



Variaciones hidroclimáticas superficiales observadas en Cuba durante el período 1961-2022

Observed surface hydroclimatic variations in Cuba during the period 1961-2022

Abel Centella-Artola^{1*}, Ranses Vázquez-Montenegro¹, Dimitris A. Herrera²³ y Cecilia Fonseca-Rivera¹

¹Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba, Apdo. 17032, C.P. 11700, Habana 17.

²Department of Geography & Sustainability. The University of Tennessee-Knoxville, Knoxville, TN, EE.UU.

³Instituto Geográfico Universitario, Universidad Autónoma de Santo Domingo, Santo Domingo 10103, República Dominicana.

*Autor para correspondencia: abelcentella@gmail.com

RESUMEN: Las condiciones hidroclimáticas superficiales ejercen una influencia decisiva en múltiples sectores económicos, sociales y ambientales, por lo que resulta crucial estudiarlas. La presente investigación se realizó con el objetivo de analizar las variaciones de la precipitación, la evapotranspiración potencial (ET_0), el balance hídrico climático ($P-ET_0$) y la sequía en Cuba durante el período 1961-2022, con énfasis en las escalas temporal y espacial. Para ello, se emplearon bases de datos en rejilla para la precipitación y la ET_0 con 4 km de resolución. Se calcularon tendencias mediante las pruebas de Mann-Kendall y de Sen, y se analizó la sequía mediante el índice estandarizado de precipitación (SPI3). Los principales resultados mostraron que la precipitación no presentó tendencias estadísticamente significativas a escala nacional, aunque se detectaron áreas con reducciones notables en la región oriental. La ET_0 mostró un incremento estadísticamente significativo en todo el país, especialmente en el período poco lluvioso. El balance hídrico no reflejó una tendencia nacional estadísticamente significativa, pero evidenció reducciones locales notables en varias regiones. La frecuencia de sequías no se incrementó, aunque su duración e intensidad mostraron patrones espaciales heterogéneos. Se concluyó que las variaciones hidroclimáticas en Cuba presentan una complejidad espacial considerable, lo que subraya la necesidad de análisis espacialmente detallados para la gestión de recursos hídricos y la adaptación climática.

Palabras clave: precipitación, evapotranspiración, balance hídrico, sequía, tendencias espaciales.

ABSTRACT : Surface hydroclimatic conditions exert a decisive influence on multiple economic, social, and environmental sectors, making their study crucial. This research was conducted to analyze variations in precipitation, potential evapotranspiration (ET_0), the climatic water balance ($P-ET_0$), and drought in Cuba during the period 1961-2022, with an emphasis on temporal and spatial scales. To this end, gridded precipitation and ET_0 datasets with a 4 km resolution were used. Trends were calculated using the Mann-Kendall and Sen tests, and drought was analyzed using the Standardized Precipitation Index (SPI3). The main results showed that precipitation did not exhibit statistically significant trends at the national scale, although areas with notable reductions were detected in the eastern region. ET_0 showed a statistically significant increase throughout the country, especially during the dry season. The water balance did not reflect a statistically significant national trend, but it did evidence notable local reductions in several regions. Drought did not increase, although its duration and intensity showed heterogeneous spatial patterns. It was concluded that hydroclimatic variations in Cuba are spatially complex, underscoring the need for spatially detailed analyses for water resource management and climate adaptation.

Keywords: precipitation, evapotranspiration, water balance, drought, spatial trends.

INTRODUCCIÓN

Las variaciones y cambios en las condiciones hidroclimáticas superficiales afectan significativamente a diversos sectores económicos, sociales y ambientales (Jiménez et al., 2014; Ault, 2020). Estos cambios se cuentan entre las principales consecuencias del cambio climático, debido a las alteraciones observadas y proyectadas en el balance hídrico. En efecto, de acuerdo con la relación de Clausius-Clapeyron, existe una fuerte asociación entre el

vapor de agua y la temperatura. Por ello se estima que, por cada 1 K de calentamiento, la capacidad de retención de agua de la atmósfera se incrementa en un 7% (Allan et al., 2014; Trenberth, 2011). En una revisión de la literatura reciente, Herrera et al. (2023) indican que las variaciones espaciales de esos cambios son complejas y presentan una tasa inferior a la estimada por Clausius-Clapeyron. En síntesis, estas modificaciones se asocian tanto al calentamiento como a cambios en la dinámica atmosférica, así como a la influencia de factores regionales y locales que actúan como mecanismos de retroalimentación.

Recibido: 16/04/2026

Aceptado: 23/05/2026

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Redacción- borrador inicial, Redacción - revisión y edición, Visualización, Supervisión: Abel Centella Artola. Metodología, Redacción - revisión y edición, Validación: Ranses Vázquez Montenegro. Metodología, Validación, revisión y edición: Dimitris Herrera. Conceptualización, revisión y edición: Cecilia Fonseca Rivera



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/>



De acuerdo con Pérez et al. (2013), los valores anuales de lluvia durante el período 1961-2007 no mostraron tendencias estadísticamente significativas en Cuba. No obstante, se observó un ligero y continuo incremento desde finales de la década de 1970, principalmente a partir de 1990. Según esos autores, las anomalías de lluvia del período lluvioso reflejaron una gran variabilidad interanual, con una tendencia significativa a la reducción de los acumulados en la región oriental del país. También indicaron un incremento de la variabilidad de los acumulados extremos de precipitación en la región central, mientras que en la región oriental ocurrió lo contrario.

Planos et al. (2005) demostraron que durante el período 1965-1990 los eventos de lluvias de más de 100 mm, relacionados con frentes fríos y bajas extratropicales, presentaron diferentes patrones de variación entre las regiones de Cuba. Estos autores señalaron que, mientras en las regiones occidental y central la tendencia era al incremento, en la región oriental ocurría lo contrario.

La sequía es uno de los eventos hidrometeorológicos más estudiados en Cuba. Se ha determinado que entre las causas de los eventos de sequía ocurridos en el período posterior a 1961, se destacaba la persistente y progresiva influencia anticiclónica sobre la región (Lapinel et al., 2006; Lapinel et al., 2007). La mayor influencia anticiclónica favorecía los movimientos descendentes del aire, lo que creaba condiciones desfavorables para la precipitación. Si bien los hallazgos de esas investigaciones demostraban el incremento en la frecuencia de los eventos de sequía hasta el año 2006, reportes posteriores (CITMA, 2020) indicaron que, tomando en cuenta los años más recientes, no hay evidencia de incremento en la frecuencia de estos eventos.

Las variaciones temporales de otros elementos relacionados con las condiciones hidrometeorológicas superficiales, como la evapotranspiración o el balance hídrico climático, han sido menos estudiadas. Se conoce que la evapotranspiración (ET) se refiere a los procesos combinados por los cuales el agua se transfiere desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera. Esto es, la evaporación de agua líquida o sólida, más la transpiración de las plantas (WMO, 1981). La ET es una parte importante del ciclo del agua y del clima local. Su determinación desempeña un papel clave en el riego agrícola y la gestión de los recursos hídricos. Debido a las limitaciones para medir las magnitudes de la ET real, así como para calcular la correspondiente a cada tipo de vegetación o cultivo específico, se estima la evapotranspiración potencial (ET_0) asociada a un cultivo y condiciones de humedecimiento de referencia hipotéticas. En esencia, ET_0 es una aproximación útil para cuantificar los flujos de agua desde la superficie hacia la atmósfera.

