

## Estado actual de la representación de los principales factores del clima del Caribe por modelos climáticos regionales. Estudios de sensibilidad y validación

### Current status of representation of relevant Caribbean climate features by regional climate models. Sensitivity and validation studies

Alejandro Vichot-Llano, Daniel Martínez-Castro✉

*Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba*

#### Resumen

Desde el inicio del presente siglo se comenzaron a aplicar los modelos climáticos regionales PRECIS y RegCM para la necesaria reducción de escala de los reanálisis globales basados en observaciones, de limitada resolución espacial y de las salidas de modelos climáticos globales, también limitados en su resolución. Las líneas de investigación se han centrado en primer lugar en la validación de estos modelos, a partir de su utilización para estudios climáticos en la región del Caribe y la comparación de sus resultados con bases de datos observacionales y paralelamente, en la realización de estudios de sensibilidad de la dependencia del rendimiento de los modelos a cambios en su configuración, incluyendo dominio, resolución y parametrización de procesos físicos. Adicionalmente, los modelos se han utilizado para la reducción de escala de las proyecciones climáticas de modelos globales en estudios de cambio climático. El presente trabajo se centrará en reseñar los principales resultados obtenidos en cuanto a validación de estos modelos y estudios de sensibilidad, enfocando principalmente su capacidad de describir los campos de precipitación y temperatura y conocidos fenómenos climáticos regionales, como la sequía intraestival, el chorro de bajo nivel del Caribe y la ocurrencia de ciclones tropicales. Se concluye que los resultados obtenidos permiten afirmar que, aunque persisten sesgos en algunas subregiones e insuficiencias en el desempeño de los modelos, existe una serie de configuraciones que describen razonablemente el clima de la región. Se recomienda el método de ensemble multiparámetro o multimodelo para la obtención de predicciones climáticas en el futuro.

**Palabras clave:** Modelo climático regional; RegCM4; Estudio de sensibilidad; Región del Caribe

#### Abstract

Since the beginning of this century, the regional climate models PRECIS and RegCM have been applied for downscaling of the low-resolution global reanalysis, based on observations and the

---

✉ Autor para correspondencia: *Daniel Martínez-Castro*. E-mail: [daniel.martinez@insmet.cu](mailto:daniel.martinez@insmet.cu)

Recibido: 7/2/2017

Aceptado: 18/7/2017

outputs of global climate models, also limited in their resolution. Research has focused primarily on the validation of these models, based on their use for climate studies in the Caribbean region and the comparison of their results with observational databases. At the same time, sensitivity studies have been conducted about the dependence of the performance of the models with changes in their configuration, including domain, resolution and physical processes parameterization. The models have also been used for the downsaling of global climate model projections in climate change studies. This paper will focus on the main results obtained in the validation of these models and in sensitivity studies, focusing mainly on their ability to describe the precipitation and temperature fields and well known regional climatic features, such as midsummer drought, the Caribbean low level jet and the occurrence of tropical cyclones. It is concluded that the obtained results allow asserting that, although biases persist in some sub regions and insufficiencies in the performance of the models, there are a series of configurations that reasonably describe the climate of the region. The multi-parameter or multi-model ensemble method is recommended to obtain future climate predictions.

**Keywords:** Regional climate model; RegCM4; Sensitivity study; Caribbean Region

### Introducción

El cambio climático asociado a los incrementos sostenidos de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera es uno de los temas más relevantes de la agenda ambiental internacional actual, con repercusión en la economía, el desarrollo y el comercio e importantes implicaciones en las decisiones políticas en nuestro mundo globalizado, especialmente por las variaciones del régimen de temperatura y de precipitación. El impacto del cambio climático puede afectar particularmente el desarrollo de los países tropicales, como los de Centro América, México y las islas del Caribe, y en especial las de menor extensión, altamente vulnerables a las consecuencias de la sobreelevación del nivel del mar asociada al calentamiento global.

A partir de los resultados de los modelos climáticos globales existen proyecciones del comportamiento de las diferentes variables climáticas para diferentes escenarios de cambio climático, en dependencia con el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero observado. Los modelos climáticos regionales (MCR) tienen como función fundamental la de lograr predicciones climáticas de resoluciones sensiblemente mayores que las alcanzadas por los modelos de circulación global, sin requerir

recursos computacionales prohibitivos. Esto permite realizar investigaciones con estos modelos en diferentes regiones del mundo utilizando como condiciones de frontera las salidas de modelos o sistemas de reanálisis de escala global y baja resolución, generados en los grandes centros de modelación climáticos de los países desarrollados ([Giorgi & Mearns, 1991](#)). Por ello, resulta de gran interés el estudio de proyecciones futuras para Centro América, México y el Caribe utilizando MCRs, siendo una región con orografía compleja, donde el forzamiento de mesoescala cobra importancia especial ([Aldrian et al., 2004](#)) por los bruscos contrastes mar-tierra, asociados a las islas, istmos, estrechos y penínsulas que la conforman.

La alta resolución de los MCRs puede ser mejor para captar otros detalles como las tormentas o los eventos extremos ([Huntingford et al., 2003](#)). También [Cantet et al. \(2014\)](#), determinó que el uso de modelos globales condicionaba los estudios de cambio climático en dichas regiones al no representar adecuadamente estas pequeñas islas cobrando así mayor importancia el uso de MCR.

En este trabajo se presenta un resumen de los resultados de las principales investigaciones sobre modelación regional climática en la

región del Caribe, cuyos dominios incluyen generalmente a los Mares Interamericanos, las Islas del Caribe y Bahamas, Centro América, México y zonas costeras del sur de los Estados Unidos. Por razones de espacio, el trabajo se restringe a investigaciones centradas en la validación de los MCR con observaciones o datos de reanálisis, y en estudios de sensibilidad acerca de la dependencia del desempeño de los modelos con determinados factores, como son la resolución, las dimensiones del dominio y las parametrizaciones de procesos físicos. En un trabajo posterior, se reseñarán los resultados de la aplicación de los modelos a estudios de cambio climático. En la primera sección, se puntualizan los principales aspectos relacionados con la modelación regional climática, incluyendo los principales conceptos y definiciones relacionados con el empleo de los MCR, posteriormente se esboza una breve caracterización del clima del Caribe, que se detiene en los fenómenos particulares de la región y seguidamente se pasa a analizar los principales resultados de los MCR en la reproducción del clima de la región, diferenciando entre estudios de validación, estudios de sensibilidad y aquéllos centrados en la reproducción de la climatología de ciclones tropicales.

### **Aspectos generales de los modelos climáticos regionales**

Los modelos resuelven las ecuaciones de las leyes y principios de la Física que gobiernan los procesos en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de energía y masa entre ellos. Un modelo climático regional no es más que un modelo numérico de alta resolución sobre un área limitada.

Dentro de las metodologías de regionalización se destacan la reducción de escala dinámica “downscaling dinámico”, que utiliza la salida de un MCR para aumentar la resolución de un modelo de circulación global (MCG) o sistema de reanálisis de datos globales que lo alimenta y el de la reducción de escala estadística. Gracias a los avances en

ordenadores, cada vez se generan más rápidamente las salidas de los MCR y son más baratos de ejecutar, de modo que este método se hace cada vez más factible. Su aplicación estimula la colaboración entre científicos del clima y de otras disciplinas de estudio, como los especialistas en física del suelo y oceanógrafos para obtener modelos cada vez más precisos mientras que el downscaling estadístico aprovecha la experiencia estadística entre investigadores, permitiendo corregir los sesgos propios de los MCGs y evaluar los resultados climáticos sobre un grupo de MCGs y sobre diversos escenarios.

Una de los procedimientos adoptados en el uso de los MCR es la conocida como “anidamiento de una dirección” (One way Nesting, OWN por sus siglas en inglés) en la cual, las ecuaciones del modelo atmosférico son integradas sobre un dominio particular con alta resolución, después de que se hayan definido las condiciones de contorno generadas a partir de un MCG o de reanálisis ([Giorgi et al., 1993a,b](#); [Christensen et al., 1997](#); [Seth & Giorgi, 1998](#)). En este tipo de experimento existen varios aspectos que deben ser considerados, entre los que se destacan la resolución que será utilizada, así como la definición del dominio a emplear ([Giorgi & Mearns, 1999](#)).

Entre las aplicaciones que se derivan de estos métodos destacan los estudios asociados con extremos climáticos y variabilidad no-lineal, así como estudios de impacto, permitiendo también comparar el clima presente y futuro de forma consistente, con rangos de variabilidad.

Para la aplicación de un modelo regional climático a una situación particular en una determinada región, deben tomarse en cuenta una serie de factores ([Giorgi & Mearns, 1999](#)). En primer lugar, el método de anidamiento del MCR en el interior del campo del MCG o salida de reanálisis debe garantizar que los valores de las variables proporcionadas por el modelo alimentador sean asimilados por el esquema numérico del MCR de modo que no surjan

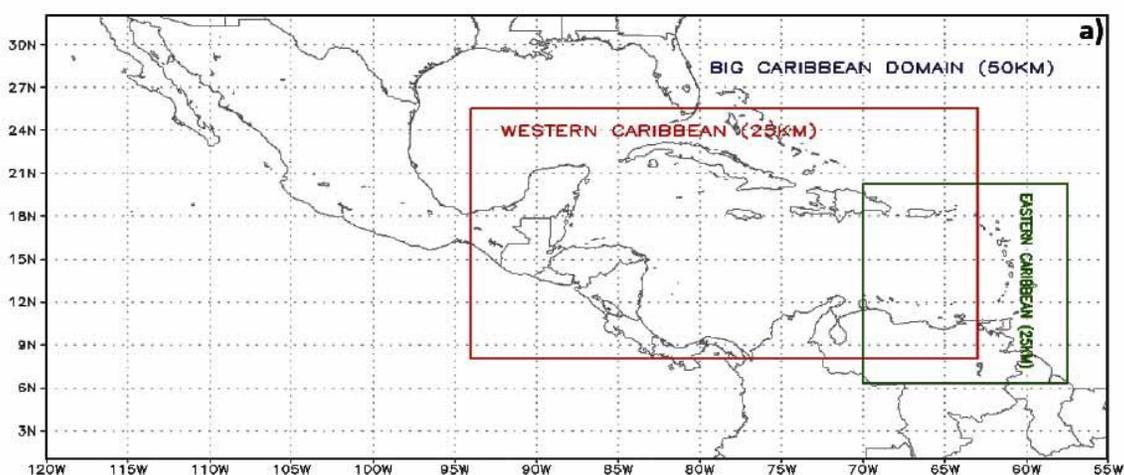
procesos artificiales que desvirtúen la solución en el interior del dominio interior. El método de anidamiento unidireccional utilizado debe garantizar la transición gradual de los campos exteriores a los interiores, lo que se logra mediante un algoritmo que combina componentes externa e interna para cada variable, dentro de una zona de transición, denominada “zona *buffer*” entre los dos dominios que contiene varios puntos de rejilla, de modo que el peso del campo externo en la solución disminuye a medida que el punto está más cerca de la frontera interior de estas zona de transición, y para el interior del dominio, son los algoritmos del MCR los que determinan la solución, evolucionando a partir de los valores obtenidos en la frontera. Consecuentemente, debe escogerse una zona *buffer* que garantice el correcto funcionamiento de este algoritmo de relajación y en la cual la orografía y el uso de suelo del MCR no varíen bruscamente, minimizando las áreas de orografía compleja y las zonas costeras. El tamaño del dominio es también determinante, ya que debe ser lo suficientemente grande como para que puedan desarrollarse las circulaciones locales en su interior, pero a la vez debe tener un número de puntos de rejilla limitado, que permita optimizar el tiempo de simulación. Otro aspecto es el problema de la necesidad de “precalentamiento” del modelo, o “*spin up*”, que es el tiempo que necesita el MCR para alcanzar un equilibrio dinámico entre la información proveniente de las condiciones de frontera y la acción de la dinámica interna del modelo. Aunque las variables meteorológicas estabilizan su comportamiento después de cinco o seis días de simulación, las interacciones suelo-radiación y los flujos en el suelo necesitan mucho más tiempo. El tiempo de *spin-up* necesario para una simulación con un MCR depende entonces del modelo y en particular de su esquema de suelo. Generalmente se utiliza al menos un mes, aunque para simulaciones climáticas de varios años o estudios de cambio climático, es preferible usar de seis meses a un año, con los

MCR más utilizados en la actualidad. Otro aspecto de particular importancia es el hecho de que, como la simulación que desarrolla el MCR se alimenta de los campos de gran escala proporcionados por el modelo global a través de las condiciones de frontera, son estos los que determinan las tendencias de las variables meteorológicas en el interior del dominio, de modo que si se utiliza un modelo global de pronóstico o de reanálisis que no refleje correctamente la climatología local, la reducción de escala dinámica efectuada por el MCR será errónea. Esto implica que antes de diseñar un experimento utilizando un MCR, debe evaluarse el modelo global utilizado para alimentarlo. Por último, un aspecto determinante en el funcionamiento de un MCR es la forma en que se reflejan en el mismo los procesos de escala menor a la rejilla del modelo, o sea, los esquemas de parametrización de procesos físicos, como la radiación, los procesos de capa fronteriza y la convección y sus precipitaciones asociadas. Este problema se enfoca de dos formas en los diferentes modelos regionales. Algunos MCR han sido desarrollados por los mismos centros de modelación que desarrollan modelos globales. En estos casos, generalmente sus parametrizaciones físicas son las mismas o siguen los mismos principios que las de los modelos globales asociados. Esto garantiza mayor compatibilidad entre los procesos producidos por el modelo global y los que desarrolla el modelo regional, pero tiene el inconveniente que las parametrizaciones del MCR no pueden variarse para diferentes áreas geográficas, lo que los hace menos adaptable a diferentes regiones del mundo con climas muy diferentes. Otro enfoque es el de los MCR que proporcionan al usuario diferentes posibilidades para escoger parametrizaciones físicas en dependencia con las condiciones geográficas y climáticas del dominio. Esto permite la realización de estudios de sensibilidad acerca de los tipos de parametrización más eficientes para cada caso, de modo que un modelo regional con un

determinado núcleo dinámico puede simular campos muy diferentes para distintas parametrizaciones. La ventaja de este enfoque es que permite ajustar los modelos para reproducir con mayor precisión las variables meteorológicas de interés. Tiene la desventaja de que resulta difícil evaluar el comportamiento de un modelo de forma general, ya que cada configuración puede comportarse de forma muy diferente a las otras, si se varían determinadas parametrizaciones. No obstante, esta particularidad se puede utilizar para generar ensembles multiparámetro con el mismo modelo y diferentes configuraciones, si bien la eficiencia de cada una de ellas debe ser minuciosamente estudiada antes de conformar el ensemble.

