

## CAMBIO CLIMÁTICO EN CENTROAMÉRICA: UN ESTUDIO PARA EL GOLFO DE FONSECA

Jaime RIBALAYGUA<sup>1</sup>, Emma GAITÁN<sup>1</sup>, Javier PÓRTOLES<sup>1</sup>, Robert MONJO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fundación para la Investigación del Clima

[fic@ficlisma.org](mailto:fic@ficlisma.org)

### RESUMEN

Una de las regiones del mundo que puede sufrir especialmente las consecuencias del cambio climático a lo largo del siglo XXI es Centroamérica; lamentablemente, los estudios sobre esta zona son escasos y las conclusiones son relativas a áreas grandes y no lo suficientemente locales. Con el fin de evaluar el comportamiento de la temperatura y la precipitación en las décadas futuras se ha adaptado una técnica de *downscaling* estadístico (la metodología FICLIMA) a las latitudes centroamericanas basándonos en sus características climáticas. Tal adaptación considera la evaluación de diferentes variables a diferentes alturas hasta encontrar aquel modelo que mejor refleja la climatología de la zona, mediante el empleo del reanálisis NCEP y el uso de observatorios meteorológicos locales. Esto permite realizar un estudio local en el área del Golfo de Fonseca a partir de varios modelos climáticos de la iniciativa CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) y bajo diferentes RCPs (los escenarios climáticos asociados al 5º informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o IPCC5) y evaluar los posibles cambios para las variables de temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria, y precipitación diaria a lo largo del siglo XXI.

Palabras clave: Cambio Climático, Downscaling estadístico, Golfo de Fonseca, RCPs

### ABSTRACT

One of the areas of the world that may especially suffer the consequences of climate change over the twenty-first century is Central America; unfortunately, studies on this area are scarce and the conclusions are related to large areas and not enough local. In order to evaluate the behavior of the temperature and precipitation in the coming decades, a statistical downscaling technique (FICLIMA methodology) has been adapted to the Central American latitudes based on its climatic characteristics. Such adaptation considers the evaluation of different variables at different heights until finding that model that best reflects the climate of the area, by using the NCEP reanalysis and the use of local meteorological observatories. This allows performing a local study in the area of the Gulf of Fonseca from several climate models belonging to the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) initiative and under several RCPs (climate scenarios associated to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC5) and evaluate the potential changes associated to the daily maximum temperature, daily minimum temperature and daily precipitation along the 21<sup>st</sup> century.

Key words: Climate Change, Statistical Downscaling. Gulf of Fonseca, RCPs

## 1. INTRODUCCIÓN

La evidencia de un cambio climático a lo largo del siglo XXI, como consecuencia de la confluencia entre la variabilidad climática propia del clima y la acción antropogénica del hombre, es un tema de gran interés dentro de la comunidad científica por las repercusiones socioeconómicas que supone. La necesidad de poder conocer con la mayor precisión posible la evolución del clima durante el presente siglo para, así, poder determinar estrategias de mitigación y adaptación es uno de los puntos en los que está trabajando actualmente la comunidad científica.

La principal herramienta que se tiene actualmente para simular el clima a largo plazo son los Generalized Climate Models (GCMs). Estos modelos son bastante buenos simulando la circulación general de la atmósfera (Stendel et al., 2000) pero debido a su gruesa resolución ( $\approx 200$  km) no son capaces de simular los efectos provocados por fenómenos meteorológicos de menor escala (convección) y por los efectos derivados de la topografía (Von Storch, 1994). Sin embargo, mediante las técnicas de regionalización o *downscaling* es posible adaptar la información proporcionada por los GCMs a escala local. De entre los dos tipos existentes de *downscaling*, dinámico y estadístico (Murphy, 1999), y atendiendo a las ventajas proporcionadas por los modelos estadísticos (son más económicos, computacionalmente hablando, lo que permite trabajar con distintos modelos y escenarios, y además permiten la posibilidad de corregir el sesgo asociado a los mismos y aprovechar los conocimientos estadísticos de los investigadores) frente a los dinámicos se ha optado por usar una técnica de *downscaling* estadístico (véase, por ejemplo, Wilby et al. 2004, Giorgi and Francisco 2001, para más información sobre las ventajas e inconvenientes de las técnicas de regionalización o *downscaling*). En líneas generales, el *downscaling* estadístico consiste en establecer relaciones empíricas entre los campos atmosféricos proporcionados por los modelos (denominados Predictores) y los campos de alta resolución en superficie, como temperatura y precipitación (denominados Predictandos) (Wilby et al., 1997).