Recientemente, Planos (2022) encontró tendencias positivas en la evapotranspiración y negativas en la relación precipitación-evapotranspiración. Según este autor, los resultados obtenidos permitieron ratificar la idea expuesta en CITMA (2015) de que el clima de Cuba estaba cambiando de húmedo a sub-húmedo.

Sin duda, las investigaciones previas han incrementado el conocimiento sobre los componentes de las condiciones hidroclimáticas superficiales en Cuba. Sin embargo, la mayor parte de los análisis se han realizado con datos agregados a escala regional o nacional. Esta agregación impide evaluar adecuadamente las variaciones espaciales. Asimismo, los estudios han abordado componentes aislados. Tales enfoques no facilitan la comprensión de sus interrelaciones.

En este contexto, el presente estudio analiza las variaciones hidroclimáticas superficiales observadas en Cuba durante el período 1961-2022. Este análisis constituye una actualización de los resultados anteriores. Además, profundiza en el comportamiento de la evapotranspiración y el balance hídrico climático. A diferencia de las investigaciones precedentes, se pone énfasis tanto en variaciones espaciales como en las temporales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los valores mensuales de precipitación (P) utilizados proceden de la base de datos SOLVAZ (Solano et al. 2003a). Este producto nacional se basa en una rejilla de 4 km de resolución espacial, actualizada sistemáticamente por el Servicio de Vigilancia del Clima del Instituto de Meteorología (INSMET) a partir de las estaciones del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

También se utilizaron los valores de ET_0 disponibles en una rejilla de puntos de 4 km de resolución. Dichos valores se calcularon mediante el método de Penman-Monteith, a partir de la información proporcionada por las estaciones del INSMET (Solano et al. 2003b). Los datos de precipitación abarcan el período 1961-2022, mientras que los de ET_0 abarcan el período 1975 a 2022.

Con la información de ambas bases de datos se estimaron los valores del balance hídrico climático, representado por las diferencias $P-ET_0$. Este cálculo se realizó con el fin de evaluar el efecto combinado de esos dos importantes componentes del ciclo hidrológico (P y ET_0) y del balance hídrico. En este último caso no se consideraron otros elementos que influyen en el balance (p.ej. los relativos al escurrimiento). Todas las variables se analizaron para los períodos estacionales poco lluvioso (PPLI, noviembre-abril) y lluvioso (PLI, mayo-octubre), así como para los valores anuales.

El estudio de la sequía meteorológica se desarrolló sobre la base del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) (McKee et al., 1993). Este índice se calculó y analizó según las facilidades del sistema R_SVSequía desarrollado por Centella et al. (2023), con el empleo del lenguaje de programación R (R Core Team, 2017). El análisis se concentró en los valores del SPI con acumulados de lluvia de 3 meses (SPI3). El SPI3 es el que se utiliza en Cuba para el monitoreo de la sequía (Centella et al., 2023) y sirve de base para clasificar los déficits de lluvia en tres categorías: débil ($-0,5 \geq SPI3 > -1,0$), moderada ($-1,0 \geq SPI3 > -1,5$) y severa ($-1,5 \geq SPI3 > -2,0$), según la metodología propuesta por Lapinel et al. (2014).

A partir de los valores del SPI3 se calcularon la duración, severidad e intensidad de los eventos de sequía. El procedimiento empleado fue similar al de otros autores (Halwatura et al., 2015; Cavus and Aksoy, 2020, Fuentes et al., 2022). El procedimiento empleado fue el siguiente:

1. Se identificaron los eventos de sequía ocurridos en toda la serie. En este caso, un evento de sequía sucede cuando se tienen valores consecutivos de SPI3 iguales o inferiores a un umbral determinado. El umbral empleado fue -0.5, que es el valor utilizado para definir la ocurrencia de la sequía en Cuba (Lapinel et al., 2014).
2. La severidad se relaciona con el efecto acumulado de la sequía y se calculó como:

$$S = \sum_{i=1}^D |\text{SPI3}| \quad (1)$$

Donde S es la severidad y D la duración del evento.

3. La intensidad se determinó entonces por:

$$I = \frac{S}{D} \quad (2)$$

Donde I es la intensidad, S es la severidad y D la duración

El análisis estadístico descriptivo de D, S e I permitió caracterizar el comportamiento general de los eventos de sequía identificados en el período 1961-2022. Dicho análisis se realizó para cada punto de la rejilla de 4 km. En cada punto se calcularon las magnitudes medias y máximas de la duración, severidad e intensidad.

Para los valores máximos de D, S e I, también se determinó la fecha de ocurrencia. Esta fecha se refiere al año de inicio de los eventos en que ocurrieron los mayores valores de esas tres características de la sequía.

A partir de la información de todas las variables, se realizó un análisis de tendencia. Este análisis consideró las series de los valores anuales y los correspondientes a los períodos PPLI y PLI. En el caso de la duración e intensidad de la sequía, no es posible realizar la evaluación en períodos estacionales, no es lógico.

Para estimar la tendencia y su significación estadística se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1970). La magnitud de la tendencia se estimó con el estimador de la pendiente de Sen (PS), que es una prueba no paramétrica basada en el estadígrafo Tau de Kendall (Sen, 1968). Para identificar las tendencias significativas se utilizó el nivel de significación $\alpha = 0,05$.

A diferencia de estudios previos, las tendencias también se calcularon para cada uno de los puntos de rejilla de 4km. El objetivo fue ofrecer una representación más clara y directa de las variaciones espaciales que la mostrada en resultados anteriores (Lapinel et al., 2006, 2007; Pérez et al., 2013; Planos 2022). En este tipo de análisis espacial se

realiza la evaluación simultánea de pruebas de hipótesis múltiples en datos en puntos de rejilla, los cuales están correlacionados espacial y temporalmente. Los resultados suelen malinterpretarse al sobrevalorarse su significación estadística (Livezey and Chen 1983). Esto ocurre porque aumenta la tasa de rechazo incorrecto de la hipótesis nula, lo cual se conoce como “False Discovery Rate” (tasa de falso descubrimiento o *FDR*, por sus siglas en inglés). *FDR* también puede definirse como el valor esperado de la proporción de falsos positivos, dentro de todas las hipótesis nulas rechazadas (“descubrimientos”) (Cortés et al., 2020).

Con base en lo anterior, se utilizó el procedimiento propuesto por Wilks (2016) para controlar el *FDR*, basado en el método descrito por Benjamini y Hochberg (1995). El control del *FDR* se realiza con p-valores más pequeños para rechazar la hipótesis nula en cada punto de la rejilla, manteniendo el nivel de significación establecido (i.e. $\alpha = 0,05$), según las múltiples pruebas que se realizan. Los detalles del método utilizado pueden verse en Wilks (2016), quien también afirma que ese procedimiento puede interpretarse como un enfoque al marco metodológico tradicional de “significación de los campos”. En este trabajo el análisis del *FDR* se realizó mediante el paquete de R *FDRestimation* (Murray y Blume, 2022). Sus resultados son los que permiten indicar (en los mapas) los puntos de rejilla cuya tendencia es estadísticamente significativa.

En el caso particular de la precipitación, también se realizó un análisis de tendencia mediante el método de estimación descrito por Şen (2012, 2014 y 2017), denominado ITA (Innovative Trend Analysis). Este método, simple e intuitivo, se ha empleado con frecuencia en el análisis de la tendencia de variables hidroclimáticas (Haktanir & Çitakoglu 2014; Kisi & Ay 2014; Ay & Kisi 2015; Tabari & Willems 2015, entre otros). El ITA parte de dividir la serie de datos en dos partes iguales (P y S: primera y segunda mitades, respectivamente). Los valores de ambas subseries son ordenados de menor a mayor y luego se plotean en un diagrama de dispersión, donde la primera mitad de la serie se coloca en el eje X y la segunda en el eje Y. La diagonal 1:1 (45°) refleja la línea de no tendencia, ya que si los datos de las subseries son iguales, la representación gráfica de los puntos de la primera serie respecto a la segunda caerá sobre esa línea (Figura 1).

