

Simulación de temperatura y precipitación estacional durante el período 1998-2000 en Centro América utilizando el modelo climático regional RegCM

Simulation of seasonal temperature and precipitation during the period 1998-2000 in Central America using the regional climate model RegCM

Paris Rivera^{1*}, Wener Ochoa², Bayron Gonzalez³

¹Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas, Universidad Mariano Gálvez de Guatemala (UMG), Guatemala, ²Programa de Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, ³Centro de Estudios Urbanos y Regionales, Universidad de San Carlos de Guatemala

*Autor al que se dirige la correspondencia: parysryver@gmail.com

Recibido: 03 de mayo 2019 / Revisión: 11 de junio 2020 / Aceptado: 28 de agosto 2020

Resumen

Este documento presenta un análisis comparativo de los resultados de un modelo de simulación de clima, datos de reanálisis regionales y datos locales de precipitación y temperatura estacional de veintitrés estaciones meteorológicas de Guatemala, para detectar señales de la habilidad del modelo a reproducir el clima estacional en un periodo de 3 años (1998-2000). La simulación se realizó con un modelo climático regional (MCR), para su reducción de escala dinámica, las condiciones de frontera se obtuvieron de los datos de reanálisis ERA-Interim. El modelo utilizado fue RegCM, versión 4, y se comparó con los datos de precipitación y temperatura de la Base de datos CRU a nivel regional centroamericano y a nivel nacional con tres instituciones que generan datos globales (CRU, TRMM y GPCP) y los datos locales. Los esquemas convectivos utilizados fueron el esquema de Grell sobre tierra y Emanuel sobre el océano, con 50 km de resolución espacial. Los ajustes realizados a las parametrizaciones generaron buen desempeño a nivel regional Centroamericano y a nivel Guatemala a pesar de perder habilidad en algunas regiones y meses. El modelo reproduce adecuadamente el comportamiento de la precipitación estacional en la mayor parte de la temporada lluviosa. Subestima la temperatura a nivel regional, pero a nivel Guatemala muestra buen ajuste. La comparación con los datos locales observados muestra que el modelo se ajusta para el periodo en estudio; pero, es necesario realizar más experimentos con distintas resoluciones espaciales y temporales y evaluar la persistencia del modelo.

Palabras claves: Modelo climático regional, Guatemala, precipitación, temperatura

Abstract

This document presents the results of an analysis on the comparison of the results of a climate simulation model, regional reanalysis data and local data on precipitation and seasonal temperature from twenty-three meteorological stations in Guatemala, to detect signs of the ability of the model to reproduce the seasonal climate over a period of 3 years (1998-2000). The simulation was performed with a regional climate model (RCM), for its dynamic scale reduction, the boundary conditions were obtained from the ERA-Interim reanalysis data. The model used was RegCM, version 4, and it was compared with the precipitation and temperature data from the CRU Database at the Central American regional level and at the national level with three institutions that generate global data (CRU, TRMM and GPCP) and local data. The convective schemes used were the scheme of Grell on land and Emanuel on the ocean, with 50 km of spatial resolution. The adjustments made to the settings generated good performance at the Central American regional level and at the Guatemala level, despite losing skill in some regions and months. The model adequately reproduces the behavior of seasonal precipitation in most of the rainy season. It underestimates the temperature at the regional level but at the Guatemala level it shows a good fit. The comparison with the observed local data shows that the model fits for the period under study, but it is necessary to carry out more experiments with different spatial and temporal resolutions and to evaluate the persistence of the model.

Keywords: Regional climate model, Guatemala, precipitation, temperature



Introducción

Los modelos climáticos regionales (MCR) tienen una mejor resolución espacial que un modelo de circulación general o global (GCM), ya que puede representar mejor la relación entre la atmósfera y la superficie de la tierra y demás componentes del sistema climático. Por lo tanto, los MCR son muy útiles para simular el clima a escala regional e incluso local. Uno de los objetivos finales de un modelo climático es poder ser utilizado para realizar pronósticos, dependiendo de la capacidad del mismo para simular el clima pasado y también proyecciones a futuro. La predicción del clima estacional se puede realizar mediante la utilización de modelos globales o regionales. Los modelos climáticos regionales permiten lograr predicciones más precisas que los modelos globales, ya que tienen una mejor resolución horizontal y parametrizaciones para determinar procesos atmosféricos a menor escala (Reboita et al., 2018), estas simulaciones del clima tienen como función lograr predicciones climáticas en un determinado año o tiempo, como en su comportamiento, mayor o menor (Baker & Huang, 2014).

De acuerdo con Giorgi (1990), el inicio de las simulaciones con el RegCM se remonta al año 1990, cuando se realizó una simulación numérica de un mes en el oeste de los EE. UU. Con RegCM se descubrió que el modelo puede simular con éxito la distribución espacial de temperatura y precipitación. El enfoque de modelado climático regional es útil para mejorar la comprensión de muchos procesos climáticos, como el forzamiento de radiación de nubes, la convección de cúmulos y los procesos de superficie terrestre (Yang et al., 2018).

El RegCM se ha utilizado para varias simulaciones numéricas en las últimas décadas. Algunos estudios verifican la capacidad del modelo para la simulación climática, la proyección climática futura, la prueba de sensibilidad del modelo, la simulación de eventos climáticos extremos o el examen de algunos procesos físicos específicos; como por ejemplo, (Widmann et al., 2003) utilizaron la salida de la simulación para predicción climática en Estados Unidos. (Van den Hurk & Van Meijgaard, 2010), simularon el clima en África Occidental y evaluaron la precipitación y la temperatura (Gianotti & Eltahir, 2014), simularon experimentos de parametrizaciones de la convección de la precipitación en Oceanía. (Wang et al., 2015) utilizó el RegCM para estudiar los efectos de diferentes esquemas de superficie terrestre en la simulación de

precipitación en la meseta tibetana. Descubrieron que la elección del esquema de superficie terrestre tuvo un impacto significativo en los resultados de la simulación.

Actualmente existen investigaciones sobre simulaciones con el MCR para Centro América, y en las cuales experimentan la simulación de la temperatura y la precipitación y utilizando el modelo RegCM, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste (ICTP) (Diro et al., 2012) y el Servicio Meteorológico del Reino Unido (Karmalkar et al., 2011), La Universidad de Costa Rica (Amador et al., 2018), del Departamento de Oceanografía Física de Ensenada, México, del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (Fuentes-Franco et al., 2014), del Experimento Coordinado de Reducción Climática Regional (CORDEX) Cavazos Y colaboradores (2020), así como algunos estudios que reconocen que hay diversas fuentes de incertidumbre en dichas simulaciones (García-Díez et al., 2013) del Grupo de Meteorología de Santander, quienes abordan este tipo de estudios desde un enfoque multidisciplinar.

Estos estudios dan una buena idea de cómo abordar los estudios nacionales, mostrando que cuando una parametrización es lo más ajustada posible en una región, otra es desajustada, por lo tanto, es necesario de varias simulaciones para encontrar la adecuada para cada región en estudio.

Materiales y métodos

En este estudio se utilizó el modelo climático regional RegCM del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP, por sus siglas en inglés) (Giorgi et al., Nieman, 1993), para realizar 3 años de simulación para Centro América con un esquema convectivo combinado; Emanuel sobre océano y Grell sobre tierra (Dickinson et al., 1993; Grell, 1993; Emanuel, 1991). El periodo de tiempo seleccionado se hizo debido a que en esos años sucedieron varios fenómenos climáticos y meteorológicos significativos que influyeron en el comportamiento climático de la región Centroamericana y particularmente en Guatemala, como el fenómeno del niño y el huracán Mitch. Así mismo se identificó la capacidad del modelo para simular la precipitación y la temperatura de la superficie y se comparó con las salidas de modelos globales y datos locales de Guatemala.

Inicialmente se procedió a conocer las ecuaciones básicas de todo el modelo climático, derivadas del conjunto completo de leyes de conservación de

momento, masa, energía y humedad que gobiernan los cambios en el movimiento y la termodinámica de la atmósfera. Además de conocer las parametrizaciones de la convección para estimación de lluvia que tiene el modelo, es decir la parte que el modelo no resuelve explícitamente, y que se agrupan con el término “física del modelo”. También se conocen con el nombre de “procesos a escala por debajo de la rejilla” (*sub-grid-scale*). Este modelo contribuyó con la generación de información de temperatura y precipitación en áreas importantes de actividad agrícola en Guatemala, lo cual permite deducir posibles efectos en esta actividad, desde el punto de vista económico para el país.

