

Estado actual de la aplicación de métodos de reducción de escala a las proyecciones de cambio climático en Centroamérica y el Caribe



Present situation of the application of downscaling methods to the climate change projections in Central America and the Caribbean

<http://opn.to/a/18k0F>

Alejandro Vichot-Llano ¹, Arnoldo Bezanilla-Morlot ¹, Daniel Martínez-Castro ^{2*},
Abel Centella-Artola ¹

¹Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

²Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

RESUMEN: En el artículo se realiza una descripción de los avances y el estado actual en la proyección climática en la región de Centro América y el Caribe. Se describen brevemente las características de los modelos climáticos globales y regionales que reproducen la dinámica del clima, permitiendo simular su evolución futura en función de los forzamientos de escenarios de emisión y se presenta una reseña de los principales resultados obtenidos en cuanto a las proyecciones de los campos de precipitación, temperatura y de otros rasgos climáticos regionales, como la sequía intraestival, el chorro de bajo nivel del Caribe y los ciclones tropicales. Los resultados alcanzados hasta el presente permiten afirmar que, a pesar de las incertidumbres existentes, la mayor parte de las proyecciones concuerdan en el calentamiento regional y en la reducción de las cantidades de lluvia en la región, así como el incremento de algunos eventos extremos. El análisis del conjunto de resultados alcanzados hasta la fecha sugiere que la aplicación de métodos basados en conjuntos de modelos, permite obtener resultados más robustos en las proyecciones climáticas.

Palabras clave: modelo climático regional, parametrizaciones, extremos climáticos, escenarios, proyecciones.

ABSTRACT: A description of the progress and current status of the climate projection in the Central American and Caribbean region is presented. The characteristics of the global and regional climate models that reproduce the dynamics of the climate and allow simulating its future evolution based on the forcing of emission scenarios are briefly described. The review summarizes the main results obtained on the projections of the fields of precipitation, temperature and other regional climatic features, such as the midsummer drought, the Caribbean low-level jet and tropical cyclones. The results achieved up to the present allow affirming that, in spite of the existing uncertainties, most of the projections agree in the regional warming and in the reduction of the amounts of rain in the region, as well as the increase of some extreme events. The analysis of the set of results achieved to date suggests that the application of methods based on model ensembles allows to obtain more robust results in the climate projections.

Key words: regional climate model, parameterization, climate extremes, scenarios, projections.

*Autor para correspondencia: Daniel Martínez-Castro. E-mail: danielmartinez53@gmail.com

Recibido: 17/01/2019

Aceptado: 08/03/2019

INTRODUCCIÓN

La proyección regional del cambio climático es un problema actual de gran importancia, por su repercusión en el desarrollo de los estudios de impacto y las evaluaciones de vulnerabilidad y capacidad de adaptación a la escala requerida. En esencia, el análisis de los impactos, la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación son elementos básicos de las agendas ambientales, por las repercusiones que el cambio climático tiene en diferentes sectores de la economía y el medio ambiente a diferentes escalas, influyendo de manera significativa en la toma de decisiones. Es de vital importancia tener en cuenta que si bien los modelos climáticos globales (MCG) constituyen la única herramienta capaz de producir información válida y relevante sobre el cambio climático futuro, aun poseen limitaciones para producir informaciones en la escala necesaria para evaluar los impactos y la adaptación, particularmente en regiones donde predominan los pequeños estados insulares. Es por ello que las técnicas de reducción de escala han adquirido gran importancia, haciendo que el uso de los modelos climáticos regionales se haya incrementado de manera significativa.

La región de Centroamérica (CAM) fue identificada por [Giorgi \(2006\)](#) como uno de los llamados “*climate change hotspots*”, o puntos muy sensibles al cambio climático, donde la manifestación regional del cambio global es especialmente pronunciada. La aparición de esta respuesta amplificada a los cambios globales se debe, según el citado autor, a las retroalimentaciones locales, que dependen de las condiciones específicas de cada región, como pueden ser cambios en la circulación regional que afecten a fenómenos climáticos característicos de las regiones, por lo que cada región debe analizarse individualmente para identificar mecanismos claves de respuesta.

La pronunciada respuesta de esta región al cambio climático se atribuyó principalmente al alto decremento de la precipitación proyectado y al alto cambio de la variabilidad de la misma. Aunque en este trabajo se excluye del análisis a la región del Caribe, estudios posteriores permiten afirmar que ambas características climáticas son atribuibles también a dicha región,

de modo que posteriormente en los estudios de cambio global se ha extendido el dominio de Centroamérica abarcando ambas regiones ([Campbell et al. 2010](#); [Karmalkar et al. 2013](#)). En el Quinto Informe de Evaluación del Programa Internacional de Cambio Climático (*International Program for Climate Change 5th Assessment Report AR5, 2013*; IPCC; por sus siglas en inglés), en base a los resultados de las proyecciones del ensemble de modelos globales del CMIP5, se plantea para fines del presente siglo, para la estación seca, un incremento de la temperatura superficial del aire en toda la región de CAMC, con predominio de incrementos entre 1.5 y 2.5 °C para el RCP 4.5 y entre 2.5 y 5 °C para el 8.5, ambos denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP; por sus siglas en inglés, [Moss et al. 2010](#)) considerados los nuevos escenarios de emisión caracterizándose por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que puede variar desde 2,6 hasta 8,5W/m². Mientras que para la estación lluviosa se proyectaron incrementos de temperatura entre 1.5 y 3 °C para el RCP 4.5 y entre 3 y 6 °C para el 8.5. En general, las zonas continentales experimentarán mayores incrementos de temperatura que las insulares, por lo que los incrementos máximos se refieren a CAM sobre tierra. Las proyecciones de precipitación promedio muestran tendencias hacia la disminución de las precipitaciones en la región, tanto para el período lluvioso como para el seco, aunque esta tendencia no es homogénea y existe un nivel de incertidumbre que da margen al incremento de lluvia en algunas regiones. En el presente trabajo, nos referiremos a este dominio, incluyendo además al Golfo de México y sus territorios circundantes, como CAMC.

En el artículo de [Vichot-Llano & Martínez-Castro \(2017\)](#), se resumieron los principales aspectos relacionados con la modelación regional climática en la región del Caribe, enfocados principalmente en la capacidad de valor añadido de los modelos climáticos regionales (MCR) sobre los resultados de los MCG. Así mismo, se discutieron brevemente los principales rasgos del clima del Caribe que deben reproducirse o proyectarse en las simulaciones climáticas y

reseñaron los principales resultados de los estudios de sensibilidad realizados en la región.

En este trabajo se presenta un resumen de los resultados de las principales investigaciones sobre la aplicación de modelos climáticos regionales a la reducción de escala de las proyecciones de cambio climático en la región CAMC. Se incluye, además un análisis del uso de conjuntos de diferentes modelos o de variantes del mismo modelo con parámetros perturbados para representar la incertidumbre asociada a la proyección climática futura sobre la base de estudios enfocados en diferentes variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, así como en patrones y rasgos climáticos, como la sequía intraestival (SIE; [Magaña et al., 1999](#)), el Chorro de bajo nivel del Caribe ([Amador, 1998](#); [Amador & Magaña, 1999](#)) y los Ciclones Tropicales (CT).

Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP)

Las predicciones del clima global futuro están sujetas a un alto grado de incertidumbre, en dependencia del modelo global utilizado, lo que no impide que se desarrollen cada vez más estudios en este sentido, tanto a escala global como regional, siendo la región de CAMC el objetivo de varios de ellos. Un precedente imprescindible para la realización de proyecciones regionales de cambio climático es la disponibilidad de proyecciones globales intercomparadas y ampliamente documentadas. [Meehl et al. 2007](#) discutieron los procedimientos y resultados relacionados con el esfuerzo de intercomparación de modelos globales conocido como Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 3 (CMIP3, por sus siglas en inglés), organizado por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP, por sus siglas en inglés) y posteriormente por el Grupo de Trabajo de Modelos Acoplados del Programa de Variabilidad y Predictabilidad Climática (WGCM, WCRP/Climate, CLIVAR, por sus siglas en inglés). En el cuarto informe de evaluación del IPCC AR4, [Solomon et al., 2007](#) se utilizaron los resultados de los modelos del CMIP3, unidos a la evolución de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) para fundamentar las proyecciones de

cambio climático de las diferentes variables, así como su origen antropogénico. Como resultado de CMIP3, se recolectaron salidas de modelos y se hicieron disponibles para toda la comunidad científica, siendo la primera vez que se conjugaba una serie tan grande de modelos de circulación general océano-atmósfera disponibles para analizar el cambio climático dando la oportunidad a cientos de científicos y estudiantes de todo el mundo, no solamente a contribuir con los informes del IPCC sino también en el conocimiento del trabajo realizado por la comunidad científica internacional sobre el cambio climático.

A partir del 2008, se desarrolló la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5; [Taylor et al. 2012](#)), que incluyó simulaciones globales de largo y mediano plazos, utilizando en las simulaciones a largo plazo no solamente modelos atmosféricos y acoplados océano-atmósfera, sino también modelos del sistema terrestre, con una representación completa del ciclo del carbono, lo que permite estudiar las retroalimentaciones de carbono sobre el cambio climático y los impactos del cambio climático en los ecosistemas. CMIP5 incluyó modelos más precisos que CMIP3, tanto para las componentes atmosféricas como oceánicas, lo que se corroboró con las evaluaciones con datos experimentales históricos. La resolución espacial de los modelos acoplados utilizados en CMIP5 fue superior a los de CMIP3. En el Quinto Informe del IPCC, AR5, ([Stocker et al., 2013](#)), se incluyó la evaluación de las simulaciones de los modelos de CMIP5 y se evidenció el avance en la capacidad predictiva climática respecto a los del CMIP3, y se utilizaron sus resultados en conjunto para las proyecciones del clima global y como condiciones de frontera para modelos regionales.

El Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés, [Sillmann et al. 2013](#) a y b) desarrolló una visión general de los cambios proyectados en una serie de índices climáticos a partir de los resultados de los modelos de CMIP3 y CMIP5. Los índices basados en la temperatura y la precipitación se calcularon con una metodología para simulaciones de cambio climático usando diferentes escenarios de emisión con el CMIP3 y

CMIP5. En la primera parte de su trabajo, los autores compararon la ejecución de ambos conjuntos de modelos, en particular respecto a la incertidumbre del conjunto y a la capacidad de reproducir situaciones extremas. Se demostró la mayor capacidad de CMIP5 para simular extremos climáticos y sus patrones de tendencia y su menor dispersión. También encontraron mejoras en el conjunto de CMIP5 en la representación de la magnitud de los índices de precipitación.

Experimento coordinado de reducción de escala regional. CORDEX

El Experimento regional coordinado de reducción de escala (CORDEX) es una iniciativa convocada en el 2009 por el Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP) conducente a unificar los esfuerzos de modelación regional climática que venían dando frutos desde la década años 90. Con este fin se definieron una serie de dominios de diferentes regiones del mundo, para unificar en lo posible los límites de las regiones para los estudios de sensibilidad y proyecciones climáticas regionales que desarrollan los diferentes grupos de modelación regional climática la [figura 1](#) muestra el dominio correspondiente a CAMC. En el marco de CORDEX, se han desarrollado una gran cantidad de proyecciones climáticas que cubren gran parte del mundo en dominios previamente coordinados. Para coadyuvar a este fin se han organizado tres conferencias internacionales de nivel mundial, el 2011 en Trieste, el 2013 en

Bruselas y el 2016 en Estocolmo. Se han desarrollado además varias reuniones regionales, en coordinación con diferentes organizaciones para promover la aplicación de técnicas dinámicas y estadísticas de reducción de escala para posibilitar la aplicación de las salidas de modelos globales a estudios de impacto regional de cambio climático. Como resultado de estos esfuerzos y de la acción de numerosos centros de investigación climática a nivel mundial, se cuenta con gran cantidad de estudios sobre el tema para los diferentes dominios regionales definidos en CORDEX y subdominios asociados a estos.

PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA CENTROAMÉRICA Y EL CARIBE

Comportamiento de los campos de variables meteorológicas en el clima futuro

Uno de los primeros estudios con escenarios de cambio climático sobre el Caribe lo desarrolló [Singh \(1997\)](#), quien utilizó el modelo de circulación general del *Canadian Climate Centre* (CCC, por sus siglas en inglés), estimando un incremento de la temperatura cerca de 2 grados celsius para mediados del siglo XXI e incremento de las condiciones para periodos de precipitaciones extremas. El estudio se centró específicamente en Trinidad y Tobago, donde las fluctuaciones de los patrones de lluvias y las temperaturas aumentaron en 1 grado Celsius mostrando signos tempranos de la influencia de los GEI en la atmósfera.



Figura 1. Dominio regional de CAMC definido en CORDEX (contorno rojo) . Tomado de http://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/images_pdf_documentation_CORDEX_domain_description_230615.pdf

Aplicando un ensemble multimodelo de simulaciones de calentamiento global, Neelin et al. 2006 evaluaron los cambios antropogénicos en la lluvia tropical. Las principales discrepancias se encontraron en la distribución espacial de las precipitaciones. Sin embargo, a pesar de la incertidumbre, dichos autores concluyeron que, tanto a nivel global como local, existen algunos estimadores de cambios para los que existe coincidencia, tanto global, como para determinadas regiones. Los modelos coincidieron en la amplitud global de las disminuciones de precipitación que ocurren en los márgenes de las zonas convectivas, con barras de error porcentual de magnitud similar a las del calentamiento tropical. En particular, para CAMC, se detecta una marcada tendencia a la sequía, tanto a partir de las series de datos de superficie y satélite para el clima actual, como para las proyecciones de cambio climático.

Con el objetivo de estudiar el impacto del aumento de las concentraciones antropogénicas del CO₂ sobre el clima del Caribe, [Ángeles et al. 2007](#) utilizaron tres escenarios de cambio climático, con el *Parallel Climate Model* (PCM, por sus siglas en inglés; [Dai et al., 2001](#)). Analizaron la variación estacional del clima de la región usando el reanálisis del Centro Nacional para la Predicción Ambiental, de los Estados Unidos (*National Center for Environmental Prediction*; NCEP, por sus siglas en inglés), la base de datos de precipitación del Centro de Predicción Climática (*Climate Prediction Center*); CPC, por sus siglas en inglés), desarrollada por [Xie y Arkin, \(1997\)](#), y los datos de temperatura superficial del mar de [Reynolds y Smith \(1994\)](#). Primero realizaron estudios de sensibilidad del PCM en representar el clima del Caribe, encontrando tendencia a subestimar la temperatura superficial del mar (TSM), que junto con la advección fría controla la variabilidad de la precipitación, de modo que se generan sesgos negativos de precipitación sobre la región. Las predicciones futuras vaticinaron la evolución de la TSM, de la formación de nubes y la interacción de la radiación solar, afectando la variabilidad anual de la lluvia simulada por el PCM desde 1996 hasta el 2098. Los autores seleccionaron el período 2041-2058 para observar las condiciones futuras del Caribe,

donde se proyecta un aumento medio de la temperatura en 1 °C, coincidiendo con un incremento de la precipitación al comienzo y al final de la temporada lluviosa, que junto con una TSM mayor a los 26.5 °C y un debilitamiento del viento en la vertical propiciaría un posible aumento de la frecuencia de ciclones tropicales.

[Centella et al. 2008](#) utilizaron el MCR PRECIS con los escenarios A2 y B2, creados por el grupo III de expertos del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC), conocidos como SRES, por el informe donde se les definió (Reporte Especial sobre Escenarios de Emisión; (*Special Report on Emissions Scenarios*); [Nakicenovic et al., 2000](#); [IPCC, 2000](#)). En esta ocasión el PRECIS fue forzado con los MCG HadCM3 del Centro de Hadley (*Hadley Center*) en Reino Unido y el ECHAM4, del Instituto Max-Planck en Alemania, con resolución espacial de 50 km. Los autores argumentaron que, bajo los escenarios A2 y B2 SRES para el período 2071-2099, y según los resultados de las simulaciones del sistema PRECIS- HadCM3 y PRECIS-ECHAM4 habrá un aumento de la temperatura entre 2.3 y 3.4 °C en la temperatura superficial del aire, principalmente sobre tierra, mostrando PRECIS-ECHAM4 el mayor calentamiento en el Caribe oriental. En general, las 2 simulaciones coincidieron en el incremento de la temperatura por encima de los 2 °C. Mientras que los cambios en la precipitación fueron simulados de diferentes maneras, respondiendo a la influencia del SRES, indicando un patrón seco sobre el Caribe, el océano Atlántico y partes de Centro América, y con patrones húmedos sobre Costa Rica, Panamá y algunas áreas de Colombia y la Florida.

Utilizando el mismo conjunto de simulaciones, [Campbell et al. 2010](#) presentaron los resultados del estudio de cambio climático en el Caribe, en particular del comportamiento proyectado de la temperatura y la precipitación en el período 2071-2100 bajo los escenarios de emisión A2 y B2, usando el sistema de modelación regional PRECIS con condiciones de frontera proporcionadas por el modelo HadAM3P ([Pope et al., 2002](#); [Jones et al., 2003](#)). Como referencia para la validación con los campos de precipitación y temperatura, se utilizaron las bases de datos en puntos de rejilla de la Unidad

de Investigación Climática (*Climate Research Unit*, CRU por sus siglas en inglés); [New et al., 2002](#)), y del Análisis Combinado de los datos de precipitación del Centro de Predicción Climática (CMAP, por sus siglas en inglés *Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation*, CMAP ([Xie y Arkin, 1997](#)) y de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), TRMM ([Huffman et al., 2007](#)). En este caso, el modelo representó acertadamente el tiempo presente, capturando la característica bimodal de la precipitación, así como el máximo y mínimo de la temperatura, mientras que los patrones de la precipitación se representaron correctamente. Sin embargo, se comprobó una subestimación de la precipitación en las islas del norte del Caribe así como sobre Cuba, Jamaica, La Española y Puerto Rico. En la proyección climática futura, los autores obtuvieron como resultado que, excepto en el extremo nordeste del dominio, que comprende La Florida y Bahamas, en la mayor parte de la región y en particular en las islas del Caribe, suponiendo el escenario A2, se experimentará una disminución de la precipitación para fines del siglo, que será cercana al 25% para Cuba y La Española, mientras que en Jamaica y las Antillas Menores puede llegar a cerca del 50 % ([Figura 2](#)). Para el escenario B2, los decrementos esperados son la mitad de los de A2. Para la temperatura, se proyectan incrementos medios de hasta 5 °C para el escenario A2 y 4 °C para el B2.

En un estudio de análisis de simulaciones numéricas y resultados de trabajos anteriores, [Biasutti et al. 2011](#) mostraron las estimaciones para los cambios de temperatura, precipitación, actividad ciclónica y el nivel del mar en el Golfo de México y el Caribe, obtenidas por medio de las simulaciones climáticas globales realizadas para el CMIP3 ([Meehl et al. 2007](#)), en función del 4to Reporte del IPCC, AR4, comparando proyecciones hacia la mitad y final del siglo XXI con los finales del siglo XX, asumiendo el escenario futuro A1B, con emisiones moderadas de GEI. Los autores concluyeron que el mayor peligro que afronta la región por el cambio climático proviene del aumento de la temperatura, ya que a finales del siglo, el verano

típico será más cálido que cualquier verano experimentado en el pasado. El calentamiento se manifestará no solo en promedio sino también en los extremos, de modo que aumenta la posibilidad de los llamados golpes de calor y olas de calor, poco frecuentes hasta ahora en la región.