La desviación de los datos respecto a la diagonal indica la existencia de tendencia, cuya pendiente puede ser determinada por la diferencia vertical del centroide de los datos respecto a esa diagonal. El valor de la pendiente puede ser obtenido como se muestra en la ecuación insertada en la esquina superior izquierda de la figura 1. Donde $\bar{P}$ y $\bar{S}$ son los valores medios de P y S, respectivamente.

Con los datos de una de las dos mitades, los valores de la serie bajo estudio se pueden clasificar en tres categorías, agrupándolos de acuerdo con las magnitudes de los percentiles 25 y 75. Así, los valores bajos serán los inferiores al percentil 25, los medios se ubicarán entre el percentil 25 y el 75, y los altos serán superiores al 75.

Este procedimiento permite obtener información adicional sobre el comportamiento de la tendencia en las series de datos. Precisamente, esta característica del método fue la que se empleó en el estudio de la tendencia de los valores de precipitación.

En el ITA, la significación estadística de la pendiente se determina a partir de la función de densidad de probabilidades gaussiana con media cero y desviación estándar 1. La descripción detallada de la fundamentación para el cálculo de la significación puede encontrarse en Şen (2017). Sin embargo, como se dijo antes, el ITA se utilizó como método complementario. Por esa razón, no se hace referencia a la significación estadística de los valores.

El período de referencia para el cálculo de las anomalías de precipitación, evapotranspiración, balance hídrico climático y de los valores del SPI fue 1991-2020. Todo el procesamiento de la información se realizó con el empleo del lenguaje de programación R (R Core Team, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación

La evaluación de las variaciones de la precipitación (P) en Cuba indica que no existen tendencias estadísticamente significativas en las series de los acumulados anuales, ni en las correspondientes a los períodos poco lluvioso (noviembre-abril) o lluvioso (mayo-octubre). El principal rasgo que sobresale al analizar el período 1961-2022 (Figura 2) es que las variaciones interanuales, y luego las de escala decadal o multidecadal, constituyen las influencias dominantes en las series de lluvia en Cuba.

Las variaciones decadales o multidecadales se observan con mayor claridad en los períodos estacionales PPLI y PLI. Incluso, entre ellos, esas variaciones son opuestas. Por ejemplo, para el PPLI (Figura 2b) se destaca la sucesión de tres intervalos de aproximadamente 20 años (1961-1980, 1981-2000, 2001-2022), donde las anomalías que predominan son primero negativas, luego positivas y finalmente negativas. En el PLI (Figura 2c), existe un comportamiento similar, pero con signo opuesto (i.e. primero anomalías positivas, luego negativas y después positivas).

Al comparar los valores de los tres subperíodos mencionados, se detectaron diferencias estadísticamente significativas en el caso del PPLI, mientras que para los valores anuales y del PLI no las hay. La figura 3 muestra un resumen de los resultados obtenidos mediante la prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) junto con la prueba ad hoc de Dunn (Dunn, 1961; Dunn, 1964). Como se observa, las diferencias estadísticamente significativas se producen entre el primer período y el segundo, así como entre el segundo y el tercero. No obstante, en general, el tamaño del efecto es pequeño.

Las variaciones observadas no son homogéneas en todo el país, pues existen áreas donde las tendencias de los acumulados anuales son estadísticamente significativas a consecuencia de los valores acumulados en el PLI

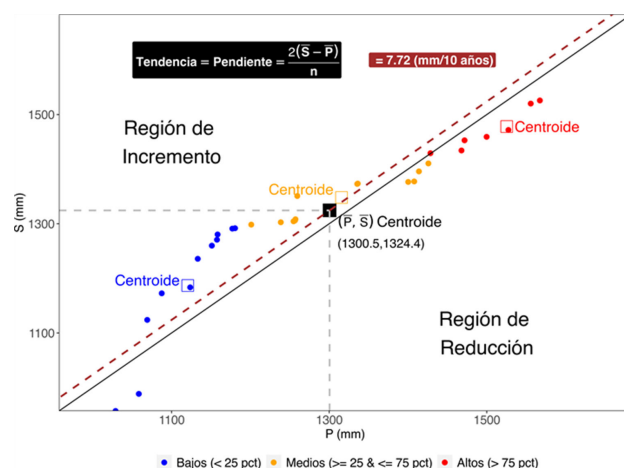


Figura 1. Ejemplo del método ITA propuesto por Şen (2012). Los puntos azules, naranja y rojo se corresponden con las agrupaciones de valores bajos, medios y altos, respectivamente. Esas agrupaciones son determinadas por los valores de los percentiles (pct) 25 y 75 de la primera o la segunda mitad.

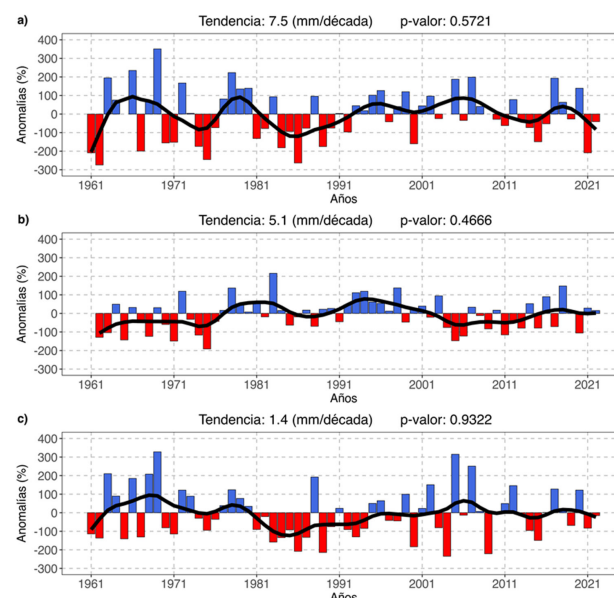


Figura 2. Anomalías (mm) de P en Cuba relativas al promedio del período 1991-2020. a), b) y c) son las series de los totales anuales y de los períodos poco lluvioso y lluvioso, respectivamente. Las líneas negras resaltan las variaciones decadales. En el tope de cada panel se indica la tendencia en milímetros cada 10 años, junto con el p-valor.

(Figura 4). Destacan las zonas ubicadas al sur de Camagüey y de las provincias más orientales, donde se aprecian reducciones importantes (estadísticamente significativas) de los acumulados anuales y del PLI (Figura 4 a y c). En estos casos, la tasa de reducción es cercana a 50 mm/década. En las propias provincias orientales también se identificaron áreas con tendencias estadísticamente significativas, en las cuales los acumulados de lluvia aumentaron sus valores con una tasa cercana a 80-100 mm/década.