Se usaron datos de reanálisis Era_Interim y se comparó con los resultados de modelos globales como la Unidad de Investigación de Clima de Inglaterra (CRU), la Misión de Medición de lluvias tropicales de la NASA (TRMM), el Proyecto de Climatología sobre Precipitaciones Globales (GPCP) y el promedio para Guatemala de 23 estaciones locales del Instituto Nacional de Vulcanología, Sismología, Meteorológica e Hidrología (Insivumeh), de Guatemala (Figura 1).

Se procedió a delimitar el modelo para la región centroamericana, utilizando como base el tiempo descrito anteriormente (1998 a 2000). Esto con el fin de demostrar que el modelo reproduce los periodos

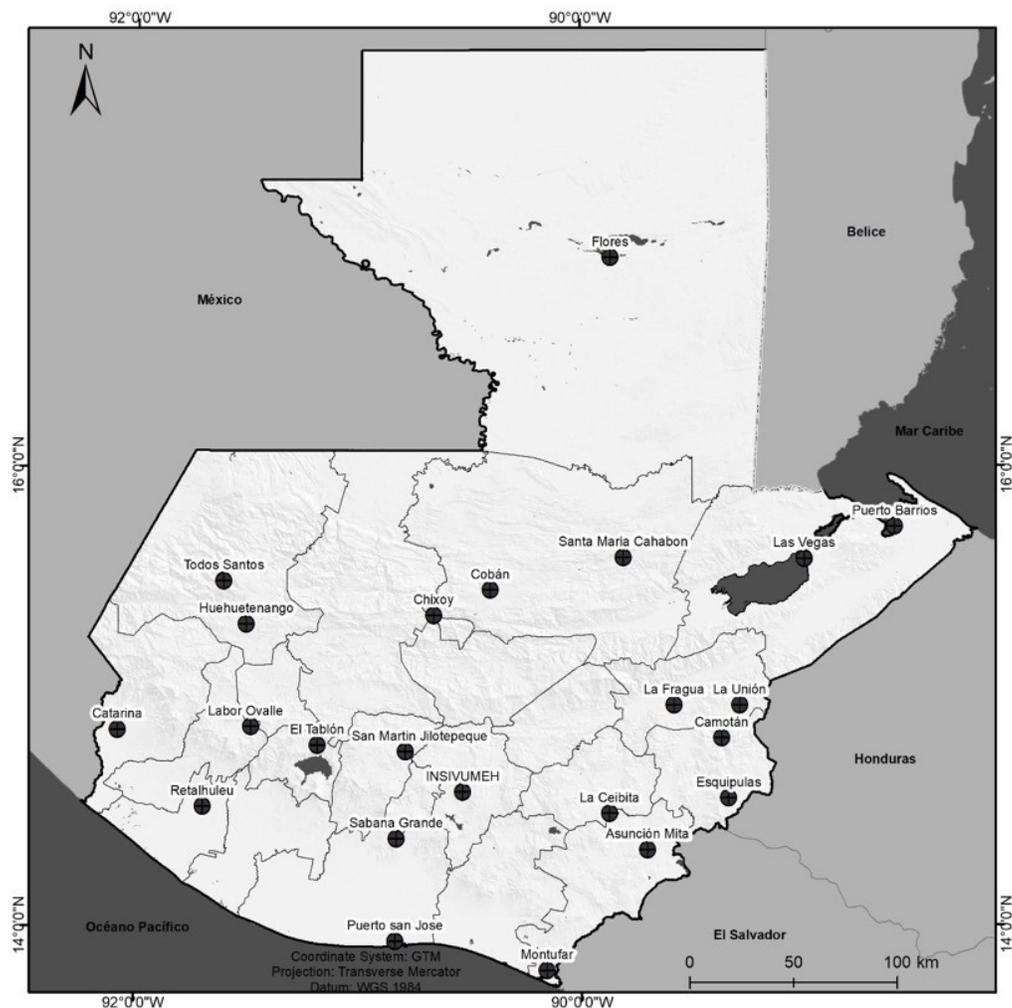


Figura 1. Estaciones locales del Instituto Nacional de Vulcanología, Sismología, Meteorológica e Hidrología (INSIVUMEH), de Guatemala.

climatológicos estacionales de una región y a su vez calibrarse para un mejor ajuste climático. Primero, se procedió a determinar para Centroamérica donde se incluye el país. Segundo, se utilizaron las condiciones del modelo por defecto sin ningún cambio, para luego realizar algunas variaciones. Finalmente, se realizó la simulación para el periodo correspondiente a los años 1998, 1999 y 2000. Se utilizaron dos parametrizaciones principales: Grell y Emmanuel, uno sobre tierra y otro sobre el océano, respectivamente.

Las comparaciones fueron descritas a través de mapas de relación BIAS de temperatura y precipitación. Estos mapas fueron realizados utilizando el programa gráfico GRADS y algoritmos proporcionados por ICTP para temperatura y precipitación, los cuales consisten en generar las diferencias por medio de una resta entre el resultado obtenido del modelo y la base de datos CRU para las variables de precipitaciones y temperatura. Los periodos estacionales fueron (DJF) correspondiente a los meses diciembre, enero y febrero, (MAM) correspondiente a marzo, abril y mayo, (JJA) correspondiente a junio, julio y agosto, y (SON) correspondientes a septiembre octubre y noviembre. A nivel nacional, se realizaron gráficas comparativas del ciclo anual promedio para precipitación entre el modelo RegCM, CRU, GPCP, TRMM y el promedio de 23 estaciones nacionales de Guatemala, para la variable de temperatura solo se comparó con los datos CRU, modelo y estaciones nacionales.

El procedimiento consistió en realizar varias simulaciones con diferentes condiciones para cada una, con el fin de evaluar la sensibilidad de modelo ante cambios en las parametrizaciones y mejorar el ajuste de las simulaciones a los datos CRU. En este marco, se describen los cinco experimentos que dieron como resultado el mejor ajuste al modelo. Para el primer experimento se modificaron las parametrizaciones por defecto del modelo. El segundo, se relaciona con el calor sensible (shr), utilizado para describir la relación entre la carga de calor sensible y la carga de calor total. Se modificó el parámetro (edt) de máxima eficiencia de precipitación sobre tierra. En el tercer experimento, se modificó la parametrización de nubes tipo cúmulos (dtauc) (Fritsch & Chappell, 1980). El cuarto experimento consideró todos los cambios realizados anteriormente y la modificación de (coeffr) coeficiente de la tasa de evaporación de lluvia. El quinto experimento utilizó todos los cambios más un ajuste del parámetro (dtauc). La condición general básica fue utilizar el esquema de precipitación Grell sobre tierra y el esquema de parametrización de precipitación Emanuel sobre el océano.

Resultados

La precipitación modelada por RegCM se ajusta muy bien al comportamiento climático de Guatemala, comparada con los datos generados por CRU. Pero con unos incrementos significativos en septiembre (Figuras 1 a 4). La temperatura modelada tiene valores bajos en comparación con la CRU. Los gráficos BIAS con CRU presenta menos diferencia en el centro y sur de Guatemala, pero no en el norte, donde hay diferencias del 50% en los periodos DJF y SON. Los periodos MAM y JJA no se ajustaron muy bien; más del 50% tenían diferencias. Se modela muy bien en el principio y en el final del año. Con respecto a la temperatura, las diferencias son más bajas en la primera parte del año.

La segunda condición, presenta menos lluvia, porque aumenta la evaporación en la parte del océano. Esto debido a que la simulación generó un aumento de temperatura a mitad de año. El resultado de la temperatura fue muy similar a la primera condición, y el porcentaje de precipitación presentó menos diferencias en los cinco primeros meses, y las diferencias del 50% en los demás.

La tercera condición, se acerca a los valores de lluvia de CRU en los primeros meses del año, pero pierde la relación a mediados de año. Incluso los mapas generados presentan menos diferencias en la lluvia. La temperatura obtenida es igual a la de los demás experimentos previos.

