

Índice estandarizado de precipitación para la evaluación de la sequía en Artemisa

Standardized precipitation index for drought assessment in Artemisa

✉ Felicitá González-Robaina^{1*}, ✉ Arnoldo Bezanilla-Morlot², ✉ Carmen Duarte-Díaz¹,
 ✉ Enrique Cisneros-Zayas¹, ✉ Julián Herrera-Puebla¹ and ✉ Yoima Chaterlán-Durruthy¹

¹Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: carmen.duarte@iagric.minag.gob.cu, enrique.cisneros@iagric.minag.gob.cu, julian.herrera@iagric.minag.gob.cu, yoimachaterlsln@iagric.minag.gob.cu

²Instituto de Meteorología (INSMET), Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba. E-mail: arnoldo.bezanilla@gmail.com

*Autora para correspondencia: Felicitá González-Robaina, e-mail: felicitá.gonzalez@iagric.minag.gob.cu

RESUMEN: En la actualidad, muchos son los procedimientos para caracterizar el fenómeno de las sequías; la mayoría de ellos se basa en el Índice estandarizado de precipitación (SPI), el cual se calcula a partir de registros históricos de precipitación para un cierto periodo de estudio. El objetivo de este trabajo fue evaluar en la región de Alquizar de la provincia de Artemisa en Cuba la intensidad de la sequía mediante el uso del SPI. Se utilizaron los valores climáticos del escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0. Con los datos de precipitaciones, tomados en el período 2015-2050 se determinó el SPI para 6 meses. El comportamiento de las precipitaciones anuales varió entre 1246,25 y 2109,76 mm. De los tres modelos el MPI-ESM1.2-HR estima los valores más altos de precipitaciones en 22 de los 36 años estudiados, y todos por encima al promedio anual actual para Cuba de 1335 mm. Mientras que el modelo HadGEM3 estima 2 años menores a 1335 mm y el máximo valor con 2109,76 mm para el año 2039. Se destacan, por su intensidad y duración 10 eventos de sequía extrema ($SPI_6 \leq -2$), según el escenario SSP5-8.5 del modelo HadGEM3. Sobresalen por la severidad de la sequía, con valores del SPI clasificados en la categoría de extremadamente seco, los periodos de mayo-diciembre 2035 con un SPI_6 máximo de -3.09, abril-diciembre 2050 de hasta -2.7, septiembre 2020 hasta septiembre 2021 SPI de -2.27, y de sequía severa de noviembre 2037 hasta noviembre 2038 con un SPI_6 de -1.29.

Palabras clave: SPI, sequía, modelos climáticos, registro histórico.

ABSTRACT: Currently, there are many procedures for characterizing droughts; most are based on the Standardized Precipitation Index (SPI), which is calculated from historical precipitation records for a given study period. The objective of this study was to evaluate drought intensity in the Alquizar region of Artemisa province, Cuba, using the SPI. Climate values from the SSP5-8.5 scenario from the HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR, and MRI-ESM2.0 models were used. The SPI was determined for a 6-month period using precipitation data from the 2015-2050 period. Annual precipitation ranged from 1246.25 to 2109.76 mm. Of the three models, the MPI-ESM1.2-HR estimates the highest precipitation values in 22 of the 36 years studied, all above the current annual average for Cuba of 1335 mm. While the HadGEM3 model estimates 2 years with less than 1335 mm and the maximum value with 2109.76 mm for the year 2039. Ten extreme drought events stand out, due to their intensity and duration ($SPI_6 \leq -2$), according to the SSP5-8.5 scenario of the HadGEM3 model. The periods that stand out for the severity of the drought, with SPI values classified as extremely dry, are: May-December 2035 with a maximum SPI_6 of -3.09, April-December 2050 with a maximum SPI_6 of -2.7, September 2020 to September 2021 with a SPI_6 of -2.27, and the severe drought from November 2037 to November 2038 with a SPI_6 of -1.29.

Keywords: SPI, Drought, Climate Models, Historical Record.

INTRODUCCIÓN

Los escenarios de cambio climático son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro (Escoto Castillo et al., 2017). Con el objetivo de mejorar el marco de análisis, la evaluación de los impactos del cambio climático y lograr una visión más interdisciplinaria en los últimos años se han desarrollado nuevos escenarios (E. O. Planos, 2014).