Los cambios proyectados en la precipitación son menos pronunciados y más variados espacialmente que los de temperatura, indicando tendencia a incrementarse los períodos relativamente secos, en particular en la región del Caribe, lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de múltiples años consecutivos más secos de lo normal, incluso si uno de esos años no sería particularmente perjudicial. Los cambios de precipitación proyectados en la zona del Golfo de México son menores, pero también muy inciertos. Los autores revisaron los resultados de la literatura sobre modelado de ocurrencia de ciclones tropicales, concluyendo que los mismos serán menos frecuentes, debido a los cambios proyectados en la cizalladura del viento, pero más intensos, con un alto grado de incertidumbre para la región, pudiendo reducirse el número y la intensidad de los mismos. Por otra parte, los autores concluyen que el proyectado incremento del nivel del mar a nivel global aumentará el riesgo de marejadas ciclónicas tropicales.

El estudio de proyecciones de cambio climático para la región de Centroamérica (CAM) y México realizado por [Karmalkar et al. 2011](#) utilizó el sistema de modelación regional PRECIS con condiciones de frontera proporcionadas por el modelo HadAM3P ([Pope et al., 2002](#); [Jones et al., 2003](#)). Para validar el modelo, sus simulaciones de tiempo presente se compararon con varias bases de datos, principalmente de temperatura y precipitación, como la Red Histórica de Climatología Global (*Global Historic Climatology Network*; GHCN, por sus siglas en inglés; [Peterson & Vose 1997](#)), CRU, [New et al., 2002](#); [Mitchell y Jones, 2005](#)), Reanálisis Regional Norteamericano (*North American Regional Reanalysis*; NARR, por sus siglas en inglés), Centro Global de Climatología de las Precipitaciones (*Global Precipitation Climatology Centre*; GPCC, por sus siglas en inglés); [Rudolf and Schneider 2005](#)) y Análisis Combinado de los datos de precipitación del Centro de Predicción Climática (CMAP, por sus

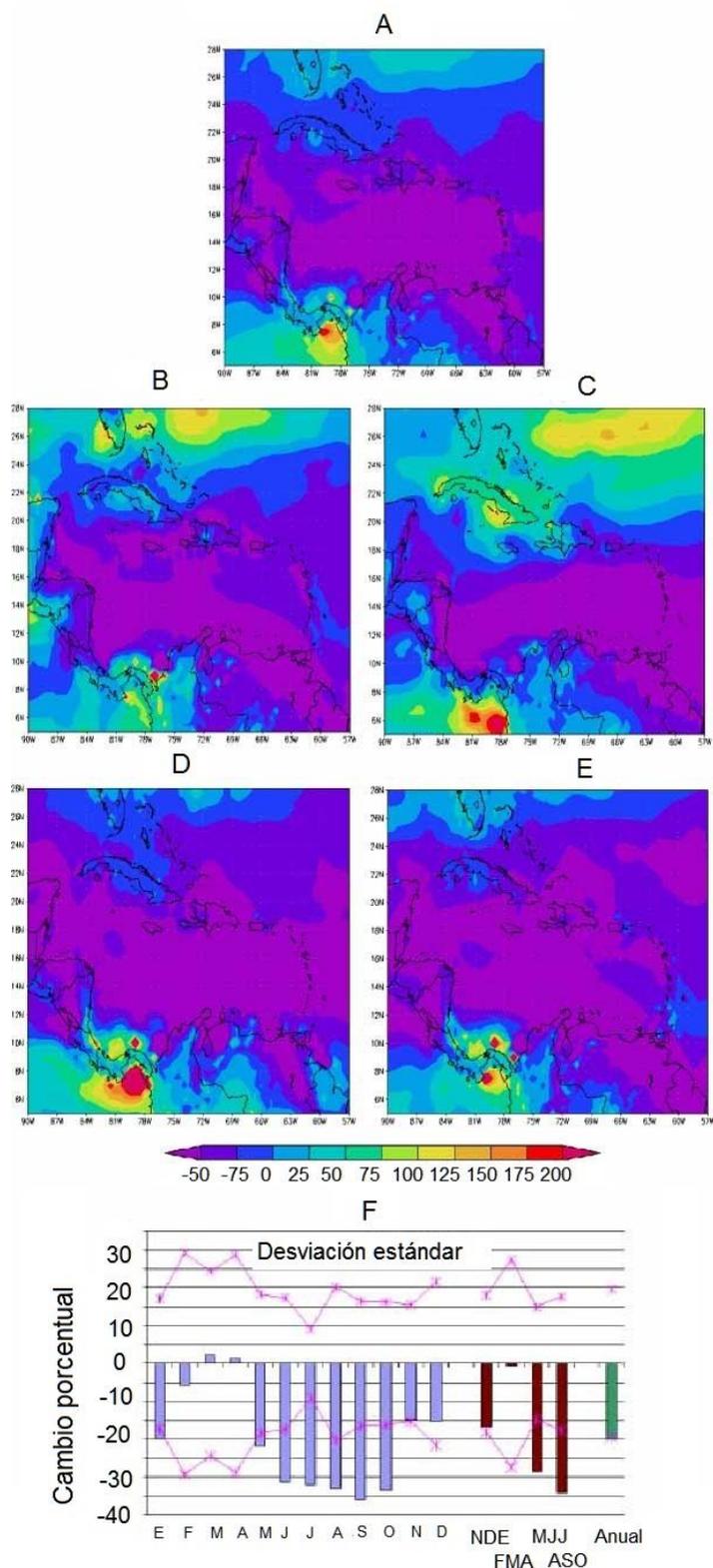


Figura 2. Proyecciones de precipitaciones para el período 2071-2100 relativas al período de referencia de 1961-1990, bajo el escenario A2 (Cambio porcentuales) Los paneles (A), (B), (C), (D) y (E) representan la precipitación anual, y los trimestres NDE, FMA, MJJ y ASO, respectivamente. El panel (F) muestra los cambios mensuales, trimestrales y anuales calculados promediando el dominio mostrado en A-E. La línea continua representa una desviación estándar calculada del conjunto de salidas de CMAP. (Tomado de [Campbell et al. 2010](#))

siglas en inglés; [Xie & Arkin 1997](#)). La validación mostró mejores resultados en la simulación espacial, y en la variabilidad temporal de la temperatura, aunque encontraron que el modelo presenta un sesgo negativo predominante en la precipitación, lo que los autores asocian principalmente al sesgo inducido por el modelo global, que es reducido por el MRC, pero no de manera suficiente. El sesgo resultante es mayor en la estación lluviosa y en particular en su segunda mitad, lo que los autores de dicho trabajo atribuyen asociándolo, por una parte, a que posiblemente no detecte correctamente la ocurrencia de ciclones tropicales y también a su incapacidad de simular correctamente la ocurrencia de tormentas convectivas, aunque ninguna de estas afirmaciones está demostrada en el trabajo. En nuestra opinión, esta limitación del modelo regional pudiera estar asociada a que la resolución horizontal de 50 km no es suficiente para predecir acertadamente este tipo de fenómeno. No obstante, en general el modelo regional mejora los resultados del modelo global y reproduce correctamente las características climáticas de la región como la SIE y el CBNC.

En las simulaciones de clima futuro, los autores determinaron que las condiciones de calentamiento del escenario A2 eran mayores en la estación lluviosa que en la poco lluviosa en CAM y en particular en la península de Yucatán, donde el incremento de temperatura se proyecta en más de 4 °C. Las predicciones futuras con el escenario A2 muestran también una reducción en la precipitación en el Océano Pacífico, unida al desplazamiento hacia el sur en la posición de la zona de convergencia intertropical ZCIT en el Pacífico y un aumento en la precipitación de la propia ZCIT. La costa de América Central experimentará una disminución de las precipitaciones en la estación húmeda, así como en la mayor parte de México y CAM, concluyéndose que el cambio climático sobre la región reducirá los acumulados de lluvia en órdenes de magnitud similares o incluso mayores que los producidos por el evento El Niño en décadas anteriores. Por otra parte, bajo condiciones del calentamiento global, en el Caribe, se prevé una intensificación de la sequía sobre la estación lluviosa de mayo a noviembre,

así como una intensificación del CBNC y su relación directa con la precipitación en la región.

Por otra parte, [Taylor et al. 2013](#) reseñaron el desarrollo de capacidades de trabajo en las islas del Caribe con el MCR PRECIS y analizaron los resultados de su aplicación a dos los escenarios SRES A2 y B2, en el período 2071-2100, capturando acertadamente las características temporal y espacial del tiempo presente, incluyendo los picos del invierno y el verano. Los autores encontraron persistencia del CBNC más allá del mes de julio, acentuando los patrones de sequía futura del Caribe. Sin embargo, el máximo invernal del CBNC apenas sufrió modificación. En general, estos resultados confirman las conclusiones de [Karmalkar et al., 2011](#).

Posteriormente, [Karmalkar et al. 2013](#) se enfocaron en las islas del Caribe, presentando un análisis actualizado basado en estudios previos, observaciones disponibles y simulaciones de modelos climáticos a escalas espaciales relevantes para la región caribeña. Para ello se utilizaron datos de los MCG incluidos en el CMIP3 ([Meehl et al., 2007](#)), así como reducción de escala para aumentar la resolución de las simulaciones, con dos variantes del sistema PRECIS ([Pope et al., 2002](#); [Jones et al., 2003](#)). Se denominó RCM-H al caso del modelo regional anidado en el HadAM3P y RCM-E al anidado en el ECHAM4. Del análisis de las proyecciones, se constata el incremento medio anual de la temperatura del aire en superficie, especialmente en el Caribe noroccidental, con su mayor expresión sobre Cuba, La Florida y parte de Las Bahamas. El enfoque del trabajo fue mayoritariamente sobre la precipitación, determinándose que la misma se subestima para las islas en los modelos del CMIP3. En particular, el primer máximo del ciclo anual de precipitación en las Antillas Mayores se subestima más que el segundo, lo que trae como consecuencia que en algunas regiones se debilite la SIE. Los autores relacionan este sesgo con la subestimación de la TSM en el Caribe Occidental. Sin embargo, los modelos en general capturan el ciclo de presión superficial y el CBNC y predicen correctamente el máximo de precipitación al final de la estación lluviosa en el Caribe Oriental.