La cuarta condición, pretende modificar la primera condición, que tiene buena relación, aumentando solo la temperatura. Se modifica el coeficiente de energía (Fritsch & Chappell, 1980) para ver si la energía puede aumentar la temperatura, pero no demasiado la lluvia. La temperatura se ajustó bastante, pero la lluvia perdió la relación de la climatología en el mes de julio.

La quinta y última condición, fue la que presentó mejor ajuste a los datos CRU, ya que los resultados muestran un buen desempeño, aunque se puede mencionar que el modelo RegCM4 subestima la precipitación y la temperatura de CRU levemente, a nivel regional y nacional.

Finalmente, se presentan las salidas del mejor ajuste para Centroamérica en mapas BIAS, comparando precipitación y temperatura, en donde se puede apreciar los meses en que existe una mejor simulación del modelo. Los colores claros significan que el modelo se ajusta bastante bien a los datos CRU, un color oscuro achurado con líneas, subestima los valores y un color oscuro lizo sobreestima los valores de precipitación.

La escala varía desde -10 mm/día a +10 mm/día, en el caso de la tasa de precipitación (intensidad diaria de precipitación) y de -100% a +100% en el caso de porcentaje de lluvia.

A nivel regional Centroamericano, la simulación para los meses de diciembre, enero y febrero, el invierno en el hemisferio norte, presenta el mejor ajuste. Centroamérica se ajusta muy bien, gran parte de México y el sur de los Estados Unidos de Norteamérica. Se pueden notar las áreas claras que representan los mejores ajustes entre el modelo y los datos de CRU, aunque algunas excepciones como el norte de Suramérica, quedan sobrestimados en este trimestre (Figura 2).

Los meses de MAM se observa en Centroamérica una subestimación del modelo respecto a CRU, se observan en algunas regiones lo contrario, es decir sobrestimación de precipitación en la región del Atlántico de México parte norte de Suramérica y la región sur y sureste de los Estados Unidos de Norteamérica (Figura 3).

Los meses de menor ajuste del modelo respecto a CRU son los meses de junio, julio y agosto en donde, a nivel Centroamericano se queda muy por debajo de la precipitación de CRU, así mismo, se ven áreas simi-

lares en el sur de los Estados Unidos de Norteamérica y del norte de Suramérica. En este trimestre los contrastes entre valores superiores e inferiores al CRU son muy marcados, existiendo pocas regiones de buen ajuste (áreas de colores claros). Se puede mencionar que en este periodo el modelo sobreestima la sequía de medio verano, la cual se presenta en este trimestre (Figura 4).

En los meses de septiembre octubre y noviembre, es decir la estación de otoño en el hemisferio norte, se nota que el modelo sobrestima la lluvia en casi toda la parte del Pacífico de Centroamérica y se queda muy por debajo de la precipitación en las islas del Caribe y parte del norte de Suramérica (Figura 5).

En el caso de la temperatura, los mapas generados presentan un color oscuro achurado con líneas los meses en que el modelo subestima la temperatura, y en color oscuro lizo donde la sobreestima. En el caso de Centroamérica, se puede ver que predomina una subestimación del modelo respecto a CRU. Pero en el caso de Guatemala, se puede observar que la región oeste del país, el ajuste al modelo CRU es aceptable, aunque en las demás regiones predomina una subestimación de temperatura (Figuras 6 y 7).

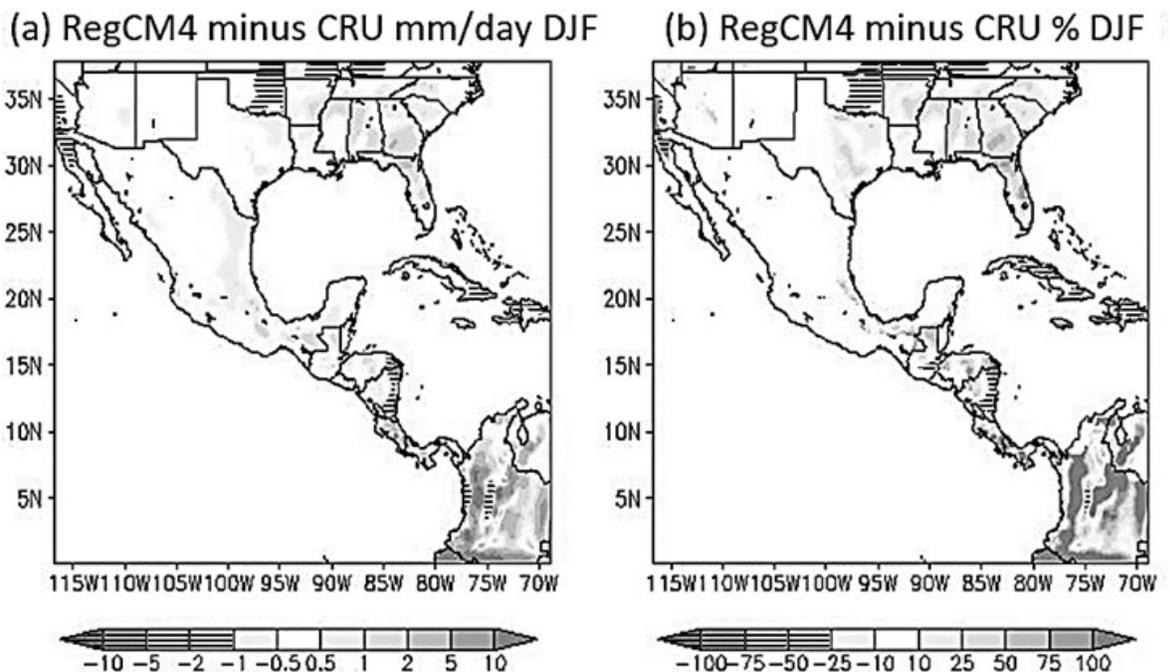


Figura 2. Diferencia de precipitación estacional entre RegCM4 y CRU de los meses de diciembre, enero y febrero (DJF); (a) tasa de precipitación mm/día; (b) % de precipitación trimestral.

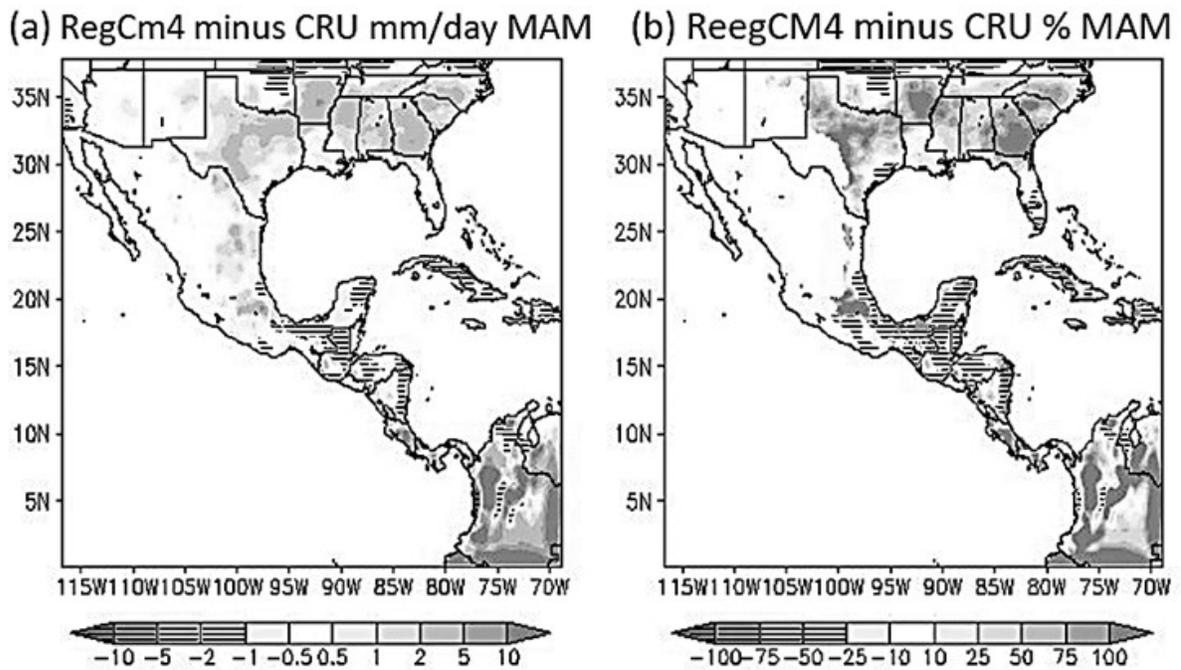


Figura 3. Diferencia de precipitación estacional entre RegCM4 y CRU de los meses de marzo, abril y mayo (MAM); (a) tasa de precipitación mm/día; (b) % de precipitación trimestral.