Los SSP (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas, por el inglés Shared Socio Economic Pathways) describen 5 vías alternativas de la sociedad según la implementación o ausencias de políticas para frenar el cambio climático, contemplando diferentes opciones de desarrollo y emisiones en el año 2100 (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 y SSP5) (Escoto Castillo et al., 2017; OFA & CC, 2023).

Recibido: 13/03/2025

Aceptado: 08/09/2025

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

Contribuciones de los autores: **Conceptualización:** F. González, A. Bezanilla, C. Duarte, E. Cisneros. **Curación de datos:** F. González, C. Duarte, E. Cisneros. **Análisis formal:** F. González, A. Bezanilla, C. Duarte. **Investigación:** F. González, C. Duarte, E. Cisneros, J. Herrera, Y. Chaterlán. **Metodología:** F. González, A. Bezanilla, C. Duarte, E. Cisneros, Y. Chaterlán. **Software:** F. González, A. Bezanilla. **Supervisión:** F. González, C. Duarte, E. Cisneros. **Validación:** F. González, C. Duarte. **Redacción-borrador original:** F. González, C. Duarte, E. Cisneros, J. Herrera. **Escritura-revisión y edición:** F. González, A. Bezanilla, C. Duarte, E. Cisneros, J. Herrera, Y. Chaterlán.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Según (Morán Armendáriz et al., 2022), el escenario SSP5 asume una muy alta dependencia de los combustibles fósiles y un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano.

Las sequías son eventos climáticos extremos de gran complejidad que ocasionan pérdidas económicas a partir de sus impactos directos e indirectos. Pueden ser monitoreadas mediante la utilización de diferentes índices, entre los que se encuentra el índice estandarizado de precipitación (SPI) (Villazón Gómez et al., 2021).

En la actualidad, muchos son los procedimientos para caracterizar el fenómeno de las sequías, la mayoría de ellos se basa en el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, Standardized Precipitation Index, por sus siglas en inglés), el cual se calcula a partir de registros históricos de precipitación para un cierto periodo de estudio (Almonacid et al., 2024; Gutiérrez & González, 2024). Este índice se destaca por su sencillez, facilidad de cálculo y es uno de los más utilizados en más de 70 países.

El índice estandarizado de precipitación se calcula para intervalos de tiempo entre 3 (valor de SPI mínimo) y 48 meses (valor de SPI máximo), y permite identificar y clasificar posibles zonas susceptibles a presentar algún tipo de daño por sequía. Esta serie de datos se estandariza empleando diversas distribuciones de probabilidad, lo que permite el análisis de los impactos de las sequías a distintas escalas de tiempo (Almonacid et al., 2024).

El objetivo de este estudio es evaluar la intensidad de la sequía en la región de Alquizar ante el escenario de cambio climático SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1-2-HR y MRI-ESM2-0 mediante el uso del índice estandarizado de precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en la región de Alquizar de la provincia de Artemisa, con coordenadas geográficas: Latitud 22° 46' N y Longitud 82° 36' O, en un suelo Ferralítico Rojo compactado. La zona se caracteriza por presentar una topografía llana.

Para el estudio se consideró el escenario SSP5-8.5 donde las emisiones de GEI son muy elevadas y es muy probable que la temperatura media de la superficie del planeta en 2081-2100 aumente entre de 3,3°C a 5,7°C (Masson-Delmotte et al., 2021). Además, este escenario protagoniza el caso más extremo con emisiones considerables para generar un forzamiento radiactivo entorno a los 8,5 Wm⁻² a finales de siglo (O'Neill et al., 2016), este escenario representa el límite superior del rango de escenarios descritos en la literatura (IPCC, 2023).

Para la obtención de estos datos se hizo uso de los valores climáticos del escenario SSP5-8.5 y los modelos HadGEM3 (Hadley Centre Global Environment Model versión 3) (Sellar et al., 2019), MPI-ESM1.2-HR (Max Planck Institute Earth System Model) (Gutjahr et al., 2019) y MRI-ESM2.0 (Meteorological Research Institute) (Yukimoto et al., 2019), que presenta una resolución de 25 x 25 km.

Con los datos de precipitaciones, tomados en el período 2015-2050 por el Instituto de Meteorología según (Bonel et al., 2023), se analizó el comportamiento de las precipitaciones anuales y promedios mensuales estimados bajo el escenario SSP5-8.5 en los tres modelos. Para los datos mensuales se calcularon los estadígrafos: media, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación.