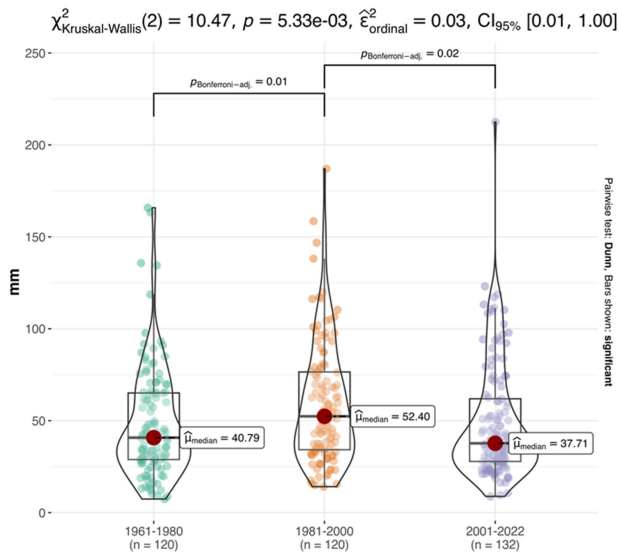


Figura 3. Comparación de los tres períodos de años 1961-1980, 1981-2000 y 2001-2022 para los valores acumulados de lluvia (mm) en el período seco. La etiqueta en el borde superior del gráfico muestra la prueba realizada, el valor del estadígrafo, el p valor, el tamaño del efecto y el intervalo de confianza. Los valores de cada período aparecen representados como puntos, diagrama de caja y bigotes, así como densidad de la distribución (violín). En cada grupo se destaca el valor de la mediana (puntos rojos al centro de la caja). Las barras horizontales unen los grupos donde hay diferencias estadísticamente significativas y sobre las mismas se ubica el valor del p ajustado y el nombre del método empleado.

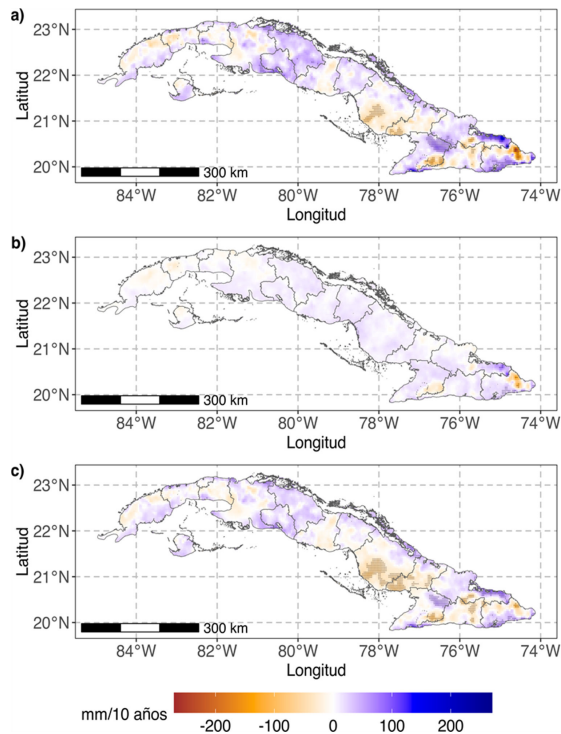


Figura 4. Tendencia (mm/10 años) de los totales anuales, período poco lluvioso y lluvioso, a b y c, respectivamente. Las zonas punteadas destacan las tendencias significativas.

El análisis de la tendencia mediante el método ITA (Figura 5) permitió confirmar los resultados obtenidos con MK y PS mostrados en la figura 2. En este caso se observó que, en las series para toda Cuba correspondientes a los períodos anual, PPLI y PLI, los valores bajos y medios tienden a crecer, pero los acumulados altos tienden a disminuir para el anual y PLI.

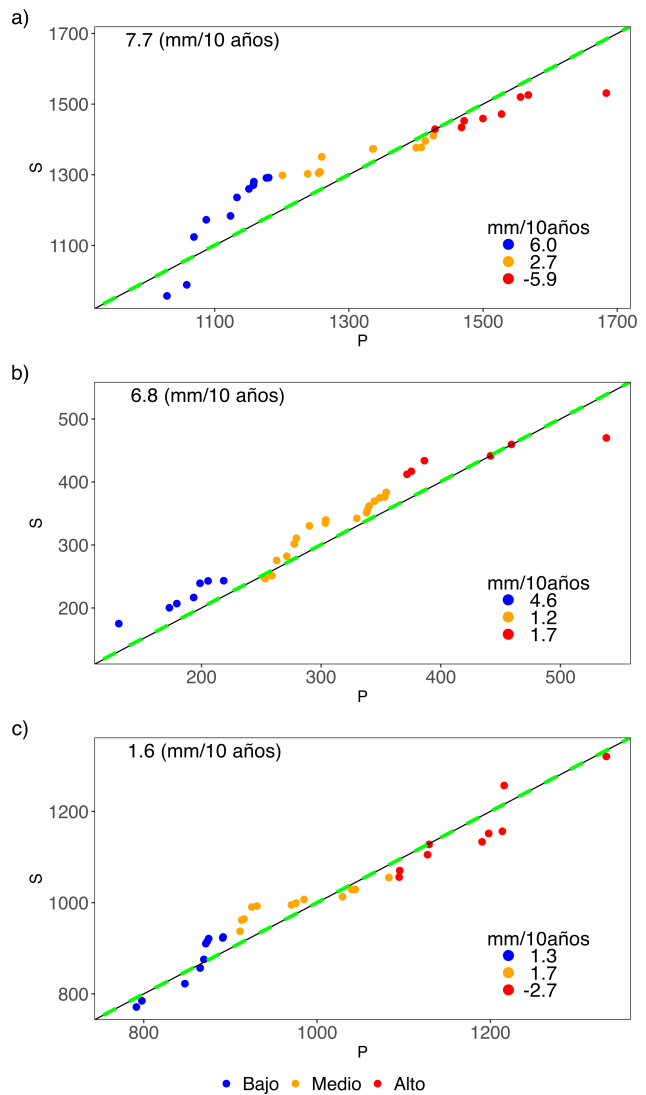


Figura 5. Resultados de la aplicación del método ITA a las series anual, PPLI y PLI de la lluvia promediada para toda Cuba. P y S son primera y segunda mitad de la serie. Los valores en la parte inferior derecha de cada panel son las tendencias (mm/10 años) de los valores bajos, medios y altos de las series correspondientes. Para más detalles ver figura 1.

En la figura 6 se aprecia que en casi todo el país los valores altos de lluvia presentan una tendencia a la reducción, mientras que los valores bajos y medios tienden a aumentar. El patrón para las tres categorías no es homogéneo, y existen zonas donde la tendencia a la reducción o aumento se aprecia en los tres niveles.

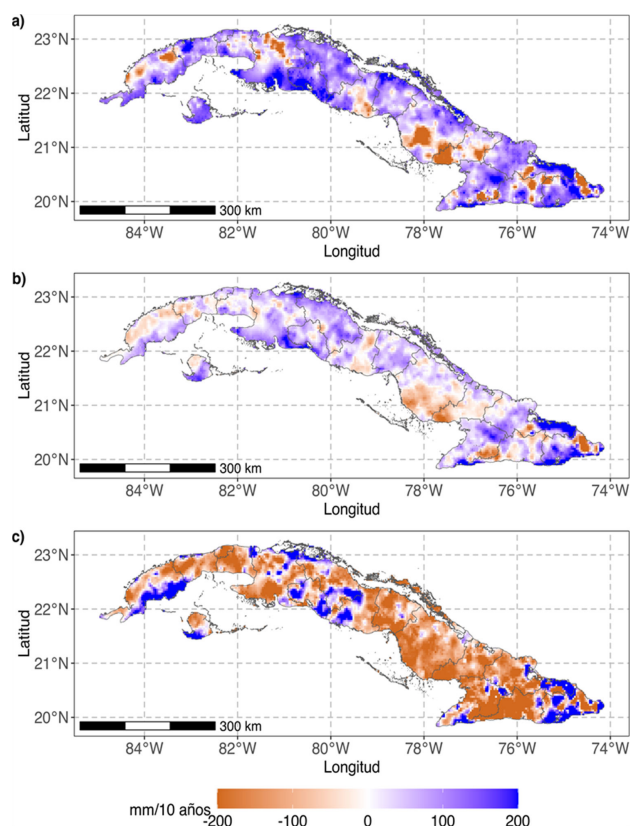


Figura 6. Áreas con tendencia al incremento (azul) y reducción (marrón) de los valores bajos (a), medios (b) y altos (c) identificados con el método ITA para los acumulados anuales de lluvia en el período 1961-2022.