La proyección del ensemble de modelos globales de CMIP3 con el escenario SRES A2

mostró un mayor calentamiento en el noroeste del Caribe (cerca de 3 °C como promedio) que en el sudeste (2,4 °C). Las simulaciones del RCM disponibles corroboran este patrón de calentamiento, pero con un mayor ritmo sobre las islas mayores. Los modelos regionales muestran un mayor grado de calentamiento que los globales para la mayor parte del dominio, en particular para RCM-E, aunque las proyecciones de RCM-H son más altas que las del ensemble global, excepto en algunas de las islas pequeñas del Caribe sudoriental. Un logro importante de los experimentos de simulación numérica con el modelo regional fue poder establecer proyecciones consistentes para las islas pequeñas, no resueltas por los modelos globales.

Como se mencionó anteriormente, las proyecciones medias de CMIP3 bajo SRES A2 (Figura 3) muestran que la disminución relativa

de la precipitación es mayor durante la estación húmeda temprana (MJJ: 30-40%) que en la tardía (ASO: 20-30%), lo que tiende a hacer menos pronunciada la SIE, especialmente en el Caribe Occidental. Para la estación seca la disminución proyectada de la precipitación es mucho menor, mientras que para la región de Las Bahamas se proyecta incremento. Las proyecciones del modelo regional corroboran en general las de los GCM, pero en el caso del RCM-H, el decremento de la precipitación es mucho menor que para RCM-E. Los autores relacionan la disminución proyectada de las precipitaciones a principios de verano con un adelanto de la influencia del anticiclón del Atlántico y con el fortalecimiento del CBNC, así como al desplazamiento al sur de la zona de convergencia inter-tropical (ZCIT).

Utilizando el modelo regional RegCM4 (Giorgi et al 2012) Fuentes-Franco et al., 2014

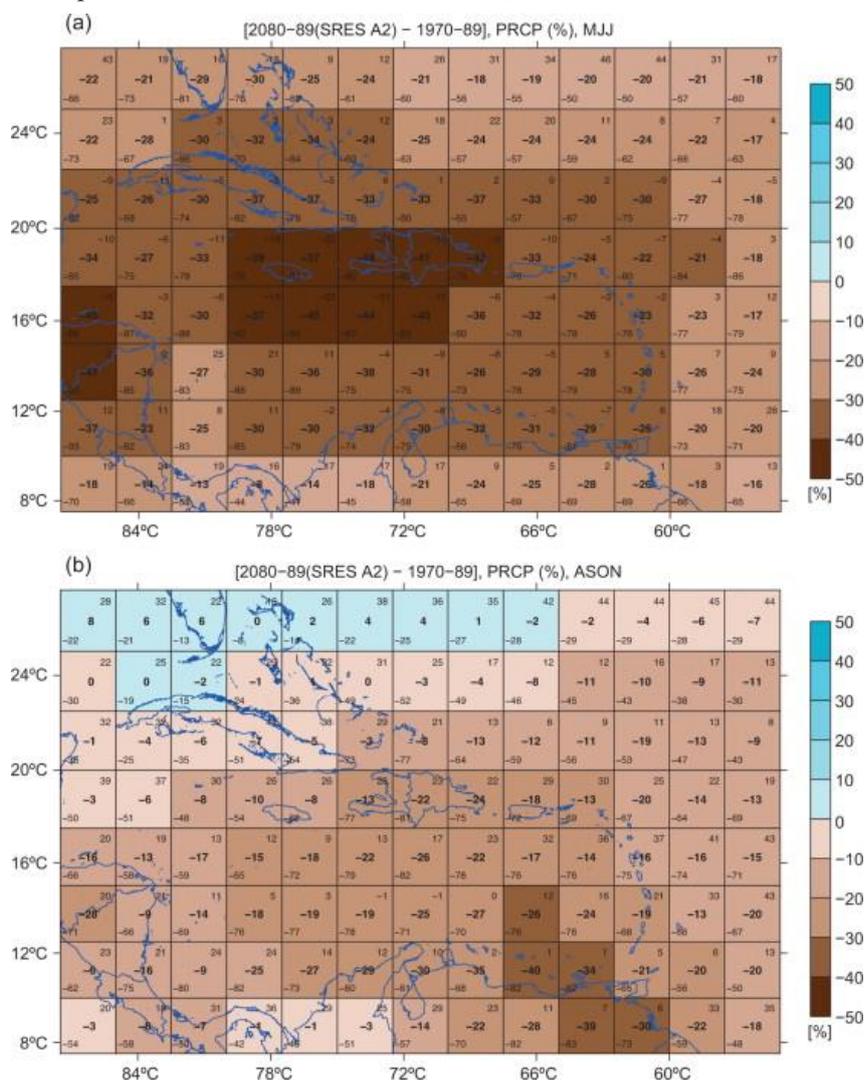


Figura 3. Cambio proyectado en la precipitación (%) para el 2080 en el escenario SRES A2 basado en el CMIP3. (Tomado de Karmalkar et al. 2013)

ejecutaron la reducción de escala de las proyecciones de CMIP5 para una región de estudio que comprende Centroamérica y México (CAMM). Dichos autores utilizaron dos MCG del CMIP5 como condiciones de contorno para dos configuraciones del RegCM-4, resultando en cuatro diferentes proyecciones climáticas para el período 1970-2100 y suponiendo la trayectoria de concentración representativa RCP 8.5. Los resultados del análisis climatológico previo mostraron que el gradiente de anomalías de SST entre el Atlántico Norte y el Pacífico Norte modula la variabilidad interanual de la precipitación sobre CAMM. Las simulaciones de tiempo presente muestran que el RegCM reproduce mejor que el MCG los patrones de anomalías de TSM durante los años más húmedos y secos, con respecto a los obtenidos de las bases de datos. Se verifica además que el RegCM4 reproduce la dependencia de la precipitación con el gradiente entre la temperatura de la superficie del mar del Atlántico y del Pacífico (SST).

La fuerte relación entre la precipitación y las anomalías de la TSM no parece cambiar sustancialmente en las condiciones climáticas futuras (Figura 4). Para la temporada de lluvias, de junio a septiembre, se proyecta un cambio futuro en la variabilidad interanual de la precipitación hacia una mayor ocurrencia de

estaciones muy secas en la región SMECAM, el cual es mayor en las proyecciones del modelo regional que en el global. La intensificación del CBNC se identifica como un eslabón clave para que el gradiente de temperaturas entre las dos regiones oceánicas dé lugar a la proyectada reducción de precipitación para fines de siglo.

Además, se detectó un aumento en la ocurrencia de estaciones muy secas y aumento del déficit medio de precipitación en las mismas, asociadas con un gradiente de temperatura superficial del mar entre el Atlántico Norte Tropical (ANT) y el Pacífico Norte Tropical (PNT) más negativo, intensificando el CBNC. Los autores identificaron tres fuentes fundamentales de incertidumbre en las proyecciones futuras del clima en la región, como son la capacidad de los MCG de simular correctamente la respuesta de TSM a la elevación de la concentración de GEI; la resolución de los modelos que se utilicen y los esquemas de parametrización de convección y procesos de superficie que se apliquen.

Análisis de extremos en las proyecciones de cambio climático

McLean et al., 2015 usaron el modelo climático regional PRECIS para estudiar los cambios de fin de siglo en los extremos climáticos bajo los escenarios de emisión A2 y B2 en cuatro zonas de la región del Caribe,

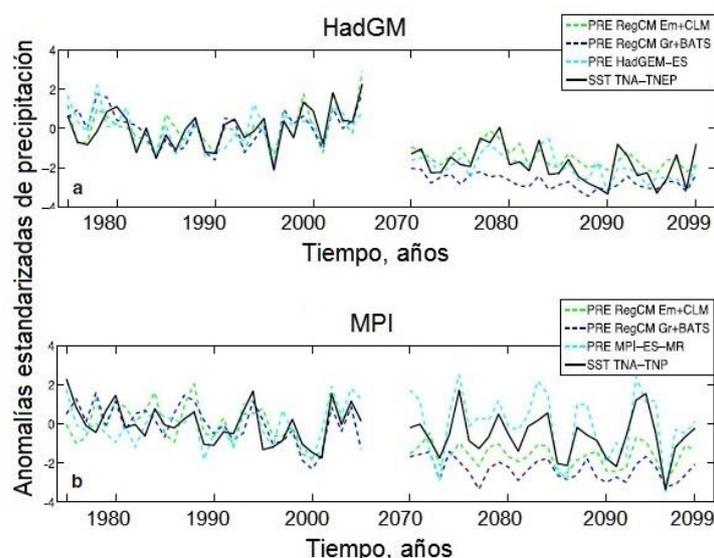


Figura 4. Series temporales de anomalías estandarizadas de precipitación y del gradiente de TSM ANT-PNT para el período de verano (JJAS) sobre CAMM para las salidas del RegCM4 con condiciones de contorno de los MCG HadCM (a) y MPI (b) para los períodos de referencia y de fines del siglo (Adaptado de Fuentes-Franco et al., 2014)

definidas anteriormente por [Jury \(2009\)](#) en un estudio del comportamiento de la precipitación en la región, complementadas con una zona más definida por los autores ([Figura 5](#)). Las tendencias de las precipitaciones y la temperatura máximas y mínimas extremas del MCR encontradas por los autores fueron validadas contra estaciones meteorológicas de superficie para el período 1979-1989. El modelo mostró mayor habilidad para representar tendencias en días húmedos y lluvias extremas que días secos consecutivos, días húmedos y precipitación máxima en 5 días. Las tendencias de la cantidad de noches cálidas, días fríos y días cálidos generalmente se reprodujeron bien. Las proyecciones para 2071-2099 relativas a 1961-1989 resultaron en que la zona norte y este de la región del Caribe experimentarían lluvias más intensas bajo A2 y B2 ([Figura 6](#)). En nuestra opinión esto contrasta con los resultados de otros trabajos, centrados en el comportamiento medio futuro de la precipitación, destacándose el hecho de que la tendencia general a la sequía coexiste con el incremento de eventos extremos de lluvia. Los cambios en los índices de temperaturas extremas generalmente confirman los resultados de otros autores ([Centella et al. 2008](#), [Campbell et al. 2010](#), [Karmarkar et al. 2011](#)) que coinciden en señalar que el Caribe será más cálido hacia el final del siglo en ambos escenarios de emisiones, con los cambios más fuertes en la zona del Caribe oriental.