Utilizando los datos mensuales se determinó el índice estandarizado de precipitación (Standardized Precipitation Index) para 6 meses (SPI6) según McKee et al. (1993), recomendado para la caracterización de las sequías por la Organización Meteorológica Mundial según (Svoboda et al., 2012) y por ser uno de las más utilizadas para reconocer los eventos de sequías a nivel estacional (Zhang et al., 2023).

El índice estandarizado de precipitación considera el déficit de precipitaciones para una gran diversidad de escalas de tiempo. Por ello resulta adecuado a la hora de estudiar el comportamiento de sequías de diferentes duraciones, desde un mes (significativo para la agricultura) hasta varios meses o años (importante para evaluar la disponibilidad de agua) (Villazón Gómez et al., 2021). Es calculado al ajustar la distribución de frecuencia de las precipitaciones con una función teórica de densidad de probabilidad (McKee et al., 1993):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

Para $x \geq 0$ y en la cual, $\alpha > 0$ es el parámetro de forma, $\beta > 0$ el de escala, $x > 0$ la precipitación en un cierto lapso y $\Gamma(\alpha)$ es la función matemática factorial o función Gamma que da nombre a tal distribución, originalmente conocida como Pearson tipo III:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (2)$$

La función de densidad de probabilidad es transformada a una distribución normal estandarizada (con media 0 y varianza 1), con el SPI como resultado de dicha transformación, con valores positivos para periodos húmedos y negativos para los secos. Para la determinación del índice estandarizado de precipitación fue utilizado el software SPI generator v1.7.1, disponible en <http://drought.unl.edu/Monitoring-Tools/DownloadableSPIProgram.aspx>.

La adaptabilidad temporal del índice estandarizado de precipitación es provechosa para determinar el comienzo y la culminación de eventos secos difíciles de precisar por medio de otros índices. (McKee et al., 1995) plantearon un esquema de clasificación del SPI (Tabla 1). Para este estudio se define el umbral de sequía en -0,5, según recomienda el Instituto de Meteorología (Bonel et al., 2023).

Tabla 1. Categorías del índice estandarizado de precipitación

Valor del índice estandarizado de precipitación	Categorías	Probabilidad (%)
$\geq 2,00$	Extremadamente húmedo	2,3
1,50 a 1,99	Muy húmedo	4,4
1,00 a 1,49	Moderadamente húmedo	9,2
0,99 a -0,99	Normal o aproximadamente normal	68,2
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco	9,2
-1,50 a -1,99	Muy seco	4,4
$\leq -2,00$	Extremadamente seco	2,3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitaciones

En la [Figura 1](#) se muestra el comportamiento de las precipitaciones anuales estimadas bajo el escenario SSP5-8.5, periodo 2015-2050 de los tres modelos estudiados para la región de Alquízar, puede observarse que el comportamiento de las precipitaciones anuales varió entre 1246,25 y 2109,76 mm. De los tres modelos el MPI-ESM1.2-HR estima los valores más altos de precipitaciones en 22 de los 36 años estudiados, y todos por encima del promedio anual actual para Cuba de 1335 mm, según nuevo isoyético ([Rodríguez, 2005, 2006](#)). Mientras que el modelo HadGEM3 estima 2 años menores a 1335 mm y el máximo valor con 2109,76 mm para el año 2039.

Las estimaciones del promedio anual de los 36 años por el modelo HadGEM3 es de 1595,90 mm, mientras que el modelo MPI-ESM1.2-HR estima 1738,55 mm y el MRI-ESM2.0 1582,83 mm, en todos los casos entre un 15 y 23,2% por encima del promedio anual actual para Cuba de 1335 mm, lo que ratifica las citadas anomalías de las precipitaciones hacia el 2050 definidas por Planos (2023).

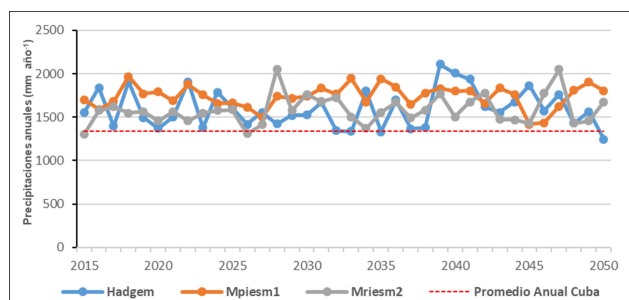


Figura 1. Comparación entre las precipitaciones anuales durante el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 para la región de Alquízar.