La metodología empleada ha sido desarrollada por la Fundación para la Investigación del Clima (FIC) y permite trabajar de forma rápida con las salidas de varios modelos y escenarios, de manera que se puede obtener un abanico de posibles evoluciones futuras con las que trabajar. La adaptación de esta metodología a Centroamérica supone no sólo verificar la metodología y comprobar que funciona correctamente, sino que requiere una revisión completa en la selección de predictores, de manera que se garantice el uso de los predictores más adecuados a las características climáticas y meteorológicas de la zona.

## 2. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 Área de Estudio

El área de estudio es el Golfo de Fonseca (región trinacional del Océano Pacífico compartida por Nicaragua, Honduras, y El Salvador). Este estuario tropical de  $3200 \text{ km}^2$  y  $409 \text{ km}$  de costa se ubica entre las latitudes  $12\text{-}14^\circ\text{N}$  y las longitudes  $86\text{-}89^\circ\text{W}$ , por lo que sus principales características climáticas se corresponden con el clima tropical (todos los meses tienen una temperatura media superior a los  $18^\circ\text{C}$  y las precipitaciones anuales son superiores a la evaporación). Debido a sus características pluviométricas se puede hablar de dos estaciones bien diferenciadas, un periodo relativamente seco (noviembre a abril) y un periodo húmedo (mayo a octubre). Dentro la estación húmeda se aprecian dos picos máximos de precipitación y un periodo de descenso de las precipitaciones entre ambos (figura 2). Al primer tramo se le conoce como *Primera* y la cantidad de precipitaciones máximas observadas se sitúan entre los

250-270 mm en junio; en el tercer tramo, conocido como *Postrera*, las precipitaciones máximas superan los 350 mm en el mes de septiembre; y entre ambos periodos tiene lugar el fenómeno de la *Canícula* (fenómeno atmosférico durante el cual se asume que las lluvias que tienen lugar durante la estación húmeda sufren un pequeño receso como consecuencia de la influencia del Anticiclón de las Bermudas). Las temperaturas mínimas son suaves durante todo el año con valores superiores a los 19°C mientras que las temperaturas máximas son algo más elevadas, valores superiores a 31°C durante todo el año (figura 3).

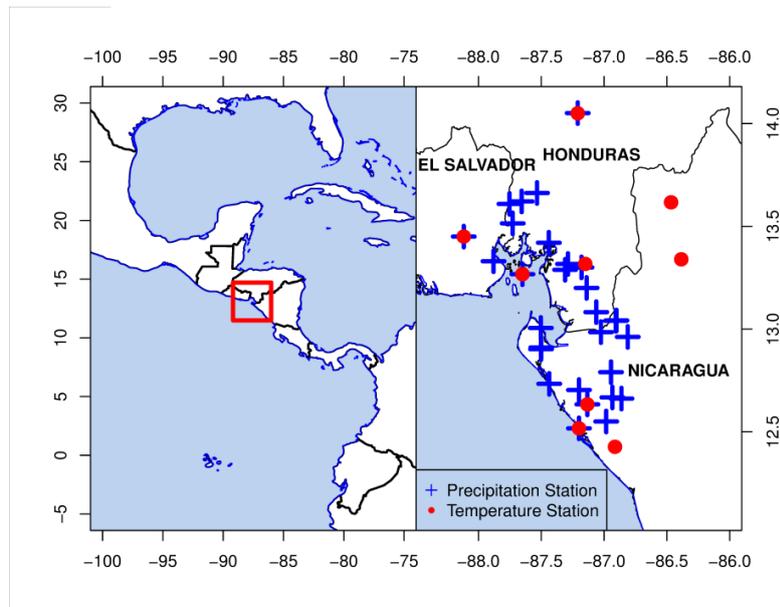


Figura 1. Localización de la zona de estudio y ubicación de los observatorios de temperatura y precipitación utilizados en este estudio.