El modelo de reducción de escala estadístico (*Statistical Downscaling Model*; SDSM, por sus siglas en inglés) fue utilizado por [Stennett-Brown et al. 2017](#) para investigar proyecciones futuras de mínimos diarios y temperaturas máximas extremas para 45 estaciones y extremos de lluvia para 39 estaciones en la región del Caribe y países vecinos. Estos autores encontraron que la frecuencia de días y noches cálidos en el período 2071-2099 se incrementará bajo los escenarios A2 y B2, respecto al período de referencia 1961-1990, mientras que, los modelos sugirieron un aumento en los días secos consecutivos para la mayoría de las estaciones, exceptuando algunas del Caribe Oriental y las Bahamas. También destacaron la disminución en el valor máximo mensual de la precipitación acumulada en un día y del total anual de días con más de 10 mm de acumulado, así como de la precipitación total anual por encima del percentil 95 para algunas localidades del norte del Caribe y Belice, en comparación con una combinación de aumentos y disminuciones para el Caribe oriental. Los resultados también coincidieron en que el CBNC parece tener una influencia significativa en la temperatura del Caribe y las precipitaciones extremas para el período en cuestión.

[Ángeles-Malaspina et al. 2018](#) desarrollaron una investigación sobre las proyecciones futuras del índice de calor y las olas de calor en CAMC. Los autores utilizaron registros cada seis horas del reanálisis NCEP en el período 1948-2015 para calcular el índice de calor y el

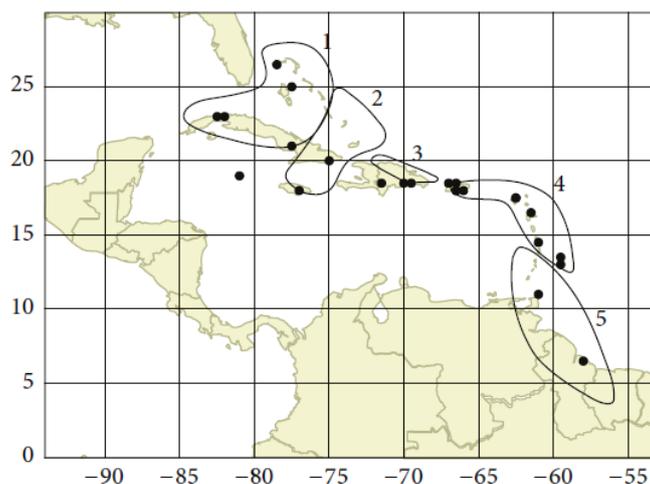


Figura 5. Zonas definidas en el trabajo de [McLean et al \(2015\)](#) para las proyecciones de los parámetros relacionados con extremos de temperatura y lluvia. (Tomado de [McLean et al., 2015](#))

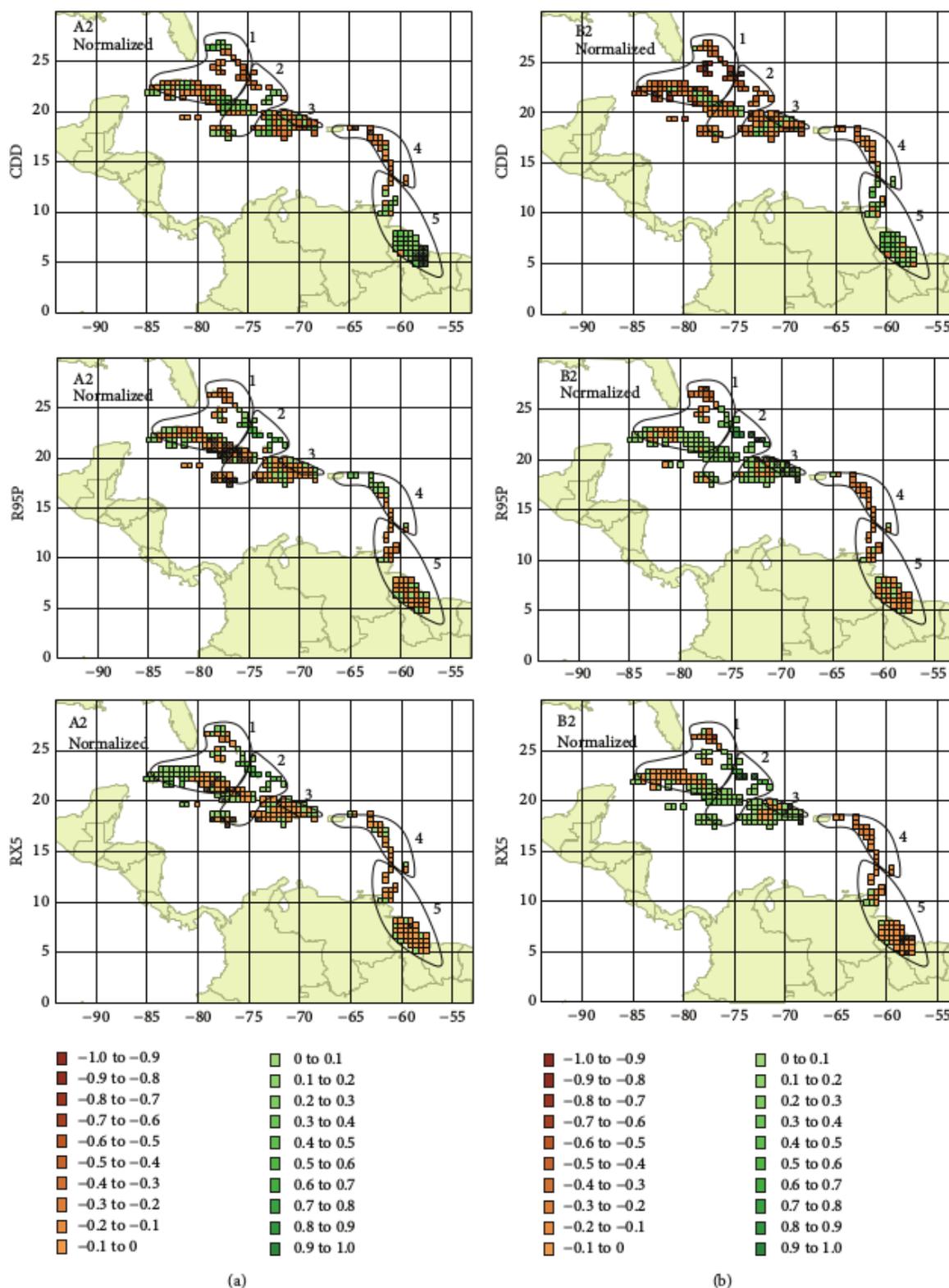


Figura 6. Cambios normalizados proyectados en las tendencias para DDC, R95P y RX5 para 2071-2099 en relación con 1961-1989 para A2 (paneles izquierdos) y B2 (paneles de la derecha) Escenarios IPCC SRES. (Tomado de McLean et al., 2015)

comportamiento de las olas de calor con el cambio climático. Se utilizó la definición de índice de calor del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos, que involucra la

temperatura y la humedad relativa (<https://www.weather.gov/ama/heatindex>). La ola de calor se definió a partir de la distribución del índice de calor para el período de referencia de

1948-1998, de modo que se dice que hay una ola de calor cuando el índice de calor es mayor que el percentil 99.5 de la distribución durante tres días consecutivos. Este valor del percentil en el período de referencia se utiliza como umbral para las evaluaciones en todos los períodos, de tiempo presente y futuro. (Figura 7).

Se detectó la tendencia a incremento del índice de calor en la región desde 1998, conduciendo a la intensificación de las olas de calor con cambios tanto en la frecuencia como en la distribución máxima de la amplitud. Como resultado del uso de un ensemble multi-modelo con cinco miembros de MCG para dos escenarios de emisión, el RCP4.5 y RCP8.5 los autores encontraron que estos eventos de olas de calor se proyectarán a fines del siglo XXI y con mayor intensidad para el RCP8.5, con grave incidencia en la economía y en la salud humana.

Comportamiento de los ciclones tropicales en el clima futuro

McDonald et al. 2005 realizaron simulaciones de ciclones tropicales (CT) a partir del modelo global atmosférico HadAM3 (Pope et al., 2002), de resolución espectral N48, correspondiente a una resolución espacial de $3.75^\circ \times 2.50^\circ$, basado en la componente atmosférica del modelo HadCM3 (Gordon et al. 2000). Se utilizó además una variante del modelo con mayor resolución (N144; $0.83^\circ \times 1.25^\circ$) ambas forzadas con TSM y hielos marinos observados. Las simulaciones de ambos modelos se compararon entre sí y con experimentos de condiciones perturbadas de TSM y hielos marinos, obtenidas de la salida del modelo acoplado HadCM3. El modelo de mayor resolución produce un aumento en la ocurrencia de CT en las cuencas del Océano Pacífico nor-