Los trabajos de ([E. Planos et al., 2000](#)) sirven como referencia para los primeros estudios científicos sobre el impacto del cambio climático en Cuba. En este trabajo se hizo un estudio de la lluvia promedio anual en los 30 años comprendidos entre 1961-1990 con 1100 pluviómetros distribuidos en todo el país y la lámina media anual resultó de 1329 mm. Con este mapa se verificó una reducción de la lámina de lluvia en el país con respecto a estimaciones anteriores (Trusov, 1967; Gagua et al., 1976; Izquierdo, 1989) citados por [Planos & Martínez \(2024\)](#).

Trabajos posteriores de ([Rodríguez, 2005](#)) muestran un valor de lluvia promedio anual de 1335 mm para el periodo entre 1961-2000 con 2175 pluviómetros distribuidos en todo el país; que incluyeron además las tendencias y los patrones regionales para el periodo 1931-2000. En este estudio se presentó el primer mapa que abarca un periodo de 60 años de observaciones. Entre los resultados principales obtenidos figura la confirmación de la reducción de la precipitación promedio en Cuba con respecto a la determinada anteriormente ([Planos & Martínez, 2024](#)).

Sin embargo, en la caracterización de la precipitación anual de Cuba y las regiones occidental, central y oriental para una serie mayor de 90 años comprendidos entre 1931 y 2020 según [Planos & Martínez \(2024\)](#), la lámina media anual para Cuba es de 1368,5 mm; mientras que para el occidente, centro y oriente fueron de 1377,8, 1331,2 y 1259,5 mm, respectivamente, con coeficientes de variación entre 11 y 16%.

Realizando similar análisis en este estudio para las condiciones de Artemisa, las precipitaciones estimadas por todos los modelos bajo el escenario SSP5-8.5 superan entre 21,7 y 28,7% al promedio anual histórico en el territorio, que es de 1278,0 mm. El comportamiento de las mismas durante el periodo lluvioso (mayo-octubre) representa el 76,6 % (948,31mm) y poco lluvioso (noviembre - abril) el 23,4% (289,69 mm). El mes con más precipitaciones es septiembre con 220,5 mm y el de menos precipitación es diciembre con 29,1 mm ([GEAF Artemisa \(2023\)](#)). Por lo que se hace necesario analizar el comportamiento de las precipitaciones mensuales según estiman los tres modelos aquí estudiados.

En la [Tabla 2](#) se resumen los estadígrafos: media, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos mensuales de precipitación en el periodo 2015-2050 para el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0.

El modelo HadGEM3 estima valores promedios mensuales de precipitación que van desde 65,59 en el mes de febrero hasta 248,74 mm en junio. Los meses con más precipitación son junio (248,74 mm) y septiembre (216,39 mm) y el de menos es marzo con 58,35 mm. Se observan coeficientes de variación por encima de 21% en todos los meses con excepción del mes de agosto con 15,2 %. Destacándose los meses de enero, febrero y diciembre con los valores más altos de CV con 69,01,

55,11 y 90,3%, respectivamente, lo que denota que existe una mayor dispersión en los valores de las precipitaciones en estos meses. En el caso particular del mes de diciembre, con el mayor CV, presenta un mínimo de 8,40 mm y un máximo de 219,40.

El comportamiento de las precipitaciones durante el período lluvioso (mayo-octubre) representa el 71,6% (1143,22) y en el poco lluvioso (noviembre-abril) el 28,3% (452,68 mm).

Tabla 2. Precipitaciones mensuales promedio en el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0