Hasta el momento, los grupos caribeños de modelación regional climática han aplicado preferentemente dos modelos climáticos regionales. El primero de ellos, es el llamado sistema PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies), por sus siglas en inglés, (Jones *et al.*, 2004; Taylor *et al.*, 2013) el cual consiste en el modelo regional climático del Hadley Centre, HadRM3P, (Jones *et al.*, 2004) alimentado con las condiciones de frontera producidas por las salidas de la componente

atmosférica actualizada del modelo acoplado global del Hadley Centre HadAMP3 (Gordon *et al.*, 2000). Posteriormente se han introducido versiones actualizadas del sistema. Este modelo se ha utilizado para la reducción de escala de proyecciones climáticas, utilizando un dominio común, concertado en reuniones regionales, con diferentes zonas de estudio, el cual se muestra en la [figura 1](#) (Centella *et al.*, 2008; Martínez-Castro *et al.*, 2011). El otro modelo utilizado inicialmente para estudios de sensibilidad en el Caribe por el grupo del Instituto de Meteorología de Cuba es el Sistema de Modelación Climática Regional RegCM, creado originalmente en el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas norteamericano (National Center for Atmospheric Research, NCAR), y desarrollado posteriormente en la Sección de Física de la Tierra (Earth Science Physics section, ESP) del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste (International Center for Theoretical Physics, ICTP), cuyas versiones 3 y 4 (Pal *et al.*, 2007; Giorgi *et al.*, 2012) han sido utilizadas en estudios de sensibilidad de parametrizaciones físicas y dimensiones del dominio (Martínez-Castro *et al.*, 2006; Vichot-Llano *et al.*, 2014; Martínez-Castro *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Dominio común de corrida del sistema PRECIS, utilizado en las investigaciones coordinadas de los grupos de modelación del Caribe, incluyendo dos áreas de estudio (Taylor *et al.*, 2013)

## Breve caracterización del clima y la variabilidad climática en el Caribe

### Rasgos generales

Antes de pasar al análisis de los principales logros de la modelación climática en el estudio del clima en la región, se hace necesario mencionar algunos de las principales resultados de las investigaciones climáticas basadas en observaciones en el área, por su importancia para focalizar los estudios de sensibilidad de los modelos climáticos en las principales particularidades del clima de la región. [Taylor & Alfaro \(2005\)](#), proporcionan un breve resumen de estos estudios y sus principales resultados.

En general, las islas del Caribe presentan dos períodos del año caracterizados por diferencias de temperatura y precipitación. El período húmedo o lluvioso, también conocido como verano, con mayores valores de la temperatura y los acumulados de precipitación, coincide con el verano boreal, incluyendo parte de la primavera y el otoño, aunque sus límites dependen de la región del Caribe que se estudie. El otro período del año, centrado en el invierno boreal, se conoce como invierno, período seco o poco lluvioso. Dentro de este patrón general, existen diferencias importantes para las diferentes sub-regiones. El intervalo anual de temperaturas medias está entre 2 y 7 °C, localizándose las mayores variaciones en la zona de Bahamas y las Antillas Mayores. Las temperaturas medias máximas, en el período lluvioso, están generalmente por debajo de 30 °C, aunque pueden llegar a 37 °C y las medias mínimas, en el período seco, se mantienen por encima de los 18 °C. En las pequeñas islas y las zonas costeras de las Antillas Mayores, la brisa marítima atenúa el ciclo diario de temperatura y limita las máximas y mínimas. El rango de temperatura diaria es ligeramente superior al rango anual, que varía entre 2 y 5,5 °C desde el sur del Caribe hasta Cuba.

La precipitación en el Caribe, en el período lluvioso, está mayormente controlada por la posición del anticiclón subtropical del Atlántico

Norte (ASAN, conocido en inglés por North Atlantic subtropical high, NASH), la intensidad variable de los vientos alisios y la temperatura superficial del mar (TSM). Generalmente en la primera quincena de junio aparecen ondas del Este, que migran desde las costas de África, estimulando la convección y creando ocasionalmente, perturbaciones de baja presión. Al llegar a las Islas, estas ondas interactúan con la orografía y su efecto se intensifica por el calentamiento diario, con fuertes precipitaciones en horas de la tarde, particularmente en las zonas de convergencia de brisas en las islas y a barlovento de las cadenas montañosas. La influencia directa de la zona intertropical de convergencia (ZITC) en la precipitación en las islas del Caribe no es significativa.

En una comunicación breve, [Naranjo & Centella \(1998\)](#), reportaron las series promedios de temperatura media, mínima y máxima de la red de estaciones cubana de la segunda mitad del siglo XX, detectando una tendencia al aumento de la media y la mínima, pero no de la máxima. Este resultado es consecuente con los de [Peterson et al. \(2002\)](#), que analizaron las tendencias de la temperatura y la precipitación para un período similar, para varias estaciones del Caribe, obteniendo que el porcentaje de días con temperaturas máximas o mínimas muy cálidas aumentó fuertemente desde finales de la década de 1950, mientras que el porcentaje de días con temperaturas muy frías disminuyó. La precipitación extrema muestra un aumento durante este período de tiempo, mientras que el número máximo de días secos mostró tendencia a disminuir.

[Jury et al. \(2007\)](#), utilizó 35 estaciones meteorológicas distribuidas en varias islas del Caribe en el período 1951-1981 para estudiar los patrones de la precipitación de la región así como la relación de la misma con la oscilación del Atlántico Norte (OAN; north Atlantic oscillation, NAO en inglés) y el evento El Niño-oscilación sur (ENOS; ENSO, por sus siglas en inglés). Más tarde, [Jury et al. \(2009\)](#), examinaron la variabilidad media espacial de la

precipitación en el Caribe, intercomparando datos de estaciones convencionales en rejillas, estimaciones de satélites, productos de reanálisis y modelos de circulación general principalmente sobre las Antillas. Sesgos positivos y negativos fueron encontrados respectivamente en productos de satélites y reanálisis. Todos los productos mostraron la habilidad de representar los patrones de lluvia del Caribe, encontrando consenso en las mediciones pero al mismo tiempo discrepancias entre ellos. De ahí la importancia de utilizar la mayor cantidad de datos posibles para lograr un mejor entendimiento del cambio climático y del funcionamiento de los modelos.

Por otra parte, [Gouirand et al. \(2012\)](#), determinaron patrones de alta y baja frecuencia en la variabilidad de la precipitación y la TSM en el Caribe Occidental para estudiar oscilaciones en escalas de tiempo mayores o menores a 8 años en el período de 1901-2002. Derivando las altas frecuencias de la combinación con las diferentes fases del ENOS, provocando condiciones de lluvias con la combinación de la fase negativa de la OAN y la fase cálida del ENOS, mientras que condiciones de sequía eran creadas con la fase positiva y fría respectivamente. También se identificaron señales de baja frecuencia, caracterizadas por el dipolo entre el Atlántico Norte y Sur y asociadas con los vientos transversales al Ecuador que estimulan la convección en el Caribe.

Uno de los estudios más recientes sobre las tendencias del clima del Caribe es el de [Stephenson et al. \(2014\)](#), que presenta las tendencias de los índices diarios y extremos de temperatura y precipitación en la región del Caribe para registros que abarcan los intervalos de 1961-2010 y 1986-2010, complementando los resultados obtenidos por [Petersen et al. \(2002\)](#), en la anterior década. En general, los resultados muestran un calentamiento de la temperatura del aire de superficie en las estaciones terrestres y los índices basados en la temperatura mínima muestran tendencias de calentamiento más fuertes que los calculados a

partir de la temperatura máxima. La frecuencia de los días cálidos, las noches cálidas y las temperaturas extremas ha aumentado, mientras que se han encontrado menos días fríos, noches frías y temperaturas bajas extremas en ambos períodos. Los cambios en los índices de precipitación son menos consistentes y las tendencias son generalmente débiles. Se observaron pequeñas tendencias positivas en la precipitación total anual, la intensidad diaria, el número máximo de días secos consecutivos y los episodios de lluvias fuertes, particularmente durante el período 1986-2010, lo que es consecuente con el resultado de [Petersen et al. \(2002\)](#), pero apunta a un régimen más seco a medida que avanza el siglo XXI. Se encontró correlación entre los índices de precipitación evaluados y el índice de la oscilación multidecadal del Atlántico (OMA; [Enfeld et al. \(2001\)](#)), cuya fase positiva favorece condiciones más lluviosas, y la negativa, más secas que lo normal. Esto sugiere que la variabilidad de la temperatura y los extremos de precipitación están relacionados con la señal OMA.

### Sequía intraestival (SIE)

En la mayor parte de la América Central, y también en las Antillas Mayores y las Bahamas está presente el fenómeno conocido como sequía intraestival (SIE) (en inglés *midsummer drought, MSD*), que no es estrictamente una sequía, sino un mínimo relativo en la precipitación dentro del período lluvioso. Existen diferentes hipótesis para explicar este fenómeno. [Magaña et al. \(1999\)](#), que estudiaron el fenómeno para México y Centro América, hacen énfasis en la interrelación entre el movimiento estacional de la ZITC, la disminución de la radiación solar sobre el océano relacionado con ésta y la TSM y enfatizan la heterogeneidad de la manifestación de este fenómeno en la región. En resumen, el movimiento hacia el norte de la ZITC produce un incremento de la convección, apantalla la radiación solar y reduce la temperatura durante el período mayo-junio, lo que implica inhibición de la convección alrededor de julio-

agosto y simultáneamente se incrementa la radiación y la TSM aumenta gradualmente, lo que provoca un nuevo incremento de la convección y de la lluvia a fines de agosto y en septiembre-octubre. Este esquema explica parcialmente el fenómeno en Centro América y el sur de México, pero no es aplicable al norte del Caribe.

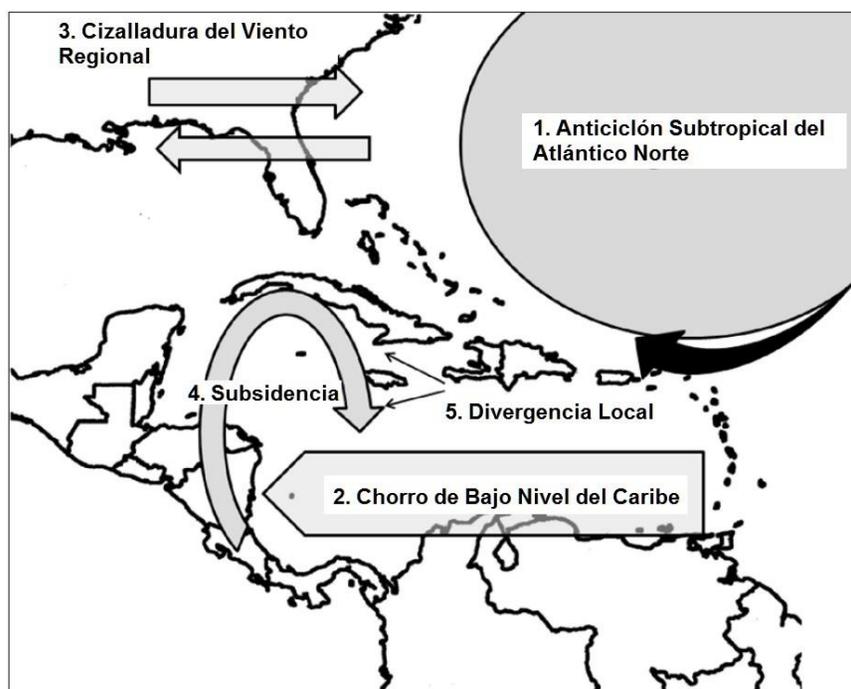
[Small et al. \(2007\)](#), describieron las características regionales de la SIE y subrayaron la importancia de la proximidad de la cuña del ASAN, que produce un incremento de la velocidad de los vientos del este en los niveles bajos, que interactúa con el borde norte de la ZITC, tendiendo a reducir la convección, lo cual argumentaron con datos de reanálisis. Profundizando en este mecanismo, [Karnauskas et al. \(2009\)](#), demostraron que en presencia de un evento “El Niño”, la ZITC se refuerza en el Pacífico Oriental, lo que afecta el comportamiento de la TSM e influye en las características de la SIE en Centro América.

[Curtis & Gamble \(2007\)](#), tomaron una base de datos de precipitación estimada por satélites y pluviómetros, aplicando análisis de wavelet para cuantificar la amplitud, tiempo y fuerza de la SIE en el Caribe y regiones aledañas. Los autores definieron que en el Caribe el período de precipitación máxima osciló entre los 98 y 117 días entre 3 y 4 meses, apareciendo a principios de junio sobre Puerto Rico y la Española y desarrollándose progresivamente a medida que avanza el verano hacia el oeste comenzando finalmente a principios de octubre sobre el Golfo de México, afectando marcadamente el Pacífico Oriental y el Caribe Occidental, mientras que prácticamente no existe en el Caribe Oriental.