Evapotranspiración

El análisis de los datos de ET_0 estimados por Solano et al. (2003b) indica que los flujos de agua desde la superficie hacia la atmósfera muestran una tendencia al incremento en el período 1975-2022 (Figura 7). Dicha tendencia resulta estadísticamente significativa en las series de valores anuales y del PPLI. En la figura 7 (a, c y e) se observa que después del año 2004 inició el predominio de las anomalías positivas. Este predominio se hace más intenso después del 2015.

La tendencia al incremento de ET_0 se manifiesta en todo el país (Figura 7 b, d y f). Durante el PPLI, sin embargo, esa tendencia no es significativa en ningún lugar. En general, las pérdidas de agua hacia la atmósfera fueron más intensas en la región occidental y en algunas áreas de la región oriental de la isla. Únicamente en las zonas montañosas del centro de Cuba y en el extremo este de Guantánamo la tendencia de ET_0 fue negativa.

Balance hídrico climático

En el período 1975-2022, $P-ET_0$ presentó una tendencia negativa, lo que indica un mayor incremento de las pérdidas respecto a las entradas de agua, pero esa tendencia no resultó significativa (Figura 8a). Espacialmente, el comportamiento es heterogéneo y se observan áreas donde la escasez hídrica crece significativamente con magnitudes que superan los 10 mm/década (Figura 8b).

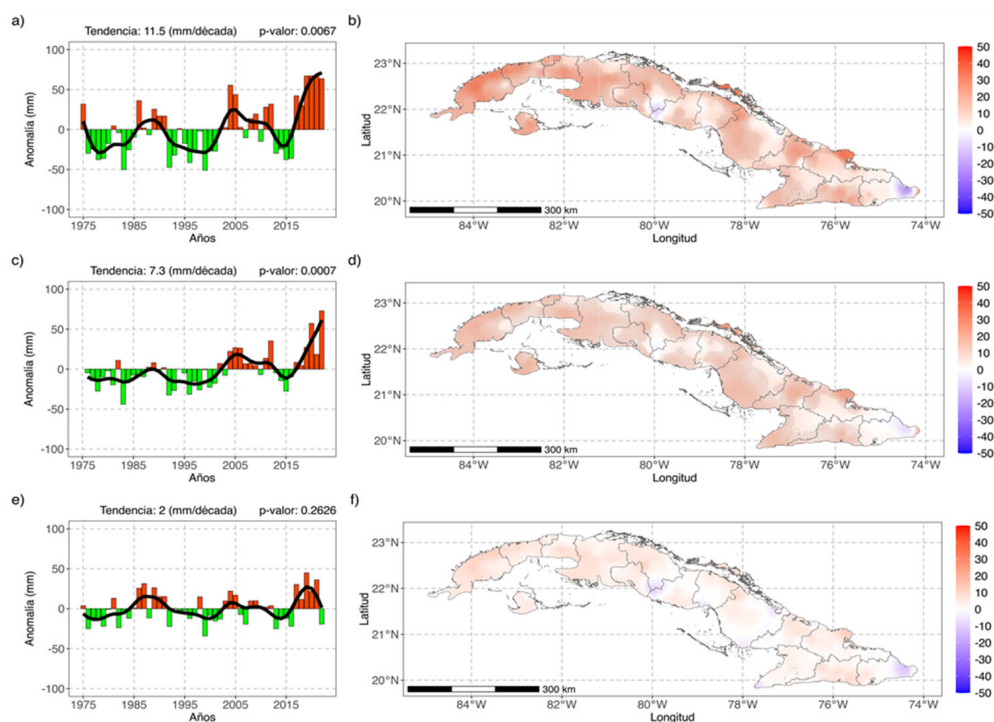


Figura 7. Anomalías (mm) de la evapotranspiración en Cuba relativas al promedio del período 1991-2020 (paneles de la columna izquierda) y tendencia de ET_0 (mm/10 años) (paneles de la columna derecha). a, c y e, se describen como en la figura 1, mientras que b, d y f, se describen como en la figura 2.

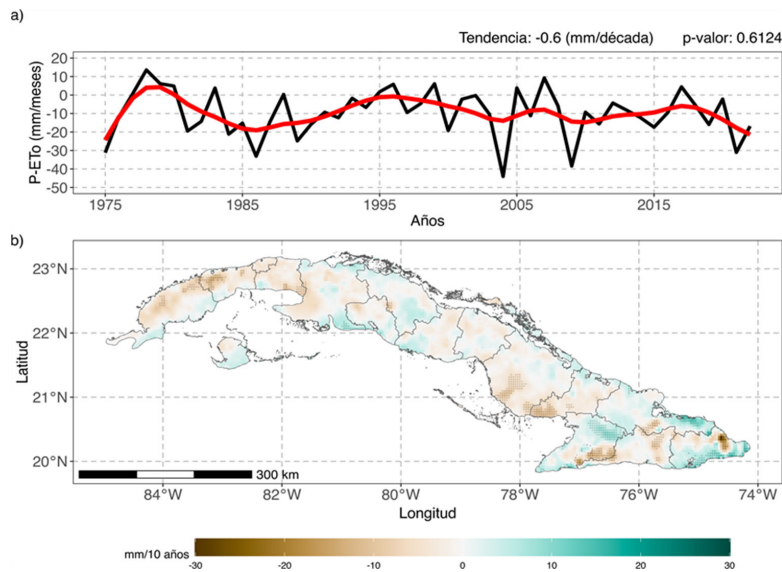


Figura 8. Cambios en precipitación menos evapotranspiración. (a) Variación temporal de los valores anuales de $P-ET_0$ (mm meses^{-1}). La línea roja resalta las variaciones decadales. (b) Tendencia de $P-ET_0$ en el período 1975-2022. Las zonas punteadas resaltan las tendencias significativas.

Las áreas donde $P-ET_0$ se redujo significativamente se localizan fundamentalmente en la zona occidental de Cuba, en la mitad sur de Camagüey y Las Tunas, así como en pequeñas porciones más al oeste. Los incrementos se ubican en el centro de Cuba (no significativos) y en áreas de la región oriental (estadísticamente significativos). En las cinco provincias más orientales del país se encuentran los mayores contrastes entre las reducciones y los incrementos estadísticamente significativos. Aunque el patrón espacial no puede explicarse con claridad, es posible que se relacione con cambios termodinámicos asociados a la topografía de esa zona.

Sequía

Durante el período 1961-2022, el número de eventos de sequía en Cuba osciló entre 70 y 108 (Figura 9a), aunque en algunas pequeñas zonas de la región oriental, principalmente montañosas, el número de eventos fue menor. Como promedio, la duración de esos eventos fue de tres meses continuos, con magnitudes de SPI3 inferiores a -0.5 , y solo en áreas muy aisladas la duración fue superior (Figura 9b). Los mayores valores de intensidad promedio se localizaron principalmente en la mitad oriental de Cuba, aunque sobre Villa Clara y Cienfuegos también se observan valores elevados de I (Figura 9c).