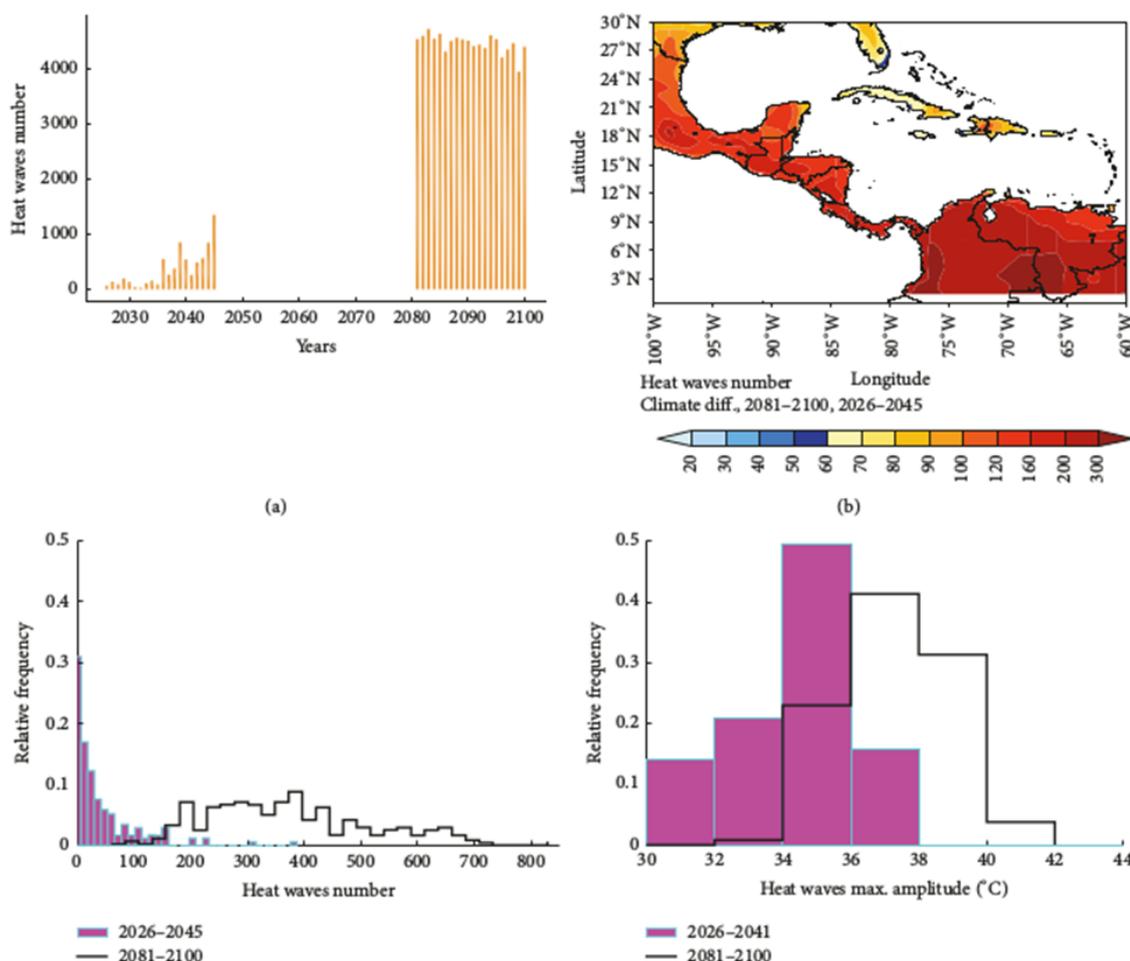


Figura 7. Media del conjunto multimodelo para el escenario de RCP8.5: (a) series temporales anuales, (b) cambio de número de olas de calor entre los períodos climáticos 2081-2100 y 2026-2045, (c) frecuencia de olas de calor de toda la región, incluida la zona oceánica, y (d) promedio regional de olas de calor de amplitud máxima. (Tomado de [Ángeles-Malaspina et al. 2018](#))

oriental e Índico y disminución en el Atlántico Norte, noroeste del Pacífico y sudoeste del Pacífico, análogos al comportamiento de los CT durante eventos ENOS. Los cambios en la distribución global de CT se obtienen en los experimentos de menos resolución, aunque produce menos vórtices ciclónicos, de modo que se muestra también la importancia del incremento de resolución para la reproducción de la ocurrencia de CT. El modelo acoplado también es capaz de predecir aproximadamente la ocurrencia de CT, a partir de la utilización de un parámetro de génesis convectiva.

Posteriormente, varios trabajos basados tanto en MCG como MCR en la última década han reforzado la predicción de que la frecuencia de los ciclones tropicales (CT) del Atlántico (Figura 8) podría disminuir a medida que el clima se calienta; sin embargo, dichos modelos no discriminaron las tormentas de intensidad de categoría 3 o superior (Knutson et al., 2008; Martínez-Castro et al., 2011). De ahí que Bender et al. 2010 exploraran la influencia del futuro calentamiento global en los huracanes del Atlántico con una estrategia de reducción de escala mediante el uso de un modelo operacional de predicción de huracanes que produce una distribución realista de huracanes intensos para las condiciones actuales. El modelo usado por los autores proyectó casi el doble de la frecuencia de las tormentas de categoría 4 y 5 para el final del siglo XXI, a pesar de una disminución en la frecuencia general de los ciclones tropicales. La

reducción de escala se basó en la media del ensemble de 18 proyecciones de cambio climático. Los autores prevén además que el mayor aumento ocurra en el Atlántico occidental, al norte del paralelo 20 ° N.

En el estudio de los CT se destaca el trabajo de [Diro et al. 2014](#) (Figura 9), quienes utilizaron datos de reanálisis para mostrar la habilidad de un ensemble de proyecciones con RegCM-4 anidados en dos modelos globales del CMIP5 para reproducir la ocurrencia de CT en el entorno de México y CAMC a partir de datos de reanálisis y de salidas de clima presente de dos modelos globales sobre el dominio CORDEX de Centro América y el Caribe. Después de establecer la sensibilidad de las simulaciones al cambio de parametrización convectiva y campo de entrada, se realizaron simulaciones a futuro con diferentes esquemas de cúmulos y alimentadas con dos GCM diferentes. Utilizando la parametrización de Emanuel, los autores encontraron que la frecuencia futura de los CT más intensos y el número de CT con ciclo de vida más largo aumentan ligeramente, mientras que la frecuencia general de los CT disminuye en las regiones atlántica y costera del Pacífico, pero aumenta en las áreas occidentales del Pacífico oriental. La frecuencia de ocurrencia de CT en las latitudes más altas del dominio tiende a desplazarse hacia el norte y a acumularse más al final de la temporada ciclónica.

[Jones et al. 2016](#) evaluaron la habilidad de cuatro modelos estadísticos en la predicción

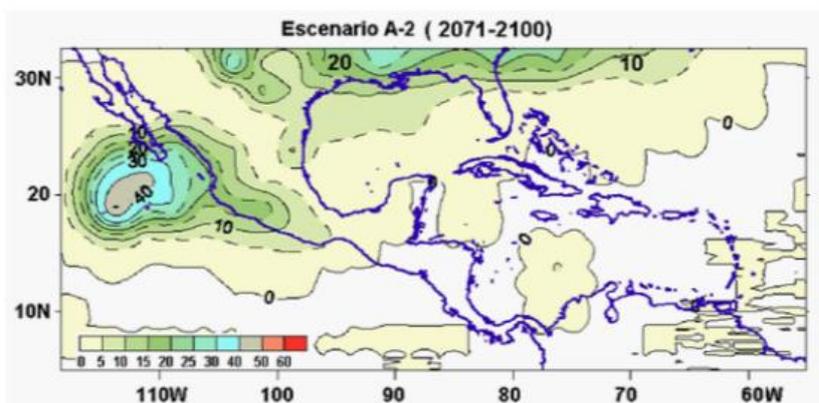


Figura 8. Isolneas de densidad de trayectorias de vórtices representativos de ciclones tropicales obtenidas de la salida del sistema de modelación climática PRECIS obtenida para el periodo 2071-2100 con las condiciones de concentración de CO₂ del escenario SRES-A2 y con las condiciones de frontera de la salida del HadCM3 correspondiente a dicho escenario. (Tomado de [Martínez-Castro et al., 2011](#))

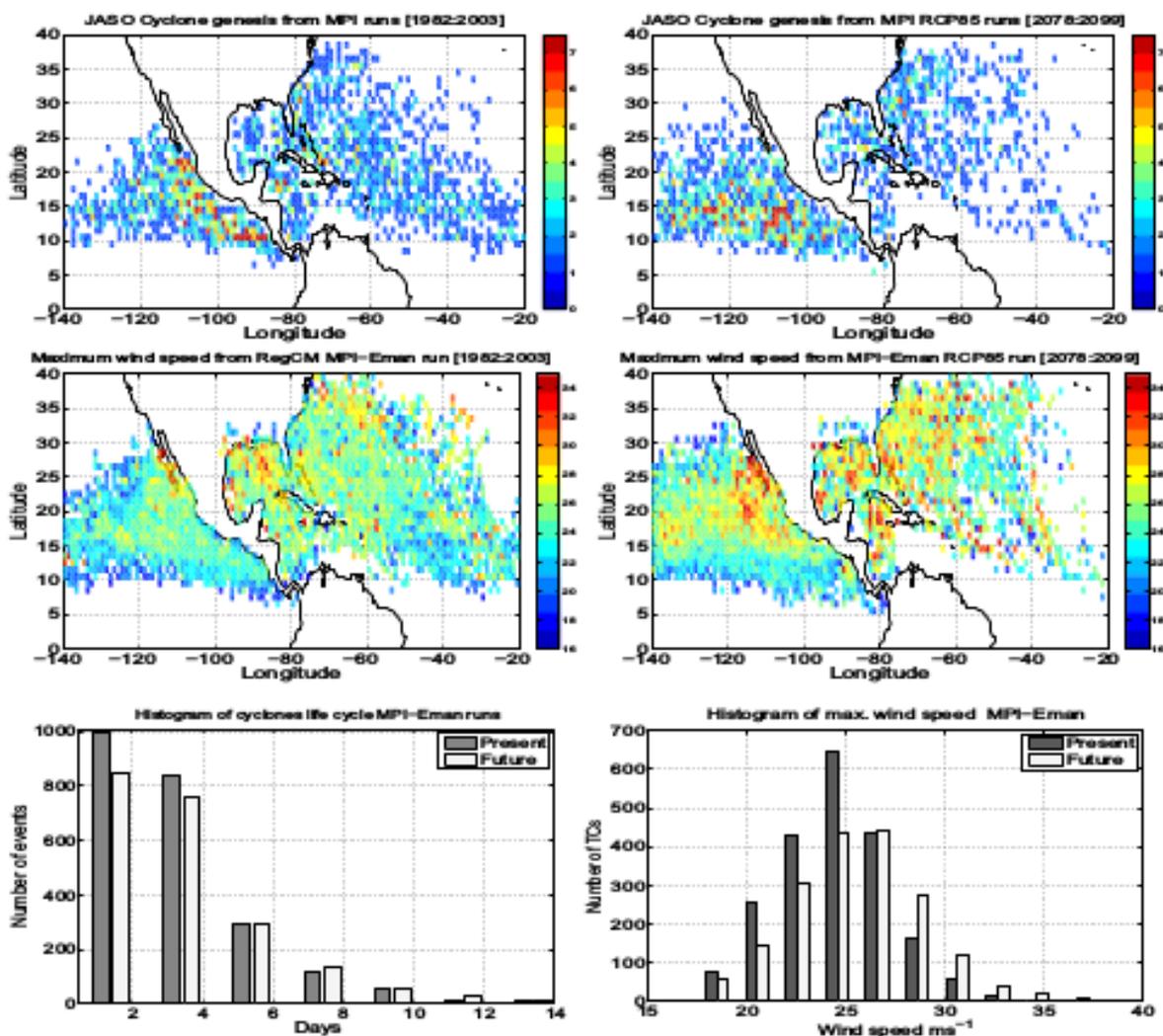


Figura 9. Características de CT en el 2078-2099 relativas a 1982-2003. (Tomado de [Diro et al. 2014](#))

