

Efectos del calentamiento global sobre los procesos de la circulación atmosférica en el hemisferio norte durante el periodo 1899-2019



<https://cu-id.com/2377/v30n4e02>

Effects of global warming on atmospheric circulation processes in the northern hemisphere during the period 1899-2019

Edgardo Soler Torres*, Luis B. Lecha Estela

Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, Isla de la Juventud, Cuba.

RESUMEN: La evolución de los Mecanismos Elementales de la Circulación Atmosférica en el hemisferio Norte es presentada utilizando la clasificación de Dzerdzeevskii, que en la actualidad abarca una serie de datos de 121 años (1899-2019) con información diaria. Se describen las características de su comportamiento multianual y estacional, utilizando las frecuencias de ocurrencia y sus anomalías en las distintas épocas del periodo de estudio y estaciones del año. El resultado demuestra la existencia de correlaciones estadísticamente significativas entre las anomalías anuales de las circulaciones meridionales del hemisferio Norte y las anomalías anuales de la temperatura media global, lo que permite establecer el grado de similitud en la relación entre los comportamientos de los procesos formadores del clima y el forzamiento externo que representa el calentamiento global sobre el sistema climático. También, se determinan los grupos, tipos de circulaciones y subtipos MEC predominantes en el hemisferio Norte que poseen una tendencia estadísticamente significativa y pueden asociarse al aumento reciente de los fenómenos meteorológicos peligrosos y de los efectos meteoro-tropicos extremos que afectan a los habitantes de la región.

Palabras claves: Anomalías de la temperatura media global, Calentamiento global, Cambio climático, Circulaciones zonales y meridionales, Mecanismos elementales de la circulación atmosférica.

ABSTRACT: The paper presents the evolution of the Elementary Mechanisms of Atmospheric Circulation in the Northern Hemisphere, applying the Dzerdzeevskii classification, which currently covers a data series of 121 years (1899-2019) with daily information. The characteristics of its multiannual and seasonal behavior were described, by means of the frequencies of occurrence and its anomalies at different times of the study period and seasons of the year. The result demonstrates the existence of statistically significant correlations between the annual anomalies of the southern circulations of the Northern Hemisphere and the annual anomalies of the global average temperature. It allows establishing the degree of similarity in the relationship between the behaviors of the climate-forming processes and the external forcing that global warming represents for the climate system. In addition, the predominant groups, types and subtypes of circulation mechanisms in the Northern Hemisphere were identified. They have a statistically significant trend and can be associated with the recent increase of dangerous meteorological phenomena and extreme meteor-tropic effects that affect the inhabitants of the region.

Keywords: Anomalies of global average temperature, Global warming, Climate change, Zonal and meridional circulations, Elementary mechanisms of atmospheric circulation.

INTRODUCCIÓN

La publicación inicial sobre la clasificación de los mecanismos elementales de circulación (MEC) en latitudes extratropicales del hemisferio Norte fue escrita por B. L. Dzerdzeevskii y colaboradores en 1946. Sin embargo, para entonces, la posibilidad de reducir toda la variedad de circulaciones ciclónicas a

solo varios tipos característicos estaba bajo discusión científica.

Luego de los descubrimientos de la existencia de ciclones y anticiclones, así como, del desarrollo del análisis frontal, la investigación de los procesos sinópticos en la antigua Unión Soviética pasó a una nueva fase, permitiendo la generalización teórica de grandes volúmenes de datos sinópticos primarios.

*Autor para correspondencia: *Edgardo Soler Torres*. E-mail: edgardosoler2@gmail.com

Recibido: 02/03/2024

Aceptado: 03/06/2024

Conflicto de Intereses: Los autores del artículo declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Edgardo Soler Torres y Luis B. Lecha Estela han tenido una contribución equivalente en todos los aspectos relativos a la elaboración del artículo.

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/)

Científicos como Alisov (1950), Dzerdzeevskii (1968), Alisov y Poltarau (1974) y Vitvitzkii (1986) desarrollaron, en el Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de la antigua URSS, la climatología de los procesos de la circulación general de la atmósfera en el hemisferio Norte. Para ello diseñaron una clasificación de los procesos de intercambios de masa y energía, basada en el número de vórtices ciclónicos que contienen las penetraciones meridionales y el número de anticiclones de bloqueo presentes en las circulaciones zonales, utilizando la información sinóptica de superficie y del nivel geopotencial de 500 hPa, para identificar los principales MEC.

Sábina y Jmelevskaya (1984) extienden la clasificación hasta los años 80 del siglo XX, ordenan y explican los patrones climatológicos del hemisferio Norte, considerando sus características en el nivel de superficie y en 500 hPa. Para cada MEC se describen las características de sus marchas anuales y multianuales.

A finales de la primera década del siglo XXI fue publicado el resultado “Los mecanismos de circulación del hemisferio Norte según la clasificación de Dzerdzeevskii”, (Kononova, 2009), importante antecedente para esta investigación, pues contiene la cronología diaria de los MEC, desde el 1 de enero de 1899 hasta el 31 de diciembre del año 2008 (110 años).