Como continuación de este trabajo, [Gamble & Curtis \(2008\)](#), desarrollaron un modelo conceptual de la SIE. El primer componente del modelo es la intensificación y expansión de ASAN en la región siendo más pronunciada en el norte del Caribe. A medida que ASAN se expande hacia la región, el segundo componente del modelo, el Chorro de bajos niveles del Caribe (CBNC; CLLJ, por sus siglas

en inglés), se intensifica entre  $12,5^{\circ}$  y  $17,5^{\circ}$  de latitud, creando convergencia de niveles bajos a medianos cerca de las regiones de entrada y salida sobre el sur del Caribe y divergencia superficial y causando advección de humedad de bajo nivel fuera del Caribe. Dada la extensión de este fenómeno, el CBNC puede producir afloramiento frío costero en el mar Caribe al oeste de Jamaica. Por otra parte, más allá de la región central del CBNC, [Ángeles et al. \(2007\)](#) habían encontrado aumento de la cizalladura vertical del viento, lo que constituye el tercer componente del modelo. El cuarto componente es la subsidencia de compensación que se produce sobre el Caribe, aproximadamente a  $70-75^{\circ}$  W, como consecuencia de la intensificación de la circulación asociada a la convección tropical a lo largo del Caribe Centroamericano. Esta subsidencia puede incrementar la TSM en la región cercana a Jamaica. El quinto componente de este modelo es un aumento en la presión y divergencia superficial en julio que se refuerza cuando la isla de Jamaica bloquea el flujo de los vientos alisios a medida que emigran hacia el norte. El impacto de este fenómeno está localizado, afectando las áreas al este de Jamaica y sur de Cuba. La [figura 2](#), resume esta modelo conceptual.

Por otra parte, [Ángeles et al. \(2007\)](#), se centraron en determinar los orígenes de la SIE en el Caribe, a partir de realizar análisis de regresión múltiple para determinar si la ZITC, la OAN, la cizalladura vertical del viento y el transporte de diferentes concentraciones de partículas desde el norte de África tenían alguna correlación con la SIE, demostrando en esta ocasión la baja correlación con la variabilidad de la precipitación de la ZITC y la OAN. Sin embargo, la cizalladura vertical del viento y la concentración de aerosoles mostraron una contribución importante. El contraste entre las conclusiones de este trabajo y el de [Gamble & Curtis \(2008\)](#), permite concluir que los mecanismos de origen de la SIE en Centro América y el Caribe no coinciden totalmente.



**Figura 2.** Esquema con los elementos del modelo conceptual de [Gamble & Curtis \(2008\)](#), que explica el mecanismo de formación de la SIE. Adaptado del artículo citado

[Karnauskas et al. \(2013\)](#), demostraron que la SIE no es un fenómeno que solo ocurre en el Caribe y América Central. Estos autores proponen un mecanismo que relaciona la dependencia latitudinal de los dos máximos climatológicos de precipitación con el cruce semestral de la declinación solar, lo cual determina la presencia de dos picos de inestabilidad convectiva y por lo tanto de lluvias, sugiriendo que la SIE es básicamente el resultado de un mecanismo de reforzamiento de la precipitación que ocurre dos veces.

Las marcadas diferencias en la manifestación de la SIE en diferentes subregiones de la región de Centro América, México y el Caribe significan un reto para su reproducción en los MCR, de forma que los estudios de sensibilidad de dichos modelos para la región generalmente se plantean entre sus objetivos evaluar su capacidad de representar correctamente este fenómeno en su distribución espacial.

### Chorro de bajo nivel del Caribe

Otro fenómeno característico de la región, cuya reproducción es uno de los principales

objetivos de los modelos climáticos es el conocido como *Caribbean low level jet (CLLJ; CBNC)* que consiste en un máximo en el perfil vertical de velocidad del viento en el Caribe Central y ha sido identificado como una característica climatológica persistente en el Caribe ([Amador, 1998; Amador & Magaña, 1999](#)). Su centro está ubicado aproximadamente en la región definida por (70 - 80 °O, y 15 °N) y su velocidad del viento horizontal máxima puede llegar a 16 m/s en el nivel de los 925 hPa. En el primer trabajo se usaron datos de reanálisis del NCEP/NCAR ([Kalnay et al., 1996](#)) con medias mensuales del período 1982-94, con 28 niveles verticales atribuyendo a la presencia del CBNC los patrones de precipitación sobre el Caribe y la costa pacífica de Centro América actuando como un cinturón de transporte de humedad, mientras que el segundo propuso que la estructura del CBNC estaba implicada con la distribución temporal de la precipitación sobre Centro América y México. El CBNC tiene un ciclo semianual con un máximo en febrero y otro en julio y se puede observar en todo el Caribe durante el verano coincidiendo con la

SIE, siendo considerado por muchos autores como una de las causas de los flujos divergentes asociados con la SIE ([Magaña et al., 1999](#); [Whyte et al., 2008](#)). [Wang \(2007\)](#), encontró una asociación de la intensidad máxima del CBNC durante el verano, el máximo de la presión a nivel del mar (PNM, por sus siglas en inglés SLP), la SIE y el mínimo de la ciclogénesis en el mar Caribe determinando que la SIE está asociado a cambios en la actividad convectiva relacionada con la distribución de la TSM, la radiación solar y al flujo estacional de los vientos del este. En ese mismo año Wang publicó otro artículo donde encontró que el CBNC del este tiene un máximo en verano y otro en el invierno, mientras que durante el otoño y la primavera se ve disminuido, siendo resultado de la variación semi-anual de la presión a nivel del mar en la región del Caribe asociado con el movimiento este-oeste del ASAN. El autor documenta además que el impacto de las albercas calientes del Atlántico (*Atlantic Warm Pools, AWP por sus siglas en inglés*) es debilitar el ASAN durante el verano, especialmente en la parte occidental y por tanto se debilita el CBNC, lo que todo en conjunto induce a un cambio del viento en los niveles altos reduciendo la cizalladura del viento en la vertical, favoreciendo a la formación de huracanes y su intensificación durante los meses de agosto y octubre.

El artículo de [Muñoz et al. \(2008\)](#), identificó los mecanismos de formación del CBNC así como su variabilidad y asociación con la precipitación de la región. Los autores utilizaron en esta ocasión el reanálisis de Norte América (NARR) y 40 años de reanálisis del ECMWF (ERA40) desde 1979 hasta el 2001. Por primera vez se asoció la influencia de las altas montañas del Caribe en el CBNC, encontrándose que éstas influyen en el gradiente meridional de la temperatura del aire dándole una estructura baroclínica que favorece al fortalecimiento de los vientos del este, asociado también con la subsidencia sobre la OAN desde mayo hasta julio cambiando la ITCZ y la evolución del Monzón de América

Central. Adicionando que la variabilidad del CBNC es debido a la variabilidad del gradiente meridional de presión a través de la cuenca del Caribe influenciado por la variabilidad del Pacífico tropical durante el verano.

El CBNC es sin duda una característica dominante de la región del Caribe. Tal y como destacan [Whyte et al. \(2007\)](#), existe una variabilidad en la fortaleza y extensión del CBNC que puede estar relacionada con gradientes zonales de la TSM entre la parte oriental del Pacífico ecuatorial y el Atlántico norte tropical (ANT). Los autores destacan que cuando el gradiente es impulsado desde el Pacífico, los vientos del CBNC se intensifican hacia el norte y el cuadrante sur-oriental, sin embargo cuando el gradiente es impulsado desde ANT, hay una intensificación uniforme en el eje del chorro. Al mismo tiempo los autores describen que el CBNC es un modulador de la sequía en la cuenca del Caribe.

[Hidalgo \(2015\)](#), introdujo un nuevo modelo conceptual, encontrando fuerte correlación entre el CBNC y la posición de la ZITC en el verano, y con determinados procesos en el Pacífico Oriental.

La reproducción de los máximos de invierno y verano que se manifiestan en el CBNC es otra de las pruebas de referencia para los modelos climáticos que pretenden reproducir el clima del Caribe. [Martin & Schumacher \(2011\)](#), destacan la dificultad en la reproducción del máximo de verano por los modelos globales, dada la limitación de algunos de ellos en representar con precisión la cuña del ASAN, de modo que un objetivo importante de la aplicación de MCR es mejorar la representación de esta característica del clima regional.

### **Ciclones tropicales**

Uno de los fenómenos meteorológicos más relevantes en la región del Caribe y que más implicaciones tienen en su economía son los Ciclones Tropicales (CT). Consisten en centros de bajas presiones de escala sinóptica, con núcleo caliente, que se desarrollan sobre los océanos tropicales, aunque excepcionalmente

pueden surgir en zonas extratropicales ([Hobgood, 2008](#), [Ballester et al., 2010](#)). Para que se formen los CT es necesario que exista una perturbación con fuerte actividad convectiva, vorticidad y convergencia cerca de la superficie del océano, a más de 500 km del ecuador, que la TSM sea superior a 26 °C y el agua cálida se extienda a varias decenas de metros de profundidad, que exista inestabilidad condicional en la tropósfera y suficiente humedad en la tropósfera media y que la cizalladura vertical del viento sea relativamente pequeña.

Para que una perturbación con las características anteriores se pueda definir como un CT, debe poseer un viento máximo sostenido en superficie superior a los 17 m/s, mientras que en caso contrario, se denomina depresión tropical. Si el viento máximo sostenido supera los 32 m/s, el CT se denomina “huracán”. Existen 5 gradaciones de intensidad para los huracanes, en dependencia de sus vientos máximos sostenidos.

La estructura interna de los ciclones tropicales consiste en una zona externa de flujo convergente, organizado en bandas espirales, que convergen hacia un anillo de vientos máximos que rodea una zona cubierta de nubes convectivas que se extiende alrededor de la zona central del huracán, denominada “ojo” y que contiene fuertes corrientes ascendentes y descendentes y se conoce como “pared del ojo”.

Una de las principales zonas ciclogénicas, o de formación de CT es la región del ANT, incluyendo al Mar Caribe y el Golfo de México. En esta zona se forman aproximadamente 10 CT por año, con una amplia variabilidad, concentrados en el período de junio a noviembre, aunque la mayor frecuencia se observa de agosto a octubre, con un mínimo relativo en julio, coincidente con la SIE. A principios y al final de la temporada ciclónica, son más frecuentes las formaciones de CT en el Caribe Occidental y el Golfo de México, mientras que en el resto de la temporada predominan los CT que se forman a partir de

perturbaciones en el flujo del Este entre las costas de África y las Antillas Menores.

En las últimas décadas se han desarrollado métodos de detección de CT en el campo de los modelos globales, y en particular de los MCR ([Walsh & Katzfey, 2000](#); [Nguyen & Walsh, 2001](#); [Walsh et al., 2004](#)). [Walsh et al. \(2007\)](#), revisaron los diferentes criterios utilizados en la literatura para definir los vórtices ciclónicos y determinaron la relación óptima entre la resolución del modelo y el umbral de viento que define el vórtice, basándose principalmente en la experiencia con CT formados en el Hemisferio Sur. Posteriormente, otros autores, como [Martínez-Castro et al. \(2011\)](#), [Diro et al. \(2014\)](#), y [Fuentes-Franco et al. \(2016\)](#), utilizaron estos criterios, con modificaciones, para la reproducción de la frecuencia de ocurrencia y la densidad de trayectorias de los CT del ANT, tanto en tiempo presente como en proyecciones futuras, utilizando el sistema de modelación regional PRECIS y el MCR RegCM4 ([Giorgi et al., 2012](#)), incluyendo estudios de sensibilidad.

### **Reproducción de características climáticas del Caribe con modelos climáticos y estudios de sensibilidad**

#### **Estudios de validación para proyecciones de cambio climático en el Caribe**

A continuación se presentan algunos ejemplos de trabajos que han utilizado modelos globales y regionales para representar la climatología local, con el objetivo de validar el empleo del modelo para proyecciones de cambio climático en la región.

[Martin & Schumacher \(2011\)](#), utilizaron simulaciones globales de 19 modelos acoplados y 12 atmosféricos no acoplados del IPCC AR4 (*Intergovernmental Panel for Climate Change. Assessment Report 4*; [IPCC, 2007](#)) para investigar la capacidad de los modelos de reproducir el CBNC.

Los modelos utilizados variaron su resolución horizontal entre 1.125° y 5°, con una amplia gama de configuraciones con diferentes

parametrizaciones de procesos físicos. Aunque todos reprodujeron aproximadamente el fenómeno, el éxito en representar sus características con precisión fue muy limitado, en particular en lo referente al ciclo estacional, observándose uniformidad en el campo de viento en la primera mitad del año, que los autores relacionaron con la representación demasiado uniforme del ASAN y la mala reproducción de su cuña sudoccidental en este período. En los meses de verano, mejoró la representación del CBNC, evidenciándose buena correlación con la precipitación en el Caribe, en el sentido de que el incremento del flujo de viento, que tiende a sacar la humedad del área del Caribe, reduce las precipitaciones. De las simulaciones se pudo constatar la relación entre la intensidad del CBNC y la evidencia de SIE en la salida del modelo.

[Rauscher et al. \(2008\)](#), analizaron el comportamiento de una serie de 17 modelos globales del experimento CMIP3 en tiempo presente, comparándolos con observaciones para el período 1961-1990, constatando una subestimación de la precipitación en la región cerca de un 60% como promedio, lo que adjudican a un sesgo frío en la estimación de la TSM, aunque los modelos con mayor resolución y mejor representación de la orografía presentaron menores sesgos. Por otra parte, muchos de los modelos detectaron correctamente la SIE, de donde los autores concluyen que ésta no está relacionada con factores orográficos, sino con la circulación de escala sinóptica de la cual el exponente más relevante es el ASAN.