retroactiva de la frecuencia anual de CT en el Atlántico Norte entre 1950 y 2008, con el objetivo de proyectar la actividad ciclónica futura. Tres de los modelos utilizados por los autores están motivados por esquemas de pronóstico estadístico operativo y se basan en predictores estándar de huracanes, incluidas la TSM y el viento zonal cercano a la superficie, mientras que el cuarto modelo usa un índice de gradiente TSM previamente propuesto para la predicción de lluvia estacional en el Caribe. Estos modelos estadísticos, creados a partir de métodos de regresión, explican el 24 - 48% de la variabilidad observada en la frecuencia anual de CT de 1950 - 2008. El estado futuro de los predictores fue extraído de las simulaciones del ECHAM5, HadCM3, MRI CGCM2.3.2a y MIROC3.2 modelos de circulación global del CMIP3. Los modelos que utilizan predictores de

TSM y viento cercano a la superficie sugirieron aumentos significativos en la frecuencia media anual entre 2 - 8 CT para el período 2070-2090, en comparación con un modelo de predicción de viento de superficie, indicando que las tendencias positivas en las TSM bajo el calentamiento global tienen una mayor influencia en las proyecciones que los cambios en la variabilidad de los vientos. Mientras que los modelos que sólo utilizaban el viento presentaban disminuciones en la frecuencia de CT y el modelo de gradiente de TSM produce pocos cambios relativos a la media actual. Las proyecciones usando los nuevos modelos mostraron un aumento más conservador o una disminución más fuerte en la frecuencia, en consonancia con un CBNC más fuerte con un rol más dominante en un clima más cálido.

[Khalyani et al. 2015](#) estudiaron los posibles efectos ecológicos y económicos del cambio

climático para las islas tropicales, utilizando los resultados de 12 MCG, con reducción de escala estadística, tomando a Puerto Rico como caso de estudio. Los autores usaron dos enfoques para la obtención de la proyección de cambio climático para la región: el primero, promediando las salidas de todos los MCG disponibles y el segundo, seleccionando sólo los modelos que fueron capaces de reproducir las dinámicas observadas a gran escala que controlan las precipitaciones en el Caribe. Se determinó que la precipitación disminuirá, produciendo aumentos graduales y lineales en la intensidad de la sequía y los extremos, lo que resulta más marcado utilizando sólo los modelos regionalmente consistentes. El calentamiento proyectado para el período 2071-99, respecto a 1960-90, sería de 4.6°C a 9°C, dependiendo de los escenarios de emisión global y el lugar específico, ocasionando aumentos de las demandas de energía para climatización, además de graves daños ecológicos, con la pérdida de la mayor parte del área de bosques pluviales subtropicales.

Por otra parte, [Taylor et al., 2018](#) (Figura 10) usaron un conjunto de 10 miembros de CMIP5 para analizar el clima futuro del Caribe para incrementos de la temperatura global de 1.5, 2.0

y 2.5 °C respecto a los valores preindustriales. Los autores encontraron que, para el escenario RCP4.5, los umbrales definidos de calentamiento global se alcanzarán en los años 2030, 2050 y 2070, respectivamente. Como promedio, el Caribe experimenta un incremento de la temperatura del aire superficial media menor que en el resto del mundo, aunque hay partes de la región que proyectan mayores incrementos. Los resultados indicaron que en el Caribe se producirá una intensificación en los aspectos estudiados a medida que la temperatura global sobrepase los umbrales de 1.5, 2.0 y 2.5 °C (incremento de la temperatura, aumento de los períodos cálidos en el año, mayor cantidad de días secos y cálidos, reducción de las precipitaciones e incremento de las áreas afectadas por sequía). Así, los autores concluyen que es de vital importancia lograr que se reduzcan seriamente las emisiones de GEI, de modo que el calentamiento global se limite a 1.5 °C o menos, hacia fines de siglo, lo que permitiría que las islas pequeñas del Caribe tengan tiempo de aplicar programas de adaptación al calentamiento global que eviten consecuencias que afecten radicalmente sus condiciones de vida.

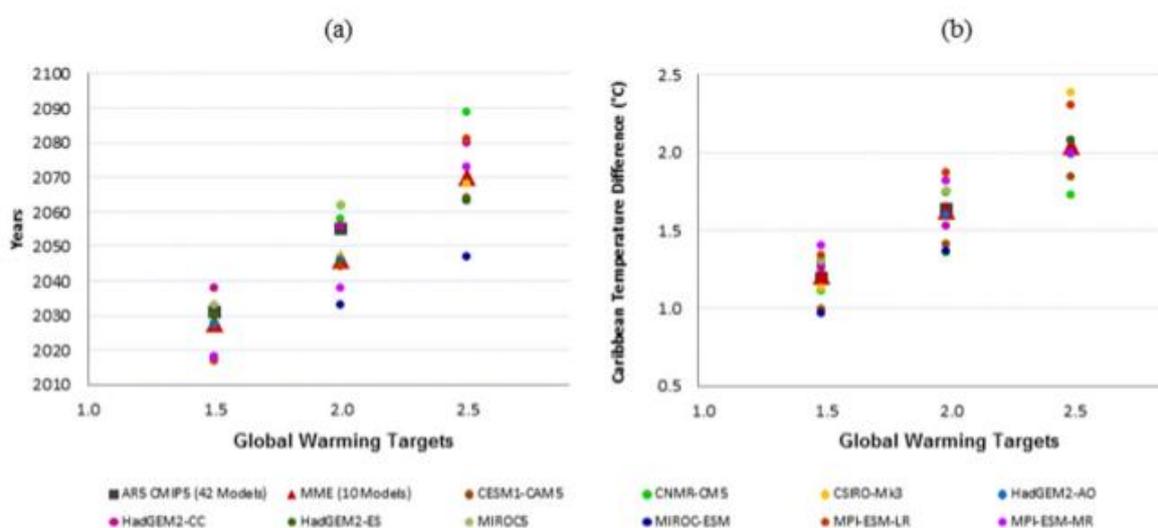


Figura 10. a) Años proyectados por los 10 modelos para los tres objetivos de calentamiento global (1.58, 2.08 y 2.58°C). (b) promedio anual del Caribe anomalías de temperatura (8C) con respecto a la línea de base preindustrial proyectada por los 10 modelos para los tres objetivos de calentamiento global. (Tomado de [Taylor et al., 2018](#))

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han resumido los principales resultados obtenidos en el área en el análisis de proyecciones de cambio climático en la región de Centroamérica y el Caribe (CAMC). De forma general, las predicciones de los modelos globales para la región y la reducción de escala producida por modelos regionales climáticos coinciden en proyectar incrementos de temperatura para toda la región, que son, en general, menores que los incrementos globales y cuyos valores dependen del escenario supuesto y la subregión, con un rango de variación entre 2 y 6 °C, mientras que las proyecciones de variación de la precipitación muestran tendencias generales hacia la disminución, aunque con una fuerte dependencia subregional.

La aplicación de MCR en la región ha permitido precisar las predicciones de los MCG, precisando los valores extremos de las variables, su distribución espacial, su influencia en los fenómenos climáticos regionales y su repercusión local. Este aporte con especial connotación en las islas del Caribe, sobre todo en las más pequeñas. Varios trabajos apuntan hacia la importancia del contraste de temperatura entre el Pacífico Norte y el Atlántico Norte en la vecindad de la región, que influye fuertemente en la intensidad del CBNC y la actividad de lluvia y en especial en la formación de ciclones tropicales. Los MCR permitieron además realizar predicciones sobre el comportamiento de la actividad ciclónica en la región, coincidiendo en la probable disminución de la ocurrencia de los mismos en el Atlántico, aunque algunas predicciones apuntan al aumento de su intensidad. Por el contrario, en el Pacífico las proyecciones predicen un aumento de la ocurrencia de estos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto “Soporte Unificado de Proyecciones para Estudios Regionales del Cambio CLIMático (SUPERCLIMA), del Programa “El cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación” de la Agencia de Medio Ambiente cubana. Agradecemos el apoyo del Centro Internacional de Física Teórica, de la UNESCO, radicado en Trieste, Italia, que propició el uso de

sus instalaciones a los autores, a través de su Programa de Asociados Simons y el Programa Sandwich de Entrenamiento y Educación y en especial a la Sección de Ciencias de la Tierra de dicho Centro, por su asesoría y colaboración.