Resultados posteriores sobre este tema ya incluyen la climatología sinóptica de los procesos de ambos hemisferios, ofreciendo una visión global de los procesos de intercambios de masa y energía (Kononova, 2016), lo cual es fundamental para comprender la dinámica actual, las tendencias futuras del clima y sus impactos potenciales sobre la vida del hombre en el planeta.

Estos resultados están siendo aplicados en diversas partes del mundo. Así lo demuestran los trabajos realizados por Lebedeva et. al. (2019) sobre los cambios en las circulaciones atmosféricas y las características regionales del clima en dos localidades remotas durante el siglo XX. Posteriormente, Kononova y Lupo (2020) examinaron las fluctuaciones a largo plazo de la circulación atmosférica global con las teleconexiones en el hemisferio Norte, incluyendo los procesos de bloqueos, y la temperatura de la superficie en el período 1899-2018.

En Cuba, los resultados obtenidos por Celeiro (1999) permitieron comparar la dinámica de la circulación atmosférica en el hemisferio Norte con las anomalías térmicas en Cuba occidental, reflejando un aumento de la temperatura superior a 1,5 ° C desde finales del siglo XVIII (195 años), y demostrando, que el clima cubano de los últimos 400 años era más frío y seco, modificándose desde mediados del siglo XIX con precipitaciones más variables y extremas.

En este trabajo se presenta el comportamiento de los MEC en el hemisferio Norte, para una serie de datos de 121 años, que incluye el análisis del comportamiento multianual y estacional de los grupos hemisféricos, tipos de circulaciones zonales y meridionales, así como, de los subtipos MEC predominantes. Se calculan las correlaciones estadísticas entre las anomalías anuales de las circulaciones zonales y meridionales del hemisferio Norte y las anomalías anuales de la temperatura media global. También, se determinan las tendencias a los grupos, tipos de circulaciones y subtipos MEC predominantes del hemisferio Norte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como fuentes fundamentales de información se emplearon:

- a. La base de datos de la clasificación de los mecanismos elementales de circulación de Dzerdzeevskii (MEC, 2019).

Esta base de datos contiene las frecuencias absolutas de ocurrencia diaria de los MEC desde 1899 a 2019. Su tipificación se fundamenta en la presencia o ausencia de procesos de bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos, su dirección y número en el hemisferio, así como, en las características de la circulación predominante en el polo. Sus anomalías fueron calculadas para el periodo de estudio 1899-2019 y para el periodo de referencia 1951-1980.

Se definen cuatro grupos de circulación (GC), 13 tipos y 41 subtipos diferentes de mecanismos elementales de circulación (MEC), es decir, “procesos homogéneos de la circulación atmosférica” que constituyen la unidad básica de la clasificación, según Dzerdzeevskii (1962).

Las características de los grupos de circulación están determinadas por la cantidad de bloqueos anticiclónicos, de intercambios ciclónicos y por el valor de la presión atmosférica en el polo (Tabla 1), según explica Dzerdzeevskii (1962, 1968), con la actualización posterior de Kononova (2009).

La clasificación consiste en determinar el tipo de circulación predominante en las diferentes regiones geográficas del hemisferio, para lo cual se identifica la dirección principal del flujo de masa y energía en la troposfera baja, a partir de las componentes o dirección predominante del viento en superficie.

La designación de cada MEC incluye números y letras, el número indica el tipo y las letras las diferencias dentro un tipo, lo que conforma los subtipos. En el caso de las letras a, b, c y d indican diferencias en la dirección (sectores) de las invasiones árticas ó de las penetraciones de ciclones desde el sur, mientras, w y s (invierno y verano en inglés) representan las diferencias estacionales de los MEC,

Tabla 1. Características de los grupos de circulación hemisféricos.

Grupos MEC	Tipos MEC	Presión en el Ártico	Bloqueos anticiclónicos	Intercambios Ciclónicos
Zonal	1 y 2	Alta	0	2 a 3
Zonal perturbado	3 al 7	Alta	1	2 a 3
Meridional del norte	8 al 12	Alta	2 a 4	2 a 4
Meridional del sur	13	Baja	0	3 a 4

según el signo de los campos de presión atmosférica sobre los océanos y continentes. Sin embargo, en los tipos MEC 4, 9 y 10, según Kononova (2009), los subtipos 4a, 9b y 10a son de invierno y están designados por las letras iniciales del alfabeto.

b) La base de datos de las anomalías de la temperatura media global, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la NASA (GISS, 2023).

Esta base de datos contiene las anomalías mensuales de la temperatura media global de tierra y océanos desde 1880 hasta 2022, calculadas para el periodo de referencia 1951-1980.