Modelo HadGEM3					
Mes	Media	Min	Max	Desviación Estándar	CV
Enero	74,26	18,20	223,37	51,24	69,01
Febrero	65,59	26,06	168,45	36,15	55,11
Marzo	58,35	18,44	105,03	24,16	41,41
Abril	88,17	62,29	181,35	31,31	35,51
Mayo	153,73	106,87	535,15	73,36	47,72
Junio	248,74	139,64	485,66	71,19	28,62
Julio	141,38	99,62	240,67	30,87	21,83
Agosto	174,78	142,72	242,36	26,54	15,19
Septiembre	216,39	149,19	422,35	56,36	26,05
Octubre	208,20	79,21	379,69	81,83	39,30
Noviembre	93,15	36,03	234,55	49,20	52,82
Diciembre	73,16	8,40	219,40	66,07	90,31
MPI-ESM1.2-HR					
Mes	Media	Min	Max	Desviación Estándar	CV
Enero	77,59	12,41	223,06	50,48	65,06
Febrero	88,23	19,34	223,49	52,70	59,73
Marzo	69,80	12,41	189,23	37,74	54,07
Abril	79,90	46,27	160,30	29,07	36,39
Mayo	154,00	79,88	372,95	63,78	41,41
Junio	309,20	134,14	619,96	108,86	35,21
Julio	145,01	72,83	287,02	54,40	37,52
Agosto	196,95	137,49	288,46	34,49	17,51
Septiembre	281,78	176,82	464,12	67,29	23,88
Octubre	185,19	59,32	309,99	69,35	37,45
Noviembre	81,44	14,77	186,72	50,62	62,15
Diciembre	69,45	7,58	186,73	47,10	67,81
MRI-ESM2.0.					
Mes	Media	Min	Max	Desviación Estándar	CV
Enero	48,64	10,00	121,67	29,29	60,21
Febrero	61,64	12,28	215,52	40,43	65,59
Marzo	55,67	15,60	160,30	33,79	60,70
Abril	92,84	53,98	181,59	30,97	33,36
Mayo	165,45	101,00	273,72	45,92	27,76
Junio	266,61	186,14	403,23	54,54	20,46
Julio	149,39	98,82	255,20	36,77	24,61
Agosto	179,55	128,91	234,19	26,65	14,85
Septiembre	260,20	188,26	318,16	30,51	11,72
Octubre	163,72	73,44	265,36	50,02	30,55
Noviembre	74,99	20,50	190,92	40,31	53,76
Diciembre	64,13	5,61	205,22	36,38	56,73

Mientras que el modelo MPI-ESM1.2-HR estima valores promedios mensuales de precipitación que van desde 69,45 en el mes de diciembre hasta 309,20 mm en junio. Los meses con más precipitaciones son junio (309,20 mm) y septiembre (281,78 mm) y el poco lluvioso es marzo con 55,67. Se observan coeficientes de variación por encima de 23,88% en todos los meses con excepción del mes de agosto con 17,5 %. Destacándose los meses de enero, febrero y diciembre con los valores más altos de CV con 65,06, 59,73 y 67,81%, respectivamente. En el caso particular del mes de diciembre, con el mayor CV, presenta un mínimo de 7,58 mm y un máximo de 186,73.

El comportamiento de las precipitaciones durante el período lluvioso (mayo-octubre) representa el 73,2 % (1272,13) y en el poco lluvioso (noviembre - abril) el 26,8% (466,41 mm).

Por otra parte, el modelo MRI-ESM2.0 estima valores promedios mensuales de precipitación que van desde 48,64 en el mes de enero hasta 260,2 mm en septiembre. Los meses con más precipitaciones son junio (266,61 mm) y septiembre (260,20 mm) y el de menos es diciembre con 69,45 mm. Se observan coeficientes de variación por encima de 20,46% en todos los meses con excepción del mes de agosto y septiembre con 14,85 y 11,72%, respectivamente. Destacándose los meses de enero, febrero y marzo con los valores más altos de CV con 60,21, 65,59 y 60,7%, respectivamente. En particular el mes febrero, con el máximo CV, los valores se encuentran entre 12,28 y 215,52 mm.

El comportamiento de las precipitaciones durante el período lluvioso (mayo-octubre) representa el 74,8 % (1184,92) y en el seco (noviembre - abril) el 25,1% (397,91 mm). Este comportamiento según los tres modelos estudiados resulta similar a los reportados por el *GEAF Artemisa* (2023) para esta zona de estudio.

En la *Figura 2* se comparan las precipitaciones mensuales promedio en el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 con el promedio mensual histórico de Cuba de la serie 1961-2020 (Planos & Martínez, 2024). Con excepción del mes de mayo, los valores estimados de precipitación mensual por los 3 modelos superan al promedio histórico en todos los meses, destacándose el mes de junio con valores entre 59,6 y 120 mm. El modelo MPI-ESM1.2-HR estima los máximos valores de precipitaciones en 6 meses.

