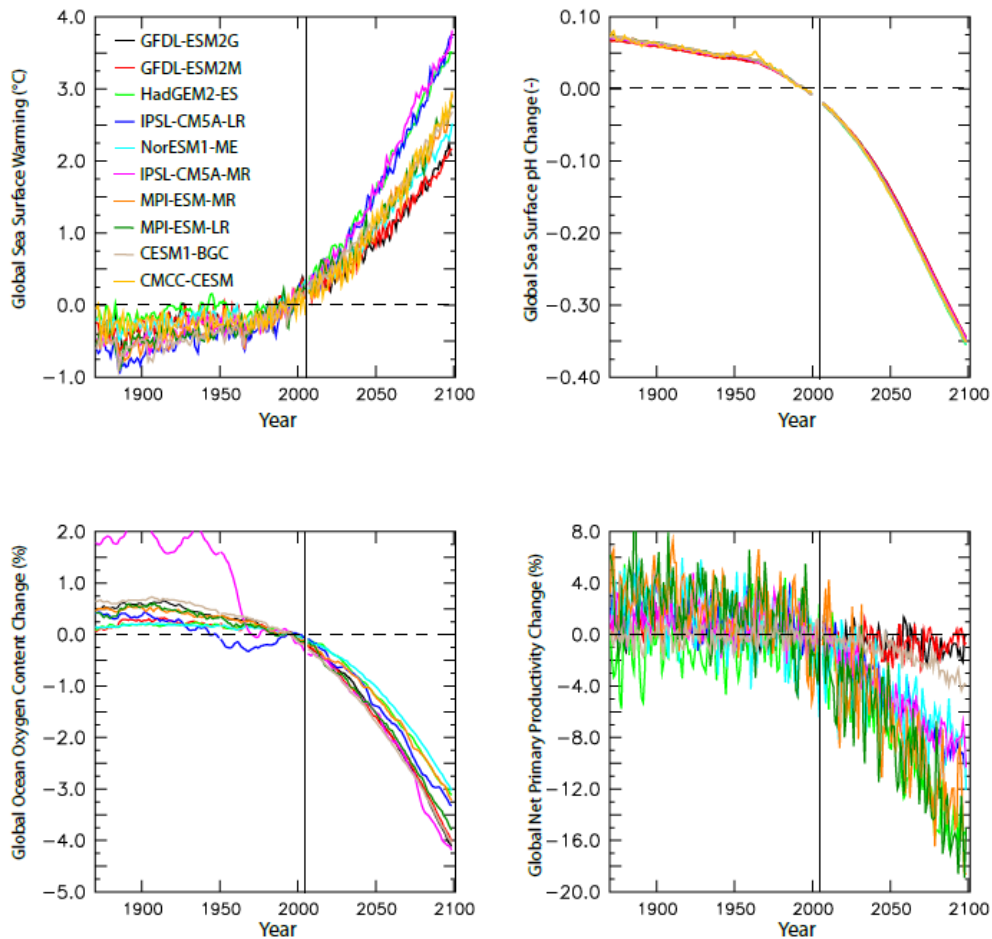


Figura 2. Evolución en % de la TSM, el pH, el oxígeno y la productividad usando simulaciones históricas, así como simulaciones RCP 8.5 (Bopp et al., 2013).

Bajo las condiciones ambientales anteriormente mencionadas encontramos el Sistema de Afloramiento costero peruano (SACP). Este sistema presenta características que lo hacen uno de los sistemas más productivos en el océano. A lo largo de la costa los vientos Alisios producen un afloramiento costero casi permanente durante el año que transporta a la superficie aguas frías, ricas en nutrientes y bajas en oxígeno, produciendo elevadas concentraciones de fitoplancton (Chavez & Messié 2009). Esta alta productividad mantiene biomasa abundante de especies comerciales (ej. anchoveta) y una gran diversidad. Encontramos también, una de las Zonas Mínimas de Oxígeno (ZMO, Paulmier & Ruiz-Pino, 2009) más intensas del océano, la cual limita el hábitat de muchas especies (Bertrand et al., 2011). Temporalmente, estas características son alteradas a escala interanual, por la fase fría (La Niña) y cálida (El Niño) de El Niño Oscilación Sur (ENOS).

Durante El Niño (EN), en el SACP, se observa un incremento de la TSM ($\sim +3^{\circ}\text{C}$), aguas más oxigenadas (Gutiérrez et al., 2008; Graco et al., 2017; Espinoza-Morriberón et al., 2019), con bajo contenido de nutrientes (Graco et al., 2017) y una disminución de las concentraciones de la clorofila-a (C1-a) superficial, indicador de la productividad (e.g. EN 1997-98; Espinoza-Morriberón et al., 2017). Esta disminución de la productividad durante EN, podría relacionarse con la alta mortalidad de especies de importancia comercial (Ñiquen & Bouchón, 2004) y de depredadores superiores debido a la poca disponibilidad de alimento (Tovar & Cabrera, 1985). Por otro lado, durante La Niña (LN) se presentan intensas anomalías negativas de la TSM ($< -0.8^{\circ}\text{C}$, Transmonte & Silva, 2008) y un afloramiento intenso posiblemente debido a la intensificación de los vientos Alisios, lo cual influiría en el incremento de la productividad (Sánchez, 2000). Sin embargo, Calienes (2014), a partir de análisis de laboratorio, menciona que, a pesar de una mayor distribución y concentración del fitoplancton, la tasa fotosintética se ve disminuida. Por último, podemos mencionar que especies como la anchoveta se ven favorecidas, ampliando su distribución espacial y biomasa a lo largo de la costa (Bouchón & Peña, 2008).

Como hemos mencionado, el SACP presenta una alta variabilidad influenciada por el ENOS. Sin embargo, a la actualidad también ha presentado algunas tendencias en sus variables oceanográficas. Se ha observado un enfriamiento de sus aguas cerca a la costa en las últimas décadas a pesar del aumento de la TSM global (Gutiérrez et al. 2011), y también un aumento de su productividad (Demarcq et al., 2009). La concentración de oxígeno en su columna de agua también ha ido disminuyendo principalmente en la zona norte-centro (Graco et al., 2017), debido al debilitamiento de las corrientes ecuatoriales

subsuperficiales que se dirigen hacia el continente americano (Espinoza-Morriberón et al., 2019). El impacto del cambio climático en el futuro también se ha estudiado en el SACP, bajo un escenario pesimista (Echevin et al., 2020). Echevin et al. (2020) muestran que, a nivel regional, mediante el uso de un modelo físico-biogeoquímico CROCO-PISCES, la temperatura aumenta en aproximadamente 4 °C hacia el 2100 y que diversos modelos concuerdan en eso. Sin embargo, en el caso de la componente biogeoquímica los modelos pueden presentar algunas discrepancias. Por ejemplo, la mayoría de modelos representan una disminución en los nutrientes y la clorofila frente a Perú, pero no hay una concordancia en la desoxigenación que se observa en el océano global.

En la actualidad en Perú se tiene interés de entender como el cambio climático podría influir en las condiciones biogeoquímica en los principales puertos pesqueros, debido a que son áreas que generan una actividad económica importante para la población circundante. En este contexto se viene desarrollando el Proyecto “Adaptación a los impactos del Cambio Climático en el ecosistema marino costero del Perú y sus pesquerías” ejecutado por Profonanpe – IMARPE, en el cuál se busca evaluar los impactos del cambio climático en algunos puertos pilotos como el de Huacho y Máncora. Por tal motivo el principal objetivo del presente informe busca evaluar el impacto del cambio climático en la productividad y los nutrientes frente a los puertos de Huacho y Máncora, debido a que la productividad soporta la biodiversidad de esas zonas costeras.

II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

II.1. Área de Estudio

El área de estudio abarca las localidades frente al puerto de Huacho ubicada entre 10.9°S y 11.4°S , y de Máncora entre 3.9°S y 4.4°S , ambas regiones dentro de las 60 mn principalmente. Para lograr este objetivo, ambas regiones provinieron de la simulación regional con el modelo CROCO-PISCES que se expandió de 5°N a 22°S y de 96°W a 69°W (Figura 3).

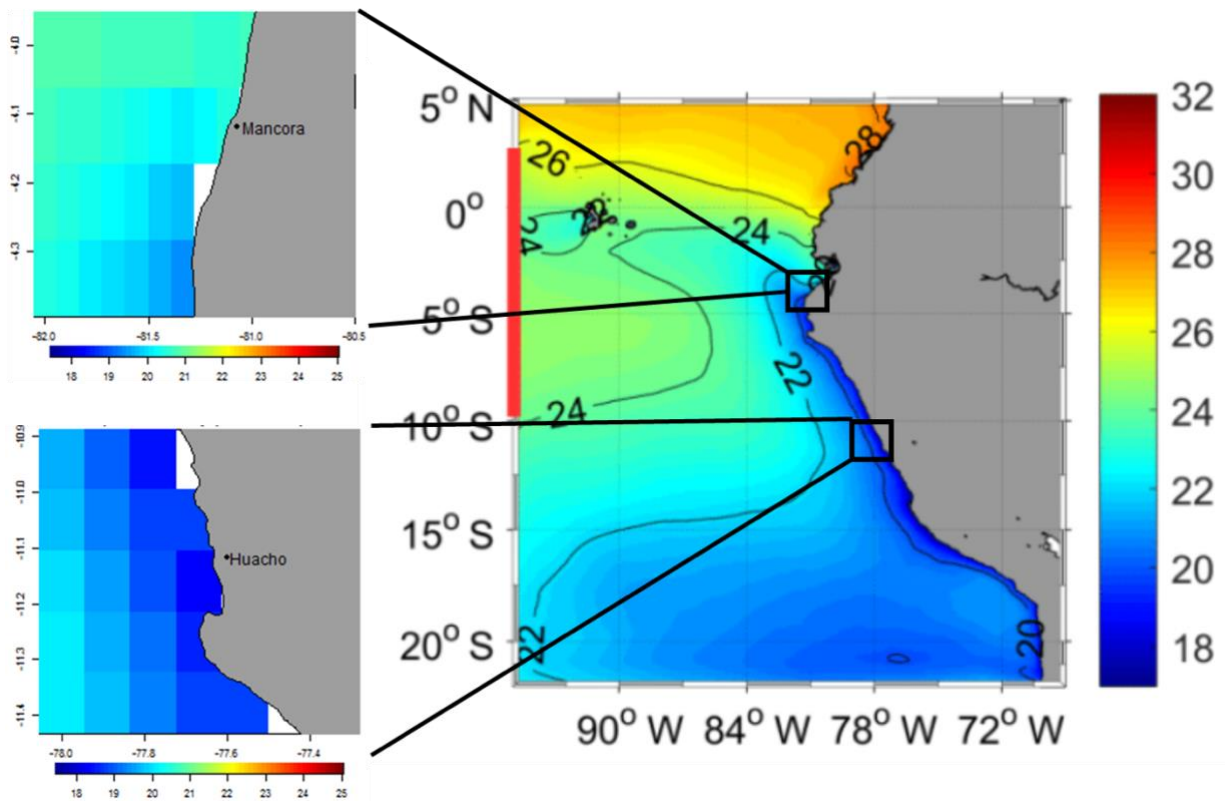


Figura 3. Regiones de estudio frente a Perú en el presente informe: Máncora y Huacho.

II.2. Modelo Físico-Biogeoquímico

Las variables oceanográficas físico-biogeoquímicas como la TSM, la clorofila-a, nitratos, silicatos y fosfatos bajo escenarios de cambio climático entre 2000 a 2100 fueron simulados a través de los modelo acoplado físico-biogeoquímico CROCO-PISCES.

Modelo Oceánico

Se utilizó el CROCO (por sus siglas en inglés, Coastal and Regional Ocean COmmunity model) que simula la dinámica del océano y resuelve las ecuaciones primitivas como la aproximación Boussineq y el balance hidrostático vertical momentum. La resolución de las simulaciones con este modelo es de $1/9^{\circ}$ que corresponde aproximadamente 12 km.

Modelo biogeoquímico

El modelo de Esquema de Interacción Pelágica para Carbono y Estudios de Ecosistemas (PISCES) (Aumont et al., 2015), el cual es un modelo biogeoquímico que simula la productividad biológica marina y los ciclos biogeoquímicos del carbón y principales nutrientes tales como fósforo, nitrógeno, silicio, hierro, además, del oxígeno disuelto. En este estudio se utilizó PISCES v.0 el cual, tiene 3 compartimentos inertes y 4 compartimentos vivos (2 clases de fitoplancton y 2 clases de zooplancton).

Configuración de las simulaciones

Las fronteras y los forzantes de las simulaciones provinieron de los modelos de emisión global (ESM) bajo 2 escenarios de cambio climático, el RCP 2.6 (escenario optimista) y RCP 8.5 (escenario pesimista).

Todos los globales debido al sesgo que presentan con los datos observados (Figura 4) fueron corregidos de acuerdo a la metodología planteada por Echevin et al. (2020).

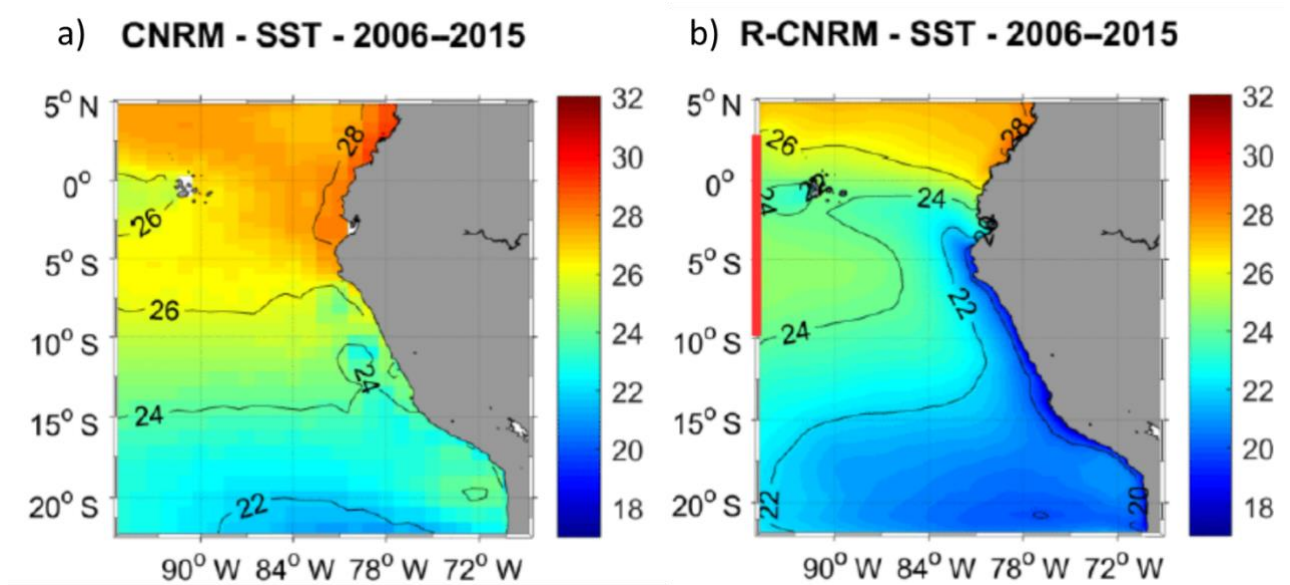


Figura 4. TSM promedio entre 2006 a 2015 de un modelo ESM (a) y del modelo regional CROCO-PISCES (b). Nótese que el modelo ESM no es capaz de reproducir el afloramiento cerca de la costa. Figura de Echevin et al. (2020).

