

Proyección de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín, Cuba a partir del modelo climático HadGEM-ES



<https://cu-id.com/2377/v30n3e01>

Future projection of temperature and rainfall regimen in Holguín's province, Cuba using climate model HadGEM-ES

 Axel Hidalgo Mayo^{1*},  Graciela Pérez Rivas¹,  Iliana Cruz Torres²

¹Universidad de Holguín y Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología, Cuba

²Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología, Cuba.

RESUMEN: Se presenta la proyección climática de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín para el mediano plazo (2031-2060) y el largo plazo (2061-2090), respecto al período base 1971-2000. Se utilizaron las salidas del modelo climático global HadGEM-ES para los escenarios climáticos RCP (trayectorias de concentración representativas) RCP4,5 y RCP8,5. Al mismo tiempo, se emplearon los datos climáticos de las estaciones meteorológicas de Cabo Lucrecia, La Jiquima y Pinares de Mayarí en el período 1971-2005, las cuales son representativas de las zonas costera, interior y montañosa de la provincia respectivamente. Se aplicó la corrección BIAS (error medio) a partir del método delta y la interpolación por los métodos del inverso de la distancia y bilineal; en tanto, se contrastaron los valores del modelo HadGEM-ES con las observaciones de las estaciones meteorológicas utilizando como métricas de comparación los errores BIAS, RSME (raíz del error cuadrático medio, por sus siglas en inglés) y el Diagrama de Taylor. La corrección BIAS a partir del método delta permitió reducir los sesgos entre los valores anuales proyectados y los observados en el orden de 10^{-3} para la temperatura y 0,1 mm para la precipitación. Los resultados muestran que el clima de la provincia Holguín, referido a los regímenes de temperatura y precipitación, estaría transitando a ser más cálido y seco a la vez, con una posible redistribución de la precipitación dentro del año.

Palabras claves: proyección climática, regímenes de temperatura y precipitación, corrección BIAS.

ABSTRACT: The climate projection of the temperature and precipitation regimes in the Holguín province for the medium term (2031-2060) and the long term (2061-2090), with respect to the base period 1971-2000 is presented. The outputs of the HadGEM-ES global climate model for the RCP (representative concentration trajectories) RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios were used. At the same time, climatic data from the meteorological stations of Cabo Lucrecia, La Jiquima and Pinares de Mayarí in the period 1971-2005, which are representative of the coastal, inland and mountainous areas of the province respectively were used. The BIAS correction (mean error) was applied using the delta method and interpolation using the inverse distance and bilinear methods; Meanwhile, the values of the HadGEM-ES model were contrasted with observations from meteorological stations using BIAS, RSME (root mean square error) and Taylor Diagram errors as comparison metrics. The BIAS correction based on the delta method allowed us to reduce the biases between the projected and observed annual values in the order of 10^{-3} for temperature and 0.1 mm for precipitation. The results show that the climate of the Holguín province, referring to the temperature and precipitation regimes, would be becoming warmer and drier at the same time, with a possible redistribution of precipitation within the year.

Key words: climatic projection, temperature and rainfall regimen, BIAS correction.

*Autor para correspondencia: Axel Hidalgo Mayo. E-mail: axel.hidalgom@gmail.com

Recibido: 12/05/2024

Aceptado: 05/06/2024

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Axel Hidalgo Mayo: **Conceptualizó la investigación. Trabajó en el procesamiento de los datos, así como en su análisis e interpretación. Se encargó de la redacción del manuscrito y la edición final del mismo.** Graciela Pérez Rivas: **Participó en el análisis de los resultados y en la revisión del manuscrito.** Iliana Cruz Torres: **Participó en el análisis de los resultados y en la revisión del manuscrito.**

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

INTRODUCCIÓN

La adaptación al cambio climático es uno de los mayores retos de esta época y sus efectos adversos menoscaban la capacidad de todos los países para alcanzar el desarrollo sostenible. Su carácter global exige la máxima cooperación internacional para acelerar la reducción de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) y abordar la adaptación de sus efectos adversos. En este sentido, la Organización de Naciones Unidas (ONU) aprobó en 2015 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la cual en su objetivo 13 exhorta a los gobiernos a “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (ONU, 2015).

El estudio del clima futuro implica el análisis de la variabilidad climática y el uso de las proyecciones de los Modelos Climáticos Globales (GCM, por sus siglas en inglés), los cuales tienen en cuenta los cambios en el sistema climático global ante distintos escenarios de concentraciones de GEI en la atmósfera. Por otra parte, el clima futuro para una región pudiera estimarse extrapolando tendencias obtenidas a partir de datos históricos; sin embargo, este enfoque no es apropiado para análisis a largo plazo, ya que el incremento en las concentraciones de GEI en la atmósfera puede conducir a cambios que no son capturados en las tendencias históricas.

En la región del Caribe, además de las investigaciones lideradas por científicos cubanos (Centella *et al.*, 1999, 2015; Planos *et al.*, 2013; Planos y Gutiérrez, 2020; Vichot *et al.*, 2021; Martínez *et al.*, 2022), varios trabajos científicos se han centrado en las proyecciones climáticas de los regímenes de temperatura y precipitación. En (Campbell *et al.*, 2011; Karmalkar *et al.*, 2011; Taylor *et al.*, 2013; Cavazos *et al.*, 2020) se empleó el modelo PRECIS; en tanto, (Karmalkar *et al.*, 2013) realizaron una revisión sobre las proyecciones climáticas en las islas del Caribe. Por su parte, (Biasutti *et al.*, 2012) emplearon los escenarios climáticos SRES (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones, por sus siglas en inglés) A2, A1B y B1; mientras (Liu *et al.*, 2015) analizaron los impactos potenciales del cambio climático en los mares interamericanos utilizando los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 a partir de 18 GCM y una serie desde 1900 hasta 2100. En los últimos años, nuevas investigaciones han profundizado en el posible comportamiento futuro de la temperatura y la precipitación en el mar Caribe y el golfo de México, destacándose los trabajos de (McLean *et al.*, 2015; Stennett *et al.*, 2017; Mohan *et al.*, 2020; Ávila *et al.*, 2023).

Además, de las investigaciones antes mencionadas, Abel Centella y su equipo de trabajo, en el marco de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático (Planos *et al.*, 2013) analizaron

el posible comportamiento futuro de tres índices extremos referidos a la precipitación sobre Cuba a partir del modelo regional PRECIS alimentado por los GCM ECHAM4 y HadAM3P, empleando los escenarios climáticos SRES A2 y B2. Por otro lado, las proyecciones climáticas en Cuba han estado, fundamentalmente, referidas a los regímenes de temperatura y precipitación. Estas investigaciones están contenidas en la Segunda y Tercera Comunicación de Cambio Climático de la República de Cuba (Planos *et al.*, 2013; Planos y Gutiérrez, 2020), así como en otros trabajos de (Vichot *et al.*, 2021; Martínez *et al.*, 2022).