En general, la distribución espacial de los eventos de sequía con mayor duración e intensidad (Figura 10 a y b) resultó muy similar a la observada en los valores medios (Figura 9 b y c). Se observa que el 38% de las áreas donde ocurrieron máximos valores de D se relacionan con eventos posteriores a la década de 1990 (Figura 10c). Estos eventos pueden asociarse con las sequías que afectaron a Cuba en los períodos 2003-2005 y 2009-2010. Por otro lado, la mayor parte de las sequías de mayor intensidad sucedieron en la década de 1990 y en las anteriores (Figura 10d).

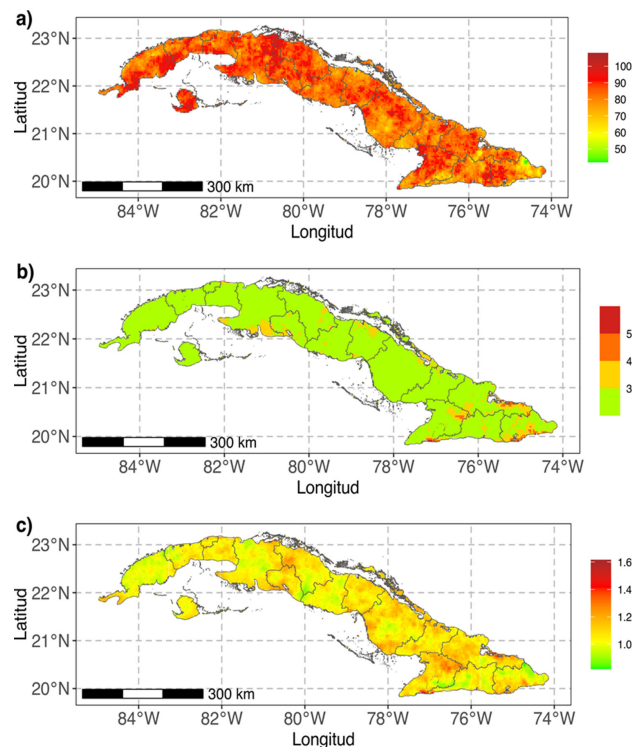


Figura 9. Estadísticas generales de los eventos de sequía en el período 1961-2022. a) cantidad total de eventos de sequía, b) duración media y c) intensidad promedio.

Las tendencias de D e I presentaron una distribución espacial heterogénea (Figura 11 a y b), que resulta más evidente en el caso de la duración. Sin embargo, existen zonas donde se aprecia un incremento de ambos indicadores. Ese incremento indica que, en esos lugares, la severidad de los eventos de sequía aumentó a una tasa superior a la observada en D. No obstante, el incremento de I no es estadísticamente significativo.

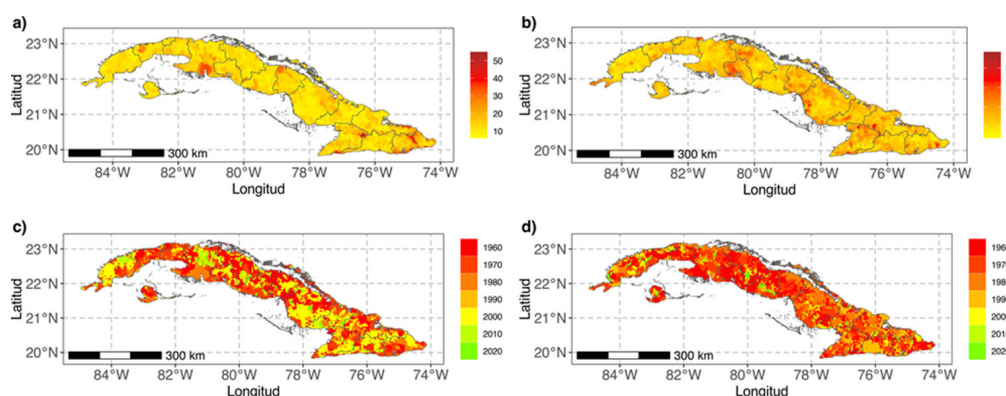


Figura 10. Distribución de los valores máximos de duración (a) e intensidad (b) en el período 1961-2022. En c y d se muestran las fechas de los valores de duración e intensidad, respectivamente. Las fechas se reflejan como las décadas en las que se identificaron los eventos.

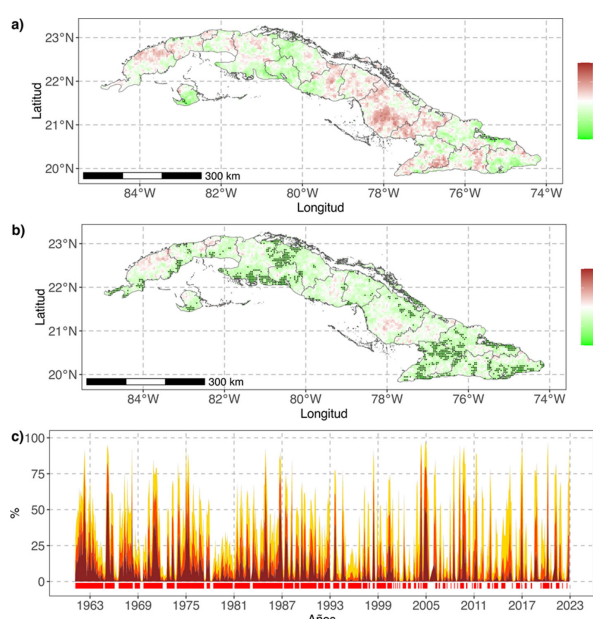


Figura 11. Tendencia en la duración (a) e intensidad (b) de los eventos de sequía. Se muestran las magnitudes del estadígrafo Z de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, cuyos valores positivos y negativos reflejan aumentos o reducciones (estadísticamente significativas en las áreas punteadas). En c) se muestra la variación de la extensión espacial de los déficits débiles (D), moderados (M) y severos (S) entre 1961 y 2022; el ancho de los rectángulos rojos ubicados en el borde inferior es proporcional al número de meses consecutivos en que el área afectada por la sequía estaba en el rango del 5% al 30%. Todas las gráficas se basan en los valores del SPI3.

La estructura espacial de la tendencia de D (Figura 11a) es similar a la apreciada en la lluvia anual (Figura 4a). Eso indica que, en las áreas donde los acumulados anuales tendieron a ser menores, D mostró un incremento que llegó a ser significativo en la mitad sur de Camagüey. Por otro lado, la intensidad reflejó una tendencia a la disminución. Las áreas con reducciones estadísticamente significativas aparecen al este de la región occidental, así como en las provincias orientales (Figura 11b).

En el período analizado, la extensión superficial de los eventos de sequía no presentó una tendencia definida al aumento o a la reducción (Figura 11c). Sin embargo, el porcentaje de área afectada por déficit moderados y severos tendió a disminuir, con valores de Z de Mann-Kendall de -3,995 y -9,070, respectivamente. Estos resultados son estadísticamente significativos, ya que los p-valores alcanzan $6,45 \times 10^{-5}$ y $1,19 \times 10^{-19}$, respectivamente.