Para determinar las tendencias a las series de datos estudiadas se aplicaron las pruebas estadísticas Wald-Wolfowitz, Spearman, Mann-Kendall y Pettitt, utilizando el programa TrendSoft (Roura et al., 2020).

RESULTADOS

La variabilidad multianual

En el transcurso de los 121 años comprendidos en el período 1899-2019 las frecuencias relativas anuales de los grupos de circulación (GC) muestran regularidades interesantes en su comportamiento climático a largo plazo. El grupo GC I que caracteriza el flujo zonal, aumenta gradualmente su frecuencia durante las primeras cuatro décadas del siglo XX, alcanzando su máximo anual en 1938, después mantiene un comportamiento estable hasta un nuevo máximo relativo en 1992 (Fig. 1).

El flujo zonal perturbado (GC II) disminuye progresivamente sus frecuencias de 150 días anuales en la década de los años 40 hasta solo 50 días anuales en 1960. Después, se mantiene entre 51 y 100 días anuales hasta fines de la década de los 80, para

reiniciar la tendencia descendente hasta el final de la serie, con la excepción del año 2014.

El flujo meridional del norte (GC III) es el predominante anual y mantiene una frecuencia por encima de 150 días anuales en casi toda la serie, excepto dos períodos de menor incidencia que se observan durante la década de los años 30 del siglo XX y entre 1983 y 1992. Los grupos de circulación GC I, II y III no tienen tendencia definida.

Por su parte, los flujos meridionales (GC III + IV) han sido predominantes durante la mayor parte del periodo de estudio, siendo de ellos el GC III el de mayor frecuencia anual. El GC IV muestra dos períodos de mayor frecuencia: el primero entre 1982 y el año 2008, caracterizado por notables fluctuaciones de un año a otro en la década del 90 del siglo XX; mientras, que el segundo período de mayor frecuencia es reciente y puede estar aún en desarrollo, a partir de su inicio en el año 2016.

El flujo meridional del sur (GC IV) es el único grupo de circulación con tendencia significativa creciente, cuyo punto de cambio fue determinado en el año 1961. Durante su comportamiento mantiene una frecuencia anual inferior a los 50 días anuales hasta 1960, año a partir del cual comienza un aumento gradual que alcanza su máximo en varios años de la década de los 90, para después disminuir durante la primera década del siglo XXI y presentar un nuevo ciclo de ascenso en años recientes.

Una imagen coherente del comportamiento de los tipos de circulación se obtiene al integrar los días de la muestra en dos grupos, según las dos componentes principales del flujo atmosférico (Fig. 2).

Las frecuencias de los flujos zonales (GC I + II) muestran una disminución paulatina desde la década de los años 30 del siglo XX, con dos periodos bien definidos: el primero desde 1931 hasta 1970; y el segundo desde 1980 hasta el presente.

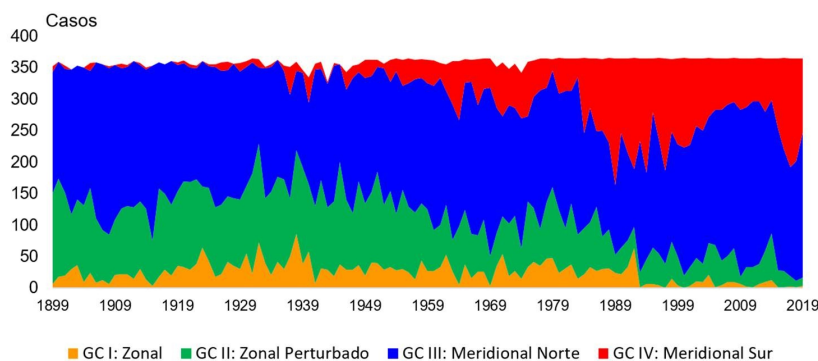


Figura 1. Frecuencias absolutas anuales (apiladas) de los grupos de circulación (1899-2019).

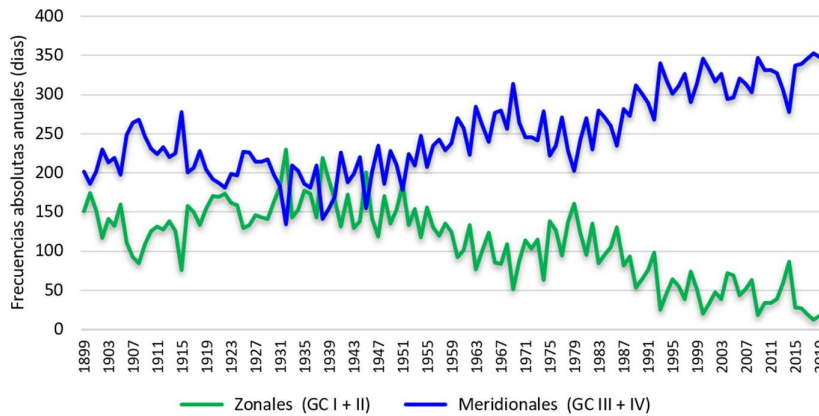


Figura 2. Frecuencias absolutas anuales de los días con circulaciones zonales y meridionales (1899-2019).