Modelos de emisión (ESM)

Se seleccionaron 3 modelos globales del CMIP fase 5, como ya se explicó bajo 2 escenarios (RCP 2.6 y 8.5). Los modelos seleccionados fueron IPSL-CMSAMR, CNRM-CM5 y GFDL-ESM2M. Estos modelos fueron seleccionados debido a que reproducen aceptablemente la distribución de los nutrientes.

Por tal motivo se posee con 6 simulaciones regionales bajo escenarios de cambio climático para el periodo de 2000 al 2100. Se tomaron en cuenta los 10 primeros años como un periodo de estabilización del modelo.

Por último, cabe recalcar que las simulaciones regionales bajo el escenario pesimista provienen de Echevin et al. (2020) y las simulaciones regionales de Soto (com. pers.). Las simulaciones bajo escenarios optimistas siguieron la misma metodología de Echevin et al. (2020).

II.3. Evaluación del modelo y análisis del impacto de Cambio climático

Para evaluar los modelos regionales se tomó en cuenta como ellos representan las condiciones actuales de la TSM a lo largo de la costa de Perú. Se utilizó la data proveniente de los cruceros y estaciones fijas de IMARPE entre 1960 a inicios del 2000; así como, información de satélite de Pathfinder entre 1983 al 2010. De estas simulaciones fueron calculadas las climatologías tomando todo el periodo en el que se expanden. Se calculó la climatología de las simulaciones regionales tomando en cuenta el periodo del 2006 al 2015, para evitar el periodo de estabilización del modelo, y se calculó un hovmuller para evaluar la variación estacional de los datos observados y modelos dentro de los 100 km de la costa.

Para evaluar el impacto del cambio climático en las regiones de Huacho y Máncora se tomó en cuenta solo las condiciones superficiales, ya que, debido a la resolución del modelo, evaluar la columna de agua muy cerca a la costa podría brindarnos información no necesariamente que se pueda ajustar a la realidad. Para estudios futuros, se sugiere realizar un zoom en las regiones a evaluar debido a que la columna de agua podría estar influenciada por procesos más regionales originados por vientos y corrientes locales.

El impacto del cambio climático se evaluó de la siguiente manera:

- Calculando las series de tiempo de las anomalías de las variables seleccionadas para el estudio en ambas regiones seleccionadas. Las anomalías fueron calculadas sustrayendo la climatología del periodo 2006 al 2015 a los datos mensuales de las simulaciones. Además, las series de tiempo fueron calculadas dentro del área de 10.9 °S a 11.4°S para el caso de Huacho y de 3.9°S a 4.4°S para Máncora, dentro de los 30 km a la costa.
- Calculando mapas promedios de las variables de los periodos actual, mitad y fines del siglo XXI para observar sus diferencias.
- Por último, se calcularon tendencias espaciales (por punto de grilla del modelo regional) entre el 2016 al 2100. Estas tendencias fueron calculadas aplicando un modelo de regresión lineal entre las anomalías de las variables y el tiempo, y se expresaron en unidad de cambio de la variable por año.

III. RESULTADOS

III.1. Evaluación de las simulaciones regionales

Como se explicó en la metodología, la evaluación del modelo se enfocó en este informe principalmente en la distribución estacional en el periodo presente. En la Figura 5 podemos observar que los datos observados (IMARPE y Pathfinder), así como los provenientes de las simulaciones regionales en ambos escenarios muestran una distribución espacial y temporal congruente. Todas las fuentes de información presentan las mayores temperaturas durante verano y las menores durante invierno. El área más fría en todos los casos se observa entre los 14°S a 16°S entre julio y agosto, donde los valores oscilan entre 16 a 17 °C; aunque específicamente IMARPE, Pathfinder y el modelo IPSL-CM5A-MR (ambos escenarios) llegan a presentar valores ligeramente menores a 16 °C. En cuanto al periodo cálido de verano IMARPE, Pathfinder y las simulaciones muestran TSM mayores a 21 °C en toda esa estación, aunque IMARPE y Pathfinder presenta las isóneas de 23 °C entre los 4 °S a 7°S y al sur de los 17°C, distribución que es más congruente con el modelo CNRM-CM5 (ambos escenarios); sin embargo, los modelos GFDL-ESM2M e ISPL-CM5A-MR tienden a sobreestimar las condiciones cálidas entre los 4°S a 13°S durante verano respecto a los datos observados.

Respecto a las localidades de Huacho y Máncora, las simulaciones reproducen aceptablemente la estacionalidad de la TSM. En el caso de Máncora, a los 4°S aproximadamente, se puede apreciar que tanto las observaciones como las simulaciones regionales reproducen un periodo de invierno con temperaturas alrededor de los 18 °C, lo cual representa las condiciones más cálidas de esta estación a lo largo de la costa, posiblemente debido a su cercanía al ecuador. Así mismo, la estación de verano está caracterizado por temperaturas mayores a 23 °C. A la altura de Huacho, aproximadamente a los 11°S, se observa que la estación de verano presenta temperaturas alrededor de los 21 °C en las observaciones y el modelo CNRM-CM5; sin embargo, el modelo GFDL-ESM2M e ISPL-CM5A-MR presentan una TSM promedio de 23 °C, aunque ligeramente más cálido en el último modelo. En invierno, las aguas frías por debajo de los 18°C se disipan para dar paso a condiciones ligeramente más cálidas que a otras latitudes entre los 5°S a 18°S, lo cual es evidenciado tanto en observaciones como en las simulaciones regionales.

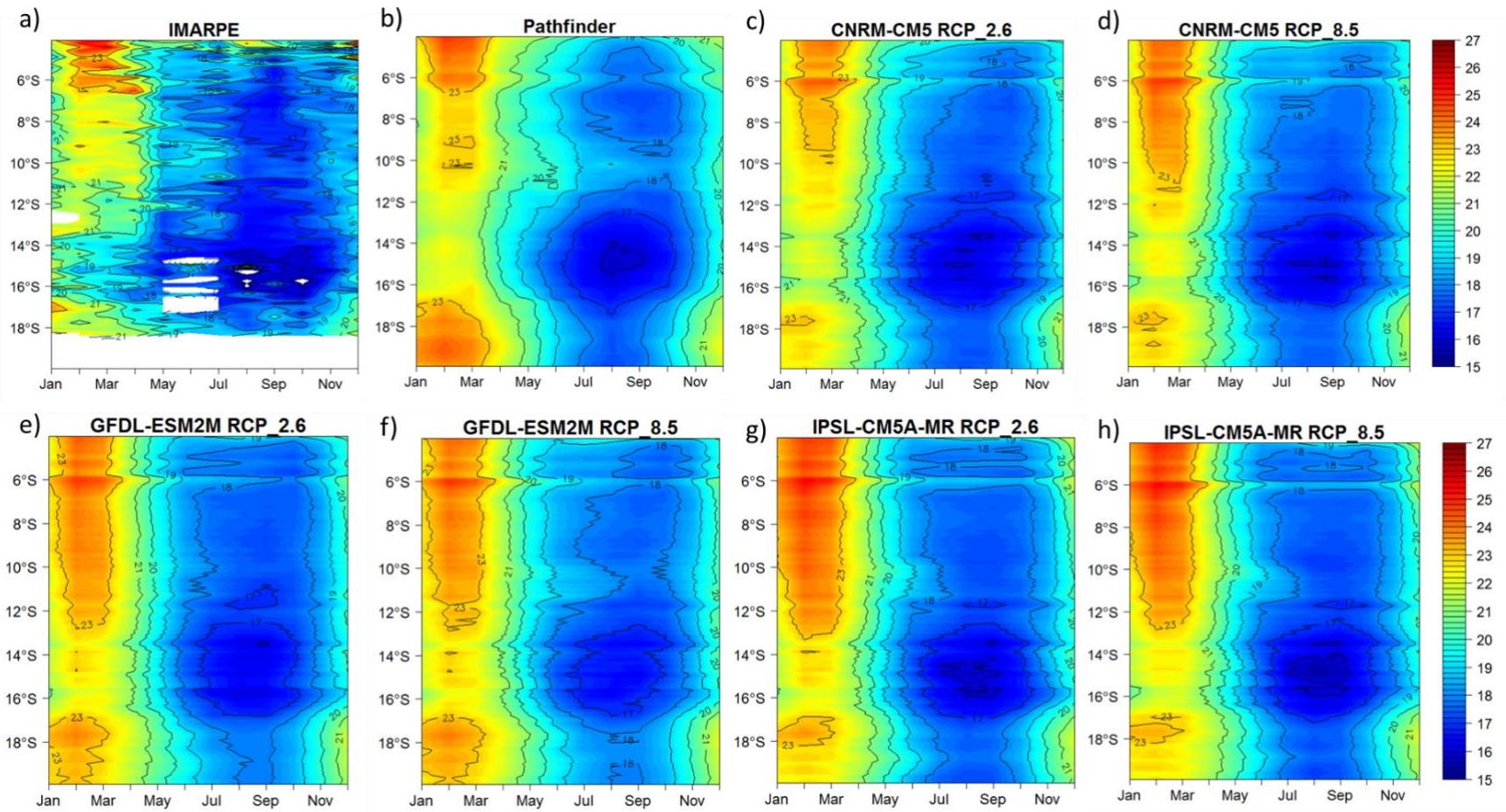


Figura 5. TSM promediada dentro de los 100 km a la costa de IMARPE (a), Pathfinder (b) y las simulaciones regionales (c-h, ambos escenarios) para el periodo actual.

III.2. Series de tiempo

Temperatura superficial del Mar

Como se puede observar en la Figura 6, todos los modelos reproducen un incremento de la TSM tanto en Máncora como en Huacho entre el 2016 al 2100 bajo un escenario pesimista. Los resultados del modelo en un escenario optimista no presentan cambios significativos respecto al presente. En Máncora para finales del siglo XXI el modelo CNRM-CM5 predice un aumento de $\sim 3^{\circ}\text{C}$, el modelo IPSL-CM5A-MR un aumento de $\sim 4^{\circ}\text{C}$ y el modelo GFDL-ESM2M un aumento de $\sim 2^{\circ}\text{C}$; mientras que, en Huacho se espera también un aumento de la TSM en la misma proporción que en Máncora de acuerdo a los modelos; sin embargo, el modelo IPSL-CM5A-MR predice un escenario más cálido ($\sim 5^{\circ}\text{C}$ de aumento). Cabe indicar que existe una variación decadal; sin embargo, la tendencia se mantiene al aumento en el periodo predicho.

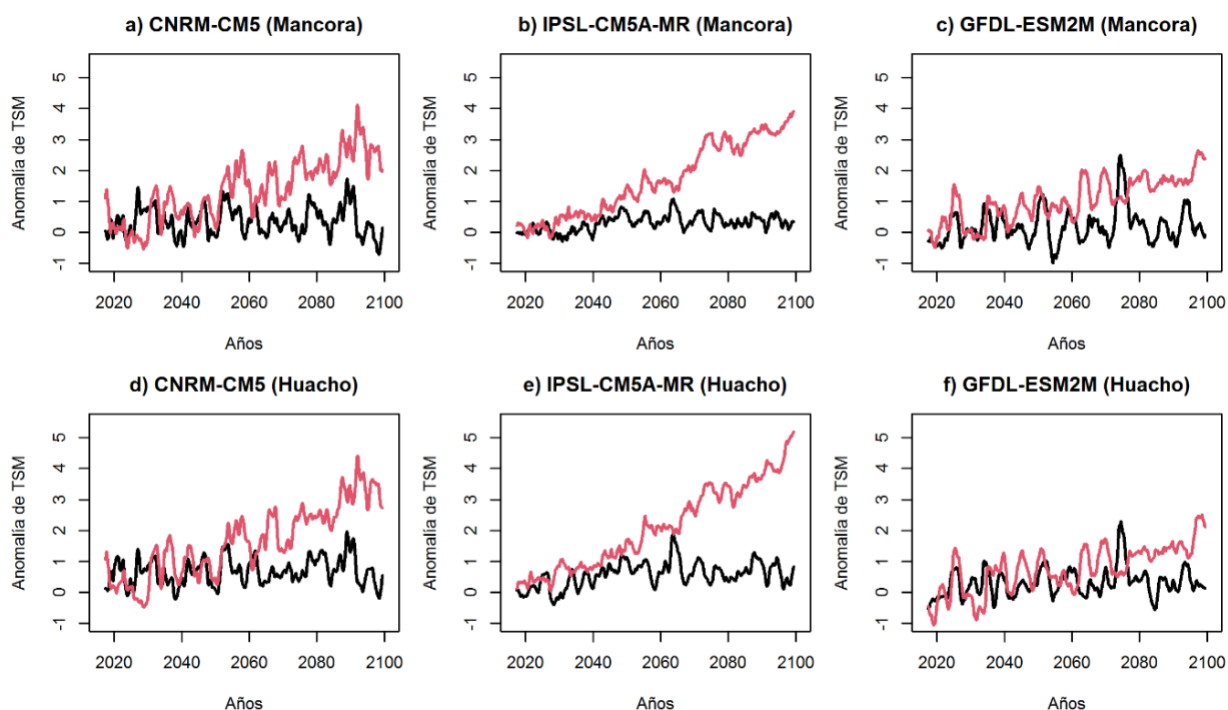


Figura 6. Series de tiempo de las anomalías de la TSM entre 2016 al 2100 para Máncora (arriba) y Huacho (abajo), de las simulaciones regionales en un escenario pesimista (línea roja) y optimista (línea negra).

Clorofila

Respecto a la productividad bajo un escenario pesimista (Figura 7) todos los modelos reproducen un aumento en superficie de la clorofila-a de diatomeas frente a Máncora, siendo los modelos CNRM-CM5 y IPSL-CM5A-MR, los que reproducen un mayor aumento, +1.0 y +0.8 mg m⁻³, respectivamente, a diferencia con el modelo GFDL-ESM2M en el cuál solo aumenta en +0.4 mg m⁻³. Los modelos bajo un escenario optimista no muestran cambios significativos respecto al presente.

En Huacho, las predicciones indican que la clorofila-a superficial de diatomeas no se vería significativamente afectada tanto bajo un escenario pesimista como optimista.