De forma general, los mínimos se observan de los meses de noviembre-abril (inferiores a 93 mm) en los tres modelos. Los máximos entre mayo y octubre coincidiendo con el período lluvioso en Cuba. Los meses de mayores precipitaciones son junio y septiembre con más de 200 mm.

Aunque los valores de precipitaciones anuales estimadas por los tres modelos se encuentran por encima del promedio anual actual para Cuba, lo cual puede interpretarse como mayor precipitación a futuro, cuando se analizan los valores mensuales se corrobora la variabilidad de este

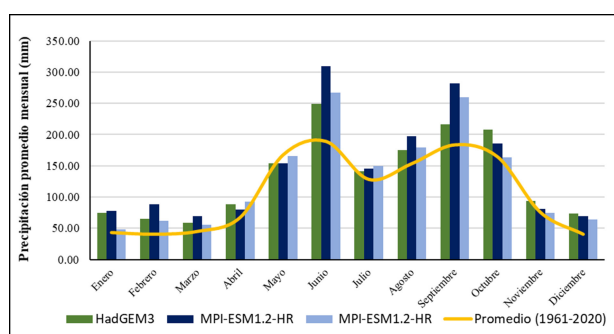


Figura 2. Comparación entre las precipitaciones mensuales promedio en el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 con el promedio histórico de Cuba.

parámetro climático y la importancia de su estudio para el planeamiento del riego de los cultivos.

Según (Herrera et al., 2025) el efecto esperado del incremento de las temperaturas, predicho en los estudios sobre el cambio climático para Cuba, sin duda conducirá a un incremento del consumo potencial de agua del cultivo. Sin embargo, el incierto comportamiento de las lluvias según los diferentes modelos y escenarios conduce a una variabilidad en cuanto a la demanda de riego del cultivo, la cual se ve fuertemente influenciada por la cantidad de lluvia ocurrida dentro del ciclo y por la distribución de las mismas.

Por su parte, (Hidalgo et al., 2024) presentan 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. Según estos autores la proyección de la precipitación para el escenario RCP5-8,5 del modelo HadGEM presenta para finales de siglo 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. Destacan, además, que esta variable en el futuro presentaría una variabilidad mucho mayor a la del período histórico.

En la *Tabla 3* se muestran las estadísticas generales de los eventos de sequía para el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 en el área de estudio. El número de eventos de sequía para este periodo varió entre 24 y 69 según el modelo. El MPI-ESM1.2-HR estima la mayor cantidad de eventos con 1 o más meses, así como la cantidad de meses por debajo del umbral definido (-0,5) con 194.

HadGEM3 presenta un máximo consecutivo de 15 meses de octubre 2032 a diciembre 2033, mientras que el modelo MPI-ESM1.2-HR estima un máximo consecutivo de 17 meses (febrero 2045-junio 2046) y el modelo MRI-ESM2.0 de 10 meses (enero 2034-octubre 2034).

En la *Tabla 4* se resume las estadísticas por categorías del SPI para 6 meses para el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 en el área de estudio.

Tabla 3. Estadísticas generales de los eventos de sequía para el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 en el área de estudio

Estadísticas generales eventos de sequía	Modelo		
	HadGEM3	MPI-ESM1.2-HR	MRI-ESM2.0
Meses por debajo del umbral (-0,5)	109	194	146
Porciento	25	45,4	34
Máximo consecutivo	15	17	10
Numero de eventos de sequía*	24	69	58

*con 1 o más meses

Tabla 4. Estadísticas por Categorías del índice estandarizado de precipitación para 6 meses (SPI6) para el periodo 2015-2050 bajo el escenario SSP5-8.5 de los modelos HadGEM3, MPI-ESM1.2-HR y MRI-ESM2.0 en el área de estudio