De los resultados obtenidos por la aplicación de las pruebas estadísticas Wald-Wolfowitz, Spearman, Mann-Kendall y Pettitt (Roura et al., 2020), se puede afirmar la existencia de una tendencia significativa creciente con punto de cambio en el año 1958 para las circulaciones meridionales, al nivel de confianza de 95 %, mientras, para las circulaciones zonales no se determinó una tendencia. En su comportamiento se identifican tres ciclos de alrededor de 40 años a lo largo de la serie temporal, donde se aproximan los valores de las dos componentes: a inicios de la serie, década de los años 30, a fines de la década de los años 70; y más recientemente, a mediados de la década 2011-2020.

Sin embargo, el único ciclo que se cierra es el primero. A partir de la década del 30 del siglo XX las frecuencias absolutas de los grupos de circulación integrados no vuelven a unirse para cerrar ciclo; aunque en los años 1979 y 2014 se aprecia que la circulación general de la atmósfera (CGA) trata de acercar las frecuencias de ambos grupos, sin lograrlo. Desde 1980 los valores de frecuencias de ambos grupos se separan gradualmente en el transcurso de la serie.

Anomalías de las circulaciones y de la temperatura

El análisis de las anomalías de las frecuencias anuales absolutas de los días con circulaciones zonales y meridionales, calculadas según el promedio de 1901-2000, ratifica el resultado anterior; pero ahora se identifican ciclos de mayor duración, el aumento de los flujos meridionales y la disminución de los flujos zonales (Fig. 3).

Es evidente, que después de un aparente equilibrio en la dinámica de los mecanismos de circulación hemisféricos, ha ocurrido una ruptura de los ciclos precedentes a 1970. Se aprecia un cambio cualitativo en las marchas multianuales entre los años 1964 y 1987, año a partir del cual comienzan a predominar tendencias opuestas y definidas en las anomalías de los flujos zonales y meridionales: descienden los primeros y aumentan los segundos, respectivamente, hasta el presente. Se debe destacar que desde el año 2015 se ha incrementado nuevamente el transporte meridional de masa y energía en la troposfera baja (Kononova, 2016), aumentando los daños anuales por ciclones invernales y tornados en los EE.UU. (Ramírez, 2022), así como, se reporta un aumento global de olas de calor estivaes (Lecha, 2018).

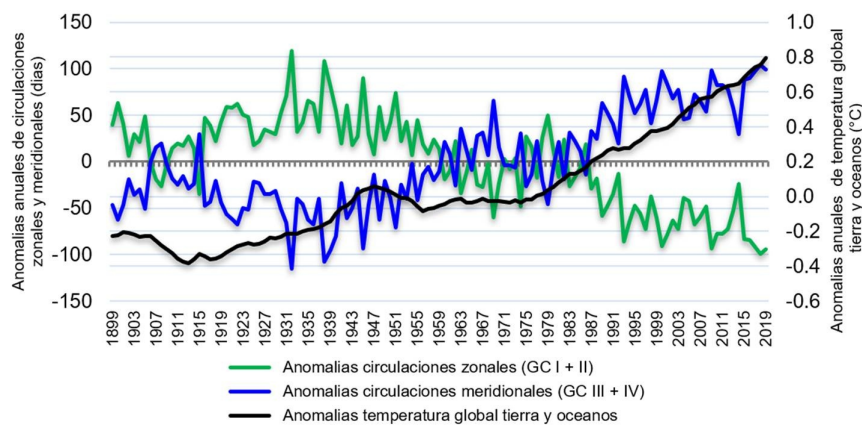


Figura 3. Anomalías anuales de los días con circulaciones zonales y meridionales y de la temperatura media global (1899-2019).

La interpretación física de estos resultados ofrece aspectos relevantes. En primer lugar, se identifican claramente dos etapas con una duración similar, alrededor de 60 años cada una. La primera indica un ciclo cerrado de los procesos de intercambios que realiza la CGA, o sea, el sistema climático está estable y los principales procesos de la circulación planetaria garantizan las transferencias de los excesos de masa y energía que pueden ocurrir a nivel global. Sin embargo, en la segunda etapa no se logra mantener la estabilidad climática, los procesos de intercambios no cierran el nuevo ciclo, y como característica dominante aumentan de manera persistente los flujos meridionales, al tiempo que proporcionalmente disminuyen los zonales, llegando al punto de casi desaparecer los zonales no perturbados.

El análisis del catálogo de los MEC del hemisferio Norte durante el siglo XX, actualizado hasta 1978 por los resultados de [Savina y Khmelevskaya \(1984\)](#), completado después por [Kononova \(2009; 2010 y 2016\)](#) hasta el año 2014 y extendido a los procesos de la circulación que ocurren en el hemisferio Sur, permitió obtener correlaciones significativas entre las circulaciones zonales y meridionales de los MEC y la temperatura media global ([Kononova y Lupo, 2020](#)).