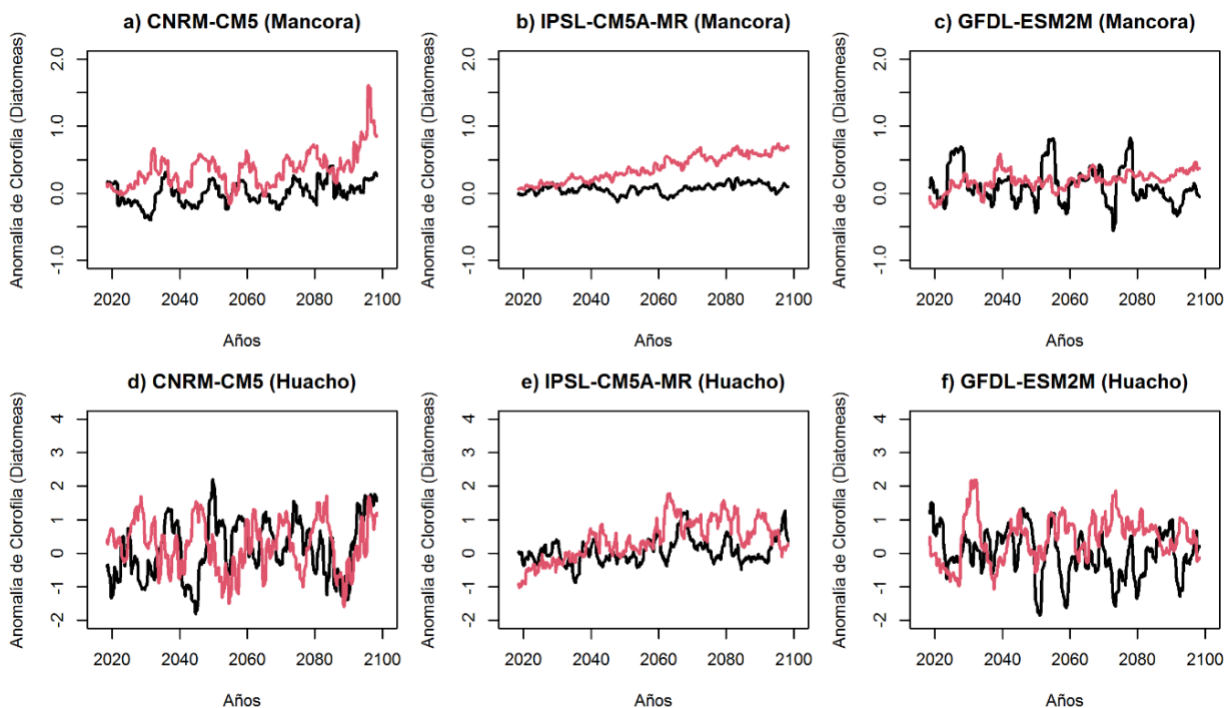


Figura 7. Series de tiempo de las anomalías de la clorofila-a superficial en diatomeas entre 2016 al 2100 para Máncora (arriba) y Huacho (abajo), de las simulaciones regionales en un escenario pesimista (línea roja) y optimista (línea negra).

Respecto a la clorofila-a superficial en nanofitoplancton, 2 de los modelos (CNRM-CM5 y IPSL-CM5A-MR) en Máncora reproducen una disminución hacia finales del 2100, aproximadamente de -0.05 mg m⁻³; mientras que en el modelo GFDL-ESM2M no se observado un cambio significativo. El escenario optimista no presenta cambios

significativos. Por último, para Huacho, tanto el modelo pesimista como el optimista no presentan un impacto significativo en el nanofitoplancton (Figura A1).

Nutrientes

En el caso de los nutrientes, la Figura 8 nos muestra que en Máncora los nitratos disminuyen bajo un escenario pesimista, siendo el modelo CNRM-CM5 el que reproduce un decrecimiento más intenso hacia el 2100 (-4 mL L^{-1}), a diferencia de los otros 2 modelos ($\sim -2 \text{ mL L}^{-1}$) respecto al presente. Bajo un escenario optimista no hay cambios significativos entre el presente y el futuro.

En Huacho, en un escenario pesimista los nitratos disminuyen CNRM-CM5 y IPSL-CM5A-MR en -6 y -3 mL L^{-1} , respectivamente, hacia fines del siglo con respecto al presente; sin embargo, el modelo GFDL-ESM2M no presenta cambios significativos. En cuanto, al escenario optimista solo el modelo CNRM-CM5 presenta una disminución de los nitratos superficiales (-2 mL L^{-1}); mientras que, los otros modelos no presentan una variación significativa respecto al periodo actual.

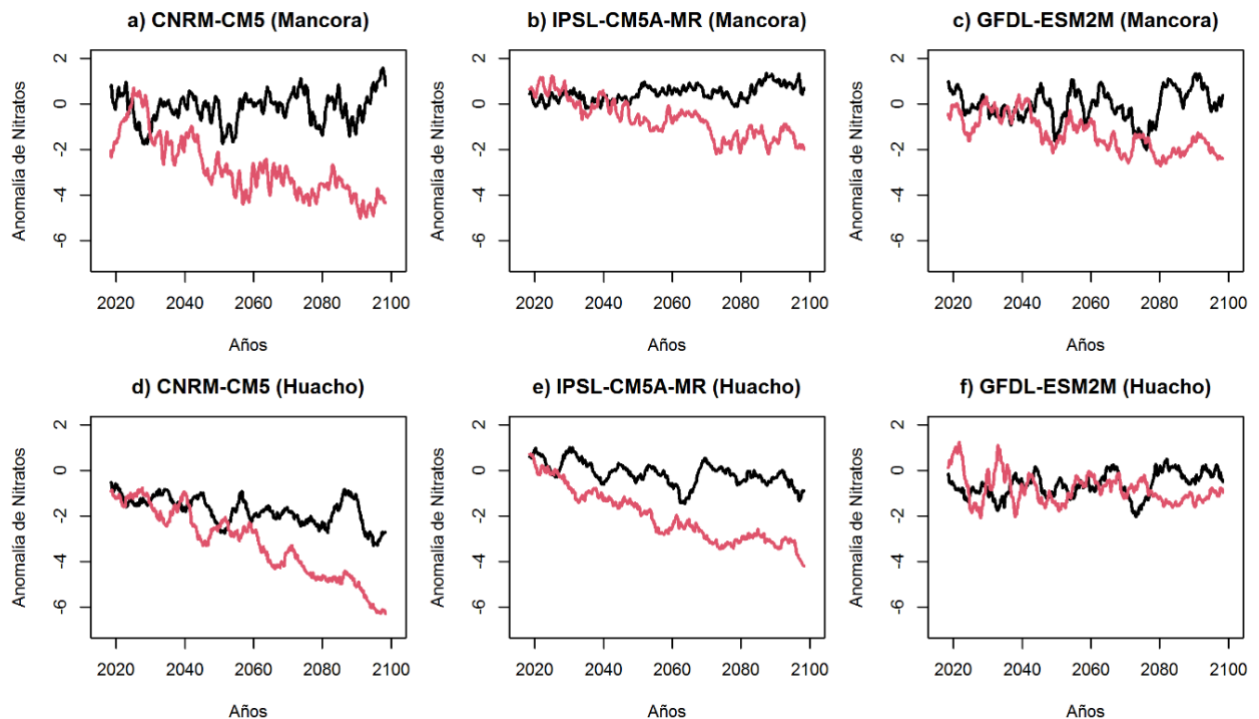


Figura 8. Series de tiempo de las anomalías de los nitratos superficiales entre 2016 al 2100 para Máncora (arriba) y Huacho (abajo), de las simulaciones regionales en un escenario pesimista (línea roja) y optimista (línea negra).

En cuanto a los silicatos y fosfatos, bajo un escenario pesimista todos los modelos presentan una disminución de sus concentraciones respecto al periodo presente. En Máncora los modelos pronostican una disminución promedio de -2 mL L^{-1} de los silicatos hacia el 2100, mientras que, en Huacho la disminución varía entre -2 a -4 mL L^{-1} , siendo más significativo en los modelos CNRM-CM5 y IPSL-CM5A-MR. Los silicatos no presentan una variación significativa bajo un escenario optimista ni en Máncora, ni en Huacho (Figura A2). Los fosfatos también presentan una disminución en todos los modelos bajo un escenario pesimista en Huacho y Máncora, siendo el modelo CNRM-CM5 el que presenta la mayor disminución hacia finales del siglo, con un valor de -0.4 mL L^{-1} en ambas localidades. Los otros 2 modelos en Máncora presentan una disminución promedio de -0.1 mL L^{-1} ; mientras que, en Huacho los modelos IPSL-CM5A-MR y GFDL-ESM2M presentan una disminución de -0.3 y -0.1 mL L^{-1} , respectivamente. Bajo el escenario optimista en ambas localidades los modelos no presentan cambios significativos en los fosfatos respecto al presente (Figura A3).

III.3. Diferencias entre el presente y futuro

Temperatura superficial del Mar

En congruencia con las series de tiempo, en las Figuras 9 a 11 se observa un incremento paulatino de la TSM en todos los modelos regionales bajo un escenario pesimista en Máncora y Huacho. En Máncora, en el modelo CNRM-CM5 la TSM alcanzaría los $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ alrededor de la región, respecto a los $20.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ que se observa en el presente; mientras que, en Huacho, dentro de las 30 mn, la TSM alcanzaría los $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respecto a los $17.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ que se observa en el presente (Figura 9). En el modelo IPSL-CM5A-MR es donde se observa el mayor incremento alrededor de las localidades de Huacho y Máncora, observándose una TSM de $22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, hacia finales de del siglo XXI. Este modelo es el que presenta un mayor incremento de temperatura respecto a los demás bajo un escenario pesimista (Figura 10). El modelo GFDL-ESM2M presenta un menor aumento de la TSM en Huacho y Máncora, respecto a los otros modelos hacia el 2100, observándose temperaturas alrededor de $20.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Figura 11).

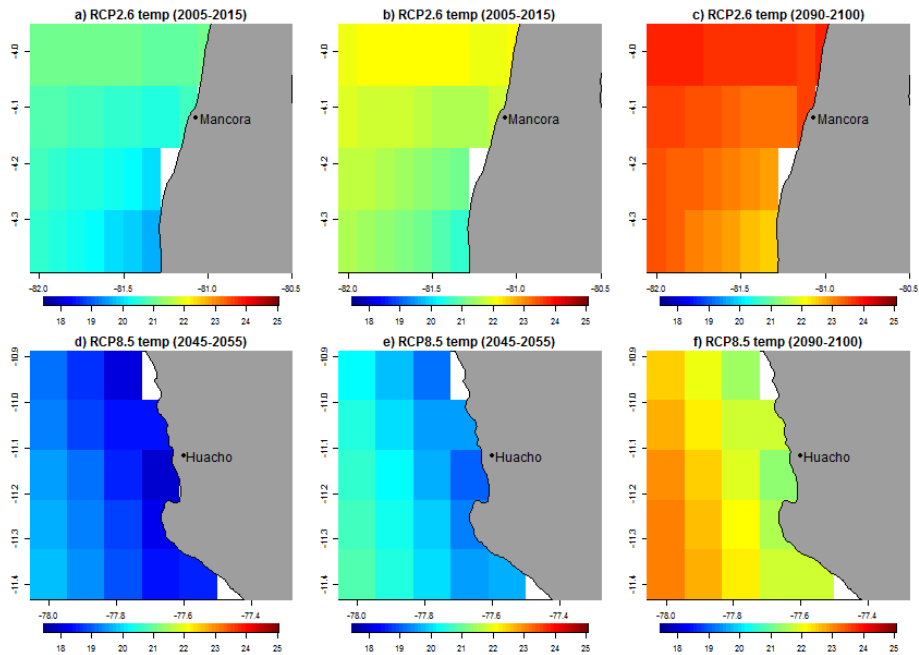


Figura 9. TSM promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo CNRM-CM5.

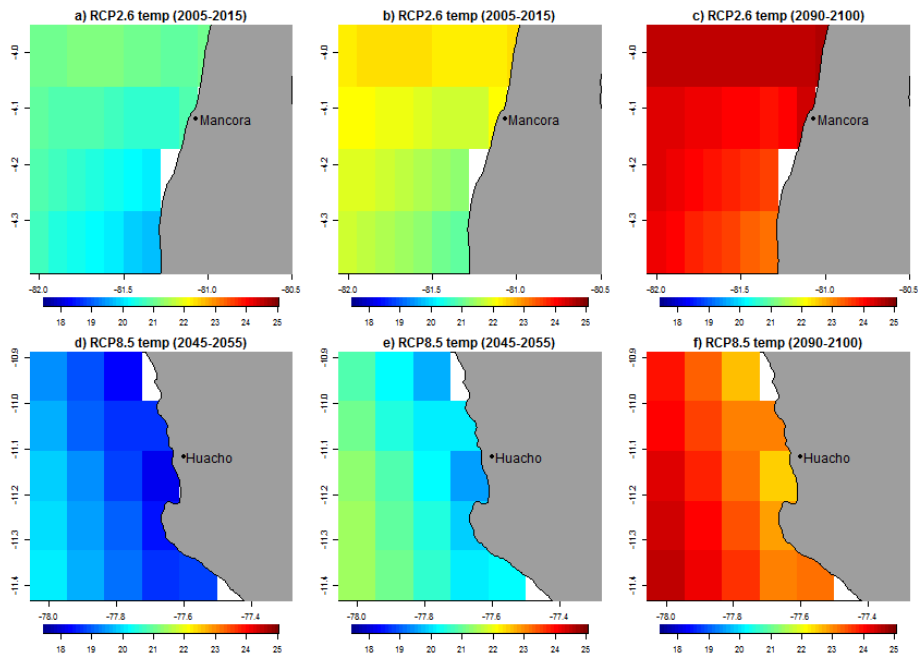


Figura 10. TSM promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo IPSL-CM5A-MR.

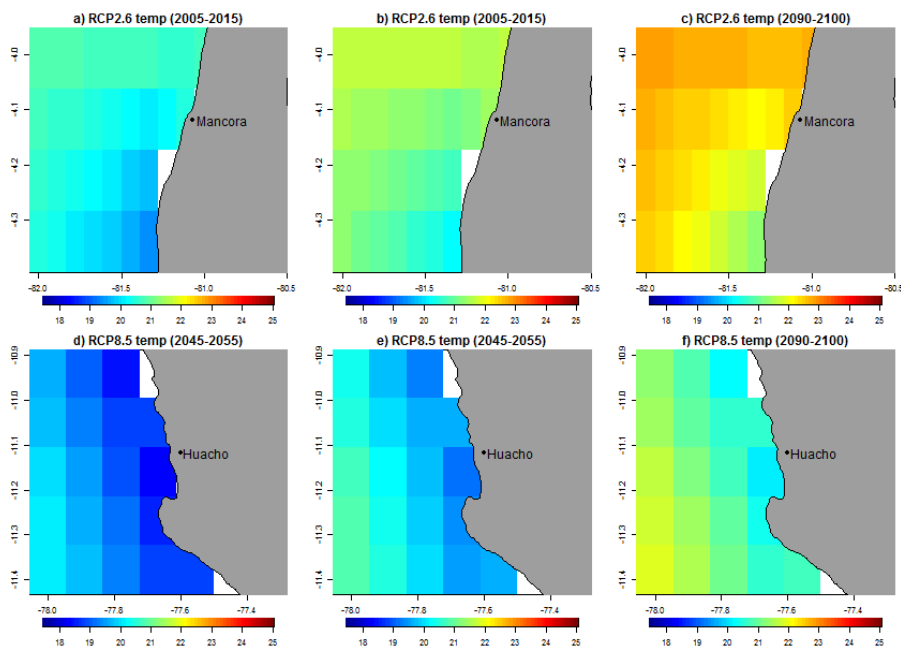


Figura 11. TSM promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo GFDL-ESM2M.