[Campbell et al. \(2010\)](#), presentaron un trabajo con los principales resultados de un esfuerzo conjunto de modelación regional climática acometido por el Instituto de Meteorología de Cuba y el Departamento de Física de la Universidad de las Indias Occidentales, con el apoyo del Centro de Cambio Climático de la Comunidad del Caribe ([Taylor et al., 2013](#)). Los autores aplicaron el sistema de modelación regional PRECIS con condiciones de frontera proporcionadas por el

modelo HadAM3P ([Pope et al., 2000](#); [Jones et al., 2001](#)). Como referencia para la validación con los campos de precipitación y temperatura se utilizaron las bases de datos en puntos de rejilla, del Climate Research Unit, CRU ([New et al., 2002](#)), y del Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation, CMAP ([Xie & Arkin, 1997](#)), Tropical Rainfall Measuring Mission, y la del Tropical Rain Measurement Mission, TRMM ([Huffman et al., 2007](#)). En el caso de CRU, los datos se limitan a puntos de rejilla sobre tierra e incluye también la temperatura del aire en superficie. Las principales variables analizadas fueron la temperatura y, la precipitación. Para la validación de la precipitación del modelo se definió un área de estudio limitada al Caribe Central, incluyendo Jamaica, Puerto Rico, La Española y el extremo norte costero de Venezuela.

El análisis de validación para las simulaciones de tiempo presente evidenció una habilidad razonable del modelo para simular los campos actuales de la precipitación y la temperatura en el Caribe y regiones adyacentes. La climatología simulada reproduce las temperaturas máximas en verano y mínimas en invierno, pero con un sesgo de +1 a +1.7 °C. Los patrones espaciales estacionales de la temperatura también están bien simulados, incluyendo el gradiente de temperatura norte-sur en los meses de invierno y la expansión hacia el este de la alberca caliente del Caribe desde marzo.

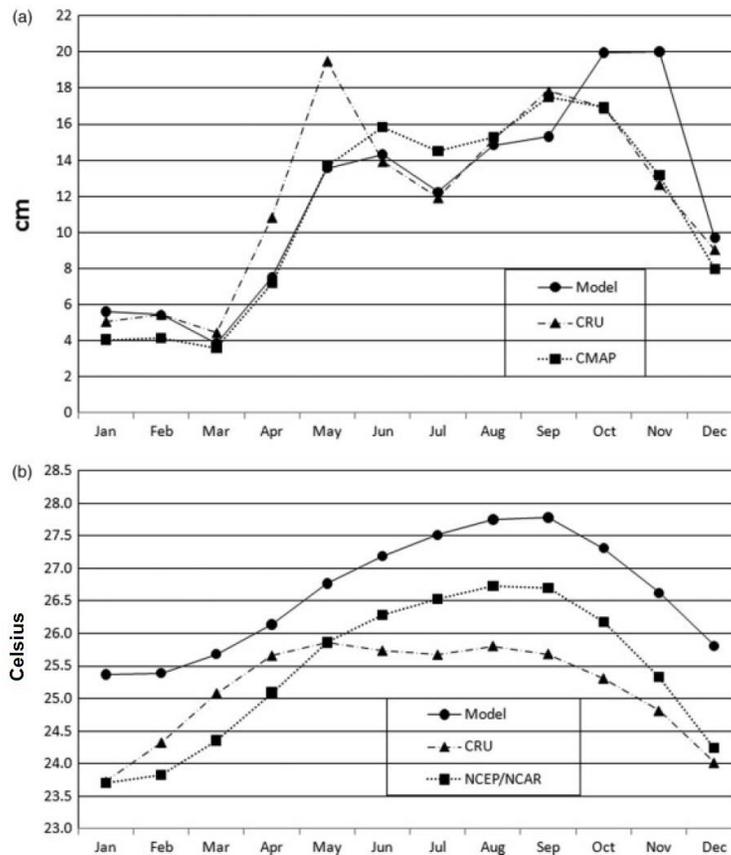
Por otra parte, el modelo capta las características bimodales de la precipitación caribeña, aunque sobreestima el segundo pico de la estación lluviosa, desplazándolo hasta noviembre. Tanto la sobreestimación como el pico desplazado son aparentemente debido a la extensión hacia el este del modelo de un máximo de lluvia que se encuentra en la esquina sudoeste de la cuenca, al este de la costa de Panamá. Sin embargo, si se excluyen los puntos sobre el mar, la sobreestimación desaparece y el pico se desplaza hacia octubre. En general, los patrones estacionales de lluvia se reproducen

aceptablemente, aunque con sesgo seco sobre las islas (Figura 3).

La colocación de la precipitación de NDJ al sur de Jamaica es interesante y sugiere que el modelo puede estar sobre o subestimar la fuerza del CBNC. El CBNC se localiza de manera similar e influye en los totales de lluvia en sus regiones de entrada y salida en el Caribe y en la costa caribeña de Centroamérica, así como en el flujo de humedad al sureste de los Estados Unidos (Muñoz *et al.*, 2008; Whyte *et al.*, 2008). Los cálculos de la magnitud del índice CBNC definido por Whyte *et al.* (2008), (no se muestra) revelan una ligera sobrestimación de la fuerza invernal por el modelo PRECIS, lo que podría explicar en parte el patrón NDJ. También puede sugerir una sensibilidad particular de las precipitaciones simuladas por PRECIS en el Caribe a velocidades de viento comerciales modeladas, que deben tenerse en cuenta al interpretar los climas futuros

simulados por el modelo. Aunque los autores no muestran el campo de viento en el Caribe Central, se menciona su sobrestimación en el período noviembre-enero, lo que se usa como argumento para explicar la sobrestimación de la precipitación.

Karmalkar *et al.* (2013), enfocaron su trabajo en las islas del Caribe, utilizando salidas de un ensemble formado por el conjunto de modelos globales del proyecto CMIP3 (Mehl *et al.*, 2007), interpolados a una rejilla de 2.5 x 2.5 (latitud-longitud) y aplicando adicionalmente reducción de escala a 50 km de resolución con el sistema PRECIS, con dos variantes para las condiciones iniciales y de frontera: el modelo HadAM3P (Pope *et al.*, 2000; Jones *et al.*, 2001) y el ECHAM4. (Roeckner *et al.*, 1996) Como referencia se utilizaron varias bases de datos en puntos de rejilla, como CRU, CMAP y TRMM, mencionadas más arriba y además, la de la Universidad de Delaware, UDel

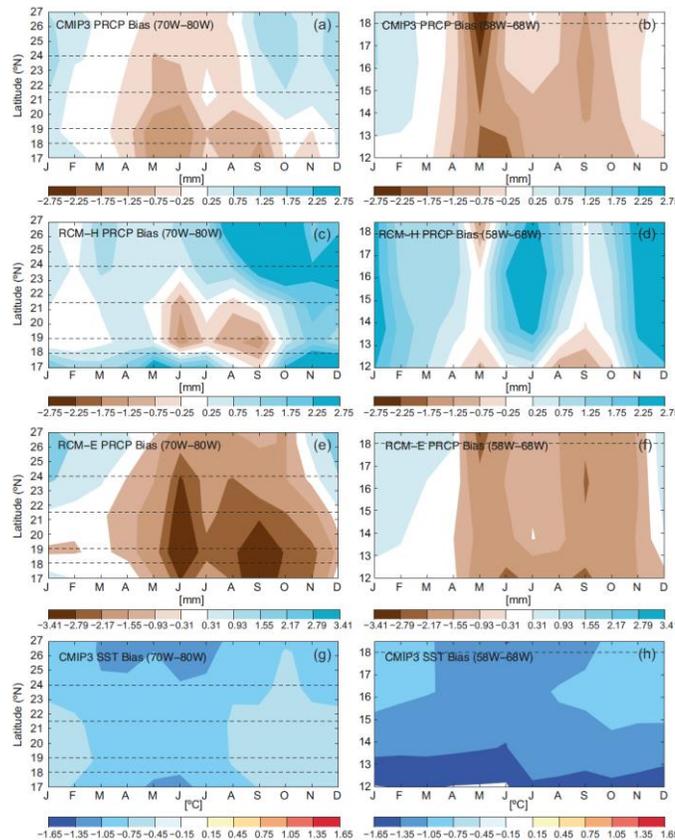


**Figura 3.** Ciclo estacional medio de la precipitación y la temperatura del aire en superficie para la región de estudio de Campbell *et al.* (2013). Adaptado del artículo citado

(<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/global-land-precipitation-and-temperature-willmott-matsuura-university-delaware>) y la del Global Precipitation Climatology Centre, GPCP ([Rudolf & Schneider, 2005](#)). Las principales variables analizadas fueron la temperatura y con mayor énfasis, la precipitación.

A partir de las simulaciones con las salidas de tiempo presente, se determinó que los modelos del CMIP3 subestiman la precipitación de las islas, y en particular el primer máximo de precipitación en las Antillas Mayores. Los autores relacionan este sesgo con la subestimación de la TSM en el Caribe Occidental, aunque sin embargo, capturan el ciclo de presión superficial y el CBNC y

predicen correctamente el pico de precipitación al final de la estación lluviosa en el Caribe Oriental. Las dos variantes del MCR del PRECIS se comportaron de diferente forma. La variante anidada en el ECHAM4 subestimó sensiblemente la precipitación en casi todo dominio y no reprodujo correctamente su ciclo estacional mientras que la alimentada por el HadCM3P sobreestimó la precipitación, excepto en la región norte del Caribe, pero reprodujo correctamente el ciclo estacional, incluyendo la SIE, lo que evidencia el valor agregado del modelo regional y a la vez, la fuerte dependencia de sus resultados con el modelo global que le provee las condiciones de frontera. ([Figura 4](#))



**Figura 4.** Sesgos de precipitación promediados en franjas latitudinales para la parte oeste (columna izquierda) y este (columna derecha) en las simulaciones a,b. Ensemble de salidas de CMIP3 respecto a CMAP; c,d. Salida del sistema PRECIS, utilizando como condiciones de frontera el MCG HadGM3P; e,f. Salida del sistema PRECIS, utilizando como condiciones de frontera el GCM ECHAM4; g,h. diferencia entre las estimaciones de la TSM del ensemble de modelos del CMIP3 con la observada de la base de datos HadISST del Hadley Centre ([Karmalkar et al., 2013](#))

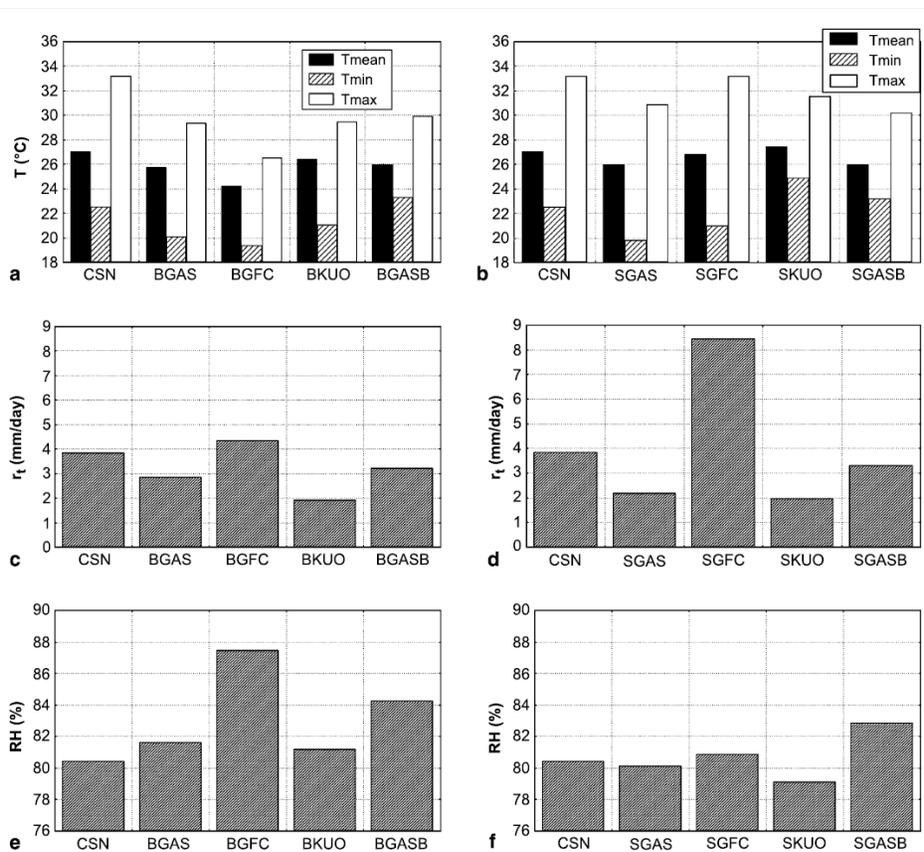
En lo referente a la reproducción del campo de temperatura del aire en superficie, los modelos CMIP3 tienen un sesgo frío para todas las islas pequeñas, que se debe a que, debido a su baja resolución representan temperaturas sobre el océano, inferiores a las estaciones terrestres que se utilizaron para la base de datos de referencia. Para las islas grandes, el sesgo de los modelos es cálido, las simulaciones con el PRECIS muestran sesgo cálido también para las islas pequeñas, el cual es mayor para el alimentado con el ECHAM-4. Los autores analizaron además las tendencias de la temperatura observada, que resultan significativas entre 1970 y 2006 en casi toda el área. Las tendencias de la temperatura anual media observada para el período 1970-1989 son positivas pero no estadísticamente significativas para todas las islas. Sin embargo, la media del conjunto CMIP3 muestra tendencias crecientes para este período, pero generalmente menores que las observadas. Las simulaciones del PRECIS también muestran tendencias crecientes, pero no siempre son estadísticamente significativas.