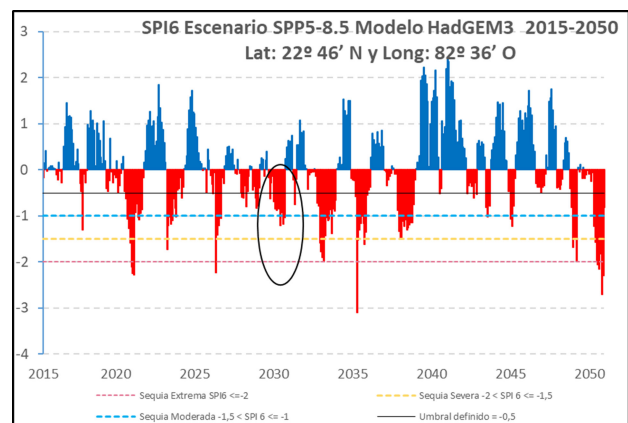
SPI6 por categorías	HadGEM3		MPI-ESM1.2-HR		MRI-ESM2.0	
	No.	%	No.	%	No.	%
Extremadamente húmedo >2.0	7	1,44	6	1,41	4	0,94
Severamente húmedo ($1,5 < \text{SPI6} \leq 1,99$)	18	4,22	14	3,28	17	3,98
Moderadamente Húmedo ($1 < \text{SPI6} \leq 1,5$)	41	9,60	25	5,85	38	8,90
Normal ($-0,99 < \text{SPI6} \leq 0,99$)	297	69,56	230	53,86	288	67,45
Sequía Moderada ($-1,5 < \text{SPI6} \leq -1$)	42	9,84	32	7,49	28	6,56
Sequía Severa ($-2 < \text{SPI6} \leq -1,5$)	12	2,81	9	2,11	12	2,81
Sequía Extrema ($\text{SPI6} \leq -2$)	10	2,34	111	26,0	40	9,37

El modelo MPI-ESM1.2-HR estima 32, 9 y 111 eventos de sequía moderada, severa y extrema, respectivamente, lo que representa el 35,6% del total y el máximo entre los 3 modelos. Por su parte, el modelo MRI-ESM2.0 estima el 18,74% y el HadGEM3 14,99% del total. Este último identifica un mayor porciento de periodos entre moderados y extremadamente húmedos con 15,26%.

La Figura 3 muestra el índice estandarizado de precipitación para 6 meses (SPI6) según el escenario SPP5-8.5 del modelo HadGEM3. Se destacan, por su intensidad y duración 10 eventos de sequía extrema ($\text{SPI6} \leq -2$), según el escenario SPP5-8.5 del modelo HadGEM3. Sobresalen por la severidad de la sequía, con valores del SPI clasificados en la categoría de extremadamente seco, los periodos de mayo 2035 hasta diciembre 2035 con un SPI6 máximo de -3.09, abril-diciembre 2050 de hasta -2.7, septiembre 2020 hasta septiembre 2021 SPI de hasta -2.27, y de sequía severa el de noviembre 2037 hasta noviembre 2038 con un SPI6 de -1,29.

Estos resultados están en concordancia con los publicados por otros autores como (Almonacid et al., 2024; Cook et al., 2020; Hidalgo et al., 2024; Zhao & Dai, 2022) que confirman al escenario SPP5-8.5 como el más crítico con sequías más frecuentes, de mayor duración y severidad; por lo que se espera un clima más extremo y seco que el actual.

Este índice permite también identificar periodos húmedos, en este caso particular se muestran periodos húmedos con valores por encima de 2, desde enero 2039-junio 2040, septiembre 2040-marzo 2042 y entre junio 2039-agosto 2039, con valores entre 2,19 y 2,42 entre diciembre 2040 y febrero 2041.



Nota: Rojo/azul indica condiciones secas/húmedas. Las barras rojas que caen por debajo de las líneas horizontales rozada, amarillas y azules representan sequía extrema, severa y moderada, línea negra es el umbral definido a -0,5.

Figura 3. Serie temporal de Índice estandarizado de precipitación para 6 meses (SPI6) según el escenario SPP5-8.5 del modelo HadGEM3, para Artemisa durante el periodo 2015-2050.

CONCLUSIONES

- El comportamiento de la precipitación anual varió entre 1246,25 y 2109,76 mm. De los tres modelos el MPI-ESM1.2-HR estima los valores más altos de precipitaciones en 22 de los 36 años estudiados, y todos por encima al promedio anual actual para Cuba de 1335 mm.
- Las precipitaciones mensuales promedio estimadas por los tres modelos presentan valores que van desde 48,64 en el mes de enero hasta 309,20 mm en

junio, con coeficientes de variación por encima de 21% en todos los meses con excepción de agosto y septiembre.