## 2.2 Datos de Superficie

Se ha utilizado un conjunto de observatorios meteorológicos fueron suministrados por la NOAA estadounidense, la Dirección General de Recursos Hídricos de Honduras, y el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, con datos diarios de temperatura y/o precipitación dentro del periodo 1951-2011. La distribución espacial de los 29 observatorios de precipitación y de los 9 de temperatura se muestra en la figura 1.

## 2.3 Datos Atmosféricos

- Banco de datos del Reanálisis: se han utilizado los datos proporcionados por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) estadounidense cuya resolución (2.5° x 2.5°) se ha relajado a la del GCM utilizado en cada momento (se interpolan los campos originales del NCEP a la rejilla del GCM, menos detallada, y se calcula un campo diario acorde con el proporcionado por el modelo).
- Banco de datos de los modelos: se ha trabajado con 9 GCMs, todos ellos asociados al IPCC5 y con 3 RCPs (véase tabla 1 al final del documento para más detalles).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Descripción de la metodología

Como método de regionalización para la generación de escenarios de clima futuro se ha utilizado la metodología de Downscaling estadístico FICLIMA desarrollada por la Fundación para la Investigación del Clima (Ribalaygua et al. 2013). En líneas generales, la metodología se desarrolla en dos pasos:

1. El primer paso, denominado estratificación analógica, consiste en seleccionar de un banco de datos aquellos  $n$  días con configuraciones atmosféricas más similares a las del día problema "X". La medida de similitud utilizada compara el parecido entre las variables empleadas para caracterizar las situaciones sinópticas atmosféricas.
2. El segundo paso aplica métodos diferentes en función de la variable que se quiera calcular. Para estimar las temperaturas mínimas y máximas diarias se realiza, por cada variable, una regresión lineal múltiple con selección automática de predictores. Para estimar la precipitación se aplica un tratamiento estadístico de los datos basado en distribuciones que permite asignar a cada día problema una precipitación simulada.

#### 3.2 Verificación de la metodología

El éxito de una metodología de *downscaling* se ve en parte condicionado por la elección de los campos predictores más adecuados a la zona de estudio, los cuales han de ser capaces de recoger la mayor información climática posible. La selección de los predictores debe hacerse de forma acorde con el predictando que se quiere simular y teniendo en cuenta ciertas consideraciones previas (véase Ribalaygua et al. 2013).

Para temperatura se necesitan predictores capaces de recoger la influencia de la baja troposfera y de la temperatura de la superficie terrestre así como la influencia de la capa nubosa y de la cobertura de nieve. Para precipitación, los predictores seleccionados deben ser capaces de recoger tanto la precipitación procedente de los ascensos de masas de aire de origen dinámico como la procedente de ascensos orográficos y convección.

Considerando las características climáticas de la zona de estudio se han seleccionado los siguientes campos predictores: 1) viento zonal y meridional en los niveles de 1000 hPa (recoge el transporte de humedad de los Alisios); 2) de 200 hPa (recoge el desarrollo vertical de los sistemas convectivos); y 3) de 700 hPa (campo más cercano al nivel de máximo desarrollo de las ondas del Este y altura intermedia entre los niveles de 1000 y 200 hPa).

El proceso de verificación supone aplicar la metodología de *downscaling* a los datos del reanálisis y comparar las series simuladas con los datos observados para cada uno de los predictandos (temperatura máxima y mínima y precipitación) para el periodo común 1951-2011. La verificación permite evaluar el funcionamiento de la metodología.

#### 3.3 Validación de la metodología

Con el objetivo de evaluar la habilidad de los distintos GCMs a la hora de simular el clima en la zona de estudio, proceso conocido como validación, se comparan las series simuladas mediante regionalización del modelo con las series simuladas mediante regionalización del reanálisis para el periodo común 1951-2005 (la existencia de lagunas en las series observadas hace inviable la comparación entre observaciones y series simuladas para el GCM).