Clorofila

La clorofila-a superficial en diatomeas en los puntos de grilla cercanos a Máncora y Huacho muestran un incremento hacia el 2100 bajo un escenario pesimista (Figuras de 12 a 14). El modelo CNRM-CM5 para el 2100, en Máncora presenta valores máximos de $\sim 3.2 \text{ mg m}^{-3}$, a diferencia de la concentración de 2.2 mg m^{-3} en el periodo actual; mientras que, en Huacho, la clorofila-a superficial alcanzan valores entre 8 a 10 mg m^{-3} para el 2100, respecto a los valores de 6 a 8.5 mg m^{-3} que presenta en el periodo actual (Figura 12). En el modelo IPSL-CM5A-MR los máximos valores también se alcanzan para el 2100 tanto en Máncora y en Huacho, con valores máximos de 2.8 y 6.5 mg m^{-3} en promedio, respectivamente (Figura 13). Para el modelo GFDL-ESM2M, se observan valores máximos de 3.0 y 7.5 mg m^{-3} en el 2100 para Mancora y Huacho, respectivamente (Figura 14).

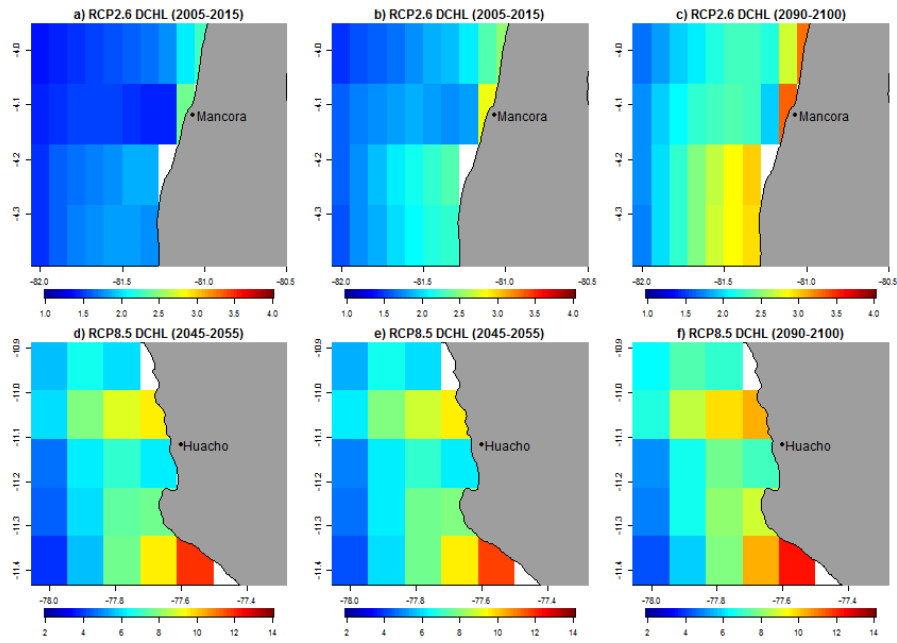


Figura 12. Clorofila-a superficial de diatomeas promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo CNRM-CM5.

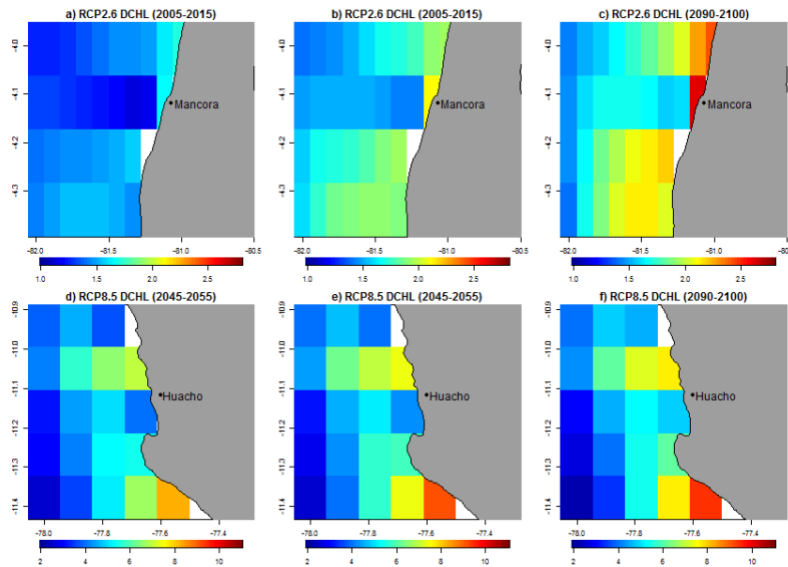


Figura 13. Clorofila-a superficial de diatomeas promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo IPSL-CM5A-MR.

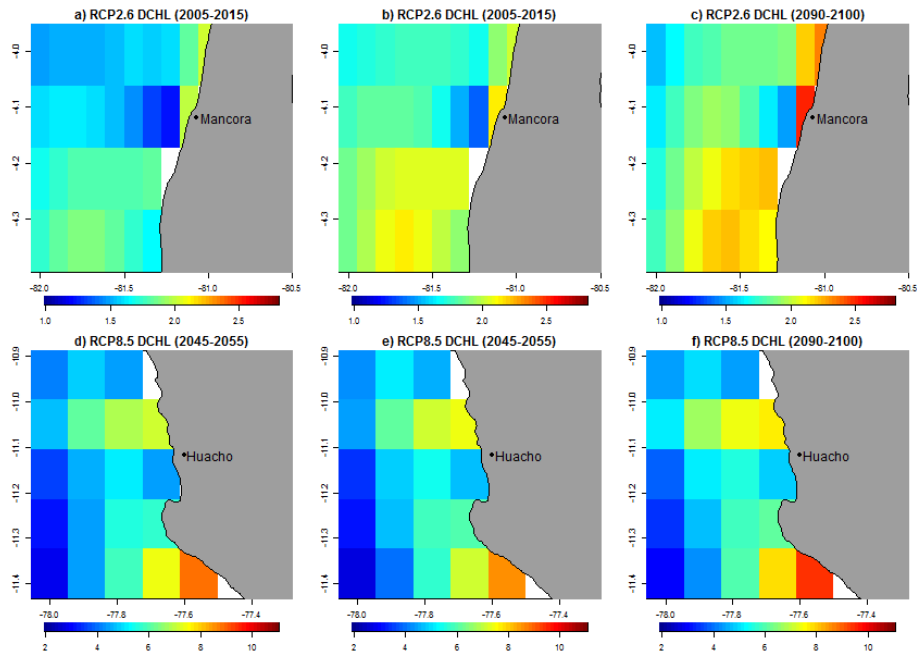


Figura 13. Clorofila-a superficial de diatomeas promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo GFDL-ESM2M.

Nutrientes

Respecto a los nitratos bajo un escenario pesimista, en el modelo CNRM-CM5, en Máncora se observa una disminución de los nitratos de 13 a 10 mL L⁻¹ entre el periodo actual y el futuro; mientras que, en Huacho la disminución en el mismo lapso de tiempo la disminución es de 14 a 10.5 mL L⁻¹ (Figura 15). Las concentraciones de nitratos para el modelo IPSL-CM5A-MR en un escenario pesimista para el 2100 están alrededor de 13 mL L⁻¹ y entre 10 a 12 mL L⁻¹, para Máncora y Huacho, respectivamente (Figura 16). El modelo GFDL-ESM2M también presenta disminuciones significativas en toda la región frente a Huacho y Máncora para el 2100 bajo un escenario pesimista (Figura 17).

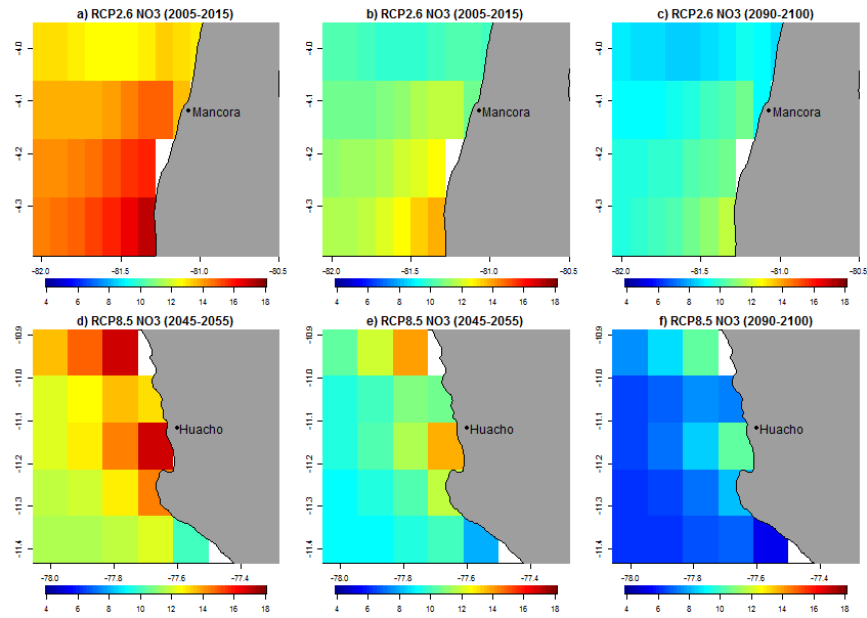


Figura 15. Nitrato superficial promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo CNRM-CM5.

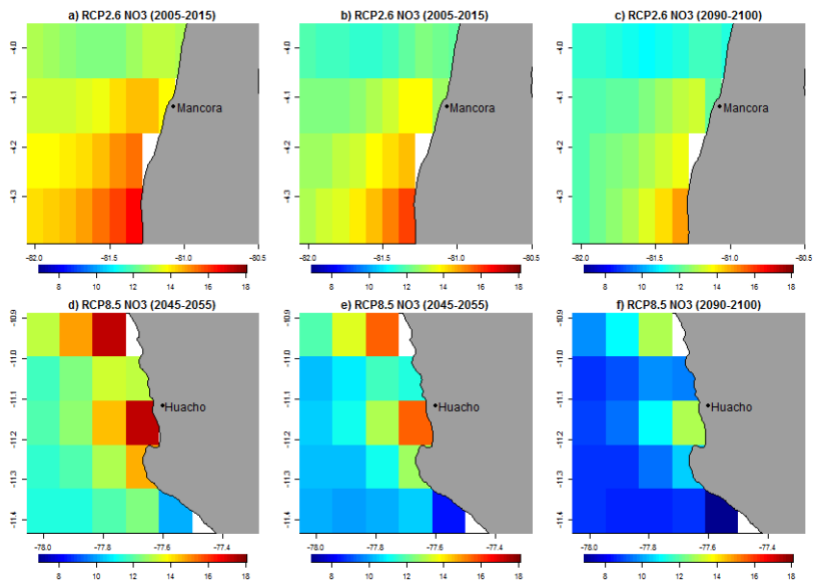


Figura 16. Nitrato superficial promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo IPSL-CM5A-MR.

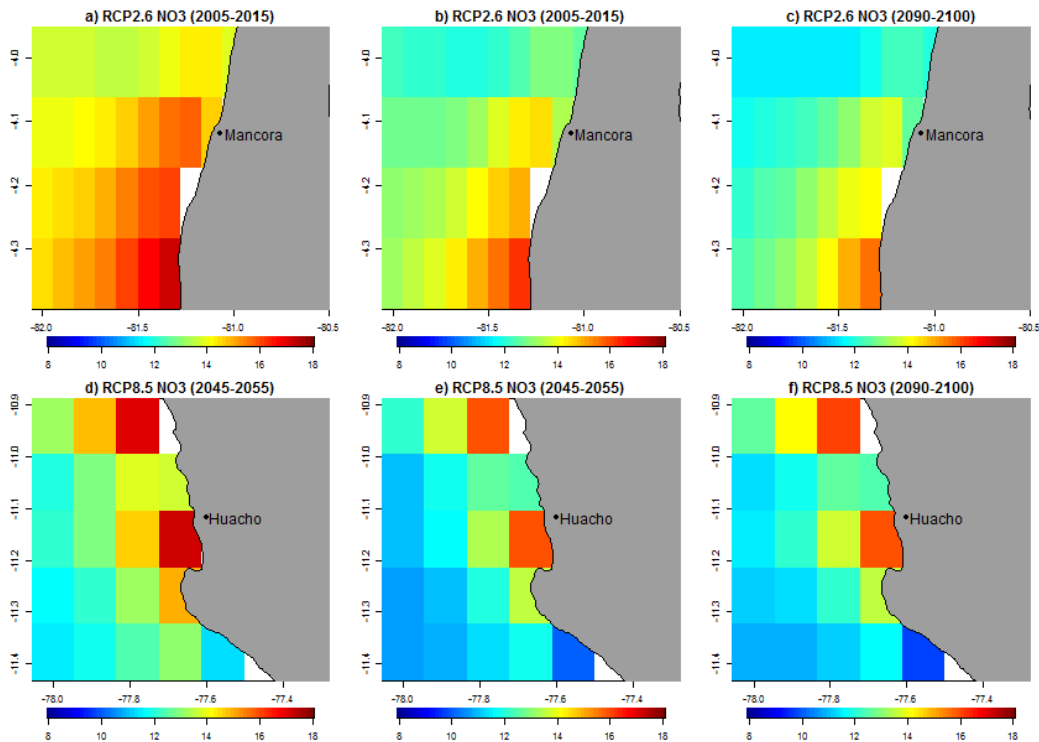


Figura 17. Nitrato superficial promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo GFDL-ESM2M.

Para el caso de los silicatos, en el 2100 para un escenario pesimista para todos los modelos presentan valores entre 10 y 12 mL L^{-1} en Máncora, con los menores valores en el modelo CM5A-MR; mientras que, en Huacho los valores para ese mismo periodo oscilan entre 8 y 12 mL L^{-1} , con los menores valores en el modelo IPSL-CM5A-MR (Figuras A4 a A6). Respecto a los fosfatos también es evidente la disminución de sus concentraciones alrededor de toda el área alrededor de Huacho y Máncora para el 2100 bajo un escenario pesimista (Figuras de A7 a A9).