- El número de eventos de sequía para el periodo 2015-2050 varió entre 24 y 69 según el modelo, el MPI-ESM1.2-HR estima la mayor cantidad de eventos con 1 o más meses, así como la cantidad de meses por debajo del umbral definido (-0,5) con 194 eventos.
- Se destacan, por su intensidad y duración 10 eventos de sequía extrema ($SPI6 \leq -2$), según el escenario SPP5-8.5 del modelo HadGEM3. Sobresalen por la severidad de la sequía, con valores del SPI clasificados en la categoría de extremadamente seco, los periodos de mayo 2035 hasta diciembre 2035 con un SPI6 máximo de -3.09, abril-diciembre 2050 de hasta -2.7, septiembre 2020 hasta septiembre 2021 SPI de hasta -2.27, y de sequía severa el de noviembre 2037 hasta noviembre 2038 con un SPI6 de -1,29.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almonacid, L., Pessacg, N., Díaz, B. G., & Peri, P. L. (2024). Caracterización espacio-temporal de las sequías meteorológicas en Santa Cruz en el contexto de cambio climático. *Meteorologica*, 035, e035. <https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>
- Bonel, N. S., González Morinigo, É. C., Bontempi, M. E., Marcora, M. G., & Ferreira, L. J. (2023). *Boletín agrometeorológico mensual: marzo 2023* (Vol. 3).
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6).
- Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L., & Gachuz Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): Nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669-693. <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- GEAF Artemisa. (2023). *Actualización programa desarrollo de las cooperativas altamente productivas de Alquizar* [Informe]. Grupo Empresarial Agropecuario y Forestal Artemisa, Cuba.
- Gutiérrez, E. O. P., & González, Y. M. (2024). Lluvia anual y estacional en Cuba. Influencia de índices climáticos. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(4).
- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H., & Stössel, A. (2019). Max planck institute earth system model (MPI-ESM1. 2) for the high-resolution model intercomparison project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241-3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>
- Herrera, J., Duarte, C., Cisneros, E., & González, F. (2025). Effect of climate change on irrigation demand for rice (*Oriza sativa* L.) under Cuban conditions. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 34.
- Hidalgo, A., Pérez, G., & Cruz, I. (2024). Proyección de los regímenes de temperatura y precipitación en la provincia Holguín, Cuba a partir del modelo climático HadGEM-ES. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(3).
- IPCC. (2023). *Sexto Informe de Evaluación*.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., & Gomis, M. I. (2021). Summary for policymakers. IPCC (2021). <https://doi.org/doi:10.1017/9781009157896.001>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *17*(22), 179-183.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. 233-236.
- Morán Armendáriz, J. R., Novillo Coello, M. J., & Cedeño, J. (2022). Selección de los Modelos de Proyección para el Cambio Climático del CMIP6 con mejor desempeño para el territorio ecuatoriano.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., & Lowe, J. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Planos, E., Barros, O., & Carrasco, A. (2000). *Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ministerio de Ciencias, Tecnologías y Medio Ambiente (CITMA, La Habana, Cuba.
- Planos, E. O. (2014). *Síntesis informativa sobre impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba*. Sello Editorial AMA, La Habana.
- Planos, E. O., & Martínez, Y. (2024). Lluvia anual y estacional en Cuba. Influencia de índices climáticos. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(4).
- Rodríguez, F. (2005). *Mapa Isoyético de Cuba 1960-2000*. Memoria técnica del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Rodríguez, F. (2006). Nuevos logros en el estudio de la pluviosidad en Cuba Mapa Isoyético para el periodo 1961-2000. *Voluntad hidráulica*, 98, 2-14.
- Sellar, A. A., Jones, C. G., Mulcahy, J. P., Tang, Y., Yool, A., Wiltshire, A., O'connor, F. M., Stringer, M., Hill, R., & Palmieri, J. (2019). UKESM1: Description and evaluation of the UK Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4513-4558.
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). *Standardized precipitation index: User guide*.
- Villazón Gómez, J. A., Noris Noris, P., & García Reyes, R. A. (2021). Uso del índice de precipitación estandarizado para la evaluación de la intensidad de la sequía en la provincia de Holguín. *Idesia (Arica)*, 39(4), 103-109.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., & Hosaka, M. (2019). The Meteorological Research

- Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(5), 931-965.
- Zhang, Y., Wang, P., Chen, Y., Yang, J., Wu, D., Ma, Y., Huo, Z., & Liu, S. (2023). The optimal time-scale of Standardized Precipitation Index for early identifying summer maize drought in the Huang-Huai-Hai region, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101350.
- Zhao, T., & Dai, A. (2022). CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes and their causes in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 35(3), 897-921.