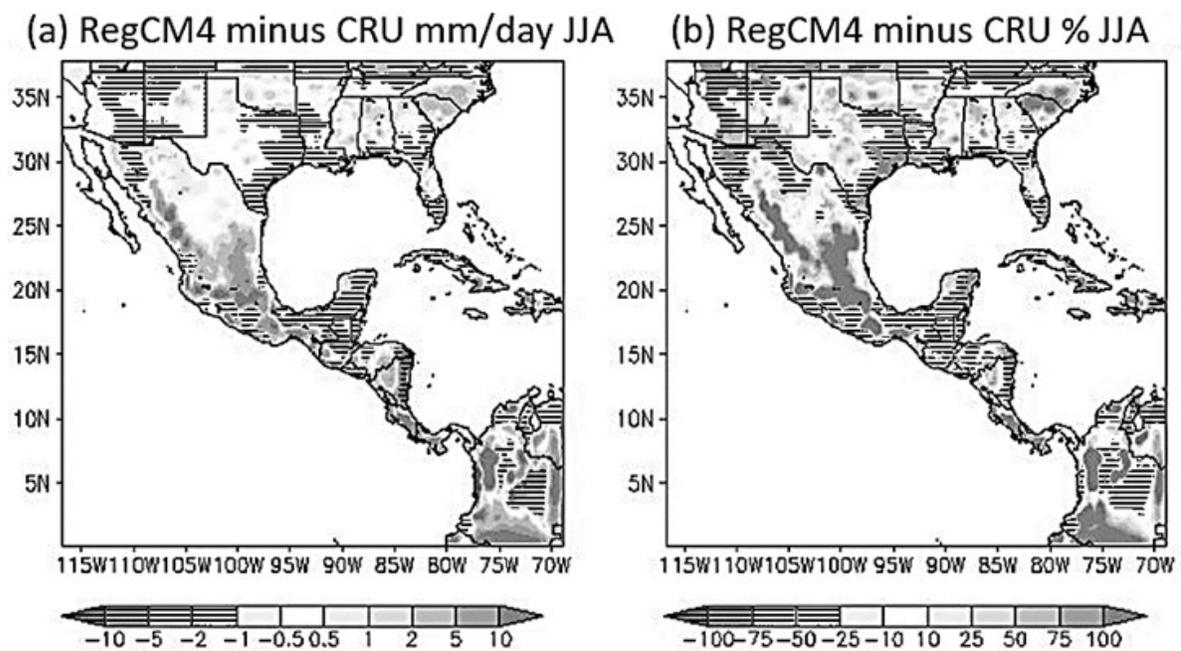


Figura 4. Diferencia de precipitación estacional entre RegCM4 y CRU de los meses de junio, julio y agosto (JJA); (a) tasa de precipitación mm/día; (b) % de precipitación trimestral.

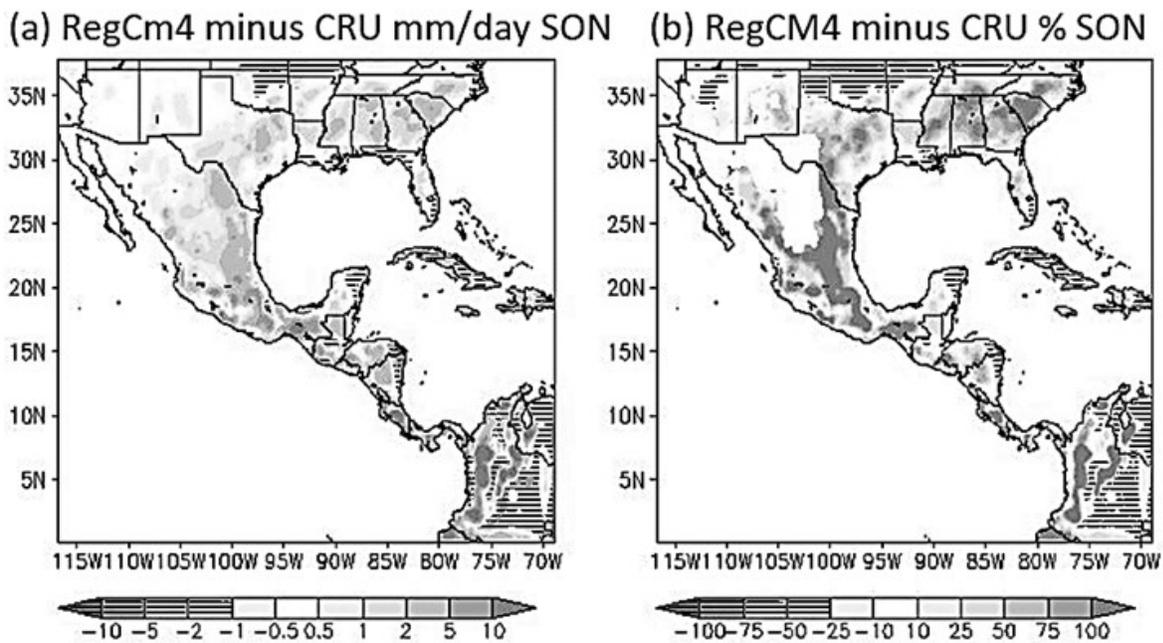


Figura 5. Diferencia de precipitación estacional entre RegCM4 y CRU de los meses de septiembre, octubre y noviembre (SON); (a) tasa de precipitación mm/día; (b) % de precipitación trimestral.

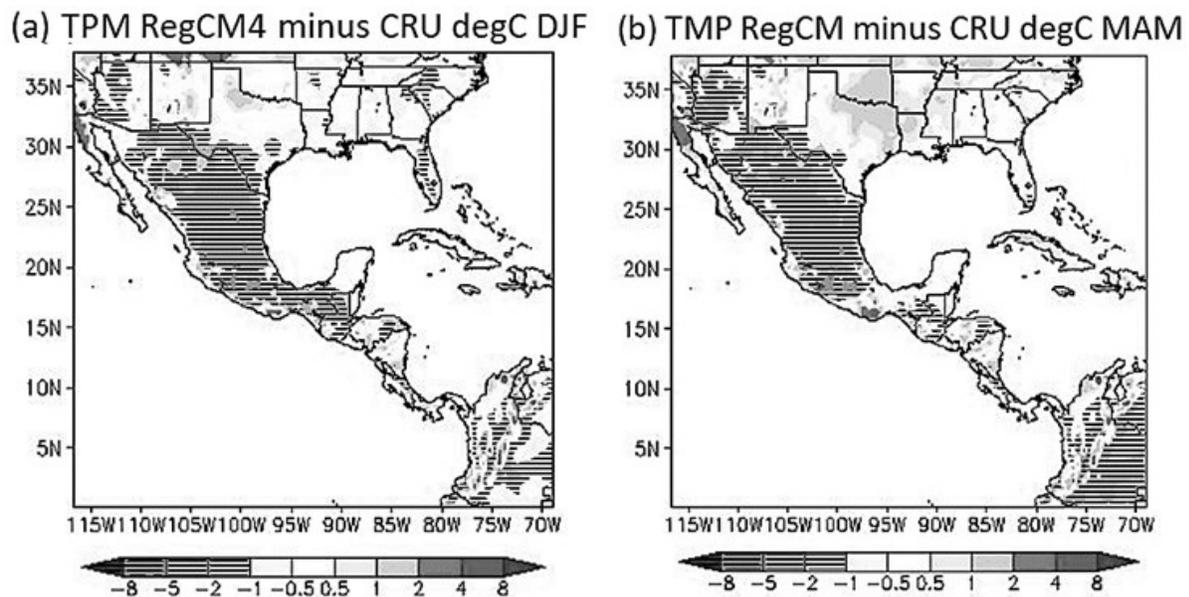


Figura 6. Diferencias estacionales de temperatura media trimestral, °C, entre el modelo RegCM4 y CRU; (a) periodo de los meses de diciembre, enero y febrero (DJF); (b) periodo de los meses de marzo, abril y mayo (MAM).