#### 3.4 Escenarios de clima futuro

Se han generado escenarios de cambio climático para tres variables diarias (temperatura

máxima, temperatura mínima y precipitación), nueve modelos climáticos (véase tabla 1) y tres escenarios futuros RCPs (26, 45 y 85).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 Resultados del proceso de verificación

##### 4.1.1 Simulación de la precipitación

La medida de similitud usada en la selección de análogos se ajustó para garantizar la mayor capacidad de predicción para la precipitación, de ahí que la predicción probabilística obtenida a partir de los días análogos muestre buenos resultados a escala diaria. Como se observa en la figura 2, el valor del RPS obtenido (Rank Probability Score, una medida de la capacidad de discriminar correctamente la probabilidad de la precipitación) es inferior a 0.1 en los meses de la estación seca y del orden o inferior a 0.2 en la estación húmeda. En la época seca el RPS de la precipitación simulada es similar al RPS de la persistencia y de la climatología debido a que en este periodo el número de días con precipitación es bajo. En la época húmeda el RPS de la simulación es bastante inferior al de la persistencia y algo inferior al de la climatología. En general el error o BIAS cometido es prácticamente inapreciable en casi todos los meses del año, excepto en los meses de mayo y noviembre donde el error cometido es algo mayor. Esto es debido a que estos meses son meses de transición entre estaciones y, especialmente en el mes de mayo, se producen fenómenos de carácter convectivo que no son fácilmente simulados mediante *downscaling*. Se aprecia cómo la metodología es capaz de simular la curva intraanual de la precipitación, es decir, simula correctamente los picos máximos de precipitación observados en los periodos de Primera y Postrera y el descenso relativo de precipitaciones correspondiente al periodo canicular.

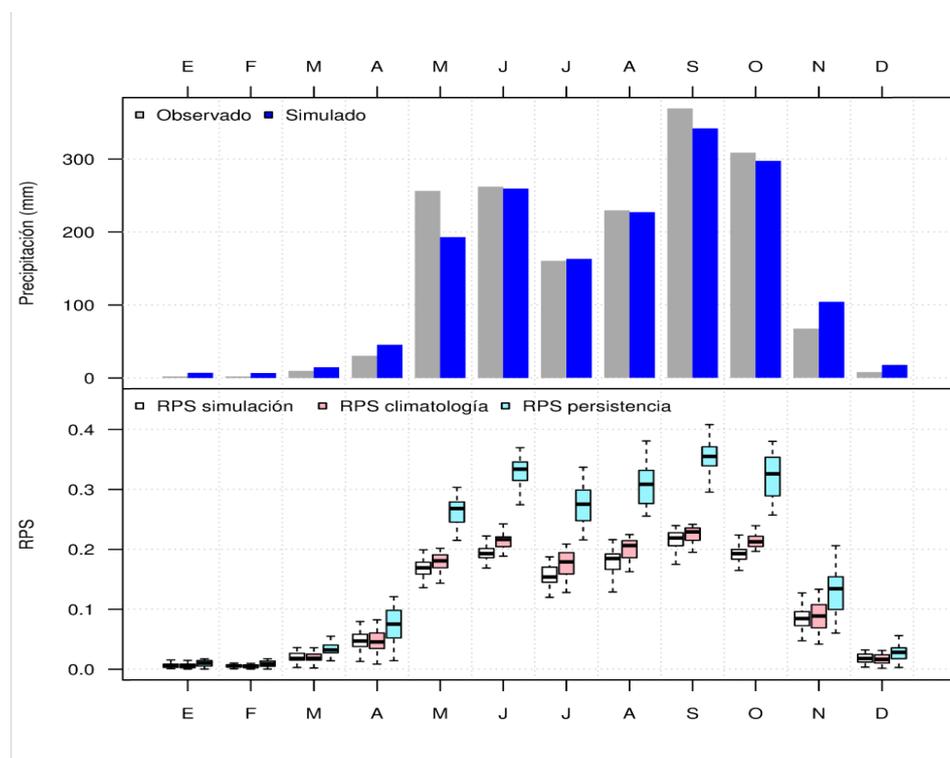


Figura 2. Verificación mensual del proceso de *downscaling* para la precipitación. Gráfica superior: datos mensuales de precipitación observados (gris) y simulados mediante regionalización del reanálisis NCEP (azul). Gráfica inferior: Boxplots del RPS de precipitación comparado con dos simulaciones de referencia, climatología y persistencia. Valores calculados como media de todos los observatorios y para el periodo común 1951-2011.