En (Planos *et al.*, 2013) se utilizaron los escenarios climáticos SRES (A2 y B2), empleados en el Cuatro Informe del IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2007), utilizando el período histórico u observado 1961-1990 y de futuro 2071-2100 para el modelo HadAM3P, y 1961-2100 para ECHAM4 (que incluye el período observado y el proyectado en forma de serie continua). Por su parte, en (Planos y Gutiérrez, 2020) se utilizaron los GCM QUMP y ECHAM5 para el escenario SRES A1B (equilibrio entre las distintas fuentes de energías) y el HadGEM2-ES para los escenarios climáticos RCP2,6; RCP4,5 y RCP8,5 del Quinto Informe del IPCC (IPCC, 2013) con una reducción de escala hasta 25 km por intermedio del modelo regional PRECIS.

Aún con la variedad de investigaciones realizadas en Cuba relacionadas con la proyección climática, las cuales datan desde finales del siglo XX (Centella *et al.*, 1999), en la literatura disponible y/o consultada, no se encontraron trabajos donde se utilicen los valores reales u observados registrados en las estaciones meteorológicas cubanas para la corrección del sesgo en la proyección a nivel local. No obstante, en (Planos y Gutiérrez, 2020) se realizó una modelación del clima futuro para diez empresas frutícolas del país empleando el modelo HadGEM2-ES.

Lo anterior conduce a que el objetivo de la presente investigación, se centre en la proyección a nivel local de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín como contribución a las políticas actuales del Estado Cubano, aprobadas para la adaptación al cambio climático (CITMA, 2017; Asamblea Nacional del Poder Popular, 2019, 2023; Ministerio de Economía y Planificación, 2019; PCC, 2021; Consejo de Ministros, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La provincia de Holguín está conformada por 14 municipios: Gibara (1), Rafael Freyre (2), Banés (3), Antilla (4), Báguanos (5), Holguín (6), Calixto García (7), Cacocum (8), Urbano Noris (9), Cueto (10), Mayarí (11), Frank País (12), Sagua de

Tánamo (13) y Moa (14). Dentro de las principales características físico - geográficas del territorio destaca, que esta posee cuatro zonas de relieve fundamentales: Llanura del Cauto, Altiplanicie de Nipe, donde se encuentra la meseta de Pinares de Mayarí, el Grupo de Maniabón, con el Cerro Galano y el Macizo Sagua - Baracoa, donde aparecen las mayores alturas de la provincia: Pico Cristal con 1 231 m y la Loma La Mensura con 995 m sobre el nivel medio del mar (ONEI, 2023).

El clima del territorio, de acuerdo a (Pérez e Hidalgo, 2016), está definido por tres zonas climáticas bien definidas: costera (costa norte de los municipios de Gibara, Rafael Freyre, Banes, Mayarí, Sagua de Tánamo, Moa, así como la totalidad de Antilla y Frank País), montañosa (área de los municipios ubicados en el macizo Nipe-Sagua-Baracoa) e interior (resto de la provincia).

En esta investigación se emplearon los datos climáticos mensuales de la temperatura media del aire y el total de precipitación durante el período 1971-2005, de las estaciones meteorológicas de La Jiquima (78362), Cabo Lucrecia (78365) y Pinares de Mayarí (78371) (ver figura 1), las cuales son representativas de las zonas interior, costera y montañosa de la provincia Holguín respectivamente (Pérez e Hidalgo, 2016).

Proyección climática y métricas de validación

Los GCM han sido la principal fuente de información para la construcción de escenarios climáticos, proporcionando de esta manera la base para las evaluaciones de los impactos del cambio climático en diferentes escalas. Sin embargo, los estudios locales rara vez utilizan directamente los resultados de GCM, debido a su baja resolución espacial.

En el presente estudio se emplearon las salidas del GCM HadGEM2-ES, a partir de una reducción de escala dinámica, empleando el modelo regional

PRECIS para una resolución espacial de $0,22^\circ \times 0,22^\circ$, y una temporal mensual de la temperatura media del aire y los totales de precipitación, para el período histórico 1950-2005, así como para las proyecciones climáticas de los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 en el período 2006-2099. En la proyección climática se empleó como período base la norma climática 1971-2000, en tanto los períodos futuros utilizados fueron 2031-2060 (mediano plazo) y 2061-2090 (largo plazo).

Para eliminar el sesgo entre las salidas del HadGEM-ES y las mediciones reales de las estaciones meteorológicas se utilizó la corrección BIAS. El enfoque de corrección BIAS, asume que los errores se propagan hasta el final del período, y se basan en el ajuste de los valores modelados respecto a valores observados (Lee y Singh, 2019; Kotamarthi et al., 2021). Este tipo de técnica se empleada para corregir las proyecciones climáticas del modelo respecto a un período de referencia (clima presente) dado por las observaciones de las estaciones meteorológicas. Para la corrección BIAS de los regímenes de temperatura y precipitación, (Maraun y Widmann, 2018) proponen emplear las siguientes expresiones a partir del método delta:

$$T_{BC} = T_{GCM(i)} + (\bar{T}_{OBS} - \bar{T}_{REF}) \quad (1)$$

$$T_{BC} = T_{GCM(i)} \frac{\bar{T}_{OBS}}{\bar{T}_{REF}} \quad (2)$$

Donde:

T_{BC} : Valor futuro corregido a partir de la corrección BIAS.

$T_{GCM(i)}$: Valor de la variable proyectada y observada para el período ($i = 1, 2, \dots, n$), donde n es la cantidad de períodos de tiempo diferentes del período que se proyecta el GCM. Para series mensuales 12 y 30 para las anuales.

$\bar{T}_{OBS}, \bar{T}_{REF}$: Valores medios observados (OBS) y simulados (REF) por ese orden en el período de referencia (1971-2000)

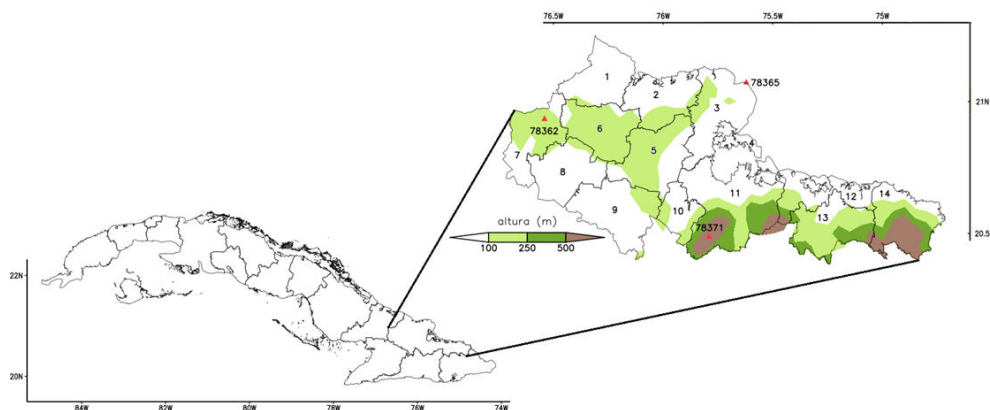


Figura 1. Ubicación geográfica y representación físico-político de la provincia de Holguín, así como la localización de las estaciones meteorológicas empleadas en esta investigación.

Elaborado con información topográfica de Atlas GEBCO en su versión 2014 disponible en el sitio web www.gebco.net.

Las ecuaciones 1 y 2 se aplican para la corrección BIAS de los valores medios de temperatura y precipitación para escalas temporales mensuales y/o anuales (Maraun y Widmann, 2018) del período histórico.