La temperatura a nivel regional, durante los meses de diciembre, enero y febrero muestra que el modelo se queda frío o pierde habilidad en gran parte de Centroamérica, principalmente en el territorio de México. Algunas áreas del sur de Estados Unidos de Norteamérica se ajustan muy bien en este periodo de invierno. En los meses de marzo, abril y mayo el modelo sigue frío en gran parte de México y Centroamérica, así como el norte de Suramérica, algunas regiones se muestran cálidas en Norte América y pocas áreas con un buen ajuste como por ejemplo los istmos de México y de Estados Unidos en el golfo de México (Figura 6).

El trimestre junio, julio y agosto se nota un contraste muy marcado entre las áreas frías y cálidas que generó el modelo, gran parte de México sigue fría, al igual que algunas áreas en Centroamérica, pero se puede notar áreas cálidas al sur de los Estados Unidos de Norteamérica. El Caribe se presenta cálido y se presentan algunas áreas de buen ajuste en Centroamérica, principalmente en Honduras y parte de Nicaragua. Finalmente, siempre a nivel regional en los meses de septiembre octubre y noviembre, el modelo es frío en la mayoría de la región, los mejores ajustes se dan en el Caribe (Figura 7).

En general el modelo es frío a nivel regional, las diferencias de temperatura varían entre 2 a 4 grados Celsius.

A nivel nacional, se compara espacialmente la precipitación en mm/día con las estaciones locales y la salida del modelo RegCM, se puede mencionar lo siguiente: la precipitación en los meses de diciembre, enero y febrero el modelo se ajusta muy bien a las tasas de precipitación nacional, la cuales tienen promedio de 1mm/día, el modelo obtuvo rangos entre 1 y 2 mm/día. Para los meses de marzo abril y mayo el modelo sobrestima la precipitación, ya que arroja valores de 24 mm/día cuando a nivel nacional las estaciones muestran tasas de 1 a 2 mm/día. En el trimestre junio, julio y agosto, cuando se presenta la sequía de medio verano en Centroamérica el modelo se ajusta muy bien, principalmente en la región sur del país, las tasas nacionales en promedio de 7 mm/día y el modelo arroja rangos entre 4 y 6 mm/día. Finalmente, en los meses de septiembre, octubre y noviembre el modelo se queda por debajo de las tasas nacionales, las cuales se encuentran entre los 7 mm/día y el modelo da un rango de entre 1 a 2 mm/día (Figuras 8, 9, 10 y 11).

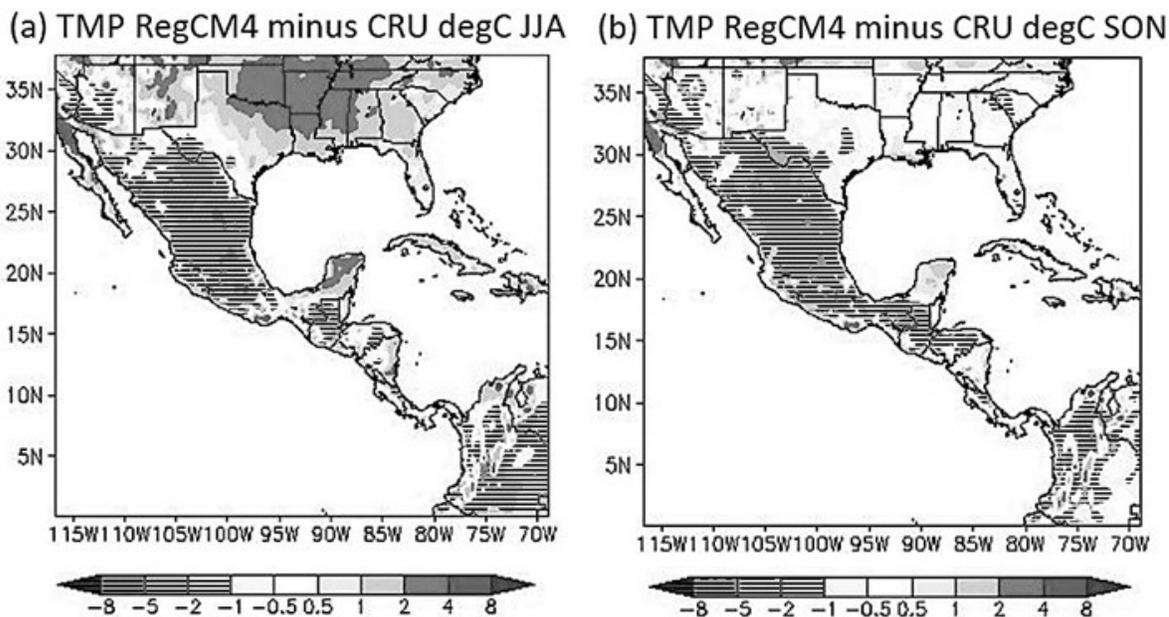


Figura 7. Diferencias estacionales de temperatura media trimestral, °C, entre el modelo RegCM4 y CRU; (a) periodo de los meses de junio, julio y agosto (JJA); (b) periodo de los meses de septiembre, octubre y noviembre (SON).

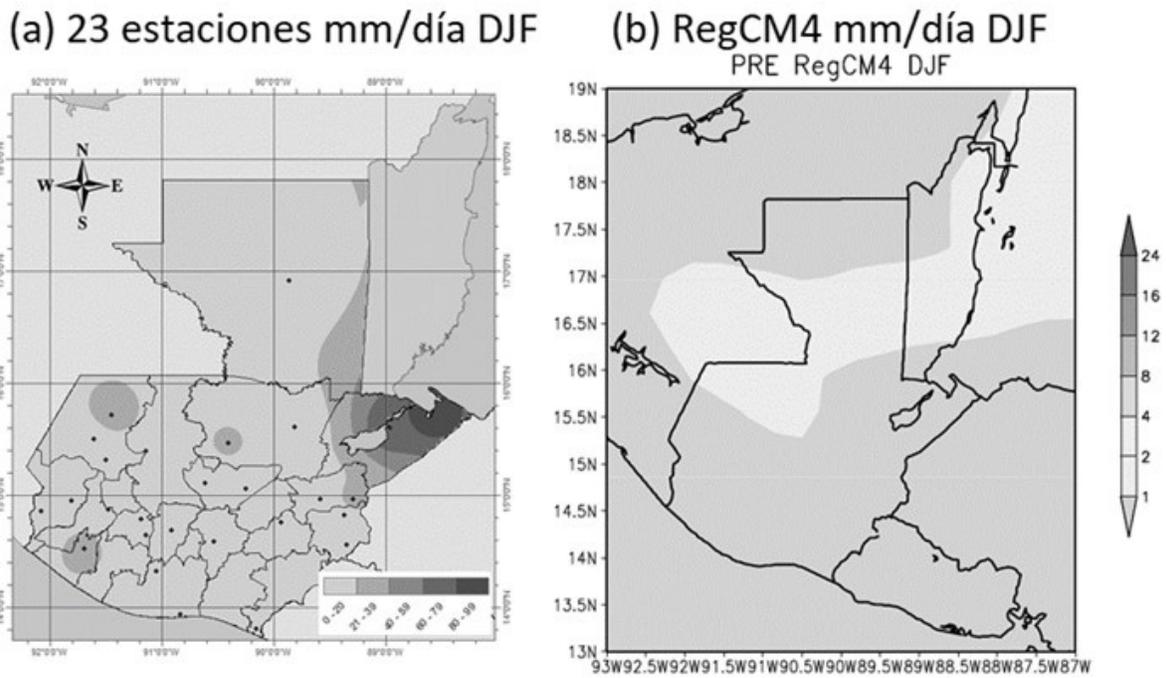


Figura 8. Comparativo de precipitación mm/día para el trimestre de diciembre, enero y febrero; (a) 23 estaciones locales de Guatemala; (b) RegCm4