III.4. Tendencias espaciales

Temperatura Superficial del Mar

El modelo IPSL-CM5A-MR es el que presenta las mayores tendencias en toda la región frente a Máncora y Huacho, observándose valores de 0.49 y 0.54 °C año⁻¹ en el punto de grilla más cercano, respectivamente, bajo un escenario pesimista (Figuras 18 y 19). Los otros 2 modelos también presentan predominantemente una tendencia positiva en Huacho y Máncora, sin embargo, casi la mitad por debajo del modelo IPSL-CM5A-MR.

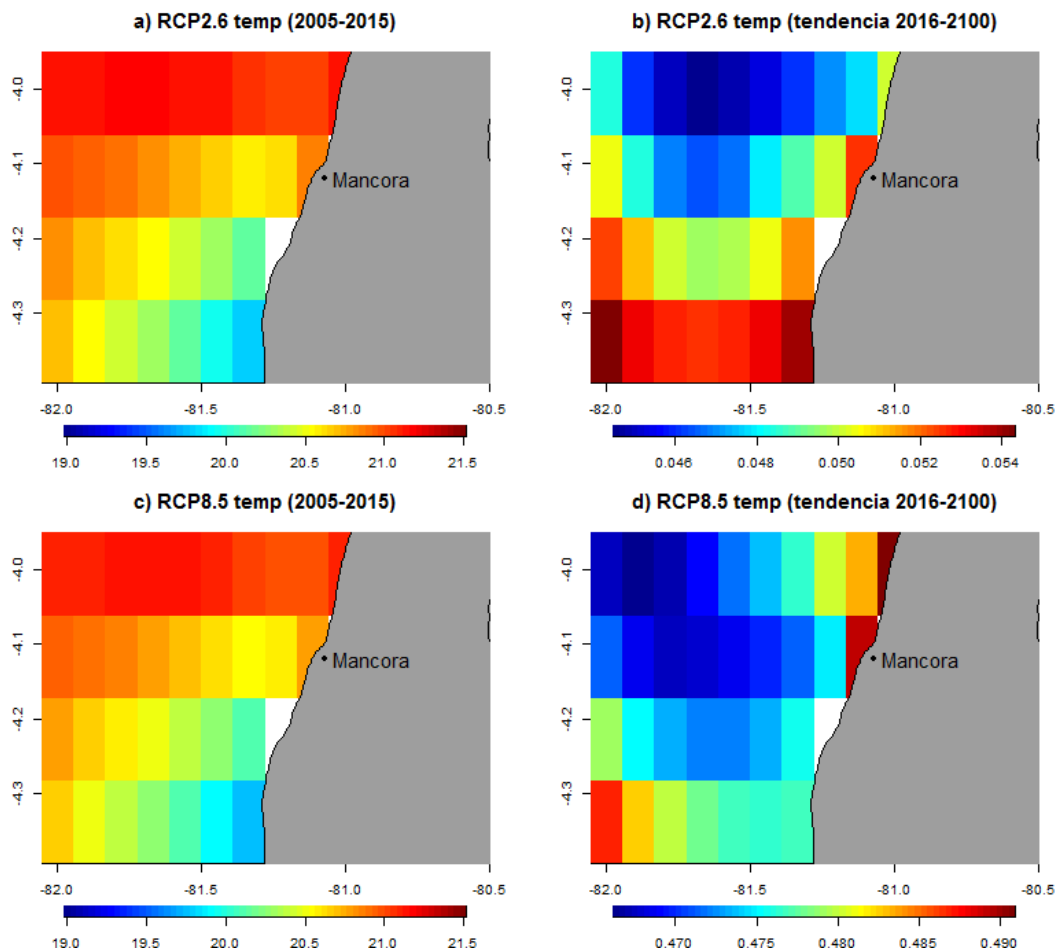


Figura 18. TSM promedio durante el periodo actual (izquierda) y las tendencias entre 2016 al 2100 (derecha, en °C año⁻¹) del escenario optimista (arriba) y pesimista (abajo) proveniente del modelo IPSL-CM5A-MR en la localidad de Máncora.

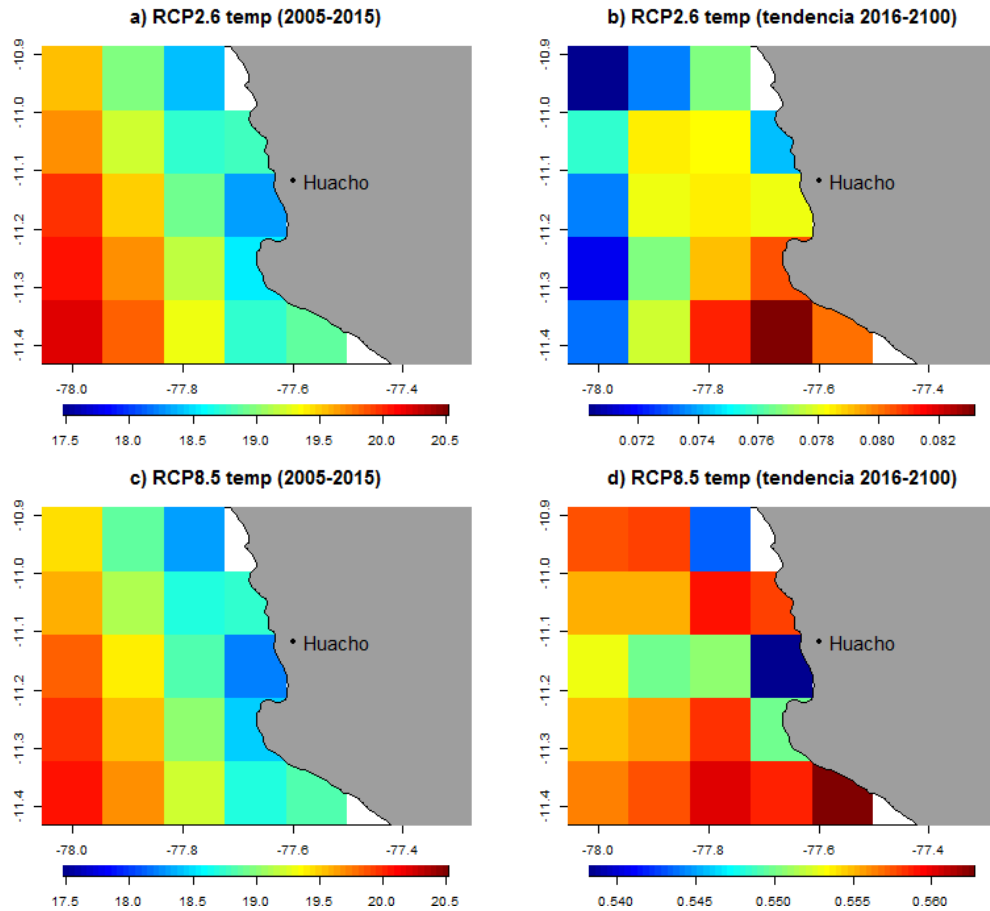


Figura 19. TSM promedio durante el periodo actual (izquierda) y las tendencias entre 2016 al 2100 (derecha, en $^{\circ}\text{C a\u00f1o}^{-1}$) del escenario optimista (arriba) y pesimista (abajo) proveniente del modelo IPSL-CM5A-MR en la localidad de Huacho.

Clorofila

Las mayores tendencias de clorofila-a superficial en diatomeas se observa en el modelo CM5A-MR, bajo un escenario pesimista en Huacho y Máncora. En un escenario pesimista en Máncora la clorofila aumenta entre 0.04 y $0.08 \text{ mg m}^{-3} \text{ a\u00f1o}^{-1}$; mientras que, en Huacho se observa que oscila entre 0.04 y $0.06 \text{ mg m}^{-3} \text{ a\u00f1o}^{-1}$ (Figuras 20 y 21). Para el caso del nanofitoplancton, muy cerca a Huacho y Máncora, se observan tendencias negativas de sus concentraciones de clorofila; sin embargo, no es homog\u00e9neo en toda el \u00e1rea, pudi\u00e9ndose observar tendencias positivas.

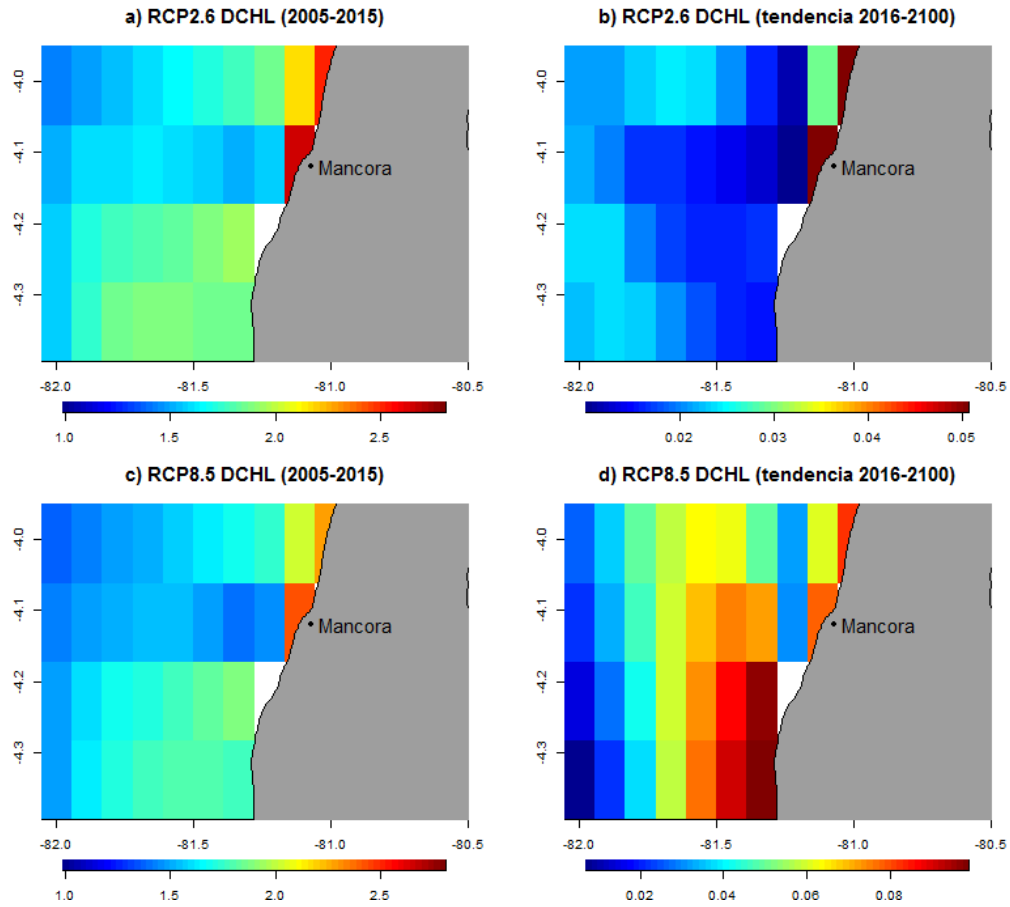


Figura 20. Clorofila-a superficial en diatomeas promedio durante el periodo actual (izquierda) y las tendencias entre 2016 al 2100 (derecha, en $^{\circ}\text{C}\ \text{a\~{n}o}^{-1}$) del escenario optimista (arriba) y pesimista (abajo) proveniente del modelo CM5A-MR en la localidad de Máncora.

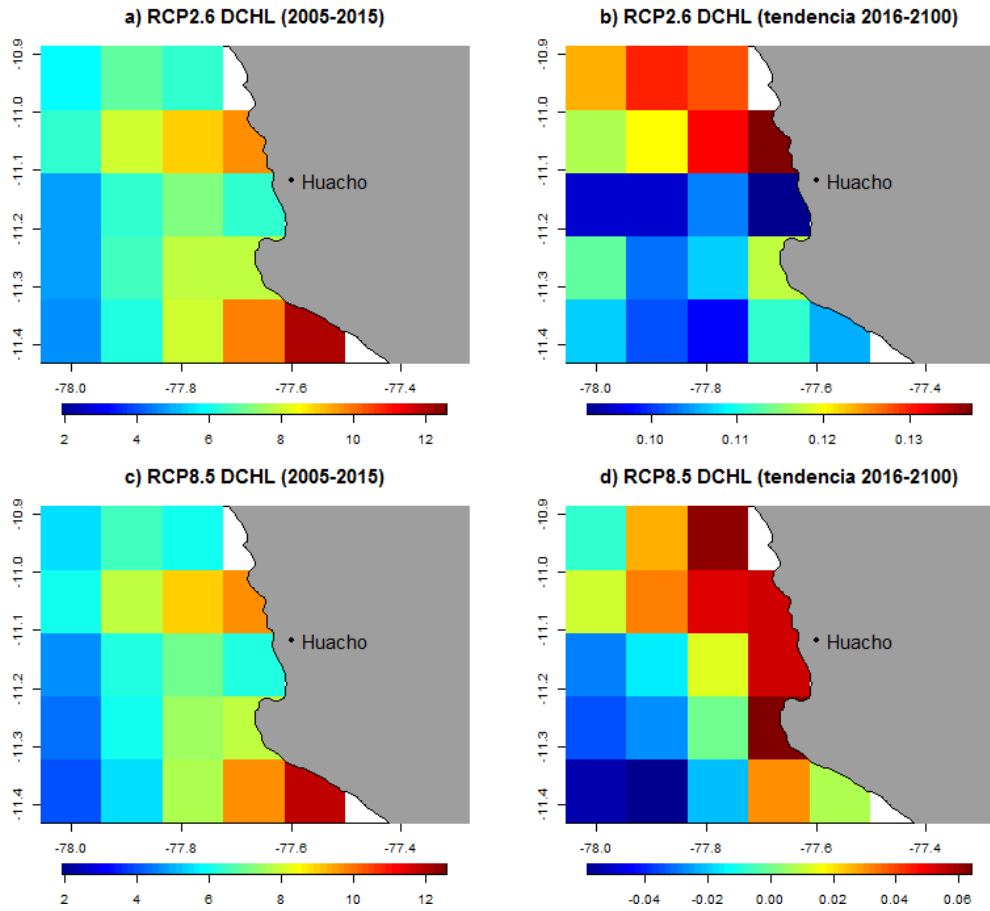


Figura 21. Clorofila-a superficial en diatomeas promedio durante el periodo actual (izquierda) y las tendencias entre 2016 al 2100 (derecha, en $^{\circ}\text{C}\ \text{a\~{n}o}^{-1}$) del escenario optimista (arriba) y pesimista (abajo) proveniente del modelo CM5A-MR en la localidad de Huacho.

Nutrientes

Los valores de nitratos también presentan valores negativos en toda el área frente a Huacho y Máncora bajo un escenario pesimista con valores de -0.66 y -0.46 $\text{mL L}^{-1} \text{año}^{-1}$, respectivamente, para el modelo CM5A-MR, que es el que presenta tendencias más marcadas (Figura 22 y 23). Los otros nutrientes como el fosfato y silicato también presentan tendencias negativas en toda la región.