Para el análisis del cambio entre el período base y la proyección climática, referida a la diferencia entre las medias (se analizó si existe un cambio estadísticamente significativo entre los valores de referencia y los proyectados) se empleó el t.test (prueba t en RStudio) cuando existe normalidad en ambas poblaciones y misma varianza. En los casos que no se cumplieron los supuestos referidos a la normalidad y homocedasticidad, se utilizó la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon a partir de la prueba wilcox.test, igualmente de RStudio según las recomendaciones que aparecen en (Wilks, 2019).

Para la validación de resultados se emplearon el error medio o BIAS y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RSME, por sus siglas en inglés). La formulación matemática de estas dos métricas se presentan a continuación:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (3)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

Donde: y_i y x_i son los valores de serie temporal de los GCM y de las estaciones meteorológicas por ese orden.

Además, para la comparación entre el HadGEM2-ES y el reanálisis ERA5 se utilizó el Diagrama de Taylor, el cual proporciona de manera gráfica la similitud entre lo simulado y lo observado. En este tipo de diagrama se utilizan como métricas de comparación el coeficiente de correlación de Pearson (r), la amplitud de sus variaciones (representadas por la desviación estándar (σ)) y la raíz de la diferencia cuadrática (RSM), esta última relacionada con las dos anteriores por intermedio de la “Ley de los Cosenos”. Estos diagramas son especialmente útiles para evaluar múltiples aspectos de modelos complejos en medir la habilidad relativa de muchos modelos respecto a un patrón de referencia (Taylor, 2001).

El proceso de interpolación para llevar los datos del GCM, hasta la ubicación geográfica de las tres estaciones meteorológicas utilizadas, se realizó por los métodos del inverso de la distancia (IDW) y bilineal (BIL) de acuerdo a las recomendaciones de (Torma *et al.*, 2015; National Center for Atmospheric Research Staff, 2022), los cuales se encuentran implementados en el CDO (operador de datos climáticos, por sus siglas en inglés) (Schulzweida, 2020).

El proceso de cálculo y cartografía en la investigación se realizó mediante la combinación de los softwares GrADS (COLA, 2018), CDO (Schulzweida, 2020) y R a través de su interfaz gráfica RStudio (R Core Team, 2023), todos sobre el sistema operativo Linux. En el caso de R, además de la ayuda que ofrecen los paquetes utilizados, se consultaron los manuales para el procesamiento de datos (Horton y Kleinman, 2015; Wickham y Grolemund, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de errores y corrección BIAS

En la tabla 1 se muestran las métricas empleadas, teniendo en cuenta los dos métodos de interpolación utilizados para la comparación entre los valores modelados por el GCM en las tres estaciones meteorológicas seleccionadas en el estudio durante el período 1971-2000.

El HadGEM-ES sobreestima la temperatura media del aire en la zona costera, aunque también en ella están los indicadores más favorables, con valores de RSME por debajo de la unidad. En la región interior y la montaña el modelo subestima los valores de la temperatura, RSME toma valores entre 1,13-1,14 y 3,47-3,56 respectivamente. La zona montañosa muestra los valores más desfavorables debido a la disminución de la temperatura con la altura, situación que el modelo no logra reflejar debido a su baja resolución ($0,22^\circ \times 0,22^\circ$). De acuerdo a (National Center for Atmospheric Research Staff, 2022), el método BIL es el que mejor representa esta variable, aunque en el estudio no se aprecian diferencias notables entre ambos métodos de interpolación.

Tabla 1. Resumen de las métricas empleadas en el análisis de errores del GCM respecto a las zonas climáticas de la provincia Holguín: interior (INT), costera (COS) y montañosa (MON).

Zona climática	Método de Interpolación	Sin corrección BIAS				Con corrección BIAS			
		Temperatura		Precipitación		Temperatura		Precipitación	
		BIAS	RSME	BIAS	RSME	BIAS	RSME	BIAS	RSME
INT	BIL	0,544	1,14	-29,1	78,4	-0,001	0,89	0,001	70,7
	IDW	0,537	1,13	-28,9	78,9	-0,001	0,89	-0,001	70,7
COS	BIL	-0,632	0,95	-7,77	76,6	0,002	0,60	0,142	72,7
	IDW	-0,623	0,95	-6,88	76,8	0,001	0,59	0,144	72,5
MON	BIL	3,340	3,47	-64,3	106,2	0,001	0,84	0,002	90,0
	IDW	3,430	3,56	-67,2	108,2	-0,002	0,84	-0,002	90,5

La precipitación en la zona costera presentó los menores errores del BIAS y RSME, mientras que en la zona interior y montañosa, estos dos estadígrafos presentan valores muy altos del error BIAS y de RSME, fundamentalmente para esta última, la cual muestra las variaciones más notables en la provincia (Pérez e Hidalgo, 2016, 2023). Para esta variable, (Torma *et al.*, 2015), demostraron que los mejores resultados se obtienen por el método del inverso de la distancia, aunque en (National Center for Atmospheric Research Staff, 2022) se menciona que el método bilineal puede mostrar también buenos resultados.

Además, se analizó el comportamiento de la temperatura y precipitación, por medio de diagramas de Taylor, ante los dos métodos de interpolación utilizados (figura 2). En los diagramas, el color rojo corresponde a la zona interior; el violeta, a la costera y el azul, a la montañosa; mientras el cuadrado y el triángulo representan los métodos de interpolación bilineal e inverso de la distancia respectivamente. En el mencionado diagrama el ángulo azimutal se corresponde con el coeficiente de correlación, los ejes "x" y "y" muestran la desviación estándar normalizada (cociente entre los valores modelados y de referencia) y los círculos verdes, la raíz de la diferencia cuadrática centrada (CRSM, definido como el cociente entre RSM y la desviación estándar de referencia para mantener la escala del gráfico).

Los diagramas de Taylor muestran similitud con los resultados presentados en la tabla 1. Para la temperatura, en las tres zonas, el coeficiente de correlación de Pearson es superior a 0,8; así como una desviación estándar y CRSM (raíz de la diferencia cuadrática centrada) inferiores a 0,6. Para las tres zonas climáticas, los dos métodos de interpolación presentan una alta coincidencia, tanto para la temperatura como para la precipitación. Para la precipitación, aunque la variabilidad es inferior a la referencia, en todos los casos la correlación fue baja, con valores en el entorno de 0,50; 0,40 y 0,18 para la zona montañosa, interior y costera respectivamente; mientras tanto, los CRSM fueron altos, con valores de 0,7-0,8; 0,9-1,0 y 1,1-1,2 para las zonas climáticas tomados en ese mismo orden.

Los análisis realizados, tanto para las métricas del error BIAS y RSME, como para los resultados gráficos de ambos Diagramas de Taylor, imponen la corrección BIAS para eliminar el sesgo entre las estimaciones de GCM y los valores reales medidos en las estaciones meteorológicas. Las correcciones BIAS, realizadas a partir de las ecuaciones 1 y 2, permitieron reducir los errores BIAS en el orden de 10^{-3} para la temperatura y en menos de 0,1 mm para la precipitación; en tanto, el RSME se redujo entre 0,6-0,9 para el régimen térmico y entre un 5-15% para las precipitaciones.