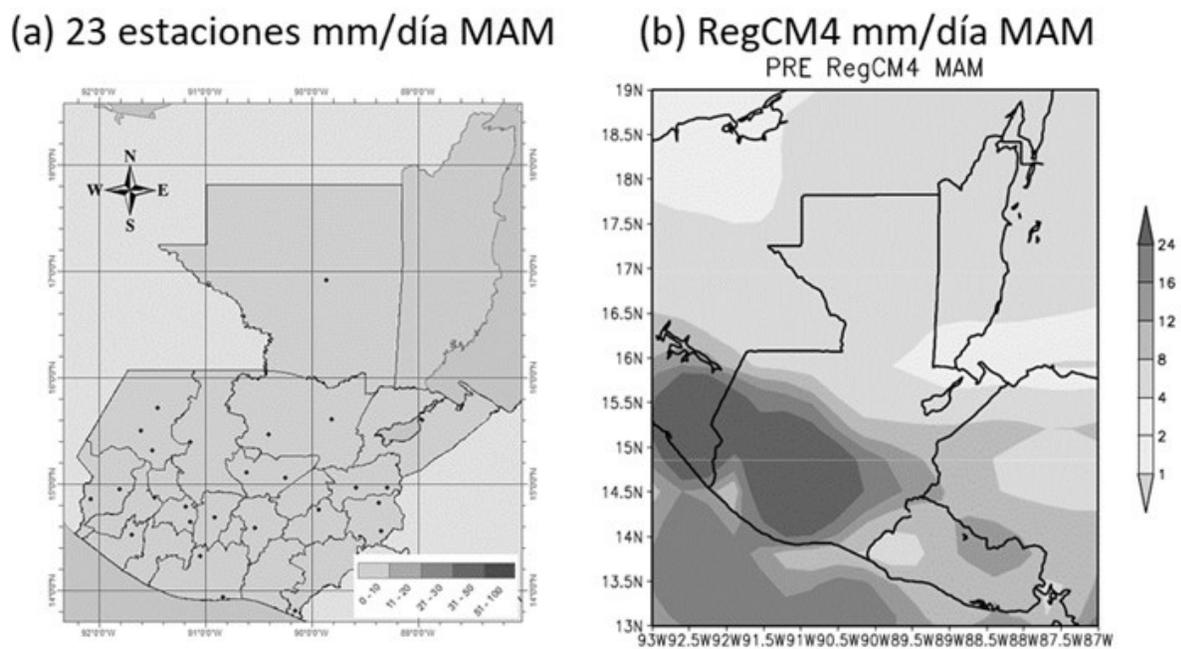
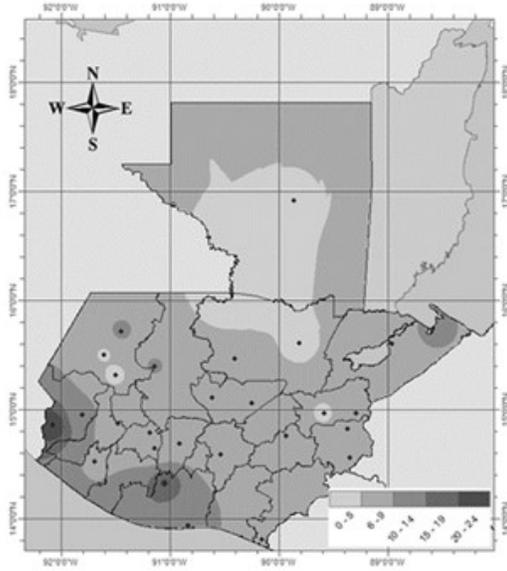


Figura 9. Comparativo de precipitación mm/día para el trimestre de marzo, abril y mayo: (a) 23 estaciones locales de Guatemala; (b) RegCM4

(a) 23 estaciones mm/día JJA



(b) RegCM4 mm/día JJA

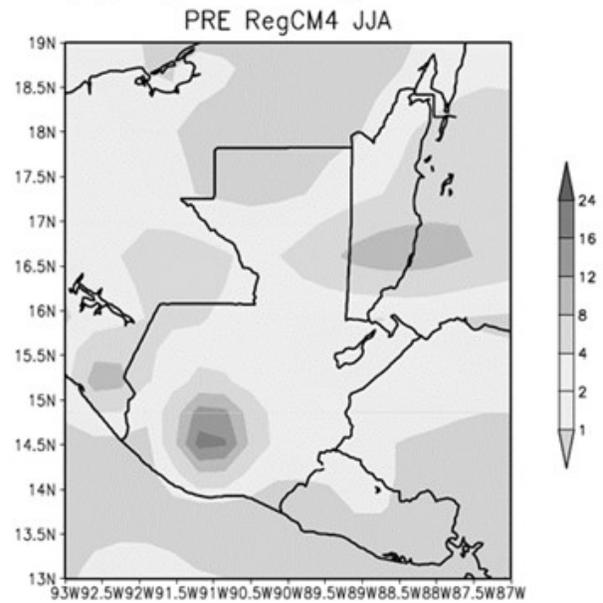
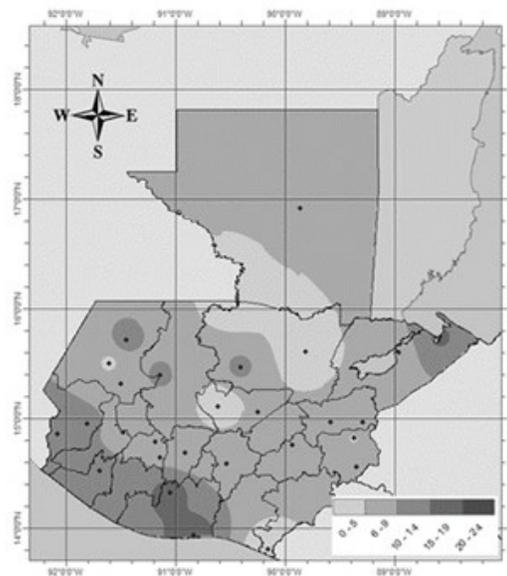


Figura 10. Comparativo de precipitación mm/día para el trimestre de junio, julio y agosto: (a) 23 estaciones locales de Guatemala; (b) RegCM4

(a) 23 estaciones mm/día SON



(b) RegCM4 mm/día SON

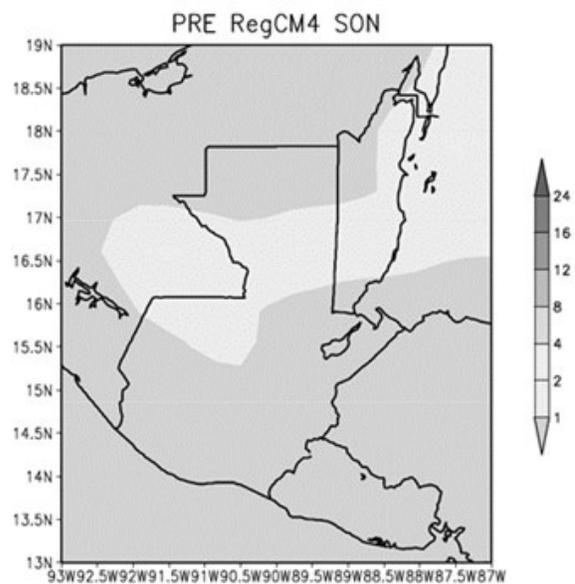


Figura 11. Comparativo de precipitación mm/día para el trimestre de septiembre, octubre y noviembre; (a) 23 estaciones locales de Guatemala; (b) RegCM4

A nivel nacional, se puede observar que la precipitación simulada sobrestima los meses de septiembre y octubre, pero se ajusta muy bien en los demás meses. Se puede mencionar también que las estaciones locales de Guatemala de los 3 años (ciclo anual promedio) es más parecida a los datos climáticos TRMM, como se muestra en las series comparadas de la Figura 12.

En el caso de la temperatura, el modelo RegCM se ajustó muy bien a la parte media del año (mayo a septiembre) en comparación con la climatología de las estaciones de Guatemala, no así en los demás meses, en los que subestima los valores (Figura 13).

Discusión

La simulación se realizó anidando un modelo regional dentro de un modelo climático global, lo cual permitió determinar la plausibilidad del sesgo húmedo, que tienen la mayoría de los modelos. Es importante

mencionar que tanto la región centroamericana, en especial Guatemala, no cuenta con suficientes datos de precipitación y temperatura en áreas importantes de producción agrícola, por lo tanto, es ahí donde radica la importancia del modelo, el cual nos permite generar datos de precipitación y temperatura para estas áreas significativas, desde el punto de vista económico y productivo.