En la [Figura 3](#), la línea negra representa el comportamiento de las anomalías de la temperatura media global ([GISS, 2023](#)). Las correlaciones entre las anomalías en las circulaciones zonales y meridionales del hemisferio Norte y las anomalías de la temperatura media global, tomando como referencia climática el periodo 1951-1980, son -0.66 y 0.68 respectivamente, con significación estadística al nivel de confianza de 99 %. Resultado similar al obtenido por [Kononova y Lupo \(2020\)](#) utilizando el periodo 1961-1990, que, aunque no demuestra causalidad, permite establecer el grado de similitud en la relación existente entre los comportamientos de los procesos formadores del clima, expresados en las anomalías en las frecuencias anuales de ocurrencia de los MEC, y el incremento en el valor de la temperatura media global, como expresión del forzamiento externo que representa el calentamiento global sobre el sistema climático.

Si se acepta que “el calentamiento del sistema climático es inequívoco, ya que desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios, y cada uno de los últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850” ([IPCC, 2013](#)), entonces, los efectos iniciales de dicho calentamiento pudieron ser gestionados por la dinámica habitual de la CGA y no tuvieron un impacto inmediato en los procesos de la circulación atmosférica; pero, a medida que aumentó este forzamiento externo sobre el sistema climático, poco a poco fue cambiando la proporción entre los flujos zonales y meridionales, rompiendo la estabilidad climática a inicios de los años 80.

A partir de esa década, diversos procesos de la CGA ya no pueden lograr de forma estable la redistribución adecuada de la masa y energía en exceso en las zonas más cálidas; y como consecuencia, empiezan a ocurrir eventos extremos y anómalos en el sistema climático, con peculiaridades regionales muy específicas como las señaladas por [Lecha \(2018\)](#).

Estas evidencias permiten afirmar que: *los efectos del calentamiento global en los procesos de la circulación atmosférica son acumulativos, y pudieron haber comenzado a manifestarse desde el inicio de la década de los años 30 del siglo XX, con un periodo de rápido crecimiento de las circulaciones meridionales del sur en los años 80 y 90 del siglo XX. En la actualidad se observa un incremento sostenido en las transferencias de masa y energía entre latitudes bajas y altas, gestionado por las circulaciones meridionales del norte y meridionales del sur, en zonas adyacentes no concurrentes, asociado al rápido aumento de la temperatura global.*

La marcha anual

Ambos grupos de flujos zonales (GC I y GC II) y los procesos donde predominan los intercambios meridionales del sur (GC IV) son más frecuentes desde junio hasta septiembre; aunque no se presentan grandes diferencias de las frecuencias absolutas de estos grupos entre los meses de verano y de invierno ([Fig. 4](#)).

Más pronunciada resulta la diferencia de las frecuencias absolutas de los flujos meridionales del norte (GC III) entre las diferentes estaciones del año, teniendo su máximo bien definido desde diciembre hasta mayo, con una disminución brusca de su frecuencia mensual durante la transición invierno-verano.

Las anomalías mensuales de los flujos zonales y meridionales muestran comportamientos opuestos, como era de esperar ([Fig. 5](#)). Los máximos mensuales de los flujos meridionales ocurren desde diciembre hasta marzo, mientras, que los máximos del flujo zonal tienen lugar en julio y agosto. Se destaca la prolongada duración de los periodos de cambio o transición, con los puntos de cruce de ambas curvas en los meses de mayo y noviembre.

Los MEC predominantes

Como criterio de referencia previa en los estudios recientes de climatología sinóptica que están en proceso, se ha considerado el valor de 5 % de la frecuencia de ocurrencia de los tipos y subtipos MEC como el límite o umbral para la representatividad climática, que propuesto por [Barry y Carleton \(2001\)](#) ha sido aplicado satisfactoriamente por [Soler et al. \(2020a\)](#).

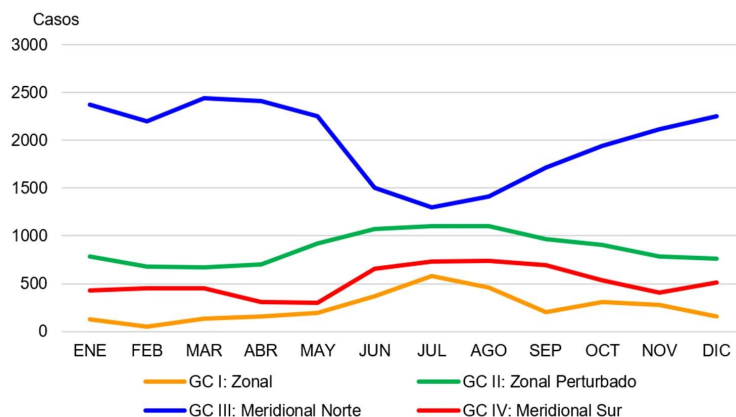


Figura 4. Frecuencias absolutas mensuales de los grupos de circulación (1899-2019).