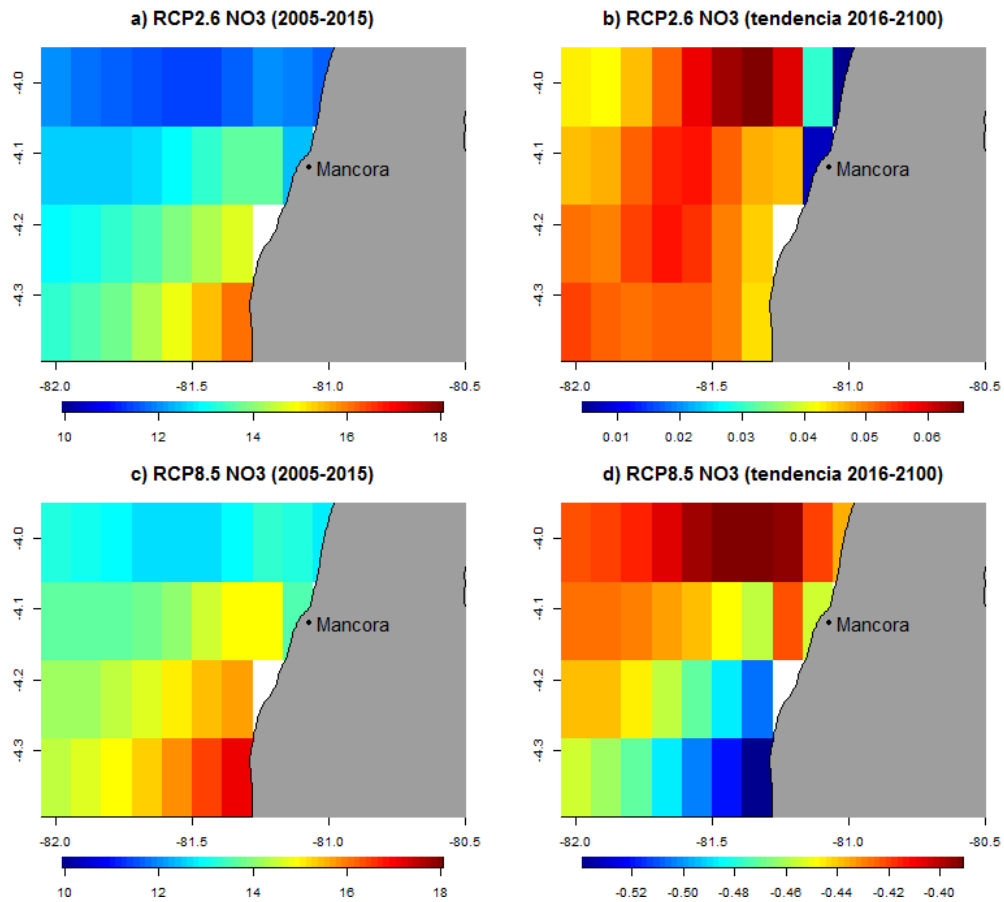


Figura 22. Nitrato superficial en diatomeas promedio durante el periodo actual (izquierda) y las tendencias entre 2016 al 2100 (derecha, en $^{\circ}\text{C año}^{-1}$) del escenario optimista (arriba) y pesimista (abajo) proveniente del modelo CM5A-MR en la localidad de Máncora.

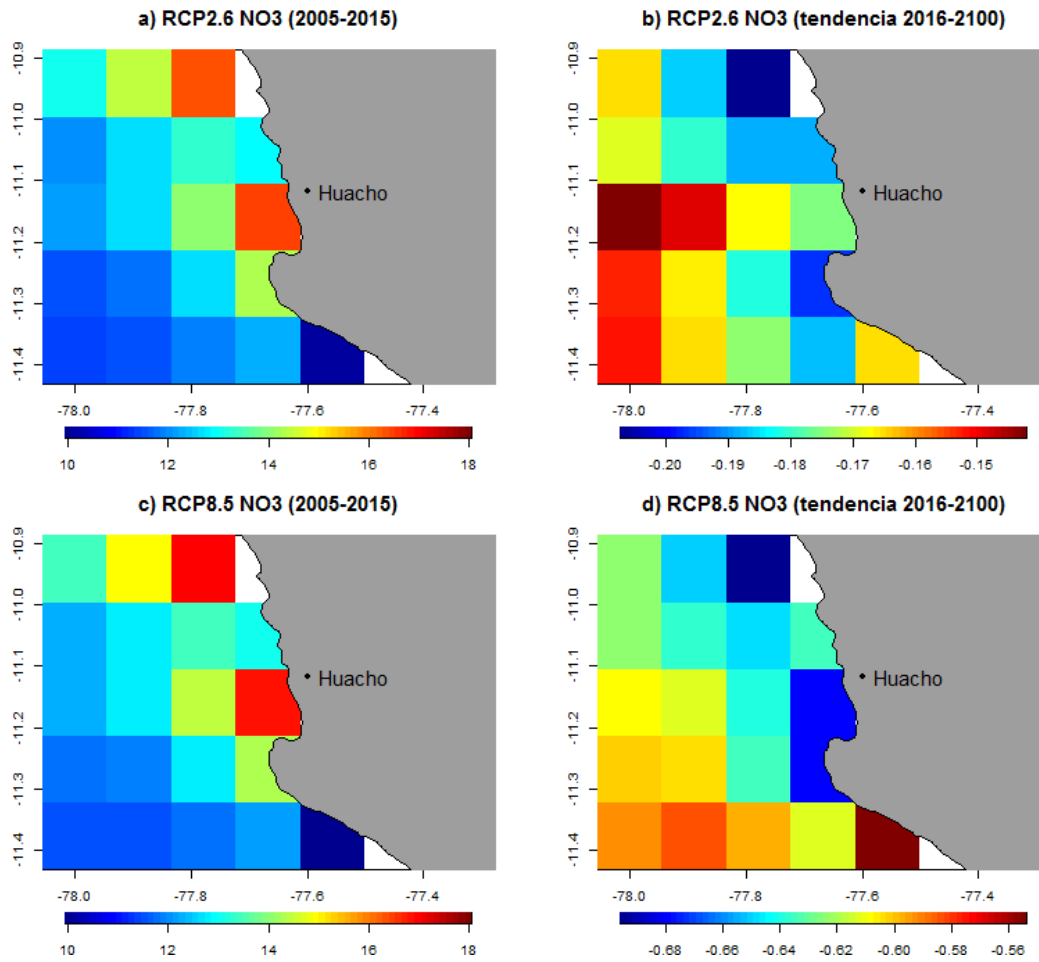


Figura 23. Nitrato superficial en diatomeas promedio durante el periodo actual (izquierda) y las tendencias entre 2016 al 2100 (derecha, en $^{\circ}\text{C a\~{n}o}^{-1}$) del escenario optimista (arriba) y pesimista (abajo) proveniente del modelo CM5A-MR en la localidad de Huacho.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados, las tendencias al aumento de la TSM bajo un escenario pesimista, lo que se observa en las localidades de Huacho y Máncora es congruente con lo que se observa a nivel regional, siendo este comportamiento similar a lo largo de toda la costa peruana. Este aumento en la TSM bajo un escenario pesimista se podría deber a la influencia del forzante remoto; sin embargo, como lo menciona Echevin et al. (2020) en regiones donde el viento no presente variaciones significativas, podrían presentar un incremento menor.

En la mayoría de modelos se observa un incremento de la productividad superficial lo cual es contradictorio con lo que se observa en los modelos globales los cuales reproducen una disminución frente a Perú y en general en todo el océano. Esto se podría deber a una mayor retención cerca a la costa debido a un menor transporte fuera de la costa, además, que el incremento de la temperatura puede incrementar el metabolismo del fitoplancton; por último, la somerización de la capa de mezcla podría replegar el fitoplancton en la capa superficial (Echevin et al., 2020).

En el caso de los nutrientes la disminución es congruente en todos los modelos bajo un escenario pesimista, siendo esto influenciado principalmente por la disminución de la contribución nutrientes que vienen desde el Ecuador. Esto es contradictorio con lo que se observa en la productividad; sin embargo, como lo muestra Echevin et al. (2020) el aumento de la productividad solo se da en la capa superficial; mientras que integrando una capa de mayor profundidad el plancton disminuye, posiblemente afectado por esta disminución en los nutrientes.

Por último, queda claro que los procesos de submesoscala, importantes para evaluar los impactos muy cerca de la región de Huacho y Máncora, no pueden ser reproducidos por el modelo debido a la resolución utilizada. Es necesario realizar simulaciones a mayor resolución; sin embargo, se entiende que esto representa un gran costo computacional y una alta especialización por lo que podría tomar un periodo de meses a años poder realizarlo. Sin embargo, creemos que es necesario realizar zoom de los modelos cerca de las regiones estudiadas, para su mejor entendimiento.

V. CONCLUSIONES

- Los modelos son congruentes en el incremento de temperatura frente a Huacho y Máncora, bajo un escenario pesimista, presentándose aumentos entre +2 °C a +4 °C para el 2100. Bajo un escenario optimista no se observan cambios significativos.
- La mayoría de modelos indican un incremento de la productividad superficial frente a Máncora, bajo un escenario pesimista; mientras que, en un escenario optimista no hay cambios significativos. Por otro lado, en Huacho en ambos escenarios, no hay cambios significativos cuando se analizan las series de tiempo; sin embargo, a nivel espacial los modelos coinciden en una mayor cobertura de tendencias positivas, bajo un escenario pesimista.
- Respecto a los nutrientes como los nitratos, silicatos y fosfatos, las simulaciones regionales concuerdan en una tendencia a la disminución de sus concentraciones tanto en la localidad de Máncora como en la de Huacho, bajo un escenario pesimista, siendo el modelo CNRM-CM5 el que presenta el decrecimiento más marcado en ambas localidades. Bajo un escenario optimista, en ambas localidades no se observan cambios significativos.

VI. REFERENCIA

Aumont, O., Ethé C., Tagliabue A., Bopp L. and M. Gehlen (2015), PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2465-2513, doi:10.5194/gmd-8-2465-2015.

Bertrand A., A. Chaigneau, S. Peraltilla, J. Ledesma, M. Graco, F. Monetti and F. P. Chavez (2011), Oxygen: A fundamental property regulating pelagic ecosystem structure in the coastal southeastern Tropical Pacific, *PLoS One*, 6(12), e29558.

Bopp L., Resplandy L., Orr J. C., Doney S. C., Dunne J.P., Gehlen M., Halloran P., Heinze C., Ilyina T., Séferian R., Tjiputra J., Vichi M., 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21 st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*. 10: 6225-6245.

Bouchón M. & C. Peña (2008), Impactos de los eventos La Niña en la pesquería peruana. Informe del Instituto del Mar del Perú ISSN 0378-7702, 35(3), 193-198.

Breitbart, D, L. A. Levin, A. Oschlies, M. Grégoire, F. P. Chavez, D. J. Conley, V. Garçon, D. Gilbert, D. Gutiérrez, K. Isensee, G. S. Jacinto, K. E. Limburg, I. Montes, S. W. A. Naqvi, G. C. Pitcher, N. N. Rabalais, M. R. Roman, K. A. Rose, B. A. Seibel, M. Telszewski, M. Yasuhara and J. Zhang (2018), Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science*, 359 (6371), eaam7240, doi:10.1126/science.aam7240.

Calienes, R. (2014), Producción primaria en el ambiente marino en el Pacífico sudeste, Perú, 1960-2000, *Bol. Inst. Mar Perú*, 29(1-2).

Chavez F & M. Messié (2009), A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Prog. Oceanogr.*, 83, 80-96.

Demarcq, H. (2009) Trends in Primary Production, Sea Surface Temperature and Wind in Upwelling Systems (1998- 2007). *Progress in Oceanography*, 83, 376-385. doi :10.1016/j.pocean.2009.07.022

Echevin V., M. Gévaudan, F. Colas, D. Espinoza-Morriberon, J. Tam, O. Aumont, D. Gutierrez. 2020. Physical and biogeochemical impacts of RCP8.5 scenario in the Peru upwelling system. *Biogeosciences*, 17 (12): 3317-3341, doi.org/10.5194/bg-2020-4.

Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F., Tam J., Ledesma J., Graco M., Vásquez L. 2017. Impact of the El Niño event on the productivity of the Peruvian Coastal Upwelling System. *Journal Geophysical Research Oceans*, 122 (7): 5423–5444, doi:10.1002/2016JC012439

Espinoza-Morriberón D., E. Echevin, F. Colas, J. Tam, D. Gutierrez, M. Graco, J. Ledesma, C. Quispe-Ccalluari. 2019. Oxygen variability during ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Frontier in Marine Science*, doi: 10.3389/fmars.2018.00526.

Graco, M. I., Purca, S., Dewitte, B., Castro, C. G., Morón, O., Ledesma, J., Flores, G., and Gutiérrez, D (2017), The OMZ and nutrient features as a signature of interannual and low-frequency variability in the Peruvian upwelling system, *Biogeosciences*, 14, 4601–4617, <https://doi.org/10.5194/bg-14-4601-2017>.

Gutiérrez, D., E. Enríquez, S. Purca, L. Quipúzcoa, R. Marquina, G. Flores and M. Graco (2008), Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: Remote forcing and benthic ecosystem response, *Progress in Oceanography*, 79 (2), 177-189, doi:10.1016/j.pocean.2008.10.025.

Gutiérrez, D., I. Bouloubassi, A. Sifeddine, S. Purca, K. Goubanova, M. Graco, D. Field, L. Méjanelle, F. Velazco, A. Lorre, R. Salvattecchi, D. Quispe, G. Vargas, B. Dewitte and L. Ortlieb (2011), Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L07603, doi:10.1029/2010GL046324.

Moss, R., Edmonds J., Hibbard K., Manning M., Rose S., Van Vuuren D., Carter T., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G., Mitchell J., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S., Stouffer R., Thomson A., Weyant J., Wilbanks T., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463(747 – 756).

Ñiquen M. & M. Bouchon (2004), Impact of El Niño event on pelagic fisheries in Peruvian waters, *Deep-Sea Research II*, 51, 563-574.

Paulmier, A. and D. Ruiz-Pino (2009), Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean, *Prog Oceanogr*, 80 (3-4), 113-28, doi:10.1016/j.pocean.2008.08.001.

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho C., Chirkov V., Fisher G., Kindermann G., Nakicenovic N., Rafaj P., 2011. RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*. 109:33-37.

Sánchez, S. (2000), Variación estacional e interanual de la biomasa fitoplanctónica y concentraciones de clorofila frente a la costa peruana durante 1976-2000. *Bol. Inst. Mar Perú*, 19(1-2), 29-43.

Tovar, H. & D. Cabrera (1985), Las aves guaneras y el fenómeno “El Niño”, in *El fenómeno “El Niño” y su impacto en la fauna marina*, edited by W. F. Arntz, A. Landa and J. Tarazona, *Bol. Inst. Mar Perú*, extraordinary volume, 181-186.