La sobreestimación de la precipitación acumulada anual de septiembre-octubre y la subestimación de la temperatura posiblemente se deba a que los modelos no simulan de manera adecuada la zona de convergencia intertropical y otros procesos regionales (Cavazos et al., 2013).

A pesar de las diferencias obtenidas de los modelos CRU, TRMM, GPCO y RegCM, para la región de Centroamérica y Guatemala en específico; se observó que todos coinciden con el indicio a la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura, coincidiendo también con los resultados de la mayoría de las

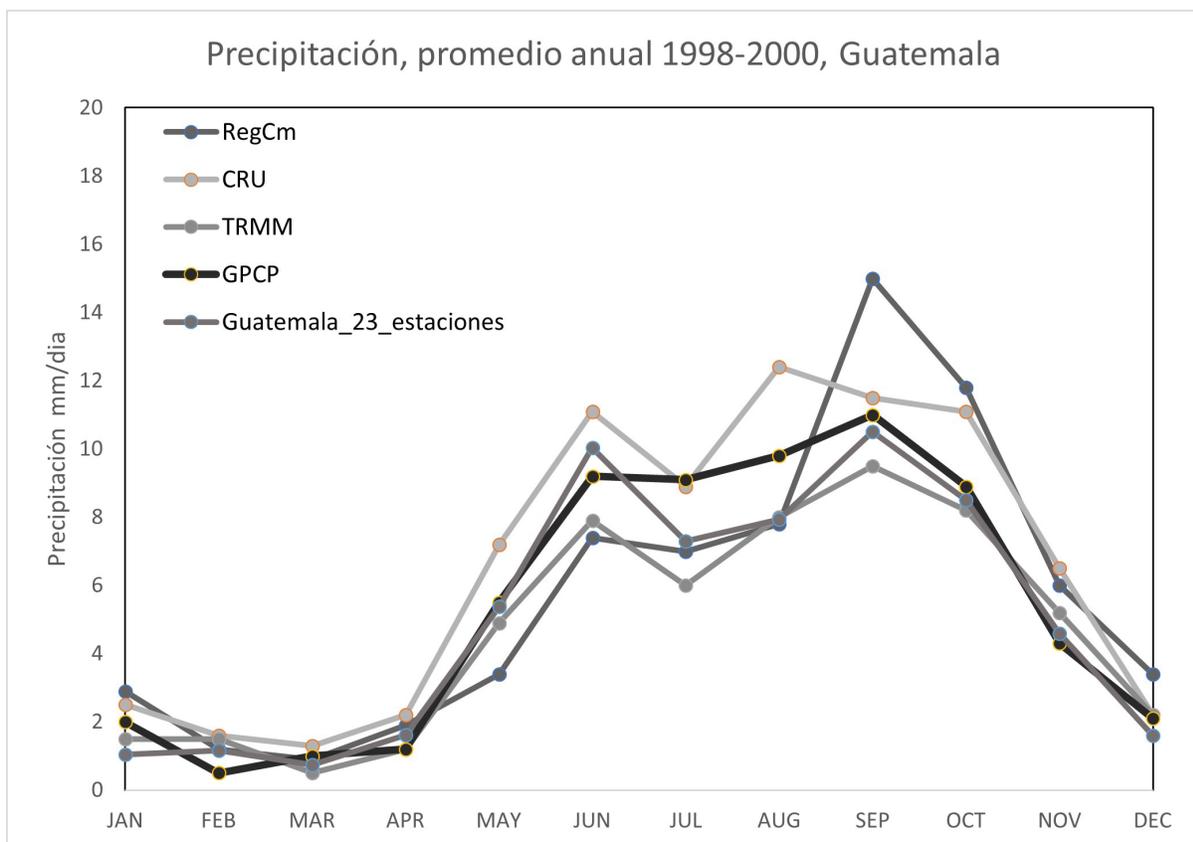


Figura 12. Comparativos de tasa de precipitación, ciclo anual de la salida del modelo RegCM4, datos CRU, TRMM, GPRCP y promedio de 23 estaciones locales en Guatemala.

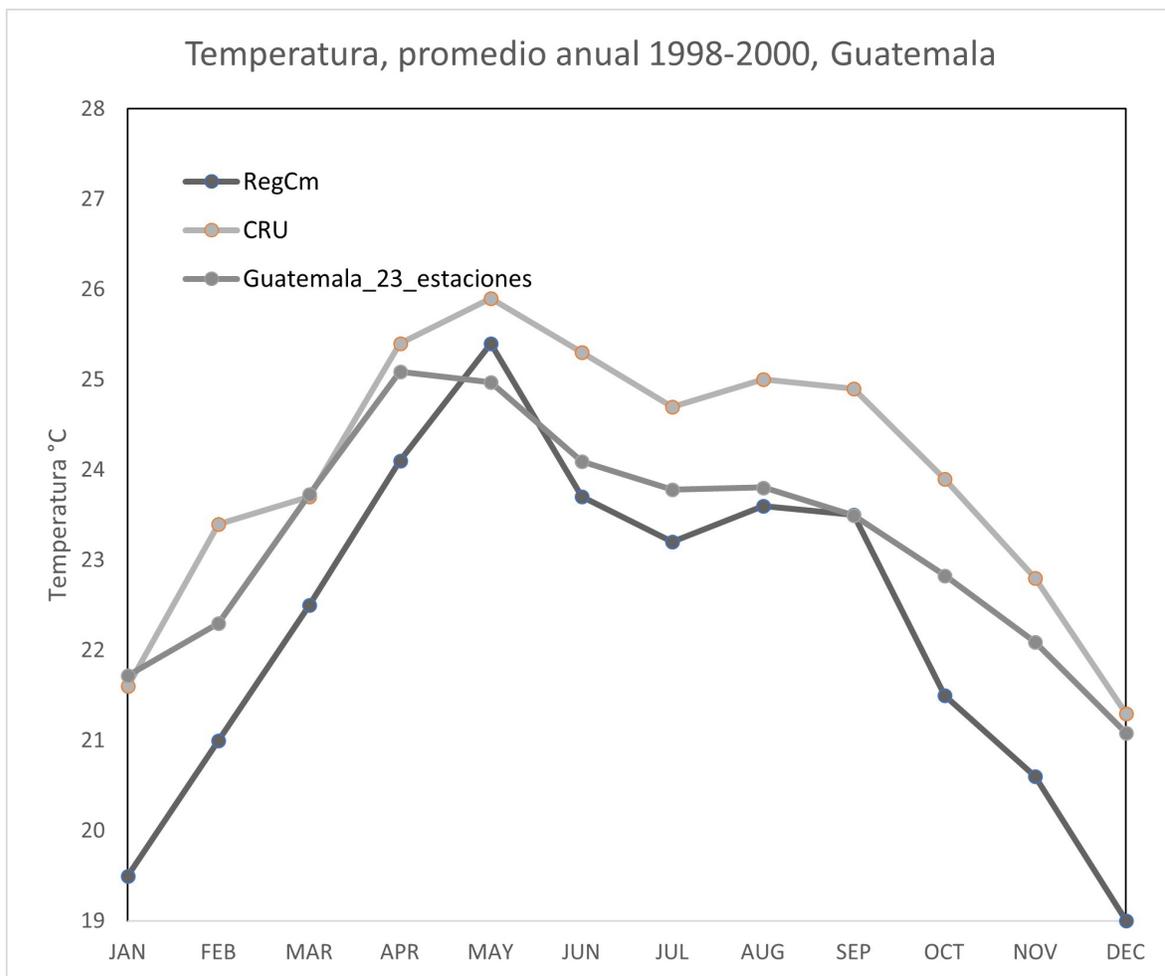


Figura 13. Comparativos de temperatura promedio, ciclo anual de la salida del modelo RegCM4, datos CRU, TRMM, GPRCP y promedio de 23 estaciones locales en Guatemala.

proyecciones realizadas para el sur de Europa según lo describe (Giorgi & Lionello, 2007).

Los datos observados no se ajustan del todo a los datos generados por CRU, por lo tanto, las comparaciones con las simulaciones fueron sesgadas a un ajuste hacia datos de reanálisis y no hacia datos locales.