#### 4.1.2 Simulación de la temperatura

Respecto a la simulación de la temperatura, los valores del error o BIAS observados son muy bajos, del orden de 0,1-0,2°C en el caso de la temperatura máxima y del orden de 0,1°C en el de la temperatura mínima (figura 3). El error absoluto medio diario (MAE) obtenido en el caso de la temperatura máxima se sitúa por debajo de 1,3°C en los meses de la estación seca y por debajo de 1°C en la época húmeda. En el caso de la temperatura mínima, estos valores son mayores en la época seca, valores de 1,5-1,6°C, e inferiores en la estación húmeda, valores de 0,8°C. Estos resultados son bastante buenos: que los valores del MAE oscilen entre 1 y 1,5°C significa que el error cometido es del mismo orden que la variabilidad natural de la temperatura, por lo que se entiende que es “irreducible”, es decir, no es posible obtener un error inferior a la variabilidad natural.

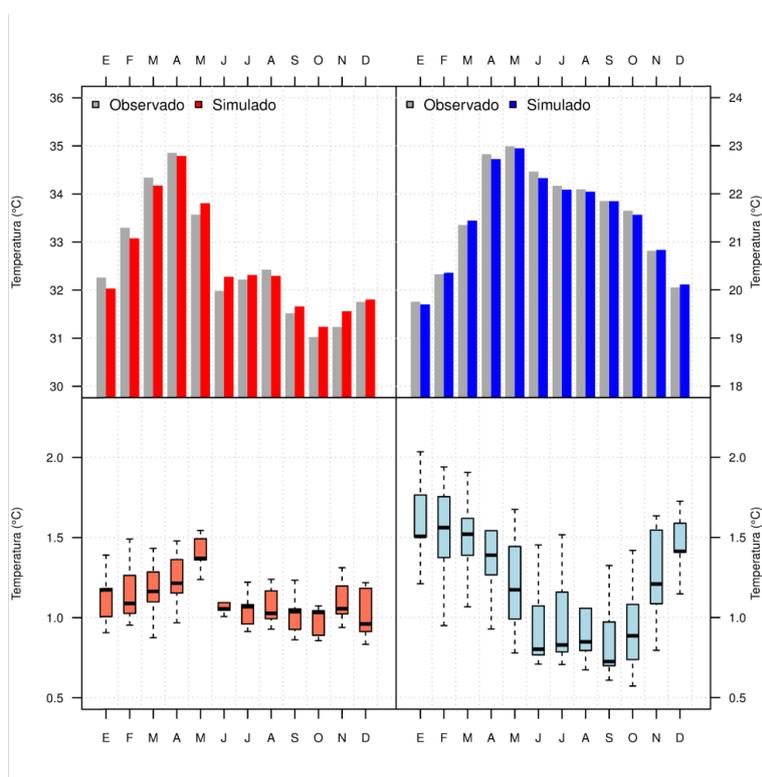


Figura 3. Verificación mensual del proceso de regionalización para la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha). Gráfica superior: datos mensuales observados (gris) y simulados mediante regionalización del reanálisis NCEP (rojo y azul, respectivamente). Gráfica inferior: Box plots del MAE simulados/observados. Valores calculados como media de todos los observatorios y para el periodo común 1951-2011.