Transmonte G. & Y. Silva (2008), Evento La Niña: Propuesta de definición y clasificación según las anomalías de temperatura de la superficie del mar en el área El Niño 1+2, *Informe del Instituto del Mar del Perú*, ISSN 0378-7702, 35(3), 199-207.

Van Vuuren D., Stehfest E., den Elzen M., Kram T., van Vliet J., Deetman S., Isaac M., Goldewijk K., Hof A., Mendoza A., Oostenrijk R., van Ruijven B., 2011. RCP 2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*. 109:95 – 116.

VII. ANEXOS

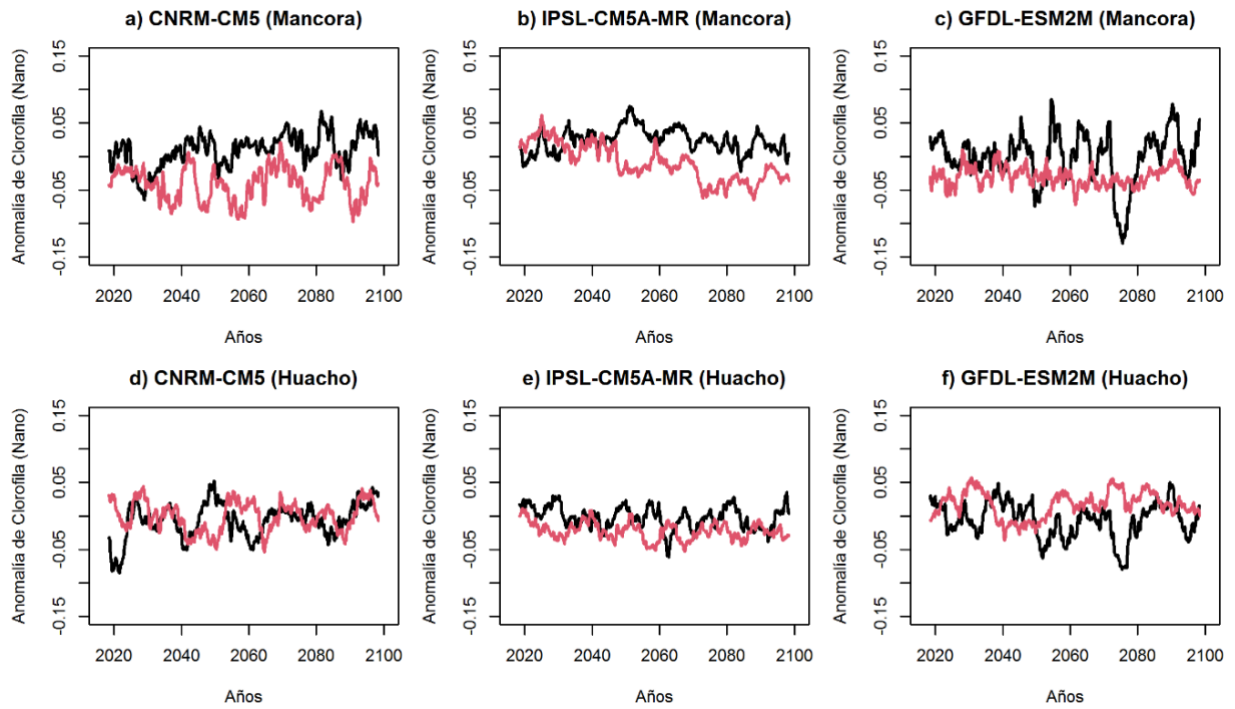


Figura A1. Series de tiempo de las anomalías de la clorofila-a superficial en nanofitoplancton entre 2016 al 2100 para Máncora (arriba) y Huacho (abajo), de las simulaciones regionales en un escenario pesimista (línea roja) y optimista (línea negra).

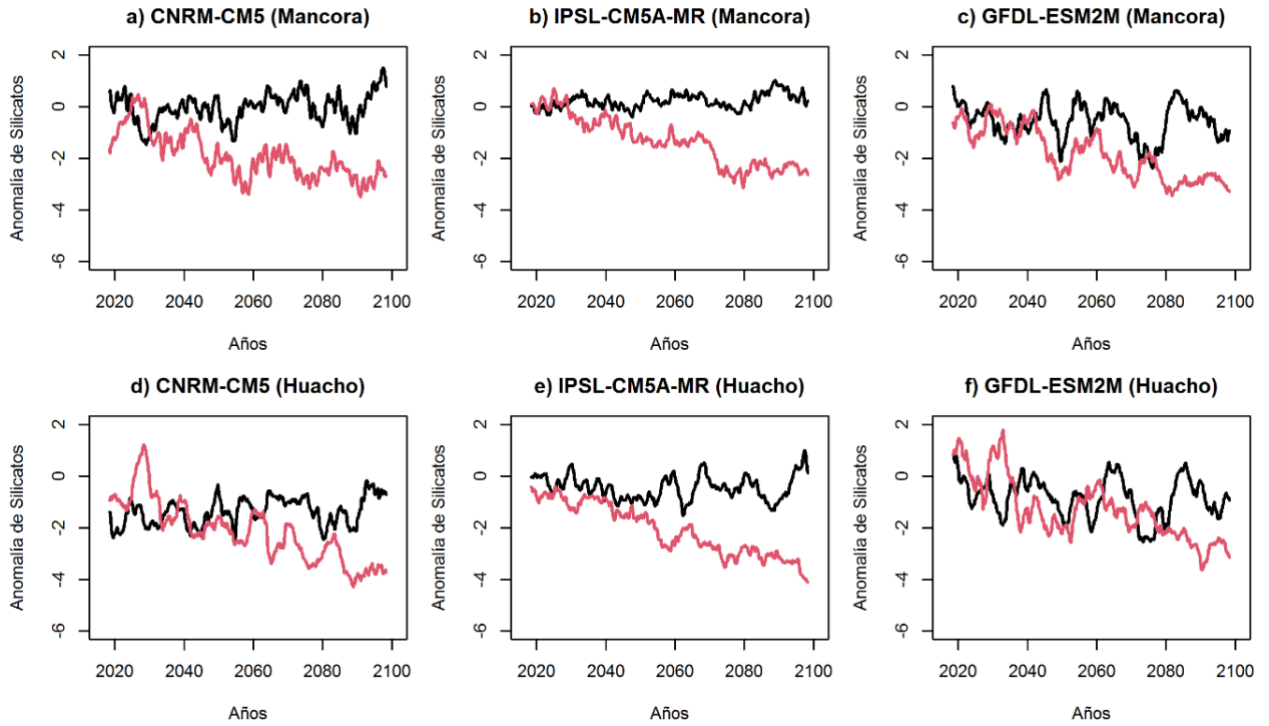


Figura A2. Series de tiempo de las anomalías de los silicatos superficiales entre 2016 al 2100 para Máncora (arriba) y Huacho (abajo), de las simulaciones regionales en un escenario pesimista (línea roja) y optimista (línea negra).

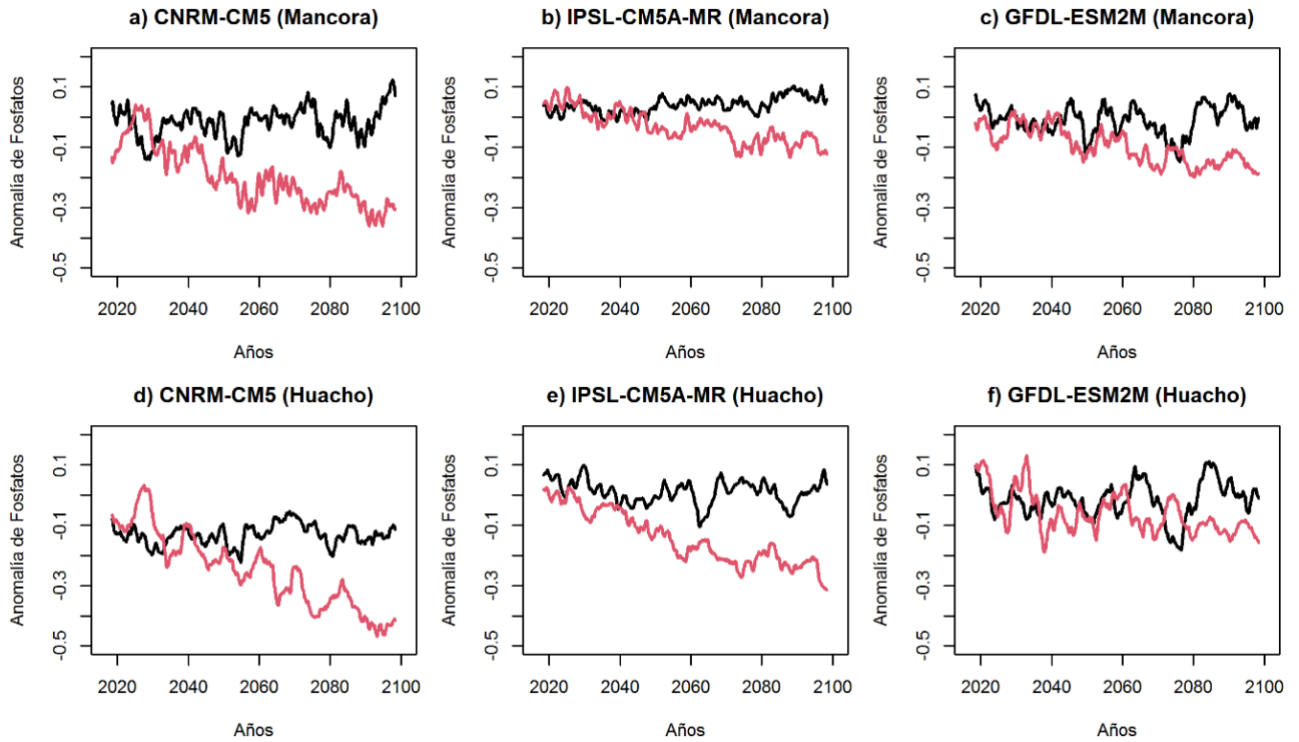


Figura A3. Series de tiempo de las anomalías de los fosfatos superficiales entre 2016 al 2100 para Máncora (arriba) y Huacho (abajo), de las simulaciones regionales en un escenario pesimista (línea roja) y optimista (línea negra).

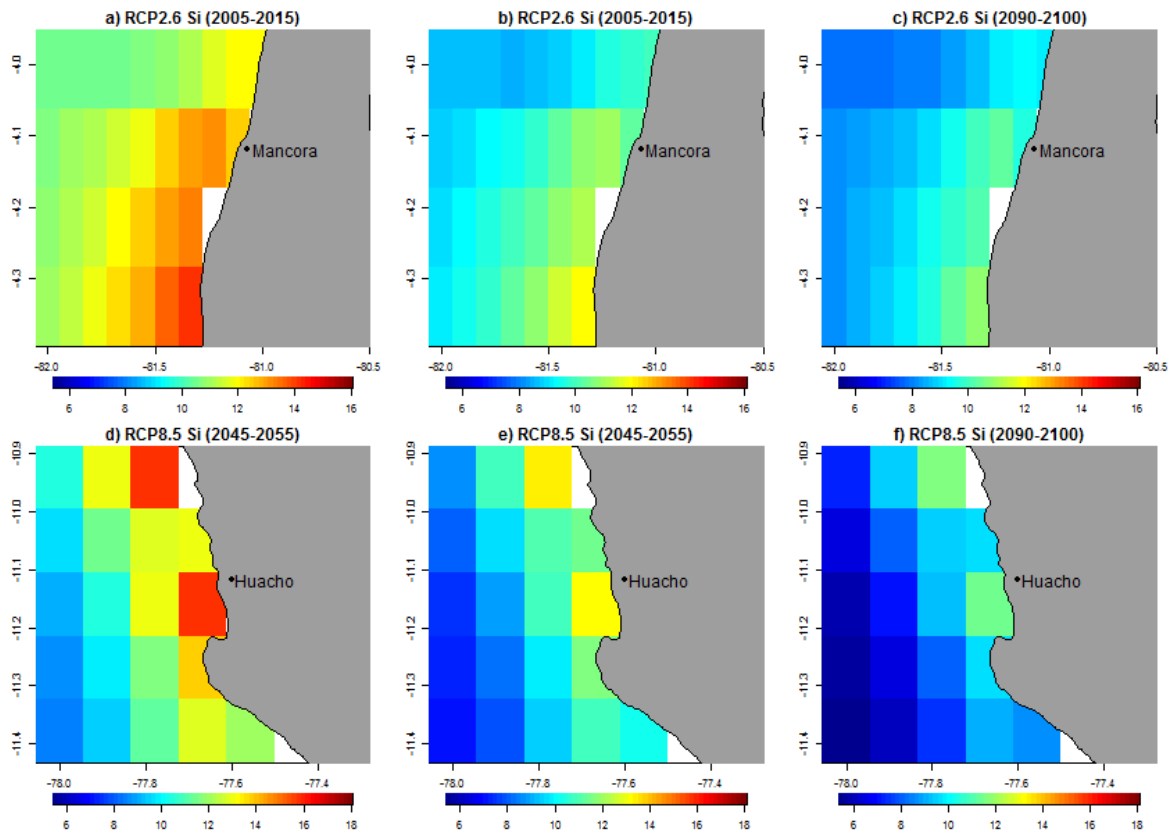


Figura A4. Silicatos superficiales promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo CNRM-CM5.