### **Estudios de sensibilidad de MCR en el Caribe**

Los estudios de esta temática a nivel mundial han sido extremadamente amplios y variados, abarcando áreas muy diferentes como son el efecto del tamaño del dominio, la resolución horizontal, las dimensiones de la zona *buffer*, los esquemas de cúmulos, parametrización del suelo y microfísica, analizando la capacidad del modelo de reproducir la distribución espacial y temporal de las variables de interés, en particular la temperatura de la superficie terrestre, el campo de viento y la precipitación, así como las particularidades climáticas más regulares en cada región. Los resultados de estas investigaciones permiten afirmar que el rendimiento de las diferentes configuraciones de un MCR depende fuertemente de la región del planeta donde se utilice. ([Syla et al., 2011](#); [Reboita et al., 2014](#); [Gao et al., 2016](#); [Notaro & Zarrin, 2011](#)).

El primer estudio de sensibilidad de un MCR para un dominio que abarcaba la región del Caribe, México y Centro América es el de [Martínez-Castro et al. \(2006\)](#), quienes utilizaron el modelo RegCM3, con condiciones iniciales y de frontera del reanálisis de NCEP-NCAR, NNRP2 ([Kalnay et al., 1996](#)), investigando el efecto de la aplicación de 3 esquemas de cúmulos diferentes en dicho dominio, a 50 km de resolución espacial y en otro dominio interno, centrado en la Isla de Cuba e incluyendo las Antillas Mayores, con 25 km de resolución. La corrida abarcó los meses de junio-septiembre del año 1993, desechando junio en el análisis para garantizar el spin-up del modelo. Los esquemas de cúmulos usados fueron [Grell \(1993\)](#), con dos condiciones de clausura diferentes y el de Anthes-Kuo ([Anthes, 1977](#)). Un experimento adicional para comparar 2 parametrizaciones de flujos oceánicos, la de [Zeng et al. \(1998\)](#), y la de versiones anteriores del modelo (Esquema de transporte biósfera-atmósfera (Biosphere-atmosphere transfer scheme; BATS; [Dickinson et al., 1993](#)). En general, encontraron una alta sensibilidad de los resultados obtenidos a los tres factores analizados, determinándose que la configuración más conveniente para la región entre las implementadas en el modelo era la de Grell, con condición de clausura de Arakawa-Schubert ([Arakawa & Schubert, 1974](#)) y la estimación de los flujos oceánicos a través del esquema BATS. La [figura 5](#), muestra los gráficos comparativos de los diferentes experimentos de simulación realizados en este trabajo, tomando como referencia la red de estaciones meteorológicas de superficie de Cuba. Se comparan la temperatura superficial y humedad relativa medias y la precipitación total en el período de tres meses de verano.

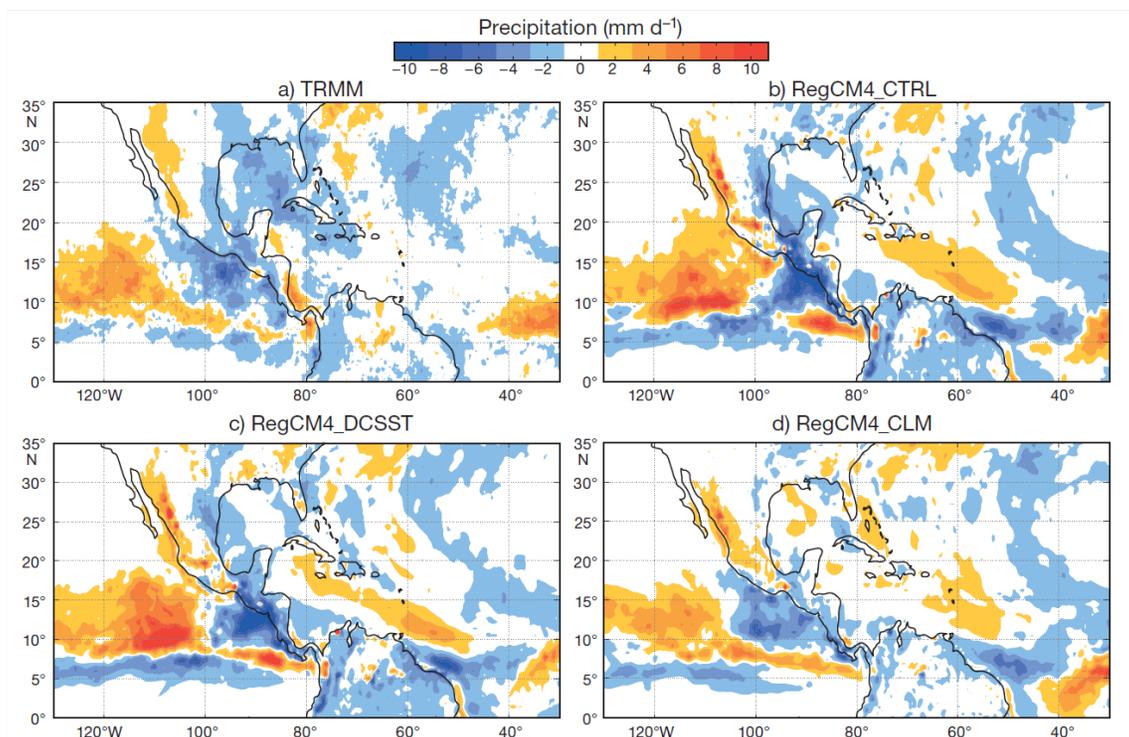
Los resultados de este trabajo fueron aplicados por [Diro et al. \(2012\)](#), en el dominio asignado para Centro América y el Caribe por el experimento Regional Coordinado de Reducción de Escala, (Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX); [Giorgi et al. 2009](#); [Jones et al. 2011](#)), quienes



**Figura 5.** Promedios estacionales (JAS) de las variables meteorológicas para diferentes experimentos numéricos con el RegCM3 y para los datos de la red meteorológica de superficie cubana, interpolados en los puntos de rejilla del modelo sobre Cuba. (A), (b): Temperatura del aire (media, máxima y mínima) para los dominios grande y pequeño. (C), (d): Precipitación total para los dominios grande y pequeño. (E), (f): Humedad relativa para los dominios grande y pequeño (Martínez-Castro *et al.*, 2006)

desarrollaron simulaciones con una nueva versión del mismo modelo, RegCM4, para un período de 6 años, con 50 km de resolución. Este dominio se solapa en gran medida con el de América del Sur, de modo que resultó ser considerablemente mayor que el utilizado en trabajos anteriores, lo que implica mayor tiempo de corrida (Figura 6). Aunque no existe ningún estudio de sensibilidad que haya demostrado la ventaja de utilizar una mayor área, los autores lo adoptaron como parte del diseño general de CORDEX. En este trabajo se aplicó una parametrización de cúmulos combinada con el esquema de Grell sobre tierra y el de Emanuel (1991), introducido en la nueva versión, sobre el mar, y se evaluó el efecto de sustituir el esquema de suelo BATS por el

Modelo Comunitario de Suelo (Community Land Model, CLM; Dai *et al.* 2003; Oleson *et al.* 2008). La evaluación del modelo se centró principalmente en el área de Centro América y México, concluyéndose que el mismo reproduce aceptablemente los ciclos diurnos y patrones espaciales medios de verano en dicha área, detectando la SIE en el área de estudio (Figura 6) y que también reproduce el CBNC, aunque atenuado y desplazado al sur. El ciclo diurno se reproduce correctamente en amplitud, aunque con diferencia de fase respecto a las observaciones. Se concluyó además que la aplicación del nuevo esquema de suelo CLM en sustitución del BATS no aporta mejoría en la ejecución del modelo, ni tampoco la aplicación del esquema de pronóstico de la TSM.



**Figura 6.** Campos de precipitación observado y simulados promediados para la SIE en el periodo de simulación de [Diro et al. \(2012\)](#). a. Campo observado según de la base de datos de TRMM; b. Campo simulado en la configuración de control del RegCM4. c. Configuración con ciclo diario de TSM d. Configuración que aplica el esquema de interacción con el suelo CLM

En la misma línea de investigación, [Fuentes-Franco et al. \(2014\)](#), utilizaron la configuración del modelo RegCM4 recomendada por [Diro et al. \(2012\)](#). Ejecutaron ejecutar 27 años (1982-2008) de simulación del clima regional en el dominio CORDEX de América Central, utilizando condiciones de frontera de ERA Interim con el objetivo de caracterizar la capacidad del modelo en reproducir los patrones medios, la variabilidad interanual y otros estadígrafos enfocados a la detección de extremos a escala diaria para la temperatura y precipitación sobre México. Se obtuvieron resultados consistentes con los establecidos por investigaciones previas, tales como la adecuada reproducción de los patrones espaciales por temporada para la temperatura, el viento y la precipitación, y la variabilidad anual e interanual, permitiéndoles afirmar el uso del modelo para estadísticas climáticas de mayor orden, incluyendo evaluación de extremos. No

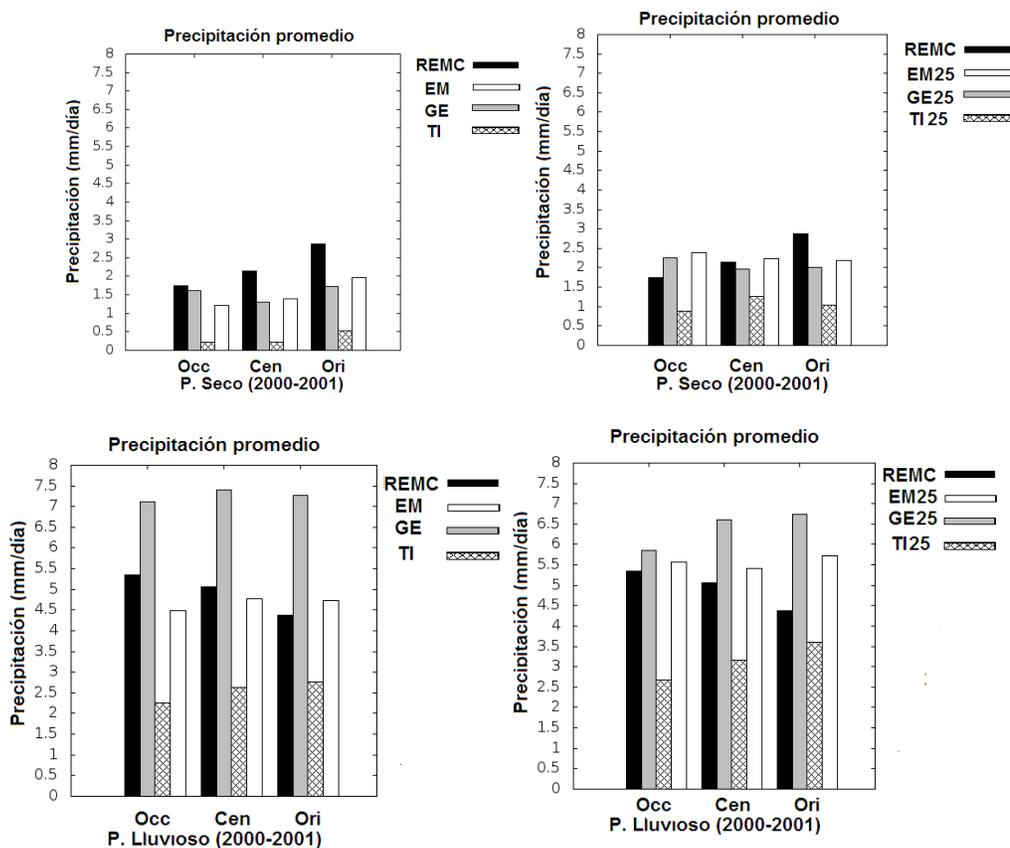
obstante, se detectó sobreestimación del número de eventos de precipitación ligera y de los valores de precipitación en zonas orográficas. En el trabajo se aplicaron criterios simplificados para determinar la capacidad del modelo de predecir el comportamiento de la actividad ciclónica, con resultados alentadores.

[Vichot et al. \(2014\)](#), utilizaron tres configuraciones del RegCM versión 4.3, para dos dominios en la región de América Central y el Caribe, con tres esquemas de parametrización de cúmulo, con el objetivo de estudiar la sensibilidad del modelo al cambio de resolución y dimensiones del dominio. En ese estudio los esquemas convectivos utilizados fueron el del [Emanuel \(1991\)](#), (EM), la combinación del esquema de Grell sobre tierra y Emanuel sobre el océano, y el esquema de Tiedtke (TI) ([Tiedtke, 1989](#); [Nordeng, 1984](#)), que había sido recientemente incorporado a la versión 4.3 del RegCM. El primer dominio se

realizó con 50 km de resolución horizontal, abarcando un área algo mayor que el utilizado por Martínez-Castro et al., 2006, pero menor que el de CORDEX, mientras que el segundo, interior a éste, con resolución de 25 km y se definió además un área de estudio común entre ambos dominios para realizar las comparaciones. El período de simulación fue desde el año 2000 hasta el 2001 utilizando la base de datos satelital TRMM como criterio de comparación para la precipitación y las del CRU ([New et al., 2000, 2002](#); [Harris et al., 2014](#)) y MERRA ([Rienecker et al., 2011](#)) para los campos de temperatura revalidando los resultados de previos autores en reproducir los patrones espaciales de la lluvia en el Caribe, pero presentando sesgos cuyo valor dependía en mayor medida del esquema de cumulo que se utilizó, y en menor medida de la resolución espacial. El estudio se dividió en período poco lluvioso y lluvioso, resultando para el primero poca sensibilidad al cambio de dominio y resolución tanto en la simulación de la precipitación como de la temperatura, donde la combinación GE dio los mejores resultados para la precipitación mientras para el período lluvioso, TI y GE presentaron los menores sesgos independientemente de la resolución, aunque para 25 km, los sesgos fueron ligeramente menores y presentaron una distribución más homogénea en el área de estudio. La temperatura simulada por el modelo fue bien representada por todas las configuraciones, y principalmente por el esquema de TI. En esta ocasión se usó la red de estaciones meteorológicas cubanas cuya comparación detectó dependencia del sesgo de la precipitación con la resolución, aunque en grado diferente para las distintas parametrizaciones, observándose menores sesgos para 25 km. La [figura 7](#) muestra la comparación entre la precipitación promedio para el período seco y el período lluvioso obtenida por las tres parametrizaciones utilizadas y para las dos configuraciones dominio-resolución del modelo.