#### 4.2 Resultados del proceso de validación

Los resultados de validación ponen de manifiesto el funcionamiento de cada modelo a la hora de simular las distintas variables en la zona de estudio ya que cada modelo es ajustado en función de una serie de consideraciones propias. En general los resultados obtenidos son muy buenos en el caso de la temperatura tendiendo a sobrestimarla muy levemente (por debajo de 1°C) en la época húmeda por algunos modelos (no mostrado aquí) y aceptables en el caso de la precipitación (figura 4), tendiendo a subestimar la precipitación en la mayoría de los casos. Algunos modelos como el GFDL-ESM2M y MIROC-ESM-CHEM presentan errores de

simulación del 60% en ciertos periodos y además no son capaces de representar la variabilidad intranual de la precipitación por lo que se ha descartado su utilización en la generación de escenarios de clima futuro.

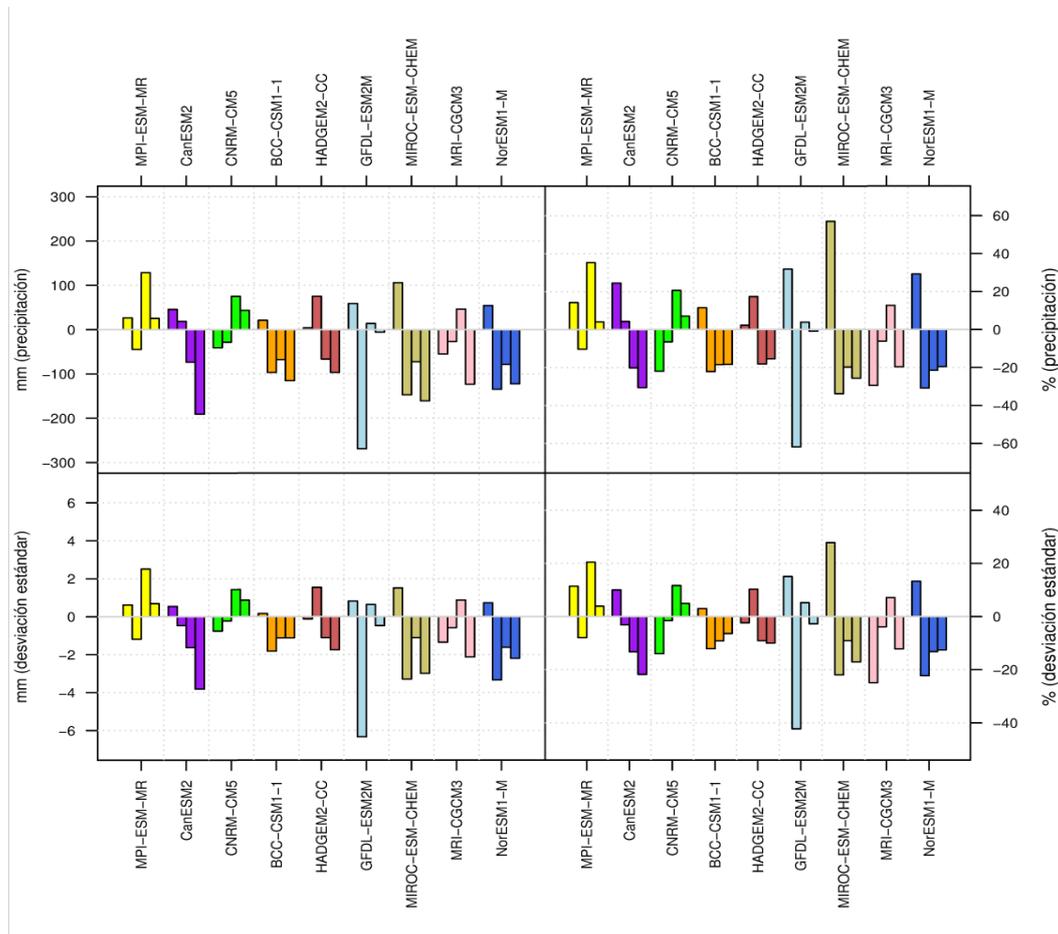


Figura 4. Validación estacional del proceso de regionalización de la precipitación acumulada (superior) y de su desviación (inferior) para los distintos GCMs, en valor absoluto (izquierda) y relativo (derecha).