REFERENCIAS

- Amador, J. 1998. “A climatic feature of the tropical Americas: the trade wind easterly jet”. *Top Meteor Oceanogr* 5:91-102.
- Amador, J.; & Magaña, V. O. 1999. “Dynamics of the Low Level Jet over the Caribbean Sea”. *Preprints 20th Conference in Tropical Meteorology*. 10-15 January 1999, Dallas, Texas, American Meteorological Society, 401 y 402.
- Ángeles, M. E.; González, J. E.; Erickson, III D. J.; & Hernández, J. L. 2007. “Predictions of future climate change in the Caribbean region using global general circulation models”. *Int. J. Clim.* 27, 555-569, doi:10.1002/joc.1416.
- Ángeles, M. M.; González, J. E.; & Ramírez, N. B. 2018. “Projections of Heat Waves Events in the Intra-Americas Region Using Multimodel Ensemble”. *Adv. in Met.*, vol. 2018, Article ID 7827984, 16 pages, doi:10.1155/2018/7827984
- Bender, M. A.; Knutson T. R.; Tuleya, R. E.; Joseph J. S.; Vecchi, G. A.; Garner, T. T.; & Held, I. M. 2010. “Modeled Impact of Anthropogenic Warming on the Frequency of Intense Atlantic Hurricanes”. *Science*, 454-458
- Biasutti, M.; Sobel, A. H.; Camargo, S. J.; & Creyts, T. 2011 “Projected changes in the physical climate of the Gulf Coast and Caribbean”. *Climate Change.*, vol. 112, 819-845, doi:10.1007/s10584-011-0254-y
- Campbell, J. D.; Taylor, M. A.; Stephenson, T. S.; Watson, R. A.; & Whyte, F. S. 2010. “Future climate of the Caribbean from a regional climate model”. *Int. J. Clim.* 31, 1866-1878, doi:10.1002/joc.2200.
- Centella-Artola, A.; Bezanilla, A.; & Leslie, K. 2008. “A study of the uncertainty in future Caribbean climate using the PRECIS regional climate model”. Technical report. Belmopan,

- Belize: Caribbean Community Climate Change Centre (CCCCC).
- Dai A.; Meehl G.A.; Washington W.M.; & Wigley T.M.L. 2001. "Climate change in the 21st century over the Asia-pacific region simulated by the NCAR CSM and PCM". *Advances in Atmospheric Sciences* 18(5): 639-658.
- Diro, G.; Giorgi, F.; Fuentes-Franco, R.; Walsh, K.J.E.; Giuliani, G.; & Coppola, E. 2014. "Tropical cyclones in a regional climate change projection with RegCM4 over the CORDEX Central America domain". *Climate change* 125 (1), 79-94.
- Fuentes-Franco, R; Coppola, E.; Diro, D. G.; Giorgi, F.; Pavia, E. G.; & Graef, F. 2014. "Inter-annual variability of precipitation over Southern Mexico and Central America and its relationship to sea surface temperature from a set of future projections from CMIP5 GCMs and RegCM4 CORDEX simulations". *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-014-2258-6
- Giorgi, F. 2006. "Climate change hot-spots". *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- Giorgi, F. 2012. "RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains". *Clim Res* 52:7-29.
- Gordon, C.; Cooper, C.; Senior, C. A.; Banks, H.T.; Gregory, J. M.; Johns, T. C.; Mitchell, J. F. B.; & Wood, R. A. 2000. "The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments". *Clim. Dyn.*, 16, 147-168.
- Huffman, G. J. 2007. "The TRMM multi-satellite precipitation analysis: quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale". *J. Hydrometeor.* 8(1), 38-55.
- IPCC, 2000. "Special report on emissions scenarios". Cambridge University Press, Cambridge, UK.. ISBN: 92-9169-113-5.
- IPCC, 2007. "Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp
- IPCC, 2013: Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014. "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jones, R. G.; Noguer, M.; Hassell, D.; Hudson, D.; Wilson, S.; Jenkins, G.; & Mitchell, J.; 2003. "Workbook on generating high resolution climate change scenarios using PRECIS". UNDP, GEF, and Met Office Hadley Centre Manual, 32 pp.
- Jones, J. J.; Stephenson, T. S.; Taylor, M. A.; & Campbell, J. D. 2016. "Statistical downscaling of North Atlantic tropical cyclone frequency and the amplified role of the Caribbean low-level jet in a warmer climate". *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 3741-3758, doi:10.1002/2015JD024342.
- Jones, P. D.; Harpham, C.; Burton, A.; & Goodess, C. M. 2016. "Downscaling regional climate model outputs for the Caribbean using a weather generator". *Jour. Clim.* <https://doi.org/10.1002/joc.4624>
- Jury, M. R. 2009 "An intercomparison of observational, reanalysis, satellite, and coupled model data on mean rainfall in the Caribbean," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, no. 2, pp. 413-430
- Karmalkar, A. V.; Bradley, R. S.; & Diaz, H. F. 2011. "Climate change in Central America and

- Mexico: regional climate model validation and climate change projections". *Clim Dyn*, 37: 605. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>.
- Karmalkar, A. V.; Taylor, M. A.; Campbell, J.; Stephenson, T.; New, M.; Centella, A.; Bezanilla, A.; & Charlery, J. 2013. "A review of observed and projected changes in climate for the islands in the Caribbean". *Atmósfera* 26(2), 283-309.
- Khalyani, A. H.; Gould, W. A.; Harmsen, E.; Terando, A.; Quinones, M.; & Collazo, J. A. 2015. "Climate Change Implications for Tropical Islands: Interpolating and Interpreting Statistically Downscaled GCM Projections for Management and Planning". AMS. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0182.1>
- Knutson, T. R.; Sirutis, J. J.; Garner, S. T.; Vecchi, G. A.; & Held, I. M.; 2008. "Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions". *Nat. Geosci.* 1, 359
- Magaña, V.; Amador, JA.; & Medina, S. 1999. "The midsummer drought over Mexico and Central America". *J Clim* 12:1577-1588
- Martínez-Castro, D.; Borrajero, I.; Bezanilla-Morlot, A.; & Centella, A. 2011. "The occurrence of tropical cyclones in the Caribbean and Mexico and global warming. Application of a regional climate model". (In Spanish Abstract in English) *Rev. Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 12, 2011. http://www.iga.cu/publicaciones/revista/cte_12/CTE12.html.
- Moss, R. H.; Edmonds, J. A.; Hibbard, K. A.; Manning, M. R.; Rose, S. K.; van Vuuren, D. P.; Carter, T. R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G. A.; Mitchell, J. F. B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S. J.; Stouffer, R. J.; Thomson, A. M.; Weyant, J. P.; & Wilbanks, T. J. 2010. "The next generation of scenarios for climate change research and assessment". *Nature*, <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>
- Meehl, G. A.; et al. 2007. "Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*". Cambridge University Press, Cambridge.
- Mitchell, T. D.; & Jones, P. D. 2005. "An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids". *Int. J. Climatol.* 25: 693-712
- McLean, N. M.; Stephenson, T. S.; Taylor, M. A.; & Campbell, J. D. 2015. "Characterization of Future Caribbean Rainfall and Temperature Extremes across Rainfall Zones" *Advances in Meteorology*, vol. 2015, Article ID 425987, 18 pages, 2015. doi:10.1155/2015/425987
- McDonald, R. E.; Bleaken, D. G.; Cresswell, D. R.; Pope, V. D.; & Senior, C. A. 2005. "Tropical storms: representation and diagnosis in climate models and the impacts of climate change". *Clim. Dyn.* 25, 19-36.
- Nakicenovic N.; Alcamo J.; Grubler A.; Riahi K.; Roehrl RA.; Rogner H-H.; & Victor N, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-80493-0
- New, M.; Lister, D.; Hulme, M.; & Makin, I. 2002. "A high resolution data set of surface climate over global land areas," *Climate research*, vol. 21, no. 1, pp. 1-25. (Pubitemid 34838195)
- Peterson, T. C.; & Vose, R. S. 1997. "An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database". *Ame. Met. Soc.*
- Pope, V. D.; & Stratton, RA. 2002. "The processes governing horizontal resolution sensitivity in a climate model". *Clim. Dyn.* 19: 211-236.
- Rudolf, B.; & Schneider, U.; 2005. "Calculation of gridded precipitation data for the global land-surface using insitu gauge observations" 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group.
- Reynolds, R. W.; & Smith T. M. 1994. "Improved global sea surface temperature

- analyses using optimum interpolation". *J. Climate*, 7, 929-948.
- Solomon, S.; Qin D.; Manning M.; Chen Z.; Marquis M.; Averyt K.B.; Tignor M.; & Miller H.L. (eds), 2007. "The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; & Midgley, P. M. (eds.) IPCC, 2013. "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Singh, B. 1997. "Climate changes in the greater and southern Caribbean". *Int J Climatol*. 17:1093-1114
- Stennett-Brown, R. K.; Jones, J. J. P.; Stephenson, T. S.; & Taylor, M. A. 2017. "Future Caribbean temperature and rainfall extremes from statistical downscaling". *Roy. Met. Soc.* <https://doi.org/10.1002/joc.5126>
- Sillmann, J.; Kharin, V. V.; Zhang, X.; Zwiers, F. W.; & Bronaugh, D. 2013. "Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate". *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 118, 1716-1733, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- Taylor K. E.; Stouffer R. J.; & Meehl G. A.; 2012. "An overview of CMIP5 and the experiment design". *Ame. Met. Soc.* . DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Taylor, M. A.; Whyte, F. S.; Stephenson, T. S.; & Campbell, J. D. 2013. "Why dry? Investigating the future evolution of the Caribbean Low Level Jet to explain projected Caribbean drying". *Int. J. Climatol.* 33: 784-792 (2013). DOI: 10.1002/joc.3461
- Taylor, M. A.; Clarke, L. A.; Centella-Artola, A.; Bezanilla, A.; Stephenson, T. S.; Jones, J. J.; Campbell, J. D.; Vichot-Llano, A.; & Charlery, J. 2018. "Future Caribbean Climates in a World of Rising Temperatures: The 1.5 vs 2.0 Dilemma". AMS. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0074.1>
- Vichot-Llano, A.; & Martínez-Castro, D. 2017. "Estado actual de las representaciones de los principales factores del clima del Caribe por modelos climáticos regionales. Estudios de sensibilidad y validación". *Revista Cubana de Meteorología*, Vol.23, No.2, pp. 232-261, 2017, ISSN: 0864-151X
- Xie, P.; & Arkin, P. A. 1997. "Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model output". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2539-2558.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)