Un nuevo estudio de sensibilidad sobre el RegCM-4.3 fue realizado por Martínez-Castro et al. 2016. En esta ocasión el estudio fue realizado nuevamente en el período 2000-2001 con resolución horizontal de 50 km. Se comparó el comportamiento del modelo para 16 configuraciones del esquema convectivo de [Tiedtke \(1989\)](#), sintonizando diferentes parámetros, relacionados con el proceso de inclusión y exclusión de aire externo en las corrientes verticales convectivas, para diferentes tipos de convección definidos en el modelo, como el *entrPen* (*Entrainment rate for penetrative convection*), *entrMid* (*Entrainment rate for midlevel convection*), *entrScv* (*Entrainment rate for shallow convection*). Otros parámetros sintonizados fueron el coeficiente de ajuste de la escala de tiempo de realización de la Energía convectiva disponible *Cmtcape* (*CAPE adjustment time scale parameter*), el coeficiente de ajuste de la razón de autoconversión de agua de nube en agua de precipitación *cprcon* (*Autoconversion parameter*) y el umbral de convección profunda *cTrigger* (*Trigger parameter for deep convection*), utilizando GE y EM como esquemas de comparación ya que en previos estudios quedó demostrado su utilidad incluyendo además redes de estaciones meteorológicas de Cuba, Jamaica y República Dominicana que permitieron la evaluación del ciclo diurno de la temperatura y precipitación por el modelo.

Se demostró la capacidad de algunas de las configuraciones propuestas para el esquema de Tiedtke de reproducir el ciclo estacional de la precipitación y en particular, la SIE para las Antillas Mayores. El CBNC se situó correctamente y se reprodujo cualitativamente bien por todas las configuraciones, pero el valor máximo del viento fue subestimado en 1-2 m/s por la mayoría de las configuraciones, excepto Grell sobre tierra y Emanuel sobre el mar (GE), y Emanuel, reprodujeron bien el máximo de febrero, y una de las configuraciones del esquema de Tiedtke, que estimó bien el viento máximo en junio ([Figura 8](#)). Se demostró que el



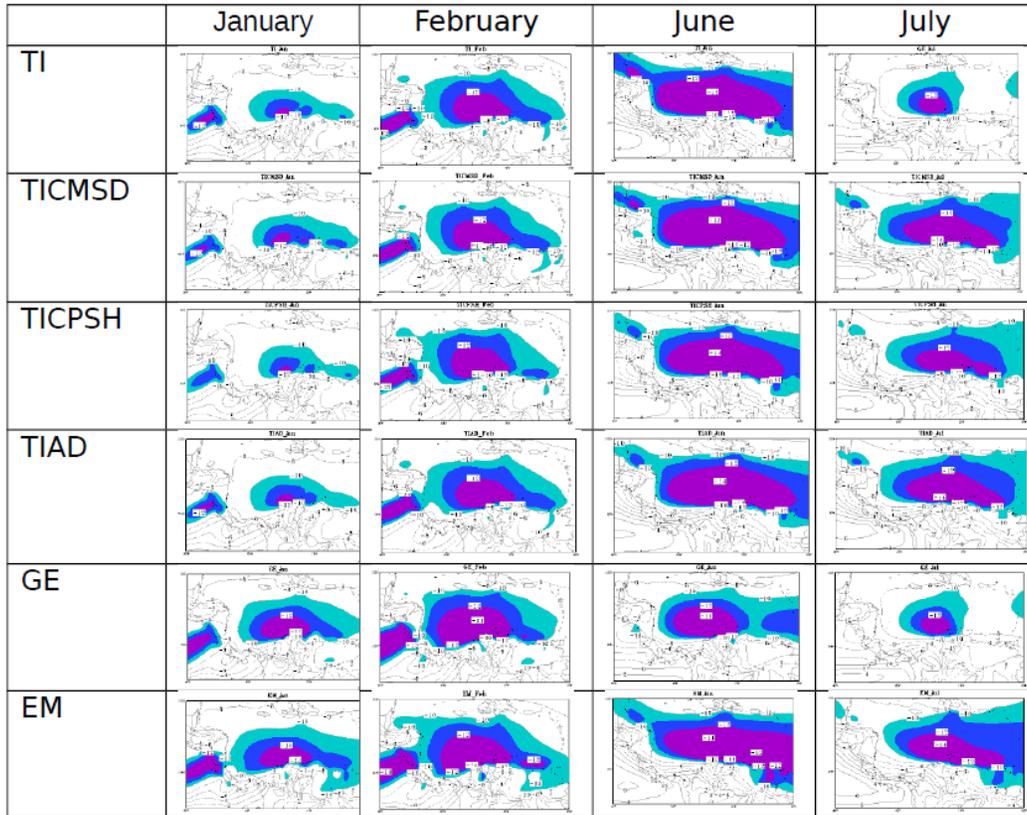
**Figura 7.** Promedio para las regiones occidental, (Occ), central (Cen) y oriental (Ori) de Cuba, para los períodos seco (fila superior) y lluvioso (fila inferior) de los totales mensuales de precipitación simulados por las tres configuraciones del modelo y estimado a partir de las observaciones de la Red de Estaciones Meteorológicas de Cuba, según el artículo de Vichot et al. (2014). La columna izquierda muestra las simulaciones con 50 km de resolución y la columna derecha, con 25 km

ciclo diurno de temperatura está bien reproducido para Cuba por todas las configuraciones, aunque el máximo de la tarde se subestima. El ciclo diurno de las precipitaciones diurnas sobre Cuba muestra una mayor dependencia del esquema convectivo, ya que las configuraciones de Tiedtke reproducen bien el comienzo de la lluvia convectiva en la tarde, pero con un retraso de 2-3 horas, mientras que GE es el único esquema que reproduce bien el tiempo del máximo (21-00 UTC) y la lenta disminución de la precipitación en la noche.

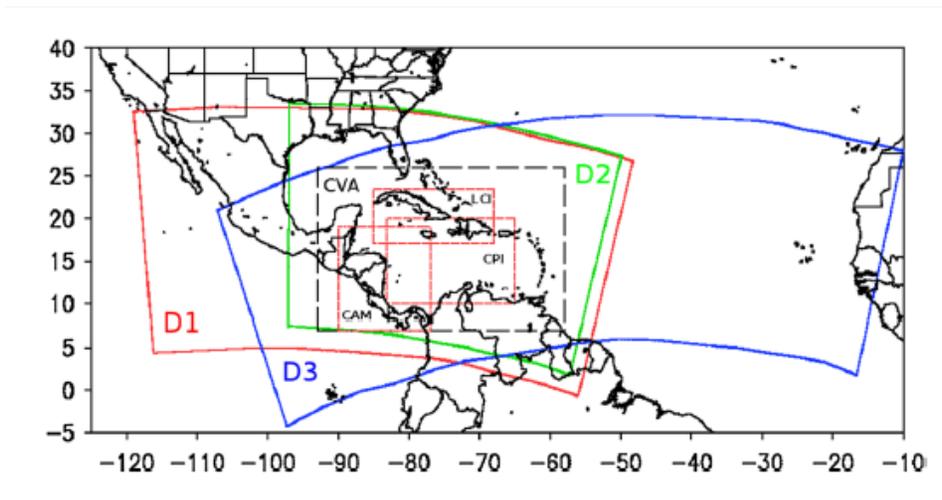
[Centella et al. \(2015\)](#), estudiaron la sensibilidad de las simulaciones del sistema PRECIS, basado en el MCR HadAMP3 ([Gordon et al., 2000](#)) con las dimensiones del

dominio, motivado por la necesidad de optimizar las corridas del modelo para los estudios de cambio climático. Para esto, definieron tres dominios, que se muestran en la [figura 9](#).

Las discrepancias entre las configuraciones de PRECIS con respecto a la precipitación simulada no son significativas cuando se consideran los puntos de rejilla terrestre y marítima. Sin embargo, cuando se analizan sólo los puntos terrestres, la capacidad general del modelo disminuye y D2 aparece como la simulación más recomendable por tener las menores dimensiones y a la vez la mejor ejecución, aunque las diferencias con los otros dominios en esto último no son sustanciales.



**Figura 8.** Viento zonal promediado para enero, febrero, junio y julio para las diferentes configuraciones del modelo ensayadas en [Martínez-Castro et al. \(2016\)](#), para la región central del Caribe donde se encuentra el CBNC. Los intervalos de isotacas con más de 10 m/s se muestran sombreados



**Figura 9.** Dominios D1, D2 y D3, definidos en el trabajo de [Centella et al., \(2015\)](#), excluyendo las zonas *buffer*. D1; línea roja; D2: línea verde D3: línea azul

En particular, los patrones de circulación atmosférica asociados con la SIE, incluyendo la influencia de la ASAN durante el año, son razonablemente reproducidos por las tres configuraciones y en especial para el dominio D2. Las tres configuraciones reproducen bien el CBNC, aunque en D1 y D2 se sobreestiman en cierta medida los vientos máximos.

Se concluye que una reducción en el tamaño del dominio no afecta significativamente los patrones de circulación atmosférica, especialmente en los niveles bajos. Más específicamente, extender el dominio hacia el este, como en D3, no parece producir mejoras sustancialmente significativas.

### Representación de los ciclones tropicales en la región del Caribe

La representación de los ciclones tropicales en los modelos numéricos es uno de los desafíos más importantes en las regiones tropicales. Como estos no se pueden obtener directamente de los campos de viento, es necesario desarrollar algoritmos para su detección, que identifiquen en los campos los conjuntos de puntos de rejilla que cumplen con las características que definen a los CT.

Los primeros trabajos que aplicaron MCR a la detección de vórtices ciclónicos se centraron principalmente en el Pacífico Oriental ([Walsh & Katzfey, 2000](#); [Nguyen & Walsh, 2001](#); [Walsh et al., 2004](#)). Un resumen de estos trabajos puede encontrarse en [Walsh et al., \(2007\)](#), quienes revisaron los diferentes criterios utilizados en la literatura para definir los vórtices ciclónicos y determinaron la relación óptima entre la resolución del modelo y el umbral de viento que define el vórtice.

[Knutson et al. \(2007\)](#), aplicaron el modelo regional climático no hidrostático sin parametrización de cúmulos, del Laboratorio de Dinámica de los Fluidos Geofísicos (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; GFDL), ([Pauluis & Garner, 2006](#)), con una resolución horizontal de 18 km y 45 niveles verticales a la simulación de la climatología de los ciclones tropicales del Atlántico. El modelo

se anidó en el reanálisis del Centro Nacional para la Predicción Medioambiental de Estados Unidos (National Centers for Environmental Prediction NCEP) ([Kalnay et al., 1996](#)). Se simuló 27 estaciones ciclónicas del Atlántico, comprendiendo los períodos agosto-octubre desde 1980 hasta 2006. El dominio aplicado cubrió el Atlántico tropical y subtropical, incluyendo las costas de África. Se logró reproducir la variabilidad de la ocurrencia de ciclones tropicales en el período de estudio, incluyendo la tendencia creciente observada, en comparación con los datos del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (National Hurricane Center; hurricane database (HURDAT; [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data\\_Storm.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data_Storm.html)).

[Martínez-Castro et al. \(2011\)](#), utilizaron el campo de viento de la salida del PRECIS para tiempo presente correspondiente al escenario SRES-A2 para el dominio de la región del Caribe, utilizado y descrito por [Campbell et al. \(2010\)](#), para aplicar un algoritmo de detección de CT utilizando salidas medias diarias, adaptando las conclusiones de [Walsh \(2007\)](#), para este tipo de campos. Esto tiene la ventaja de eliminar posibles fluctuaciones de los campos, características de salidas instantáneas del modelo, aunque adolece de la limitación de que los datos han sido suavizados al promediar.

El método puede resumirse en los siguientes pasos:

En la rejilla de 0.44° (50 km), se busca un punto de mínima presión superficial, que cumpla que la presión promedio de los puntos de rejilla vecinos contenidos en una circunferencia de 6° (700 km) centrada en el punto sea al menos 5.5 hPa mayor que la del punto.

La diferencia entre los valores máximo y mínimo de la velocidad del viento en un entorno de 3 puntos de rejilla de radio (1.3° o 150 km) centrado en el punto de máxima presión debe ser de al menos 40 km/h (11 m/s).

El final de la trayectoria de un vórtice individual ocurre cuando la posición del vórtice

más cercano detectado al día siguiente está a más de 7° (800km) de la del día anterior.

En la validación del método, los autores obtuvieron buena coincidencia entre la densidad de trayectorias de vórtices simulados para la región del Caribe y la obtenida de la base de datos del National Hurricane Center norteamericano

(Unisys <http://weather.unisys.com/hurricane/>), aunque subestimaron la ocurrencia de vórtices en la región del Pacífico Oriental, cercana a México.