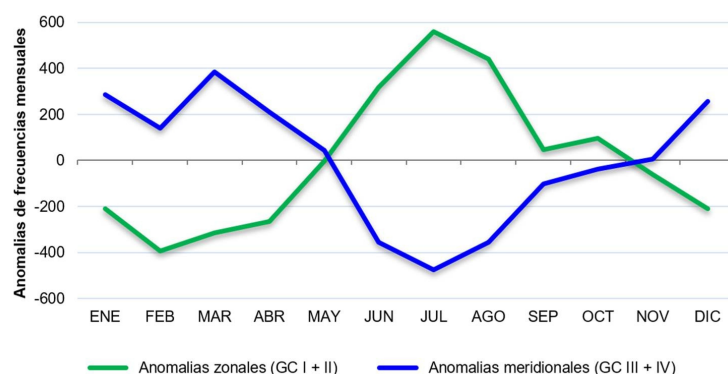


Figura 5. Marcha anual de las anomalías mensuales zonales y meridionales (1899-2019).

Las frecuencias relativas calculadas para el periodo completo 1899-2019 de los 41 subtipos MEC definidos por Dzerdzevskii (1968), incluyendo los casos no clasificados (nc), se representan por colores diferentes en la Fig. 6, según los grupos de circulación (GC). De ellos solo cuatro fueron considerados predominantes durante el largo periodo de estudio analizado, al ser sus frecuencias superiores a 5.0 %.

El tipo 13, circulaciones meridionales del sur, se identifica por los subtipos 13w y 13s, que representan la ausencia de bloqueos anticiclónicos, unido a la presencia de tres a cuatro vórtices ciclónicos, lo cual facilita el intercambio abundante de masa y energía desde latitudes tropicales hacia latitudes medias y altas. Además, un área de baja presión atmosférica domina el Ártico.

El MEC 13s (#41) aparece durante el verano. Lo conforman cuatro zonas de intercambios ciclónicos del sur: sobre el este de América, Europa occidental, Asia central y el Lejano Oriente. En el polo Norte predomina una baja presión, mientras, el anticiclón subtropical del océano Pacífico influye sobre el noroeste de América, el anticiclón del Atlántico extiende su campo desde Europa occidental hasta el golfo de México y sobre Eurasia dos anticiclones continentales alternan con los canales de intercambios ciclónicos (Fig. 7).

El patrón estacional de cambios en la naturaleza de la superficie subyacente causa importantes diferencias en el desarrollo de la circulación en el hemisferio, manteniendo la principal característica del tipo 13, la circulación ciclónica sobre el Ártico, siendo esta depresión barométrica parte de una extensa zona de baja presión, que cubre la mayor parte de las latitudes extratropicales del hemisferio Norte.

Como contraparte, el MEC 13w (#40) es propio del invierno. Está caracterizado por anticiclones fuertemente desarrollados, uno sobre América con dorsal extendida al suroeste conectado al anticiclón subtropical del océano Pacífico y otro sobre Eurasia, ambos dominando extensas áreas y con gran altura (Fig. 8).

Especialmente poderoso, en comparación con los promedios a largo plazo, es el anticiclón norteamericano que ocupa todo el continente, con impresionante cresta geopotencial. En el polo Norte predomina una baja presión que conecta en forma de banda dos estrechos canales de intercambios ciclónicos del sur: sobre América oriental y el Lejano Oriente. El centro del anticiclón subtropical del océano Atlántico aparece desplazado al este sobre Europa occidental.

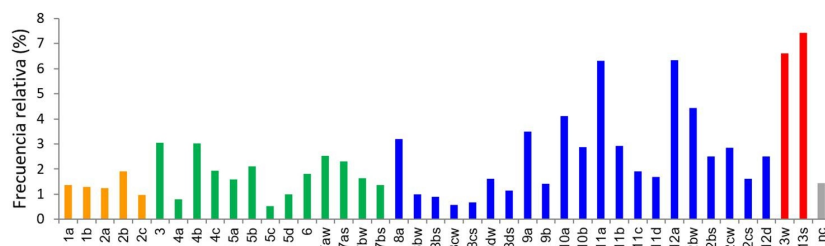


Figura 6. Frecuencias relativas de los subtipos MEC en el hemisferio Norte (1899-2019)

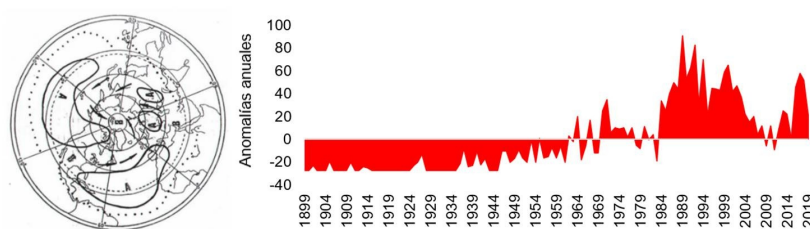


Figura 7. Mapa representativo del subtipo MEC 13s y sus anomalías anuales (1899-2019)