En el caso de los Diagramas de Taylor la corrección BIAS, también, permitió aumentar la correlación y disminuir los errores, pero no mejorar la variabilidad; no obstante, se cumplió con el objetivo de la corrección BIAS que no es más que disminuir las diferencias entre los períodos normales del GCM y las observaciones. En este sentido, después de aplicar la corrección BIAS, las diferencias en las medias anuales para el período 1971-2000 respecto a la temperatura se eliminaron, y en la precipitación fueron inferiores a 6 mm.

De manera general, al aplicar los métodos de interpolación BIL e IDW, los resultados son muy similares y están a tono con las recomendaciones y resultados obtenidos por (Torma *et al.*, 2015; National Center for Atmospheric Research Staff, 2022), por lo que indistintamente pudieran aplicarse uno u otro, ya que el tiempo de cálculo es similar.

Proyección de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín

En la tabla 2 se muestran los promedios históricos, para el período base 1971-2000, de los regímenes de la temperatura del aire y la precipitación anual, así como para los períodos estacionales lluvioso (PLL) y poco lluvioso (PPLL). Para la zona interior en el PLL las precipitaciones representan 76,9% del total anual, en la costera el 52,5% y en la montañosa el 71,8%.

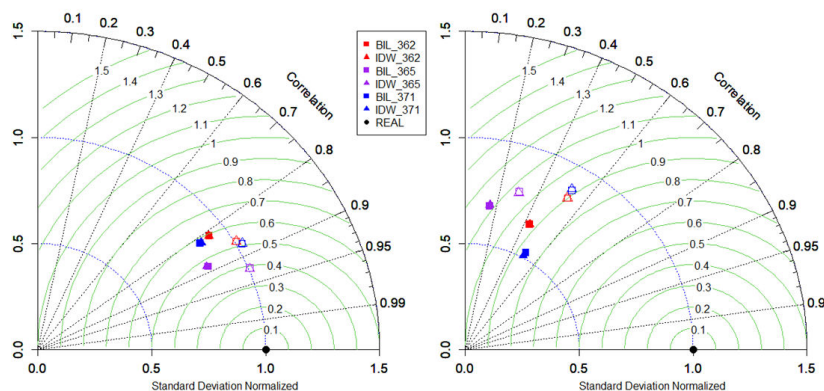


Figura 2. Diagramas de Taylor para la temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) en las estaciones meteorológicas empleadas en la presente investigación durante el período 1971-2000. Los triángulos y cuadrados sin rellenar se corresponden a los valores después de aplicar la corrección BIAS.

Los cambios de los regímenes futuros anuales de la temperatura media del aire (ver [tabla 3](#)) respecto al período base 1971-2000, indican que esta variable tendrá, en todos los casos, un incremento de 1,6 °C y 1,9 °C para la media anual en el mediano plazo en las tres zonas climáticas de la provincia para RCP4,5; en tanto para RCP8,5 estos valores serían entre en 1,9 °C y 2,3 °C. Por su parte, para el largo plazo estos valores serían 2,8-4,9 °C y 4,9-5,3 °C para RCP4,5 y RCP8,5 por ese orden. Es importante hacer hincapié que dentro del año el PPLL estaría transitando a ser mucho más cálido en toda la provincia.

En el caso de la precipitación, las zonas interior y montañosa mostrarían cambios en los totales anuales, tanto para el mediano como el largo plazo, que no excederían en 10% del total anual para el período 1971-2000, mientras que para la zona costera estos valores estarían entre 7-18%. Para el período 2061-2090, se observa una disminución de los totales en el PLL en ambos escenarios climáticos, mientras que las precipitaciones disminuirían en el largo plazo respecto al mediano plazo, aunque estas serían superiores al período histórico. Destaca en los tres casos una posible redistribución de las precipitaciones en la provincia dentro del año, tal como ha sido descrito por ([Planos et al., 2013](#); [Planos y Gutiérrez, 2020](#)).

Al no distribuirse la precipitación anual de forma normal para ninguna de las estaciones se empleó el test no paramétrico de Mann-Whitney-Wilcoxon (wilcox.test del paquete “stats” de RStudio), el cual plantea como hipótesis nula que las medias anuales son similares. Esta prueba arrojó que, en todos los casos, excepto para el escenario RCP8,5 en el total anual del mediano plazo y el PPLL del largo plazo

en la zona costera, las diferencias entre el mediano y largo plazo para ambos escenarios respecto al período base 1971-2000 no son estadísticamente significativo para el nivel de significación del 5%.

Los resultados obtenidos en esta investigación referidos al cambio en los acumulados de precipitación en los PLL y PPLL, y a la redistribución de las precipitaciones dentro del año, son coherentes con los presentados para el GCM HadGEM2-ES que aparecen en ([Planos y Gutiérrez, 2020](#)) para el escenario RCP8,5; aunque en esta investigación se emplearon otros períodos futuros (2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080).

Por su parte, en el caso de la temperatura al comportarse de forma normal se utilizó el t.test, igualmente del paquete “stats”, presentándose en todos los casos diferencias entre los valores medios proyectados y los históricos, que si son estadísticamente significativos, lo que indica la existencia de un cambio en el clima de la provincia referido al régimen térmico.

Para la temperatura media anual del aire, además, las proyecciones obtenidas muestran similitud con las publicadas en ([Planos y Gutiérrez, 2020](#)) para nivel de país (2,1-2,8 °C para RCP4,5 y 1,5-5,3 °C para RCP8,5), aunque existen diferencias para los PLL y PPLL, las cuales deben buscarse en las escalas de trabajos empleadas, en ([Planos y Gutiérrez, 2020](#)) para nivel de país y en la presente investigación a escala local o de estaciones meteorológicas.

El comportamiento de los regímenes de temperatura y precipitación, tanto para el período histórico (1951-2005) y el futuro (2006-2099), para los escenarios climáticos RCP4,5 y RCP8,5 se muestran en la [figura 3](#). En el caso de la temperatura

Tabla 2. Valores medios de la temperatura media del aire (TMP en °C) y los acumulados totales de precipitación (PREC en mm) en el período base 1971-2000 para las zonas climáticas de la provincia Holguín.

Variable	Zona Interior			Zona Costera			Zona Montañosa		
	Anual	PLL	PPLL	Anual	PLL	PPLL	Anual	PLL	PPLL
PREC	1110,7	854,4	256,3	883,1	463,4	419,7	1660,7	1191,7	469,1
TMP	24,9	26,3	23,5	26,5	27,8	25,2	21,4	22,8	20,0

Tabla 3. Cambios proyectados para los regímenes de temperatura (°C) y precipitación (%) en las zonas climáticas de la provincia Holguín. En “negritas” se muestran los valores estadísticamente significativos para un nivel de significación del 5%.