En el trabajo de [Fuentes-Franco \(2014\)](#), citado anteriormente, se propone un algoritmo de detección muy simple, que permite inferir la capacidad del modelo de reproducir ciclones, estimando los posibles días con vórtice ciclónico. Las condiciones impuestas a cada punto de rejilla son que al menos una vez en el día, la velocidad del viento sea mayor o igual que  $21 \text{ ms}^{-1}$ , la presión a nivel del mar menor o igual que 1005 hPa y la intensidad de precipitación mayor o igual que  $15 \text{ mm día}^{-1}$ . La aplicación de estos criterios permitió concluir que el modelo reproduce adecuadamente las zonas ciclogénicas de la región, aunque subestima los huracanes del Pacífico Oriental, resultado similar al de [Martínez-Castro \(2011\)](#).

Paralelamente, [Diro et al. \(2014\)](#), examinaron las características de los ciclones tropicales sobre el dominio Centro América de CORDEX para tiempo presente y futuro usando un ensemble de proyecciones con RegCM-4 anidado en dos modelos globales provenientes del CMIP5 (*Couple Model Intercomparison Project Phase 5*; [IPCC, 2013](#)), con el objetivo de reducir la escala a 50 km y aumentar la capacidad de detección de vórtices. La validación del modelo para detección de vórtices se realizó a partir de una corrida con condiciones de frontera de ERA Interim, ([Dee et al., 2011](#)), para un período de 22 años, utilizando como parametrización de convección el esquema mixto de Grell sobre tierra y Emanuel sobre el mar, al igual que [Fuentes-Franco \(2014\)](#), pero aplicando

diferentes criterios de detección de vórtices, que se enumeran a continuación:

- La vorticidad relativa a 850 hPa debe superar los  $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
- Debe haber un centro cerrado con un mínimo de presión dentro del radio de 100 km, que se define como el centro del vórtice.
- El mínimo de presión debe ser al menos 2 hPa menor que la presión superficial media sobre un cuadrado de  $2 \times 2$  puntos de rejilla.
- El viento superficial a 10 m debe ser al menos de  $17.5 \text{ m s}^{-1}$
- La suma de las anomalías de temperatura a 700, 500 y 300 hPa alrededor del centro del ciclón debe ser mayor que cero.
- El punto de presión mínima donde se genera el ciclón debe estar a una TSM superior a  $26^{\circ}\text{C}$ .

Los resultados muestran buena coincidencia entre la climatología observada, con alguna sobreestimación en el ANT y el Caribe y subestimación en el Pacífico Oriental Tropical (POT), análogamente a los trabajos anteriores.

Posteriormente, [Fuentes-Franco et al. \(2016\)](#), desarrollaron la idea de su anterior trabajo, realizando un estudio de sensibilidad del modelo RegCM4, evaluando la ocurrencia de vórtices ciclónicos sobre el dominio CORDEX de América Central a intervalos de cuadrícula de 50 y 25 km, utilizando diez años de condiciones de frontera de ERA Interim y TSM observadas. Utilizaron la misma metodología de detección de ocurrencia de vórtice, pero quitando el umbral de precipitación. En este caso, se estimaron las trayectorias utilizando el método de [Diro et al. \(2014\)](#).

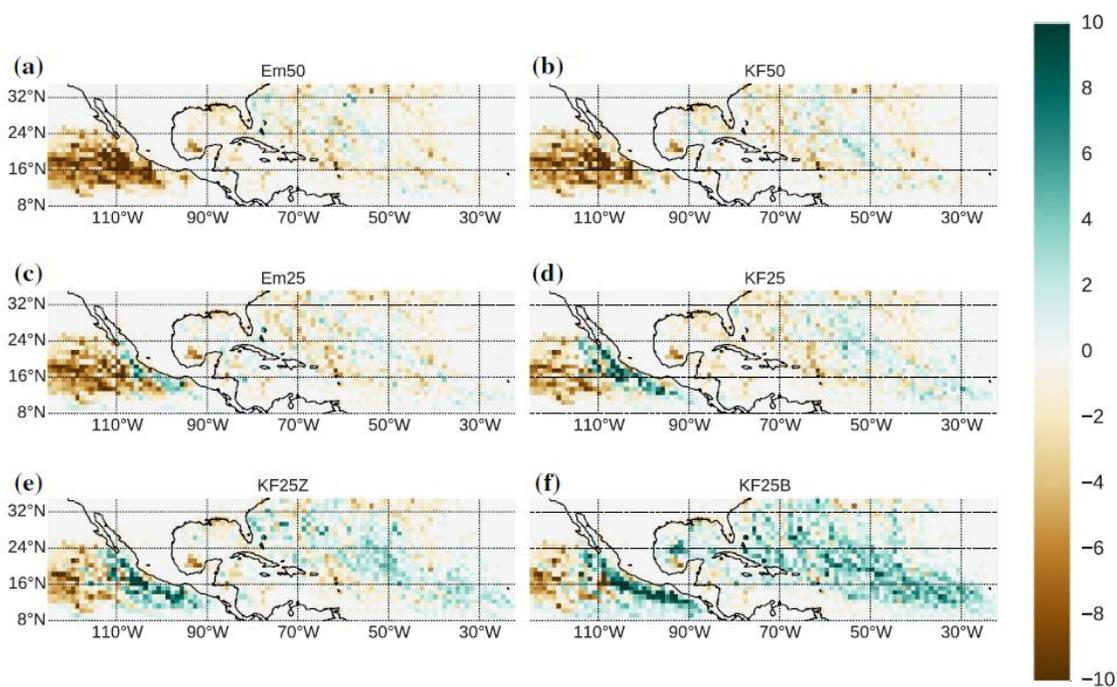
El modelo mostró una respuesta dependiente de la zona ciclogénica en específico. Sobre la cuenca del Atlántico Norte, se determinó una mayor sensibilidad a los esquemas de la física que la resolución. La parametrización de los flujos oceánicos influyó fuertemente en la frecuencia de vórtices estimados y en su intensidad. Por el contrario, en la cuenca del

Pacífico Oriental las configuraciones de 50 km subestimaron fuertemente las ocurrencias de CT, mientras que las de 25 km estuvieron mucho más cerca de las climatologías observadas. Esta diferencia, los autores la atribuyen a limitaciones de la configuración de menor resolución para describir el campo de viento en determinadas regiones de alta vorticidad. No obstante, pudiera cuestionarse la metodología aplicada para evaluar la sensibilidad a la resolución, ya que se utilizan los mismos umbrales de detección para resoluciones diferentes, lo que no toma en cuenta la experiencia de investigaciones anteriores ([Walsh et al., 2007](#)).

En general, el modelo reprodujo la variabilidad interanual de la ocurrencia de TC sobre la cuenca del ANT. Los autores concluyeron que la configuración del RegCM4 más recomendable para detección de vórtices ciclónicos es la que utiliza 25 km de resolución espacial, el esquema de convección de Kain-Fritsch y el esquema de flujo oceánico de Zeng con mayor valor del parámetro de Charnok ([Figura 10](#)).

## Conclusiones

En el presente trabajo se han resumido los principales resultados obtenidos en la utilización de modelos climáticos regionales (MCR) para la reproducción del clima de la región del Caribe, comprendiendo los Mares Interamericanos, islas y territorios circundantes. Después de la introducción del modelo RegCM3 y el sistema de modelación regional PRECIS en la región, entre los años 2003 y 2004, se desarrolló un intenso trabajo de adaptación de estos modelos en diferentes centros científicos de la región, desarrollándose estudios de sensibilidad para determinar las mejores configuraciones de los modelos en dependencia de los objetivos de trabajo y estudios de validación y de determinación de valor añadido con datos de reanálisis y con salidas de modelos globales en tiempo presente. Aunque la región es una de las menos estudiadas del mundo en los referente a la modelación regional climática, en estos momentos se posee un conocimiento detallado



**Figura 10.** Sesgos de la densidad de trayectorias por puntos de rejilla para las diferentes configuraciones utilizadas por [Fuentes-Franco \(2016\)](#)

del desempeño de los sistemas de modelación regional PRECIS y RegCM en la misma, tanto con relación a los sesgos en determinadas subregiones para las diferentes estaciones del año, como en su capacidad de reproducir los principales rasgos del clima regional, como son el ciclo anual medio, caracterizado por los períodos seco y lluvioso y la sequía intraestival, el chorro de bajo nivel del Caribe y la ocurrencia de ciclones tropicales. Algunos de los estudios, enmarcados en el experimento CORDEX, han utilizado el dominio determinado por este esfuerzo coordinado, que abarca una extensa área de América del Sur, en concordancia con sus directivas, aunque en otras investigaciones se ha demostrado que se puede obtener buen desempeño en dominios menores, incluyendo un área menor de América del Sur y del Atlántico. Hasta el momento, no se han desarrollado simulaciones con enfoque de ensemble, aunque se han ejecutado estudios de sensibilidad enfocados a la identificación de configuraciones para integrar los ensembles, con recomendaciones concretas. En un trabajo posterior, los autores abordarán el resumen de los resultados actuales de la aplicación de modelos regionales climáticos en la región a la reducción de escala de proyecciones de cambio climático, lo que no fue abordado en este trabajo por limitaciones de espacio.

En estos momentos los autores desarrollan experimentos con varias configuraciones del modelo RegCM4 con condiciones de frontera de un modelo global con el objetivo de obtener proyecciones futuras de alta resolución.

### 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

- Aldrian, E.; Deumenil-Gates, L.; Jacob, D.; Podzun, R.; Gunawan D (2004) “Long-term simulation of Indonesia rainfall with the MPI regional model”. *Clim Dyn*, 22: 795-814.
- Amador, J. A. 1998. “A climatic feature of the Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet”. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 5(2):91-102.
- 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.
- Anthes, R. A. 1977. “A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model”. *Mon Wea Rev* 105: 270–286.
- Arakawa, A.; & Schubert, WH. 1974. “Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment”. Part I. *J Atmos Sci* 31: 674–701.
- Ballester-Pérez M., Pedroso-González C. & Pérez-Suárez R. 2010. Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico. Proyecto 0803. Editorial Academia. La Habana, 170 pp.
- 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.
- Cantet, P.; Déqué, M.; Palany, P.; & Maridet, J. L. 2014. "The importance of using a high-resolution model to study the climate change on small islands: the Lesser Antilles case". *Tellus A* 2014, 66, 24065, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.24065>.
- 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).
- Centella-Artola, A.; Taylor, MA.; Bezanilla-Morlot, A.; Martínez-Castro, D.; Campbell, J.; Stephenson, T.; & Vichot-Llano, A. 2015. "Assessing the effect of domain size over the Caribbean region using the PRECIS regional climate model". *Clim. Dyn.* 44. 1901-1918. DOI 10.1007/s00382-014-2272-8.
- Christensen, J. H.; Machenauer, B.; Jones, R.G.; Schar, C.; Ruti, P. M.; Castro, M.; & Visconti, G. 1997. "Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions". *Clim. Dyn.* 13: 489-506.
- Curtis & Gamble. 2007. "Regional variations of the Caribbean mid-summer drought" S. Curtis, D. W. Gamble. . *Theor. Appl. Climatol.* 94: 25-34.
- Dai, Y.; Zeng, X.; Dickinson, R.; Baker, I.; Bonan, G.; Bosilovich, M.; & Denning, A. 2003. "The Common Land Model". *Bulletin of the American Meteorological Society* 84: 1013-1023.
- Dee, D. P.; Uppala, S. M.; Simmons, A. J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M. A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A. C. M.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A. J.; Haimberger, L.; Healy, S. B.; Hersbach, H.; V. Hólm, E.; Isaksen, L.; Kallberg, P.; Kohler, M.; Matricardi, M.; McNally, A. P.; Monge-Sanz, B. M.; Morcrette, J.-J.; Park, B.-K.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.-N.; & Vitart, F. 2011. "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system". *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553-597.
- Dickinson, RE.; Henderson-Sellers, A.; & Kennedy, P. J. 1993. "Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1E as coupled to the NCAR Community Climate Model".
- Diro, GT.; Rauscher, SA.; Giorgi, F.; & Tompkins, AM. 2012. "Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over Central America to land and sea surface schemes in RegCM4". *Clim. Res.* Vol. 52: 31-48, doi:10.3354/cr01049.
- Diro, G.; Giorgi, F.; Fuentes-Franco, R.; Walsh, KJE.; Giuliani, G.; & Coppola, E. 2014. "Tropical cyclones in a regional climate change projection with RegCM4 over the CORDEX Central America domain". *Climatic change* 125 (1), 79-94.
- Emanuel, K. 1991. "A scheme for representative cumulus convection in large scale models". *J Atmos Sci* 48: 2313-2335
- Fuentes-Franco, R.; Coppola, E.; Giorgi, F.; Graef, F.; & Pavia, E-G. 2014. "Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico". *Clim Dyn* 42:629-647.
- Fuentes-Franco, R.; Giorgi, F.; Coppola, E.; & Zimmermann, K. 2016. "Sensitivity of tropical cyclones to resolution, convection scheme and ocean flux parameterization over Eastern Tropical Pacific and Tropical North Atlantic Oceans in the RegCM4 model".