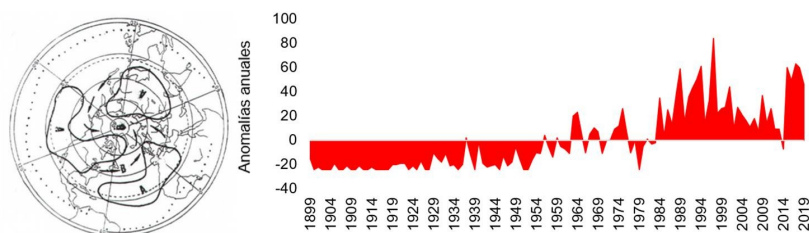


Figura 8. Mapa representativo del subtipo MEC 13w y sus anomalías anuales (1899-2019)

Los subtipos MEC 13s y 13w presentan los mayores valores de frecuencias de ocurrencia entre 1899-2019, con 7.4 % y 6.6 %, así como, tendencias significativas crecientes, con puntos de cambios en los años 1961 y 1955 respectivamente, al nivel de confianza de 95 %. Sus anomalías positivas marcaron el rápido crecimiento de las circulaciones meridionales del sur en los decenios de los años 80 y 90 del siglo XX, que caracterizó la segunda época o ciclo de los procesos de la circulación.

El amplio número de tipos y subtipos MEC que contiene el GC III, representativo de las circulaciones meridionales del norte, incluye a los subtipos de máximo intercambio hemisférico de masa y energía, identificados por múltiples vórtices ciclónicos y zonas de bloqueos anticiclónicos, que pueden estar presentes en un mismo día, durante cualquier estación del año.

El subtipo MEC 12a (#34) tiene una tendencia significativa creciente, con punto de cambio en el año 1959, al nivel de confianza de 95 %. Es el mecanismo elemental de circulación con mayor potencial para el intercambio de masa y energía, ya que contiene cuatro invasiones Árticas: sobre el nordeste de América, en Europa occidental conectado al anticiclón subtropical del océano Atlántico, en el este de Asia conectado

al anticiclón Euroasiático y en Alaska conectado al anticiclón del océano Pacífico. Además, cuatro zonas de intercambios ciclónicos del sur: sobre América, el Atlántico, Europa del este y el océano Pacífico occidental (Fig. 9).

Este subtipo 12a tiene una frecuencia de ocurrencia de 6.3 %, solo inferior a los dos meridionales del sur antes analizados. Ha experimentado un rápido crecimiento de sus anomalías positivas en los últimos dos decenios, y está integrado en el macroproceso 9 para el sector América del Norte, determinando que este sea el patrón regional de circulación predominante en los años del presente siglo (2002 a 2019).

El aumento de la influencia del MEC 12a se asocia con las invasiones del vórtice polar troposférico durante la época invernal. Según Gibbens (2017), “el calentamiento del Ártico podría ser responsable de los inviernos más fríos en Norteamérica”. Su estudio muestra cómo el calentamiento del Ártico podría tener un efecto negativo sobre regiones a miles de kilómetros de distancia, ya que al aumentar la temperatura del Ártico ocurre un debilitamiento y el fraccionamiento del vórtice polar troposférico.

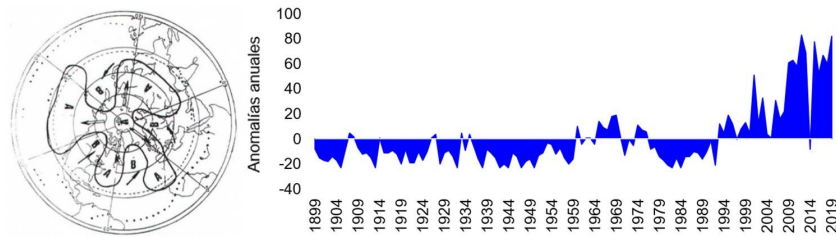


Figura 9. Mapa representativo del subtipo MEC 12a y sus anomalías anuales (1899-2019).

También, Erdman (2013) y Henson (2022) han coincidido en que el cambio climático está volviendo los inviernos más cálidos en los Estados Unidos, pero eso no significa que no puedan ocurrir eventos de frío extremo, los cuales de hecho están aumentando su incidencia anual, acompañados también del aumento anual del número de ciclones extratropicales con inusitada intensidad y tiempo severo asociado. Este comportamiento puede tener influencia en el clima de regiones en bajas latitudes del hemisferio, como el archipiélago cubano, que es dominado por los mismos macroprocesos de circulación, principalmente en el periodo poco lluvioso del año cuando predominan los sistemas extratropicales.