Zona	Escenario	Variable	2031-2060			2061-2090		
			Anual	PLL	PPLL	Año	PLL	PPLL
INT	RCP4,5	PREC	4,5%	5,9%	-1,3%	1,0%	-4,1%	5,1%
		TMP	1,9	1,4	2,4	2,8	2,2	3,3
	RCP8,5	PREC	6,0%	1,1%	4,9%	-6,0%	-16,0%	10,1%
		TMP	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
COS	RCP4,5	PREC	13,7%	22,2%	-8,5%	7,4%	2,3%	5,1%
		TMP	1,6	2,6	3,6	4,6	5,6	6,6
	RCP8,5	PREC	17,5%	15,0%	2,5%	11,0%	-5,8%	16,9%
		TMP	1,9	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9
MON	RCP4,5	PREC	7,5%	9,1%	-1,7%	0,9%	-1,7%	2,6%
		TMP	1,9	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9
	RCP8,5	PREC	2,7%	-0,5%	3,2%	1,6%	-4,0%	5,6%
		TMP	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3

media del aire, esta variable muestra en todos los casos una tendencia lineal creciente desde finales de los años '80 del siglo pasado; mientras que para ambos escenarios climáticos el comportamiento es a continuar el calentamiento de forma lineal, pero con una mayor pendiente. En el caso de RCP4,5 para finales de siglo esta variable tiende a estabilizarse, tal como describe este tipo de escenario, con un comportamiento en el entorno de 27,8 °C; 28,9 °C y 24,2 °C para las zonas interior, costera y montañosa por ese orden, valores estos superiores entre 2,5-3,0 °C al período base.

Por su parte, la proyección de la precipitación presenta un comportamiento similar al período histórico, aunque en los tres casos el escenario RCP4,5 muestra un evento de grandes precipitaciones hacia 2054; mientras que, el escenario RCP8,5 presenta para finales de siglo en los tres casos un proceso de sequía que podría alcanzar los déficits en más de 600 mm para las zonas interior y montañosa, así como 400 mm para la costera. Destaca, además, que esta variable en el futuro presentaría una variabilidad mucho mayor a la del período histórico, fundamentalmente, para RCP8,5.

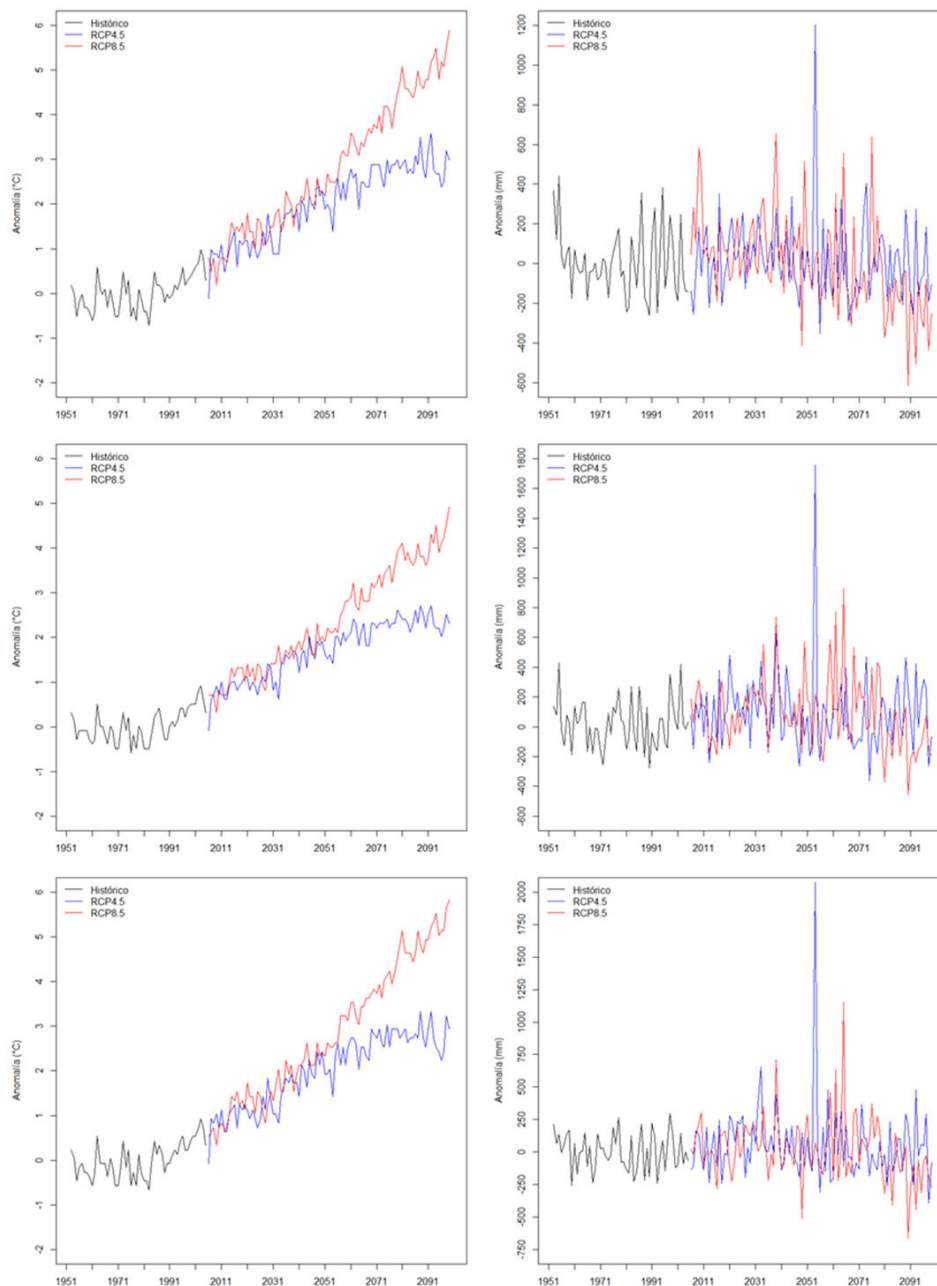


Figura 3. Anomalía multianual respecto al período base 1971-2000 de la temperatura del aire (columna izquierda) y la precipitación (columna derecha) para las zonas climáticas de la provincia Holguín: interior (panel superior), costera (panel intermedio) y montañosa (panel inferior). La línea negra se corresponde con el período histórico, en tanto la azul y la roja hacen referencia a los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 respectivamente.

En la **tabla 4** se muestra la tendencia de la temperatura media anual del aire y los acumulados anuales de precipitación por décadas para las tres zonas climáticas de la provincia. Las magnitudes del cambio oscilan entre 0,12-0,15 °C/década para el período histórico comprendido entre los años 1953-2005, las cuales se duplican y triplican para la proyección futura de esta variable referida al período 2006-2099 en los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 con relación al período histórico respectivamente. En el caso de la precipitación la mayor tendencia la muestra la zona interior, la cual para el escenario RCP8,5 mostraría para finales de siglo una reducción del orden del 36% respecto al período base 1971-2000; por su parte, estas reducciones estarían en un 20% para las zonas costera y un 12% para la zona montañosa. Estos resultados confirman los resultados obtenidos en la presente investigación concerniente a los indicadores climáticos, en tanto enfatiza en el tránsito del clima de la provincia a ser más cálido y seco a la vez.

Los paneles de la **figura 4** muestran la marcha interanual de la temperatura del aire para las zonas climáticas de la provincia. Para las tres regiones, tanto para el mediano como para el largo plazo, el escenario RCP4,5 muestra el mismo comportamiento que el período histórico (línea negra), aunque con mayores valores debido al forzamiento radiativo. En el caso del RCP8,5 se observarían diferencias en el curso anual de esta variable meteorológica, con la posible ocurrencia del máximo anual hacia el mes de mayo en las zonas interior y montañosa; mientras que para la zona costera ocurriría de forma similar al régimen actual para el mediano plazo, en tanto para el largo plazo sucedería en el bimestre mayo-junio.