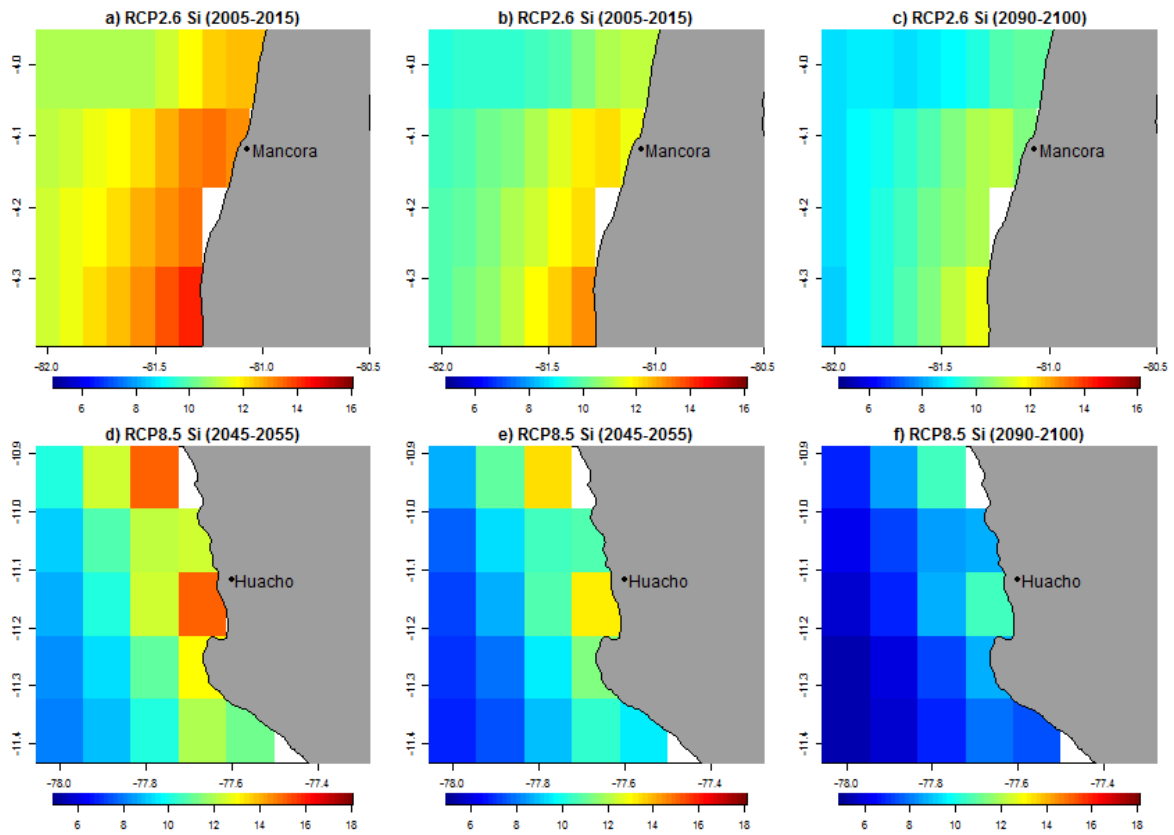


Figura A5. Silicatos superficiales promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo IPSL-CM5A-MR.

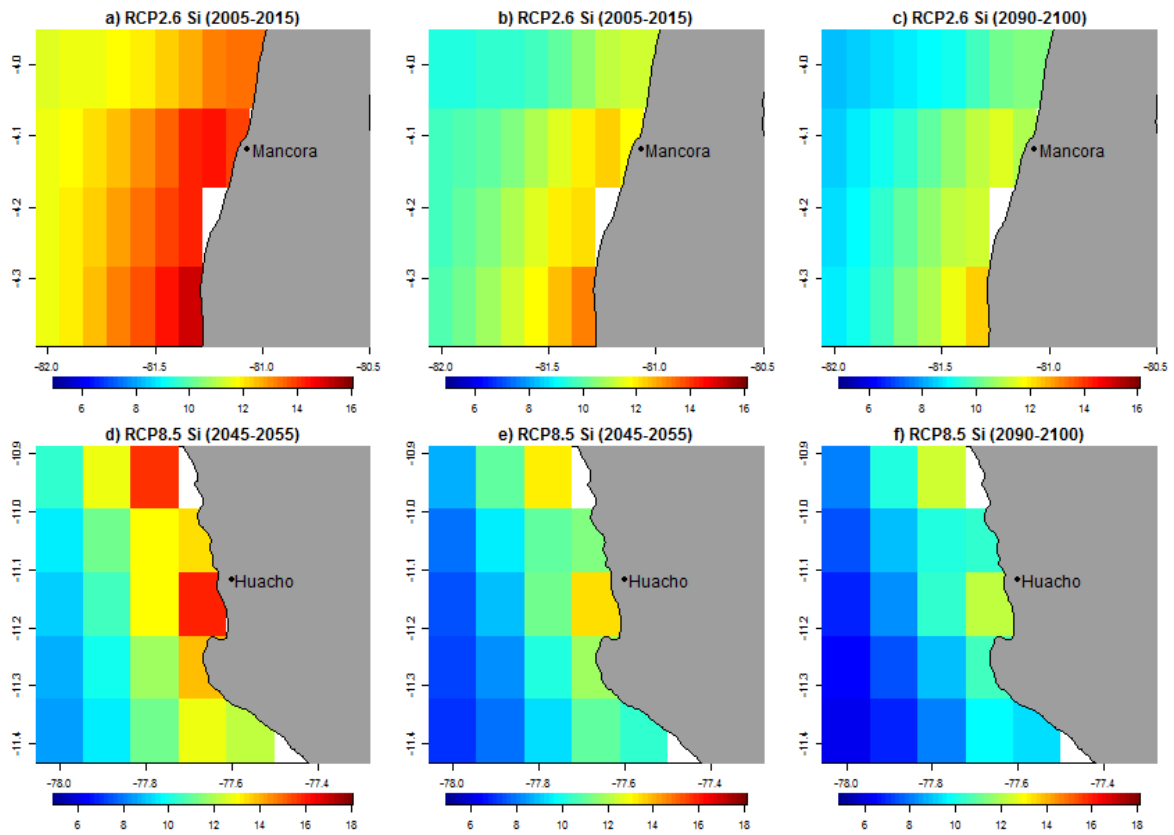


Figura A6. Silicatos superficiales promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo GFDL-ESM2M.

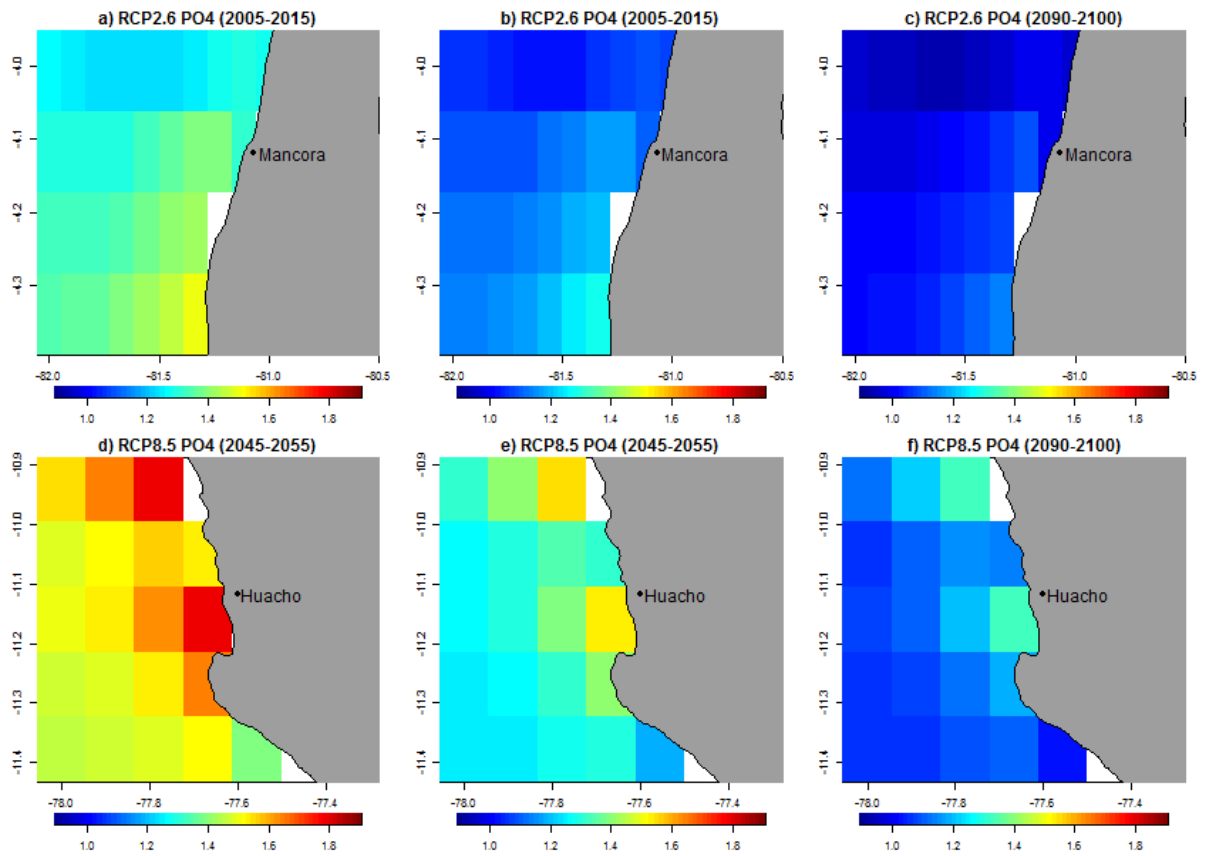


Figura A7. Fosfatos superficiales promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo CNRM-CM5.

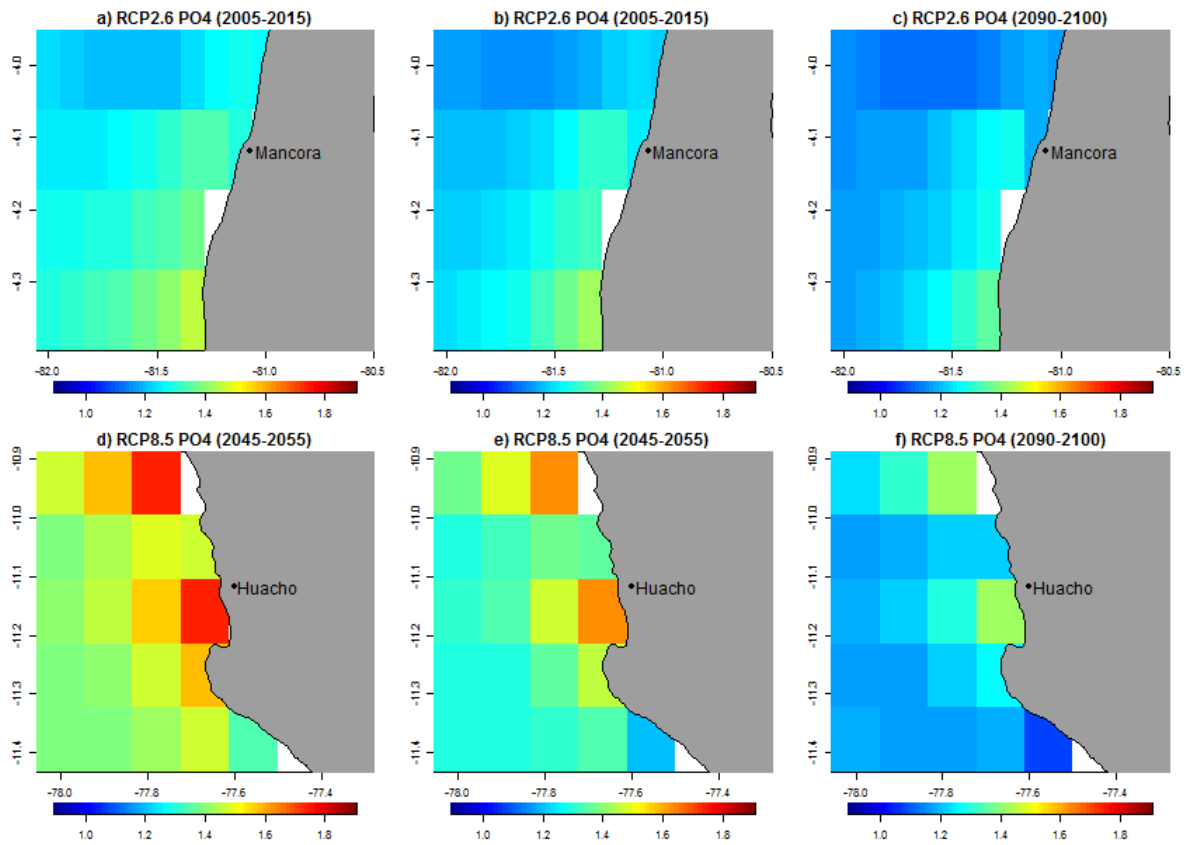


Figura A8. Fosfatos superficiales promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo IPSL-CM5A-MR.

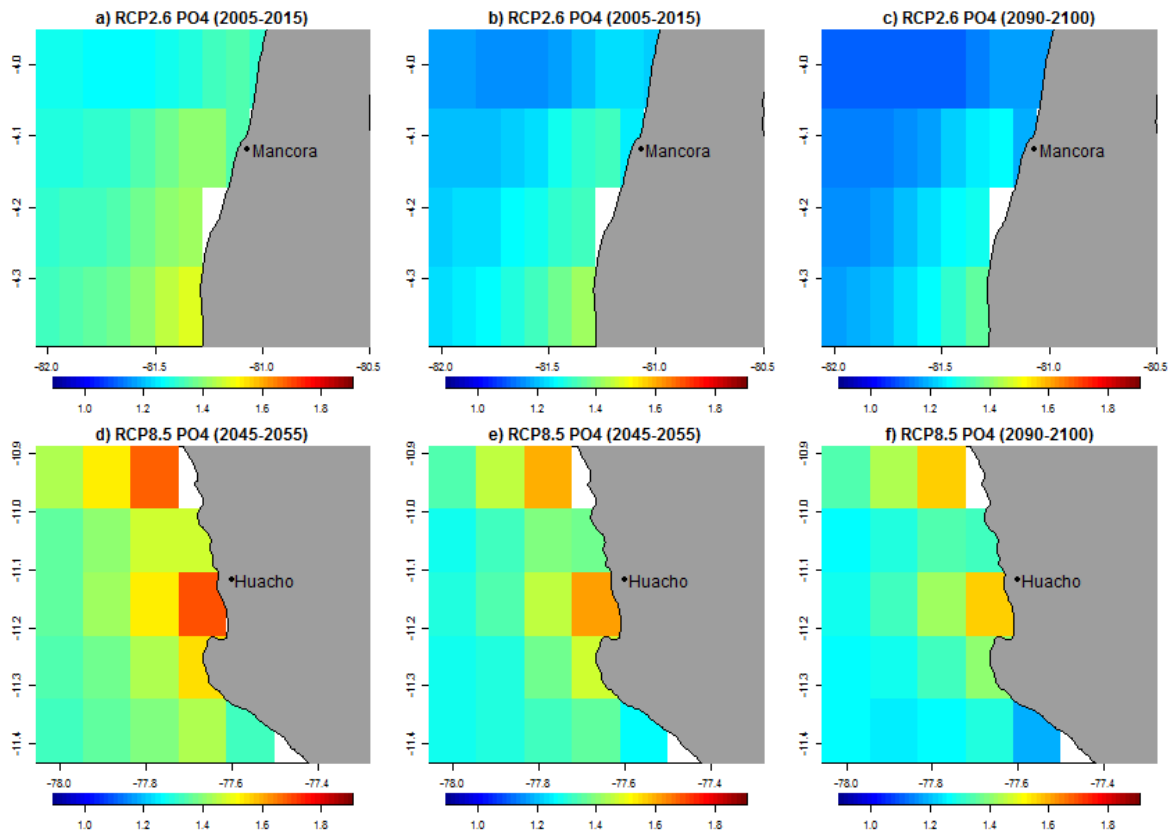


Figura A9. Fosfatos superficiales promedio para el periodo actual (izquierda, del 2005 al 2015), mitad (centro, del 2045 al 2055) y fines (derecha, del 2090 al 2100) del siglo XXI para huacho (abajo) y Máncora (arriba), bajo un escenario pesimista para el modelo GFDL-ESM2M.