#### 4.2 Resultados de la generación de escenarios de clima futuro

Se espera que la temperatura máxima aumente de forma progresiva a lo largo de todo el siglo XXI con respecto a los valores actuales (figura 5). Estos ascensos serán más acusados en los meses de la época de lluvias (incrementos de más de 3°C a finales de siglo) y especialmente en el periodo de Primera (donde llegan a los 4°C). Un comportamiento similar es el que se espera en el caso de la temperatura mínima (no mostrado aquí) pero con ascensos más suaves a los esperados en la temperatura máxima (incrementos máximos a finales de siglo de 2,8°C en el periodo de Primera). En cuanto a la precipitación relativa, se esperan pequeños cambios en los meses de la estación húmeda y aumentos en los de la estación seca (figura 6). Debe recalarse que, al registrarse precipitaciones muy bajas durante los meses secos, leves incrementos en la cantidad de precipitación suponen un aumento relativo importante.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de una metodología de *downscaling* estadístico se han generado escenarios de clima futuro para la región del Golfo de Fonseca. La técnica empleada ha sido verificada y validada antes de generar los escenarios, mostrando buenos resultados. El uso de 9 GCMs y diversos RCPs indica que los resultados son robustos y que las incertidumbres asociadas a las simulaciones climáticas pueden ser cuantificadas. La robustez de los escenarios generados permite su uso para evaluar el impacto del cambio climático.

Los resultados muestran una clara evidencia hacia un ascenso de las temperaturas, tanto máximas como mínimas, especialmente en la época de lluvias. No se esperan grandes variaciones en las precipitaciones durante la época de lluvias mientras que la tendencia para la estación seca es hacia un aumento de las precipitaciones.

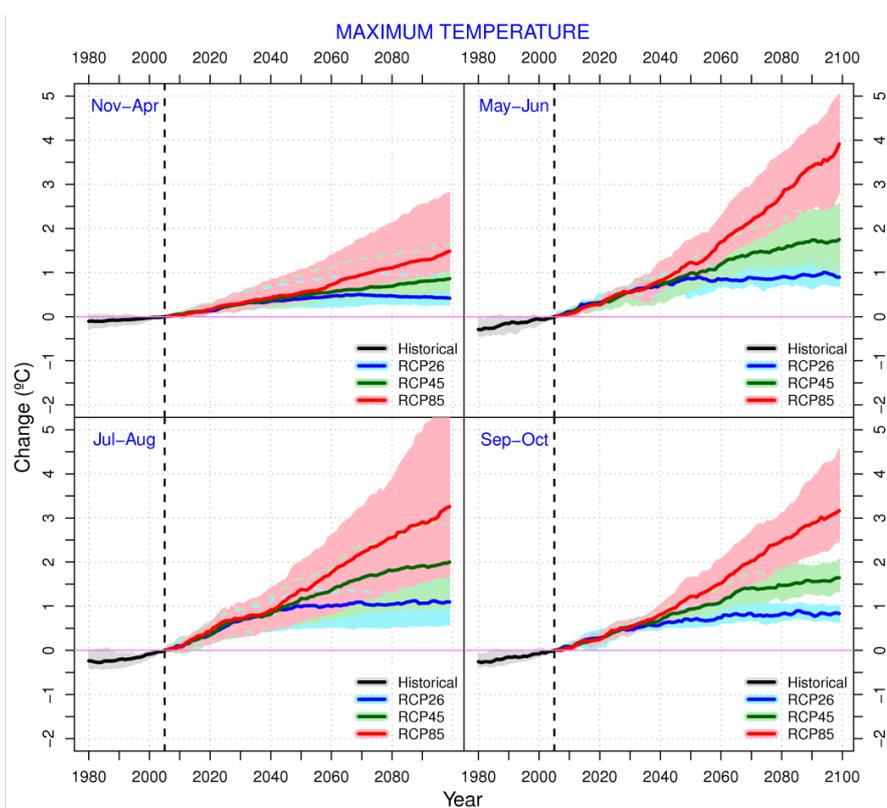


Figura 5. Incrementos de temperatura máxima esperados para: estación seca (noviembre-abril), periodo de Primera (mayo-junio), periodo de Canícula (julio-agosto) y periodo de Postrera (septiembre-octubre) para cada uno de los RCPs (26, 45, 85) a lo largo del siglo XXI. Los incrementos esperados se muestran como la mediana de todos los modelos para un mismo RCP (líneas) y la desviación estándar correspondiente (zonas sombreadas).