Los experimentos realizados muestran la sensibilidad del modelo cuando se realizan algunos cambios en la configuración. De manera general se puede mencionar que la simulación en temperatura para los periodos estacionales en Guatemala, presenta buena habilidad en la región del Altiplano de Guatemala, con buena cobertura en áreas de montaña, a diferencia de lo detectado por las áreas planas con menos cobertura, en el estudio de sensibilidad del modelo RegCMen

Centroamérica y el Caribe (Vichot-Llano et al., 2014); pero esto puede ser explicado por los cambios en el dominio y resolución en los experimentos realizados en ese estudio.

Se estima que lo detectado en las simulaciones en el comportamiento de la lluvia, donde se encontró un buen ajuste en la parte inicial de la temporada de lluvias y no en la parte final, puede ser explicado por los cambios en la variabilidad interanual de la precipitación y la temperatura, para lo cual el modelo RegCM logra detectar esos cambios en un estudio realizado en México y América Central de las proyecciones RegCM (Fuentes-Franco et al., 2013).

Así mismo, se estima que los cambios interanuales en el comportamiento bajo efectos del fenóme-

no del Niño pudieron sesgar los resultados debido a que el 1998 representó uno de los fenómenos del Niño más importantes en los últimos años, además de presentarse un huracán a finales de la temporada de lluvia.

Con el modelo se pueden realizar mejores estudios sobre el cambio climático en Guatemala, pero se necesita previamente de estudios con la climatología general del país y compararla con la climatología simulada por el modelo RegCM, entonces se podrá proyectar diferentes escenarios en el futuro. En términos generales, el modelo puede ser ajustado a una climatología local. Gracias al comparativo con datos locales de Guatemala, se concluye que durante los meses de septiembre y octubre el modelo sobreestima la precipitación acumulada anual, requiriendo futuras simulaciones para ajustar mejor el modelo. En el caso de temperatura el modelo subestimó la temperatura en los últimos tres meses del año, pero se ve un buen ajuste para la región del oeste del país, requiriendo también futuras simulaciones para lograr un mejor ajuste, además de simular un mayor número de años.

Los modelos climáticos regionales (MCR) tienen como objetivo generar predicciones climáticas a mayor resolución que los modelos de circulación global. Estos permiten realizar investigaciones, utilizando como condiciones de frontera las salidas de modelos o sistemas de reanálisis de escala global de baja resolución, generados en los grandes centros de modelación climáticos de los países desarrollados (Giorgi & Mearns, 1991).

Al tener aumentos de temperatura y disminución de precipitación, aumentan las posibilidades de mayor aridez en la región, lo cual sucedió en el periodo en estudio en Centroamérica, por lo que, si un modelo pudo reproducir en términos generales esas variaciones, se puede intentar utilizarlo para generar pronósticos climáticos futuros que puedan advertir situaciones de menor disponibilidad de agua para la población y para los ecosistemas en general, así como modificaciones en el ciclo hidrológico y fenológico de las plantas, afectando de esta manera el sector agrícola. De acuerdo con López Moreno, y Vicente Serrano (2008), existen altas posibilidades que estas alteraciones obliguen a introducir cambios importantes en la estacionalidad, manejo agronómico e incluso en la selección de las especies en aquellos cultivos particularmente sensibles a las condiciones térmicas. También visualizan desde ya, la gestión integrada del recurso hídrico como una estrategia a considerar en el marco de la sostenibilidad del uso de este líquido vital en todas las áreas de la vida.

Finalmente, ante estas simulaciones encontradas se hace necesario remarcar la gestión del agua como algo imperativo para la región y empezar a utilizar más los pronósticos climáticos para mejorar las técnicas y tecnologías de ahorro de agua, ya que identificará áreas con problemática hídrica.

Referencias

- Amador, J. A., Ambrizzi, T., Arritt, R. W., Castro, C. L., Cavazos, T., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Giorgi, F., Guiliani, G., Lee, H., Méndez-Pérez, M., & Rivera, E. R. (2018). Putting into action the REGCM4.6 regional climate model for the study of climate change, variability and modeling over Central America and Mexico. *Atmosfera*, 31(2), 185-188.
- Baker, N. C., & Huang, H.-P. (2014). A comparative study of precipitation and evaporation between CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles in semiarid regions. *Journal of Climate*, 27(10), 3731-3749. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00398.1>
- Cavazos, T., Salinas, J., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto-González, R., Conde Álvarez, A. C., Quintanar Isaiás, A., Santana Sepúlveda, J. S., Romero Centeno, R., Maya Magaña, M. E., Rosario de La Cruz, Ma. del R., Ayala Enríquez, Carrillo Tlazazanatza, H., Santiesteban, O., & Bravo, M. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*. México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F., & Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico). *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396-1420. <https://doi.org/10.1002/joc.6276>
- Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., & Kennedy, P. (1993) *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. Technical note*. [NCAR (National Center for Atmospheric

- Research)]. Recuperado de <https://www.osti.gov/biblio/5733868>.
- Diro, G. T., Rauscher, S. A., Giorgi, F., & Tompkins, A. M. (2012). Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over Central America to land and sea surface schemes in RegCM4. *Climate Research*, 52(1), 31-48. <https://doi.org/10.3354/cr01049>.
- Emanuel, K. A. (1991). A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(21), 2313-2329. [https://doi.org/10.1175/15200469\(1991\)048<2313:ASFRCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200469(1991)048<2313:ASFRCC>2.0.CO;2)
- Fritsch, J., & Chappell, C. (1980). Numerical Prediction of Convectively Driven Mesoscale Pressure Systems. Part I: Convective Parameterization. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 37(USA), 1722-1733.
- Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Tefera Diro, G., Giorgi, F., Pavia, E. G., & Graef, F. (2013). Changes in inter-annual variability of precipitation and temperature over Mexico and Central America from RegCM projections. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 15. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2258-6>.
- 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. *Climate Dynamics*, 42(3-4), 629-647. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1686-z>.
- García-Díez, M., Stegehuis, A., Magariño, M. E., Vautard, R., & Fernández, J. (2013). *Using multi-physics ensembles to explore sources of uncertainty in the climate system. 1*, 22158. https://www.meteo.unican.es/files/posters/2013_Garcia-Diez_CORDEX_Brussels.pdf
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2007). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Giorgi, F. (1990). Simulation of Regional Climate Using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model. *Journal of Climate*, 3(9), 941-963. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0941:sorcua>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0941:sorcua>2.0.co;2).
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Reviews of Geophysics*, 29(2), 191-216. <https://doi.org/10.1029/90RG02636>
- Giorgi, F., Bates, G. T., & Nieman, S. J. (1993). The multiyear surface climatology of a regional atmospheric model over the western United States. *Journal of Climate*, 6(1), 75-95. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0075:TMSCOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0075:TMSCOA>2.0.CO;2)
- Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121(3), 764-787. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121%3C0764:PEOAUB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121%3C0764:PEOAUB%3E2.0.CO;2)
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: Regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics*, 37(3), 605-629. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>.
- López Moreno, J. I., & Vicente Serrano, S. M. (2008). Predicciones de cambio climático en La Rioja a partir de modelos regionales: Estimaciones para finales del siglo XXI. *Zubía Monográfico*, 20, 187-200.
- Reboita, M. S., Dias, C. G., Dutra, L. M. M., da Rocha R. P., & Llopart, M. (2018). Previsão climática sazonal para o Brasil obtida através de modelos climáticos globais e regional. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(2), 207-224. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332001>.
- Van den Hurk, B. J. J. M., & van Meijgaard, E. (2010). Diagnosing land-atmosphere interaction from a regional climate model simulation over West Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 467-481. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1173.1>
- 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. *Revista de Climatología*, 14, 45-62.
- Wang, X., Yang, M., & Pang, G. (2015). Influences of two land-surface schemes on regcm4 precipitation

- simulations over the tibetan plateau. *Advances in Meteorology*. <https://doi.org/10.1155/2015/106891>
- Widmann, M., Bretherton, C. S., & Salathé, E. P. (2003). Statistical precipitation downscaling over the northwestern united states using numerically simulated precipitation as a predictor. *Journal of Climate*, *16*(5), 799-816. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0799:SPDOTN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0799:SPDOTN>2.0.CO;2)
- Yang, M., Zuo, R., Wang, L., & Chen, X. (2018). Simulation of Land Surface Climate over China with RegCM4.5: Verification and Analysis. *Advances in Meteorology*. <https://doi.org/10.1155/2018/7960908>