Por su parte, la **figura 5** indica el ciclo anual de las precipitaciones, los cuales mostrarían una mayor variabilidad interanual que la temperatura del aire. En este sentido, para las tres zonas, se apreciaría un incremento de los totales de precipitación en el mes de febrero (mayores valores para RCP8,5 en el mediano plazo, pero se invierte a RCP4,5 en el largo plazo), así como en el trimestre octubre-diciembre, contrariamente a lo que ocurría en el bimestre julio-agosto. Este comportamiento indica una redistribución de las precipitaciones en la provincia dentro del año.

En resumen, el efecto combinado entre el comportamiento interanual de la temperatura del aire y la precipitación indicaría que en el bimestre mayo-

junio continuarían ocurriendo los mayores acumulados de precipitación para las zonas interior y montañosa, unido al posible corrimiento del máximo anual de la temperatura media hacia el mes de mayo para el escenario climático RCP8,5 lo que a su vez provocaría mayores valores de evaporación.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados y discutidos en este artículo, los autores arribaron a las siguientes conclusiones:

1. Las correcciones BIAS realizadas permitieron reducir los errores BIAS en el orden de 10^{-3} para la temperatura y en menos de 0,1 mm a la precipitación; mientras que el RSME se redujo entre 0,6-0,9 y entre 5-15% para ambas variables por ese orden. Por su parte, no se apreciaron diferencias significativas en los errores de interpolación al emplear los métodos BIL e IDW para ambos regímenes.
2. Los cambios de los regímenes futuros anuales de la temperatura media del aire, respecto al período base 1971-2000, en todos los casos son estadísticamente significativos para el nivel de significación del 5%, y muestran un posible incremento entre 1,6-1,9 °C y 1,9-2,3 °C para RCP4,5 y RCP8,5 en el mediano plazo; así como entre 2,8-4,9 °C y 4,9-5,3 °C para el largo plazo en ese mismo orden.
3. Las proyecciones de la precipitación para la provincia Holguín indican una disminución en el entorno del 10% de los totales anuales para el mediano y largo plazo en ambos escenarios climáticos, aunque sin significación estadística. No obstante, las diferencias en el PPLL y PLL, respecto a los valores históricos, presentan variaciones entre escenarios y período futuros mostrando una posible redistribución de las precipitaciones en la provincia dentro del año.
4. Las anomalías de los regímenes anuales de precipitación presentarían en el futuro una variabilidad mucho mayor a la observada en el período de referencia con la posible ocurrencia de un evento de grandes precipitaciones hacia 2050 en el escenario RCP4,5 y un proceso de sequía intensa hacia 2090 en RCP8,5 con déficits entre 40-55% del total anual.

Tabla 4. Tendencia de la temperatura media anual del aire (°C/décadas) y acumulados de precipitación (mm/década) para las tres regiones climáticas de la provincia Holguín.

Período/ escenario	Serie climática	Zona Costera		Zona Interior		Zona Montañosa	
		TMP	PREC	TMP	PREC	TMP	PREC
Histórico	1953-2005	0,12	-17,2	0,14	-0,42	0,15	-9,54
RCP4,5	2006-2099	0,22	-4,99	0,28	-3,91	0,26	-6,80
RCP8,5		0,42	-42,1	0,53	-18,6	0,54	-20,9

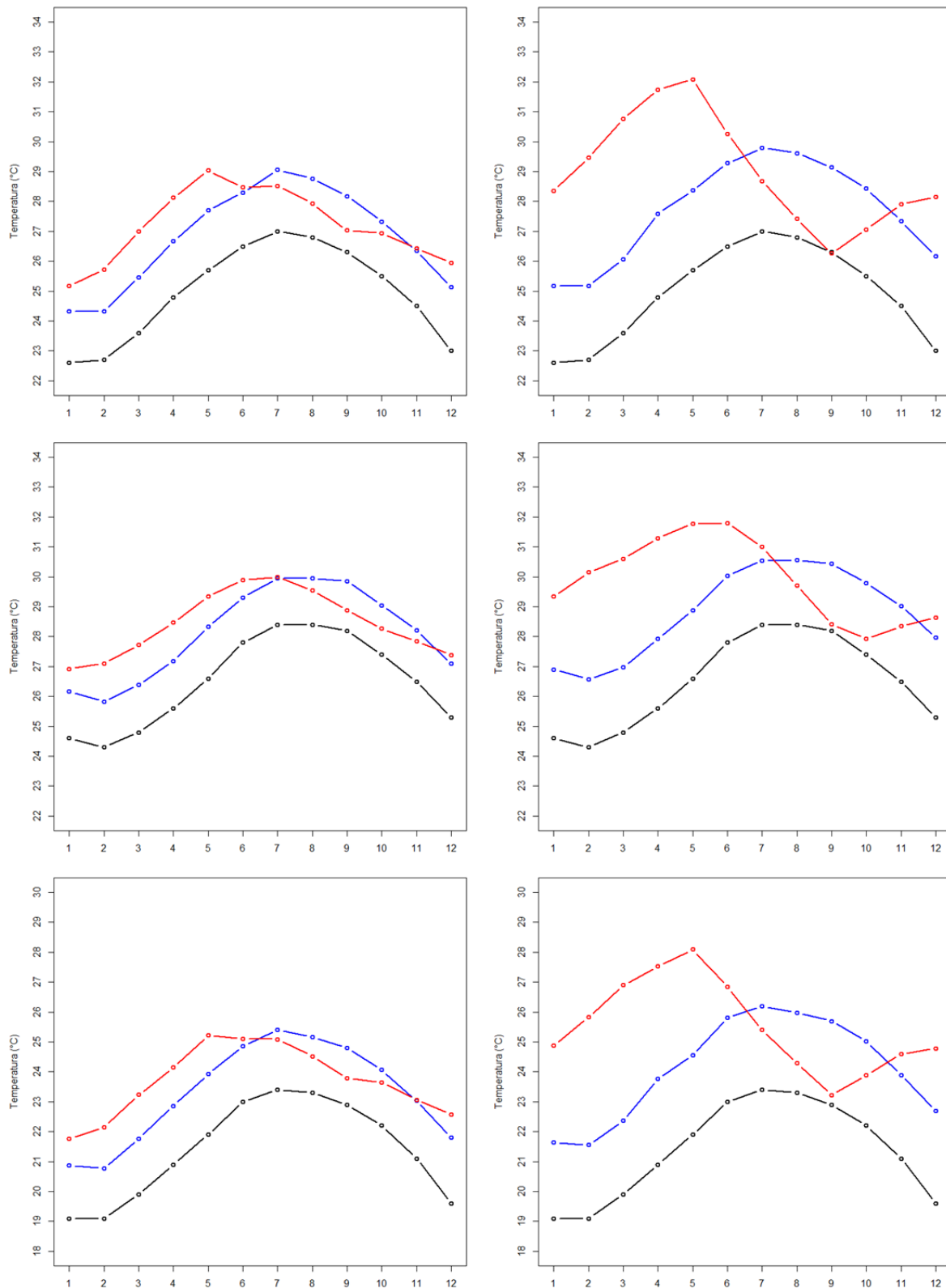


Figura 4. Marcha interanual de la temperatura media del aire para las zonas climáticas de la provincia Holguín: interior (panel superior), costera (panel intermedio) y montañosa (panel inferior). La columna izquierda representa el mediano plazo y la derecha el largo plazo, en tanto la línea negra se corresponde con el período histórico, la azul al escenario climático RCP4,5 y la roja al RCP8,5.