En la Figura 11c se observa también que, durante los años de la primera mitad del período de estudio, los procesos de sequía que afectaban a Cuba de forma espacialmente extensa tuvieron una mayor duración que aquellos que ocurrieron en la segunda mitad de la serie. Por ejemplo, al considerar el rango de extensión superficial del 5% al 30%, se nota claramente que en los últimos años los eventos fueron mucho menos prolongados, pues el ancho de los rectángulos rojos es más pequeño que durante la primera mitad del período analizado. Esta característica presentó una tendencia negativa y estadísticamente significativa, con $Z = -5,46$ y $p\text{-valor} = 4,4 \times 10^{-8}$.

La evaluación de las condiciones hidroclimáticas superficiales en Cuba durante los últimos 62 años muestra que las variaciones observadas en la precipitación estuvieron dominadas por la variabilidad interanual y multidecadal, sin que se observen tendencias estadísticamente significativas al aumento o a la reducción de los valores. Por un lado, este resultado reafirma los hallazgos de otros autores (Centella et al., 1997; Pérez et al., 2013), quienes destacaron la ausencia de tendencias significativas en las series de precipitación anual y del PLI. Por otro lado, la existencia de variaciones en la escala multidecadal y su comportamiento opuesto entre el PPLI y el PLI sugieren que no se trata de tendencias contrarias en los acumulados de ambos períodos. Estos resultados no corroboran la idea sugerida por Centella et al (1997) de que existe un proceso de redistribución de las precipitaciones entre el PLI y el PPLI.

Se comprobó que, a nivel espacial, existen zonas del país con tendencias positivas y negativas que son estadísticamente significativas, las cuales se concentran en la mitad oriental de Cuba, aunque en la región occidental también se intercalan zonas de incremento y

reducción. Lo anterior indica que la conclusión de que no existen tendencias significativas en la precipitación en Cuba (Centella et al., 1997; Pérez et al., 2013) no debe interpretarse como un fenómeno espacialmente generalizado. Se reconoce que las causas del patrón observado en el oriente no están claras. Aunque ello podría relacionarse con las características particulares de la topografía de esa región y con la interacción de la circulación regional y local con el relieve, es necesario profundizar en la investigación de los posibles procesos que dan lugar a ese comportamiento.

Un aspecto novedoso de esta investigación es la determinación de las modificaciones en los niveles de magnitud de los acumulados de lluvia. En términos generales, se comprobó que los altos valores de los acumulados anuales de lluvia muestran una tendencia a ser menos frecuentes, mientras que las magnitudes más bajas muestran la tendencia opuesta. Sin embargo, en aquellas zonas donde existen tendencias negativas y estadísticamente significativas de los totales anuales, la magnitud de los valores bajos, medios y altos también tiende a ser menor. Este hallazgo requiere un análisis más profundo para comprender si sus causas están directamente relacionadas con las variaciones de los eventos climáticos extremos asociados a la lluvia (i.e. frecuencia de días muy lluviosos, días consecutivos secos, entre otros), con la contribución de las precipitaciones asociadas a los ciclones tropicales, con las bajas tropicales y con los procesos de la circulación.

Los resultados indican que la demanda evaporativa de la atmósfera se incrementó significativamente. Ese incremento obedece fundamentalmente a los altos valores de ET_0 observados durante los años posteriores al 2014. Las evidencias sugieren que ese aumento se relaciona principalmente con la tendencia creciente de la temperatura del aire en Cuba y con el aumento de la radiación solar, este último asociado a la disminución observada en la nubosidad total (INSMET, 2025). El incremento estadísticamente significativo de los valores anuales de ET_0 es bastante generalizado espacialmente y se debe principalmente al intenso crecimiento de sus magnitudes en los meses del PPLI. Durante el PPLI, las tendencias al aumento no son significativas en ninguna zona de Cuba.

Cuando los valores del balance hídrico climático se agregan a escala nacional, no se observaron cambios importantes en la serie del período 1975-2022. Este resultado no respalda la idea expresada por otros autores sobre la existencia de una transición o cambio de un clima húmedo hacia uno sub-húmedo (CITMA, 2015; Planos, 2022). Por el contrario, las evidencias obtenidas sugieren que el comportamiento de la relación $P-ET_0$ está dominado por variaciones interanuales y decadales. Las diferencias entre los resultados podrían atribuirse a dos factores: por un lado, la menor cantidad de datos empleados en los trabajos anteriores para realizar conclusiones extensivas a todo el país; por otro lado, la formulación de conclusiones sin evaluar el rechazo de la hipótesis nula en un nivel de significación determinado.

Los hallazgos de este estudio indican que la distribución espacial de las tendencias de $P-ET_0$ es semejante a la de los totales anuales de lluvia en el período 1975-2022 (no mostrado). Sin embargo, resulta sobresaliente la reducción significativa de los valores en algunas zonas de Pinar del Río, Camagüey y las provincias orientales. En todos estos casos se presenta un efecto combinado de mayor reducción de los acumulados de lluvia con incrementos significativos de ET_0 . Esta combinación reduce notablemente la disponibilidad de agua en esas regiones y crea condiciones adversas con impactos negativos para sectores como la agricultura y los recursos hídricos.

Se corroboró objetivamente que la frecuencia de ocurrencia de la sequía en Cuba es bastante similar en todo el territorio. La cantidad de eventos identificados entre 1961 y 2022 oscila entre 70 y 100, excepto en pequeñas áreas donde el número fue cercano a 50. Se ha demostrado que la severidad promedio de este fenómeno es también bastante homogénea en todo el país.

En general, la duración máxima de los eventos de sequía identificados se relaciona con los ocurridos antes de la década de 1990, aunque cerca del 38 % de Cuba tuvo eventos de duración máxima en décadas más recientes. Así mismo, la intensidad de la sequía resultó mayor durante los años de la primera mitad del período considerado. La determinación de estas estadísticas contribuye a una mejor comprensión de ciertos aspectos espacio-temporales de este fenómeno en Cuba, los cuales hasta ahora han sido analizados de forma bastante dispersa.

Las evidencias obtenidas confirman que la cantidad de eventos de sequía desde 1961 hasta 2022 no presentó cambios significativos, en concordancia con lo expresado en CITMA (2020). De hecho, la distribución espacial de los valores de la pendiente del número de sequías durante esos años (no se muestra) tuvo una estructura espacial muy ruidosa de aumentos y disminuciones estadísticamente no significativos. De la misma forma, la duración de los eventos reflejó un aumento en muchos lugares del territorio cubano, con una distribución espacial similar a la de la tendencia de los totales anuales de lluvia, pero en este caso no se encontró significación estadística en ningún punto de rejilla. En cuanto a la intensidad, se demostró que esta se redujo en áreas al este de la región occidental y en las cuatro provincias localizadas en el extremo este del país.

Se confirmó que la extensión superficial de la sequía ha mostrado variaciones de interés. Por un lado, aunque las áreas afectadas por este evento no presentan una tendencia definida durante los años analizados, los déficit moderados y severos han manifestado una reducción en su extensión superficial. Por otro lado, la duración de los eventos que afectaron extensiones superficiales superiores al 5 % e inferiores a la cuarta parte del país se redujo de manera sustancial, lo que indica que en años recientes ese fenómeno impacta las áreas de Cuba con una duración menor y con una intensidad más reducida, por lo que, en general, resultan menos severos.