- Gamble, D. W.; & Curtis, S. 2008. "Caribbean precipitation: review, model and prospect". *Prog. Phys. Geo.* 32, doi:10.1177/0309133308096027.
- Gao, XJ.; Shi, Y.; & Giorgi, F. 2016. "Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface mode". *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9,4:246–254. <http://dx.doi.org/10.1080/16742834.2016.1172938>.
- Giorgi, F., Marinucci, M.; & Bates, G. 1993a. "Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part I: Boundary-Layer and Radiative Transfer Processes." *Monthly Weather Review* 121: 2794–2813.
- Giorgi, F., Marinucci, M.; Bates, G. & De Canio, G. 1993b. "Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part II: Convective Processes and Assimilation of Lateral Boundary Conditions." *Monthly Weather Review* 121: 2814–2832.
- Giorgi, F.; Mearns, LO. 1991. "Approaches to regional climate change simulation: a review". *Rev Geophys* 29: 191-221. *Jour Geoph. Res.*
- Giorgi, F.; & Mearns, L. O. 1999. "Introduction to special section. Regional climate modeling revisited". *Jour. Geoph, Res.*, 104, D6, 6335-6352, March 27, 1999. *Journal of Geophysical Research*, 104.
- Giorgi, F.; Jones, C.; & Asrar, G. 2009. "Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework". *WMO Bulletin* 58: 175–183.
- Giorgi, F.; Coppola, E.; Solmon, F.; Mariotti, L.; Sylla, M.; Bi, X.; & Elguindi, N. 2012. "RegCM4: Model Description and Preliminary Tests over Multiple CORDEX Domains." *Climate Research* 52: 7–29.
- Gordon, C.; Cooper, C. A.; Senior, H. T.; Banks, J. M.; Gregory, T. C.; Johns, J. F. B.; Mitchell, & 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.
- Gouirand, I.; Jury, M. R.; & Sing, B. 2012. "An analysis of low- and high-frequency summer climate variability around the Caribbean Antilles". *J. Clim.* 25, 3942-3952.
- Harris, I.; Jones, PD.; Osborn, TJ.; & Lister, DH. 2014. "Update high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset". *Int. J. Climatology*, 34:623-642, Doi:10.1002/joc.3711.
- Hidalgo, H. G.; Durán-Quesada, A. M.; Amador, J. A.; & Alfaro, E. J. 2015. "The Caribbean Low-Level Jet, the Inter-Tropical Convergence Zone and Precipitation Patterns in the Intra-Americas Sea: A Proposed Dynamical Mechanism. *Geografiska Annaler*". Series A, *Physical Geography*, 97, 41–59.
- Hobgood, J. 2005. "Tropical cyclones". In: *Encyclopedia of World Climatology* (J. E. Oliver, ed.). Springer.
- Huffman, G. J.; Adler, R. F.; Bolvin, D. T.; Gu, G.; Nelkin, E. J.; Bowman, K. P.; Hong, Y.; Stocker, E. F.; & Wolff, D. B. 2007. "The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales". *J. Hydrometeorol.* 8, 38-55.
- Huntingford, C.; Jones, R. G.; Prudhomme, C.; Lamb, R.; Gash, J. H. C.; & Jones, D. A. 2003. "Regional climate-model predictions of extreme rainfall for a changing climate". *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, pp. 1607–1621 doi: 10.1256/qj.02.97.
- Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; & Miller, H. L. (eds.) IPCC, 2007. "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, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- 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.
- Jones, R.; Murphy, J.; Hassell, D.; & Taylor, R. 2001. "Ensemble Mean Changes in a Simulation of the European Climate of 2071–2100 Using the New Hadley Centre Regional Modelling System HadAM3H/HadRM3H". Hadley Centre, Met Office: Bracknell.
- Jones, R. G.; Noguer, M.; Hassell, D.; Hudson, D.; Wilson, S.; Jenkins, G.; & Mitchell, J. 2004. "Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS (manual)". Exeter, UK: Hadley Centre for Climate Prediction and Research Met Office, 40 pp.
- Jones, C.; Giorgi, F.; & Asrar, G. 2011. "The coordinated regional downscaling experiment: CORDEX. An international downscaling link to CMIP5". CLIVAR Exch 56:34–40.
- Jury, M. R.; Malmgren, B. A.; & Winter, A. 2007. "Sub-regional precipitation climate of the Caribbean and relationships with ENSO and NAO". *J. Geophys. Res.* 112, D16107, doi:10.1029/2006JD007541.
- Jury, M. R. 2009. "An inter-comparison of observational, reanalysis, satellite, and coupled model data on mean rainfall in the Caribbean". *J. Hydrometeorol.* 10, 413-430.
- Kalnay, E. 1996. "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471.
- 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.
- Karnauskas, K. B.; & Busalacchi, A. J. 2009. "The Role of SST in the East Pacific Warm Pool in the Interannual Variability of Central American Rainfall". *Jour Clim.*, 22. 2605-2623.
- Karnauskas, K. B.; Seager, R.; & Giannini, A. 2013. "A simple mechanism for the climatological midsummer drought along the Pacific coast of Central America". *Atmósfera* 26(2), 261-281.
- Knutson, T.R.; Sirutis, J. J.; Garner, S. TR.; Held, I. M.; & Tuleya, R. E. 2007. "Simulation of the recent multi-decadal increase of Atlantic hurricane activity using an 18-km grid regional model". *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 88, 10: 1549-1565.
- Magaña, V.; Amador, J. A.; & Medina, S. 1999. "The midsummer drought over Mexico and Central America". *J. Clim.* 12, 1577-1588.
- Martin, E. R.; & Schumacher, C. 2011. "The Caribbean low-level jet and its relationship to precipitation in IPCC AR4 models". *J. Clim.* 24, 5935-5950.
- Martinez-Castro, D.; da Rocha, R. P.; Benzanilla-Morlot, A.; Álvarez-Escudero, L.; Reyes-Fernández, J. P.; Silva-Vidal, Y.; & Arritt, R. W. 2006. "Sensitivity studies of the RegCM3 simulation of summer precipitation, temperature and local wind field in the Caribbean region". *Theor. Appl. Climatol.* 86, 5-22, doi:10.1007/s00704-005-0201-9.

- 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](http://www.iga.cu/publicaciones/revista/cte_12/CTE12.html).
- Martínez-Castro, D.; Vichot-Llano, A.; Bezanilla-Morlot, A.; Centella-Artola, A.; Campbell, J.; & Vilorio-Holguin, C. 2016. "Performance of RegCM-4.3 over the Caribbean region using different configurations of the Tiedtke convective parameterization scheme". *Rev Climat. Vol. 16* (2016): 77-98. <http://webs.ono.com/reclim11/reclim16.pdf>.
- Meehl, G. A.; Covey, C.; Delworth, T.; Latif, M.; McAvaney, B.; Mitchell, J. F. B.; Stouffer, R. J.; & Taylor, K. E. 2007. "The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research". *Bull. American. Met. Soc.* 88, 1383-1394.
- Muñoz, E.; Busalacchi, A. J.; Nigam, S.; & Ruiz-Barradas, A. 2008. "Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet". *J. Clim.* 21, 1260-1276.
- Naranjo-Díaz L. R.; & Centella, A. 1998. Recent trends in the climate of Cuba. *Weather* 53, 80-85, doi:10.1002/j.1477-8696.1998.tb03964.x.
- New, M.; Hulme, M.; & Jones, P. 2000. "Representing twentieth century space-time climate variability: Part II: Development of 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate". *J. Climate*, 13:2217-2238.
- New, M.; Lister, D.; Hulme, M.; & Makin, I. 2002. "A high-resolution data set of surface climate over global land areas". *CR* 21:1-25 (2002) - doi:10.3354/cr021001
- Nguyen, K. C.; & Walsh, K. J. E. 2001. "Interannual, decadal and transient greenhouse simulation of tropical cyclone-like vortices in a regional climate model of the South Pacific". *J. Climate*, 14, 3043-3054.
- Nordeng, T. E. 1994. "Extended versions of the convective parameterization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the Tropics". ECMWF. Tech.Memo. 206, 41pp.
- Notaro, M.; & Zarrin, A. 2011. "Sensitivity of the North American monsoon to antecedent Rocky Mountain snowpack". *Geoph. Res. Let.*, vol. 38, 117403, doi:10.1029/2011GL048803, 2011.
- Oleson, K.; David, W.; Lawrence, D. W. M.; Bonan, G. B.; Flanner, M. G.; Kluzek E.; Levis, P. J.; Swenson, S. C.; & Thornton, P. E. 2010. "Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) Climate and Global Dynamics Division" NCAR/TN-478+STR
- Pal, J. S.; Giorgi, F.; Bi, X.; Elguindi, N.; Solmon, F.; Gao, X.; Rauscher, S. A.; Francisco, R.; Zakey, A.; Winter, J.; Ashfaq, M.; Syed, F. S.; Bell, J. L.; Diefenbaugh, N. S.; Karmacharya, K.; Konare, A.; Martinez-Castro, D.; Da Rocha, R. P.; Sloan, L. C.; & Steiner, A. L. 2007. "Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET". *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 88, 1395-1409, DOI: 10.1175/BAMS-88-9-1395.
- Pauluis, O.; & Garner, S. T. 2006. "Sensitivity of radiative-convective equilibrium simulations to horizontal resolution". *J. Atmos. Sci.*, 63, 1910-1923.
- Peterson, T. C.; Taylor, M. A.; Demeritte, R.; Duncombe, D. L.; Burton, S.; Thompson, F.; Porter, A.; Mejia, M.; Villegas, E.; Semexant, F. R.; Klein, T. A.; Martis, A.;

- Warner, R.; Joyette, A.; Mills, W.; Al Alexander, L.; & Gleason, B. 2002. "Recent changes in climate extremes in the Caribbean region". *J. Geophys. Res.*, 107, 4601, doi:10.1029/2002JD002251.
- Pope, V. D.; Gallani, M. L.; Rowntree, P. R.; & Stratton, R. A. 2000. "The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model HadAM3". *Climate Dynamics*, 16, 123-146. doi:10.1007/s003820050009.
- Rauscher, S.; Giorgi, F.; Diffenbaugh, N. S.; & Seth, A. 2008. "Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century". *Clim. Dyn.* 31, 551-571, doi:10.1007/s00382-007-0359-1.
- Rienecker, M. M.; Suarez, M. J.; Gelaro, R.; Todling, R.; Bacmeister, J.; Liu, E.; Bosilovich, M. G.; Schubert, S. D.; Takacs, L.; Kim, G. K.; & others 2011. "MERRA-NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications". *J. Climate*, 24:3624-3648.
- Reboita, M. S.; Fernandez, J. P. R.; Pereira, M.; Porfirio da Rocha, R.; Albertani, P. L. & Cruz, F. T. 2014. "Assessment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parameterization schemes". *Clim Res* 60:215-234. <https://doi.org/10.3354/cr01239>
- Roeckner, E.; Arpe, K.; Bengtsson, L.; Christoph, M.; Claussen, M.; Dümenil, L.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Schlese, U.; & Schulzweida, U. 1996. "The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate Max-Planck Institute for Meteorology". Report No.218, Hamburg, Germany, 90pp.
- Rudolf, B.; & Schneider, U. 2005. "Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global Land-Surface using in-situ Gauge Observations, Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG". Monterey October 2004, EUMETSAT, ISBN 92-9110-070-6, ISSN 1727-432X, 231-247.
- Seth, A.; & Giorgi, F.; 1998. "The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model". *Jour. Clim.*, 11, 2698-2712.
- Sylla, M. B.; Giorgi, F.; Ruti, P. M.; Calmanti, S.; & Dell'Aquila, A.; 2011. "The impact of deep convection on the West African summer monsoon climate: a regional climate model sensitivity study". *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 1417-1430.
- Small, R. J. O.; de Szoeki, S. P.; & Xie, S. P. 2007. "The Central American midsummer drought: Regional aspects and large-scale forcing". *J. Clim.* 20, 4853-4873.
- Tiedtke, M.; 1989. "A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in large-scale models. American Meteorological Society". 117: pp. 1779-1800.
- Taylor, M. A.; & Alfaro, E. J. 2005. "Climate of Central America and the Caribbean". In: *Encyclopedia of World Climatology* (J. E. Oliver, ed.). Springer.
- Taylor, M. A.; Centella, A.; Charlery, J.; Bezanilla, A.; Campbell, J. D.; Borrajero, I.; Stephenson, T. S.; & Nurmohamed, R. 2013. "The PRECIS Caribbean story: lessons and legacies". *Bull Am Meteorol Soc.* 94:1065-1073.
- Vichot-Llano, A.; Martínez-Castro, D.; Centella-Artola, A.; & Bezanilla-Morlot, A. 2014. "Sensibilidad al cambio de dominio y resolución de tres configuraciones del modelo climático regional RegCM 4.3 para la región de América Central y el Caribe". *Rev. Climatología*, 14:45-62.

- Wang, C.; 2007. "Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate". *Clim Dyn* (2007) 29:411–422 DOI 10.1007/s00382-007-0243-z.
- Wang, C.; & Lee, S. 2007. "Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes". *Geophys. Res. Lett.* 34, L02703, doi:10.1029/2006GL028579.
- Whyte, F. S.; Taylor, M. A.; Stephenson, T. S.; & Campbell, J. D. 2008. "Features of the Caribbean low-level jet". *Int. J. Clim.* 28, 119-128.
- Walsh, K. J.; & Katzfey, J. J. 2000. "The impact of climate change on the poleward movement of cyclone-like vortices in a regional climate model". *J. Climate*, 13, 1116-1132.
- Walsh, K. J.; Nguyen, K. C.; & McGregor, J. L. 2004. "Fine resolution regional climate model simulations of the impact of climate change on tropical cyclones near Australia". *Climate Dyn.*, 22, 47-56.
- Walsh, K. J. E.; Fiorino, M.; Landsea, C. W.; & McInnes, K. L. 2007. "Objectively determined resolution-dependent threshold criteria for the detection of tropical cyclones in climate models and reanalysis". *J. Climate*, 20, 2307-2314.
- 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.
- Zeng, X.; Zhao, M.; & Dickinson, R. E. 1998. "Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO DATA". *J Climate* 11: 2628–2644.