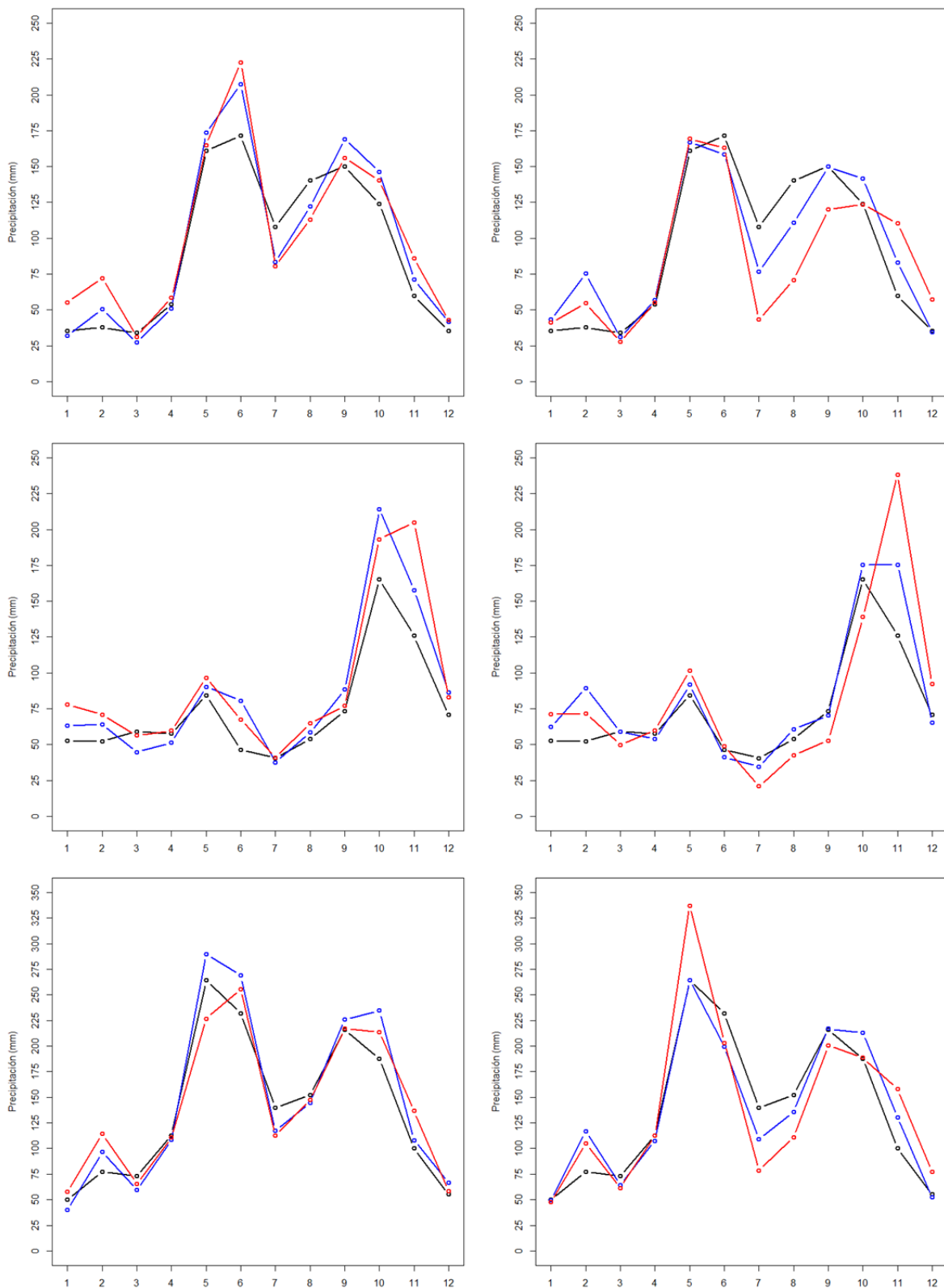


Figura 5. Marcha interanual de la precipitación para las zonas climáticas de la provincia Holguín: interior (panel superior), costera (panel intermedio) y montañosa (panel inferior). La columna izquierda representa el mediano plazo y la derecha el largo plazo, en tanto la línea negra se corresponde con el período histórico, la azul al escenario climático RCP4,5 y la roja al RCP8,5.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa Territorial de Ciencia, Tecnología e Innovación “Impactos del cambio climático en Holguín” de la República de Cuba, por aprobar y financiar el proyecto “El clima de la provincia Holguín. Principales variaciones y tendencias” entre los años 2023-2024, en el marco del cual se obtuvieron los resultados que se presentan en el presente artículo científico. Además, los autores desean agradecer a los compañeros Abel Centella y Arnaldo Bezanilla quienes gentilmente facilitaron las salidas del GCM HadGEM-ES empleadas en esta investigación.

REFERENCIAS

- Asamblea Nacional del Poder Popular. 2019. *Constitución de la República de Cuba*. Gaceta Oficial No. 5 Extraordinaria, pp. 69–116.
- Asamblea Nacional del Poder Popular. 2023. *Ley 150/2022 Del Sistema de Recursos Naturales y el Medio Ambiente*. Gaceta Oficial No. 87 Ordinaria, pp. 2091–2140.
- Ávila, A.; Rodrigues, R.; Zuluaga, C. F.; Cerón, W. L.; Oliveira, L.; Benezoli, V.; Ayes, I.; Marengo, J. A.; Wilson, A. B. and Medeiros, F. 2023. “Current and Future Climate Extremes Over Latin America and Caribbean: Assessing Earth System Models from High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP)”. *Earth Systems and Environment*, 7: 99–130, DOI: <http://doi.org/10.1007/s41748-022-00337-7>.
- Biasutti, M.; Sobel, A. H.; Camargo, S. J. and Creyts, T. T. 2012. “Projected changes in the physical climate of the Gulf Coast and Caribbean”. *Climatic Change*, 112(3): 819–845, DOI: <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0254-y>.
- Campbell, J. D.; Taylor, M. A.; Stephenson, T. S.; Watson, R. A. and Whyte, F. S. 2011. “Future climate of the Caribbean from a regional climate model”. *International Journal of Climatology*, 31(12): 1866–1878, DOI: <http://doi.org/10.1002/joc.2200>.
- Cavazos, T.; Luna, R.; Cerezo, R.; Fuentes, R.; Méndez, M.; Pineda, L. F. and Valenzuela, E. 2020. “Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain”. *International Journal of Climatology*, 40(3): 1396–1420, DOI: <http://doi.org/10.1002/joc.6276>.
- Centella, A.; Gutiérrez, T., L.; Limia, M. and Rivero, R. 1999. “Climate change scenarios for impact assessment in Cuba”. *Climate Research*, 12: 223–230.
- Centella, A.; Taylor, M. A.; Bezanilla, A.; Martínez, D.; Campbell, J. D.; Stennett, R. K. and Vichot, A. 2015. “Assessing the effect of domain size over the Caribbean region using the PRECIS regional climate model”. *Climate Dynamics*, 44: 1901–1918, DOI: <http://doi.org/10.1007/s00382-014-2272-8>.
- CITMA 2017. *Enfrentamiento al cambio climático en la República de Cuba (Tarea Vida)*. La Habana: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, p. 41.
- COLA. 2018. *Grid Analysis and Display System (GrADS)*. [Linux], Virginia, US, The Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, Available: <http://cola.gmu.edu/grads/grads.php>.
- Consejo de Ministros. 2023. *Decreto 86/2023 “Del enfrentamiento al cambio climático”*. Gaceta Oficial No. 87 Ordinaria, pp. 2179–2193.
- Horton, N. J. and Kleinman, K. 2015. *Using R and RStudio for Data Management, Statistical Analysis, and Graphics*. Second Edition ed., Boca Raton, US: Taylor & Francis Group, 253 p., ISBN: 978-1-4822-3737-5.
- 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, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 996 p., ISBN: 978-0-521-70596-7, Available: <https://www.ipcc.ch/>, [Consulted: October 12, 2023].
- 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, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535 p., ISBN: 978-1-107-66182-0, Available: <https://www.ipcc.ch/>, [Consulted: October 12, 2023].
- Karmalkar, A. V.; Bradley, R. S. and Diaz, H. F. 2011. “Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections”. *Climate Dynamics*, 49: 605–629, DOI: <http://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>
- Karmalkar, A. V.; Taylor, M. A.; Campbell, J.; Stephenson, T.; New, M.; Centella, A.; Bezanilla, A. and Charlery, J. 2013. “A review of observed and projected changes in climate for the islands in the Caribbean”. *Atmósfera*, 26(2): 283–309.
- Kotamarthi, R.; Hayhoe, K.; Mearns, L. O.; Wuebbles, D.; Jacobs, J. and Jurado, J. 2021. *Downscaling techniques for high-resolution climate projections: from global change to local impacts*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 201 p., ISBN: 978-1-108-47375-0.
- Lee, T. and Singh, V. 2019. *Statistical Downscaling for Hydrological and Environmental Applications*. Boca Raton, US: Taylor & Francis Group, 161 p., ISBN: 978-1-138-62596-9.