CONCLUSIONES

En términos generales, los resultados aquí mostrados permiten concluir lo siguiente:

1. Las variaciones de la precipitación en Cuba (1961-2022) están dominadas por la variabilidad interanual y multidecadal, sin que se detecten tendencias estadísticamente significativas a escala nacional. Sin embargo, espacialmente existen áreas con tendencias estadísticamente significativas, tanto positivas como negativas, principalmente en la región oriental, lo que evidencia una heterogeneidad que no se refleja en los promedios nacionales.
2. La evapotranspiración potencial (ET_0) muestra un incremento estadísticamente significativo y generalizado en el período 1975-2022, atribuible al aumento de la temperatura y la radiación solar. Este incremento es más pronunciado en la región occidental y durante el período poco lluvioso, lo que indica un aumento en la demanda evaporativa de la atmósfera.
3. El balance hídrico climático ($P-ET_0$) no presenta una tendencia estadísticamente significativa a nivel nacional, lo que no respalda la hipótesis de un cambio generalizado de clima húmedo a sub-húmedo. No obstante, la reducción significativa de $P-ET_0$ en zonas como Pinar del Río, Camagüey y las provincias orientales revela una disminución local de la disponibilidad hídrica.
4. La frecuencia de eventos de sequía no muestra un incremento en el período 1961-2022, y su extensión superficial no presenta una tendencia definida. Sin embargo, se observa una reducción significativa en la duración de los eventos que afectan áreas extensas y en la intensidad de los déficits moderados y severos, lo que indica una menor severidad general de la sequía en las últimas décadas.
5. Los resultados demuestran la necesidad de superar la visión exclusivamente agregada a escala nacional para comprender adecuadamente las variaciones hidroclimáticas en Cuba, dado que existen patrones espaciales contrastantes que quedan ocultos en los promedios nacionales. Se recomienda profundizar en la investigación de los procesos físico-climáticos que explican las tendencias observadas en la región oriental, así como en el comportamiento diferencial de los extremos de precipitación. Asimismo, resulta prioritario evaluar las implicaciones que la creciente demanda evaporativa y la reducción del balance hídrico en zonas específicas tienen sobre la seguridad hídrica y la agricultura cubana.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la contribución de los proyectos “Variaciones y Cambios del Clima en

Cuba. Pasado, presente y futuro” y “Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático” del Programa Nacional “Cambio Climático en Cuba: Impactos, Adaptación y Mitigación”.

BIBLIOGRAFÍA

- Allan, R. P., Liu, C., Zahn, M., Lavers, D. A., Koukouvagias, E., & Bodas-Salcedo, A. (2014). Physically consistent responses of the global atmospheric hydrological cycle in models and observations. *Surveys in Geophysics*, 35(3), 533-552. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9213-z>
- Ault, T. R. (2020). On the essentials of drought in a changing climate. *Science*, 368(6488), 256-260. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5492>
- Ay, M., & Kisi, O. (2015). Investigation of trend analysis of monthly total precipitation by an innovative method. *Theoretical and Applied Climatology*, 120, 617-629. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1198-8>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 57, 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Cavus, Y., & Aksoy, H. (2020). Critical drought severity/intensity-duration-frequency curves based on precipitation deficit. *Journal of Hydrology*, 584, 124312. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124312>
- Centella, A., Naranjo, L., Paz, L., Cárdenas, P., Alfonso, A., Ballester, M., Lapinel, B., González, C., Pérez, R., Limia, M., & Sosa, M. (1997). *Variaciones y cambios del clima en Cuba* (Informe del Centro Nacional del Clima). Instituto de Meteorología.
- Centella-Artola, A., Fonseca-Rivera, C., & González-García, I. (2023). R_SVsequia: Nuevo servicio climático automatizado para el monitoreo de la sequía meteorológica en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 29(4), Epub December 01, 2023. Retrieved October 14, 2025.
- CITMA. (2015). *Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. <https://unfccc.int/documents/104917>
- CITMA. (2020). *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- Cortés, J., Mahecha, M., Reichstein, M., & Brenning, A. (2020). Accounting for multiple testing in the analysis of spatio-temporal environmental data. *Environmental and Ecological Statistics*, 27, 293-318. <https://doi.org/10.1007/s10651-020-00452-4>
- Dunn, O. J. (1961). Multiple comparisons among means. *Journal of the American Statistical Association*, 56(293), 54-64. <https://doi.org/10.1080/01621459.1961.10482090>
- Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6(3), 241-252. <https://doi.org/10.2307/1266041>

- Fuentes, I., Padarian, J., & Vervoort, R. W. (2022). Spatial and temporal global patterns of drought propagation. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.979848>
- Haktanir, T., & Citakoglu, H. (2014). Trend, independence, stationarity, and homogeneity tests on maximum rainfall series of standard durations recorded in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000973)
- Halwatura, D., Lechner, A. M., & Arnold, S. (2015). Drought severity-duration-frequency curves: A foundation for risk assessment and planning tool for ecosystem establishment in post-mining landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 1069-1091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1069-2015>
- Herrera, D. A., Cook, B. I., Fasullo, J., Anchukaitis, K. J., Alessi, M., Martinez, C. J., & coautores. (2023). Observed changes in hydroclimate attributed to human forcing. *PLOS Climate*, 2(11), e0000303. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000303>
- INSMET (2025). Variaciones y cambios del clima en Cuba. Presente y futuro. Reporte Final de Proyecto. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. 260 pp.
- Jiménez Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, B., Cogley, J. G., Döll, P., Jiang, T., & Mwakalila, S. S. (2014). Freshwater resources. En C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects* (pp. 229-269). Cambridge University Press. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap3_FINAL.pdf
- Kendall, M. G. (1970). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- Kisi, O., & Ay, M. (2014). Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*, 513, 362-375. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.005>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Lapinel, B. P., Rivero, R.E., Rivero, R.R., Varela, N., Cutié, V. y Fonseca, C. (2006). El Sistema Nacional de Vigilancia y Predicción de la Sequía en Cuba: Caso de Estudio. En "Solano, O., H. Shannon y R. Villalobos (Eds.) (2006): Informe del Grupo de Trabajo sobre Meteorología Agrícola de la AR IV".
- Lapinel, B., Fonseca, C., Cutié, V., Boudet, D. (2007). Movimientos troposféricos verticales sobre Cuba y sus características en condiciones de lluvias medias y extremas. Centro del Clima, Instituto de Meteorología.
- Lapinel, B. P., Fonseca, C., González, I., González, C., & coautores. (2014). Metodología para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por intensa sequía. En *Cuba: Metodologías para la determinación de riesgos de desastre a nivel territorial*. PNUD-Cuba. <https://www.undp.org/es/cuba/publicaciones/metodologias-para-la-determinacion-de-riesgos-de-desastres-parte-1>
- Livezey, R. E., & Chen, W. Y. (1983). Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques. *Monthly Weather Review*, 111, 46-59. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1983\)111<0046:SFSAID>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<0046:SFSAID>2.0.CO;2)
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184). American Meteorological Society. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Murray, M., & Blume, J. (2022). *FDRestimation: Estimate, plot, and summarize false discovery rates* (Versión 1.0.1) [Paquete de R]. CRAN. <https://CRAN.R-project.org/package=FDRestimation>
- Pérez, R., Fonseca, F., Lapinel, B., González, C., González, I., Planos, E., Cutié, V., Mitrani, I., Aguilar, Gisell., Carnesoltas, M., Ballester, M., Limia, M., Vega, R., Vichot, A., Díaz, O., Pérez, A., Coangas, R., Álvarez, L., Morales, A., Viamontes, J., Pérez J. (2013). Variaciones y cambios en el clima. en *Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba* [Planos, Rivero, R., Guevara, V. (editores)]. Editorial AMA. Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. 430 pp. ISBN: 978-959-300-039-0.
- Planos, E. (2022). Aproximación a los recursos hídricos potenciales en Cuba al 2030. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(1), 48-62. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10076063>