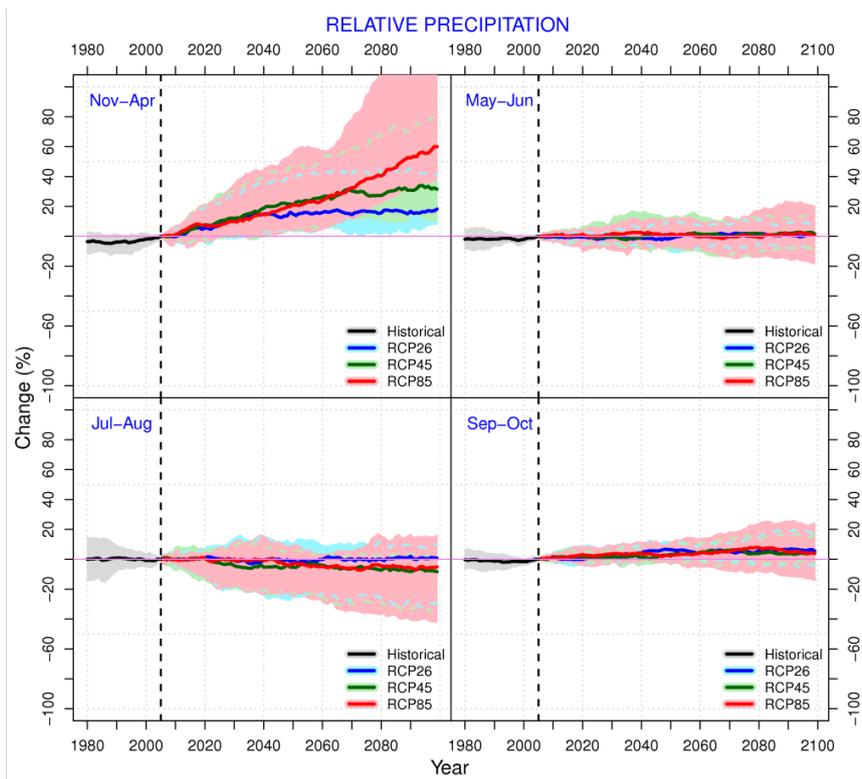


Figura 6. Incrementos relativos de precipitación esperados para: estación seca (noviembre-abril), periodo de Primera (mayo-junio), periodo de Canícula (julio-agosto) y periodo de Postrera (septiembre-octubre) para cada uno de los RCPs (26, 45, 85) a lo largo del siglo XXI. Los incrementos esperados se muestran como la mediana de todos los modelos para un mismo RCP (líneas) y la desviación estándar correspondiente (zonas sombreadas).

Modelo	Instituto	País
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
HADGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (MOHC)	United Kingdom
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	France
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CC-CMA)	Canada
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre (NCC)	Norway
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Germany
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japan
MIROC-ESM-CHEM	AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo), NIES (National Institute for Environmental Studies), JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)	Japan
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	USA

Tabla 1. RELACIÓN DE LOS GCMs UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO.

## 6. REFERENCIAS

Giorgi F, Francisco R (2001) *Uncertainties in the prediction of regional climate change*. Global Change and Protected Areas 9:127–139

Murphy J (1999) *An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate*. J Climate 12:2256–2284

Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtoles, J., Monjo, R., Gaitán, E. and Pino, M.R. (2013) *Description and validation of a two-step analog/regression downscaling method*. Theoretical and Applied Climatology, Volume 114, Issue 1-2, pp 253-269. Doi: 10.1007/s00704-013-0836-x. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-013-0836-x>

Von Storch V (1994) *Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research*. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report no. 122, Hamburg

Wilby RL, Wigley TML (1997) *Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations*. Prog Phys Geogr 21:530–548

Wilby RL, Wedgbrow CS, Fox HR (2004) *Seasonal predictability of the summer hydrometeorology of the River Thames*, UK. J Hydrol 295:1–16