- Liu, Y.; Lee, S.-K.; Enfield, D. B.; Muhling, B. A.; Lamkin, J. T.; Muller-Karger, F. E. and Roffer, M. A. 2015. "Potential impact of climate change on the Intra-Americas Sea: Part-1. A dynamic downscaling of the CMIP5 model projections". *Journal of Marine Systems*, 148: 56–69, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.01.007>.
- Maraun, D. and Widmann, M. 2018. *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 341 p., ISBN: 978-1-107-06605-2.
- Martínez, M.; Bezanilla, A.; Centella, A. y Vichot, A. 2022. "Proyección de extremos climáticos futuros en Cuba bajo escenarios de geoingeniería". *Revista Cubana de Meteorología*, 28(2): 1–13.
- McLean, N. M.; Stephenson, T. S.; Taylor, M. A. and Campbell, J. D. 2015. "Characterization of Future Caribbean Rainfall and Temperature Extremes across Rainfall Zones". *Advances in Meteorology*, 2015: 1–18, DOI: <http://doi.org/10.1155/2015/425987>.
- Ministerio de Economía y Planificación 2019. *Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el año 2030 (PNDES 2030)*. La Habana: Ministerio de Economía y Planificación, p. 45.
- Mohan, S.; Clarke, R. M. and Chadee, X. T. 2020. "Variations in extreme temperature and precipitation for a Caribbean island: Barbados (1969–2017)". *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3): 1277–1290, DOI: <http://doi.org/10.1007/s00704-020-03157-9>.
- National Center for Atmospheric Research Staff. 2022. *The Climate Data Guide: Regridding Overview*. NCAR Climate Data Guide, Climate Data Analysis Tools & Methods, Available: www.climateadaguide.ucar.edu/climate-tools/regridding-overview , [Consulted: November 10, 2022].
- ONEI 2023. *Anuario Estadístico de Holguín 2022*. Edición 2023 ed., Holguín, Cuba: Oficina Nacional de Estadística e Información, provincia Holguín, 170 p., Available: <https://www.onei.gob.cu/sites/default/files/publicaciones/2023-12/anuario-provincial-holguin-2022-edicion-2023.pdf>, [Consulted: December 16, 2023].
- ONU 2015. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York: Asamblea General de las Naciones Unidas, p. 40, Available: <https://undocs.org/A/RES/70/1> , [Consulted: February 18, 2019].
- PCC 2021. *Lineamientos de Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2021-2026*. La Habana: Comité Central del Partido Comunista de Cuba, 85 p.
- Pérez, G. e Hidalgo, A. 2016. "Regionalización climática de la provincia de Holguín". *Revista Cubana de Meteorología*, 22(1): 39–48.
- Pérez, G. e Hidalgo, A. 2023. "Principales variaciones de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín. Período 1972-2020". *Revista Cubana de Meteorología*, 29(4): 1–6.
- Planos, E. O. y Gutiérrez, T. L. (eds.). 2020. *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. La Habana: AMA Sello Editorial, 402 p., ISBN: 978-959-300-170-0.
- Planos, E. O.; Rivero, R. y Guevara, V. (eds.). 2013. *Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*. La Habana: Editorial AMA, 430 p., ISBN: 978-959-300-039-0.
- R Core Team. 2023. *R: A language and environment for statistical computing*. [Linux], Vienna, Austria, The R Foundation for Statistical Computing, Available: <https://www.R-project.org/> .
- Schulzweida, U. 2022. *Climate Data Operator*. [Linux], Hamburg, Germany, Max Planck Institute of Meteorology, Available: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/> .
- Stennett, R. K.; Jones, J. J. P.; Stephenson, T. S. and Taylor, M. A. 2017. "Future Caribbean temperature and rainfall extremes from statistical downscaling". *International Journal of Climatology*, 37(14): 4828–4845, DOI: <http://doi.org/10.1002/joc.5126>.
- Taylor, K. E. 2001. "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7): 7183–7192, ISSN: 0148-0227, DOI: <http://doi.org/10.1029/2000JD900719>.
- Taylor, M. A.; Centella, A.; Charlery, J.; Bezanilla, A.; Campbell, J.; Borrajero, I.; Stephenson, T. and Nurmohamed, R. 2013. "The Precip Caribbean Story: Lessons and Legacies". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(7): 1065–1073, DOI: <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00235.1>.
- Torma, C.; Giorgi, F. and Coppola, E. 2015. "Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain Precipitation over the Alps". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9): 3957–3972, DOI: <http://doi.org/10.1002/2014JD022781>.
- Vichot, A.; Martínez, D.; Bezanilla, A.; Centella, A. and Giorgi, F. 2021. "Projected changes in precipitation and temperature regimes and extremes over the Caribbean and Central America using a multiparameter ensemble of RegCM4". *International Journal of Climatology*, 41(2): 1328–1350, DOI: <http://doi.org/10.1002/joc.6811>.
- Wickham, H. and Grommund, G. 2016. *R for Data Science*. First Edition ed., Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, Inc, 492 p., ISBN: 978-1-4919-1039-9.
- Wilks, D. S. 2019. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Fourth Edition ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier/Academic Press, 818 p., ISBN: 978-0-12-385022.

Axel Hidalgo Mayo. Universidad de Holguín y Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología, Cuba.
Graciela Pérez Rivas. Universidad de Holguín y Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología, Cuba.
Iliana Cruz Torres. Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología, Cuba.