Si se prescinde de la biosfera, el componente más sensible del sistema climático es la atmósfera, debido a su menor capacidad calorífica (Linés, 1990); entonces, es posible afirmar que *el incremento en la frecuencia de ocurrencia de los procesos de la circulación general de la atmósfera, que involucran los mecanismos con mayor potencial para las transferencias de masa y energía entre la zona tropical y las regiones de medias y altas latitudes, mediante los intercambios ciclónicos y las invasiones árticas, denota la búsqueda de la estabilidad climática en el planeta, frente al forzamiento externo provocado por el calentamiento global.*

El MEC 11, también pertenece al grupo de las circulaciones meridionales del norte, es el típico patrón invernal para la región americana. Los subtipos dependen de las combinaciones entre procesos de bloqueos y la formación de vórtices ciclónicos en diferentes regiones del hemisferio Norte. El MEC 11a (#30) es un patrón característico del invierno en Cuba, pues aporta la influencia de las masas de aire continentales sobre el Golfo de México, Cuba y el mar Caribe occidental.

El subtipo MEC 11a no posee una tendencia definida. Está formado por dos bloqueos de invasiones Árticas: uno sobre América, con dorsal conectada al anticiclón subtropical del océano Pacífico, y otro sobre Asia central conectado al anticiclón continental Euroasiático, así como por dos zonas de intercambios ciclónicos del sur: una sobre el Atlántico occidental y la otra en el Pacífico occidental (Fig. 10).

Al igual que el subtipo MEC 12a, tiene una frecuencia de ocurrencia de 6.3 % en el periodo de 1899 a 2019. Sin embargo, el comportamiento de sus anomalías es negativa en los decenios más recientes, lo que se asocia con la disminución gradual de los días con condiciones meteorológicas representativas del invierno en Cuba, especialmente en su mitad occidental, proceso que se manifiesta desde las décadas finales del siglo XX.

Los restantes 37 subtipos MEC tienen frecuencias relativas inferiores al 5 %, siendo los que más se acercan a este umbral: el MEC 12bw (#35) con 4.4 %, que aporta invasiones sobre América del Norte por intensificación del anticiclón Ártico en invierno; y el MEC 10a (#29) con 4.1 %, que se asocia a los días con centros anticiclónicos continentales migratorios en avanzado estado de transformación por su desplazamiento del continente norteamericano al Atlántico.

Un resumen de las tendencias observadas en los subtipos MEC predominantes se ofrece en la Tabla 2.

De lo anterior, resulta consistente la hipótesis siguiente: *el calentamiento global contribuye a disminuir la incidencia de los tipos de circulación invernales sobre Cuba, pero aumenta la probabilidad de ocurrencia de invasiones árticas extremas*, hecho que se justifica por las recientes anomalías negativas del MEC 11a y el aumento en las anomalías

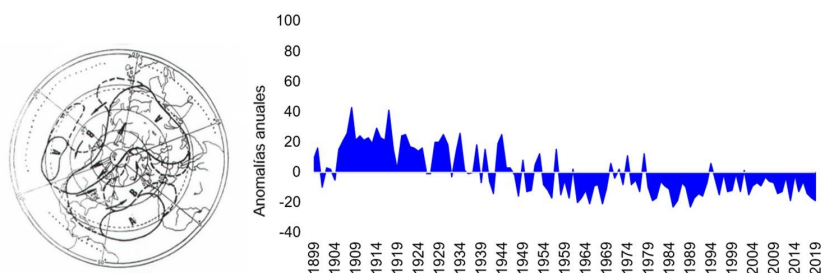


Figura 10. Mapa representativo del tipo MEC 11 y anomalías anuales del subtipo MEC 11a (1899-2019)

Tabla 2. Tendencias de los subtipos MEC predominantes 1899-2019

Subtipos MEC	(%)	Alfa 0	Alfa 1	Tendencia	Signo	Significancia	Coef. R'	Pto. cambio (año)
11a	6.3	0.05	2.00	No existe	-	-	0.89	1947
12a	6.3		0.00	Existe	+	Significativa	0.64	1959
13w	6.6		0.00	Existe	+	Significativa	0.98	1955
13s	7.4		0.00	Existe	+	Significativa	0.94	1961

positivas del MEC 12a, en combinación con los cambios en la dinámica del vórtice polar troposférico, potencialmente motivadas por el aumento gradual y persistente de la temperatura del aire en las regiones polares del hemisferio Norte.

DISCUSIÓN

La evaluación objetiva del impacto potencial de la variabilidad del clima global sobre el clima del área geográfica que incluye a Cuba, no es posible sin estar bien definidos los efectos y cambios potenciales que el actual cambio climático está produciendo sobre los factores formadores del clima regional y local.

La influencia del régimen de radiación solar no ha cambiado, su variabilidad se mantiene acorde al comportamiento de los procesos astronómicos ya conocidos. Sin embargo, está en marcha un proceso de aumento de la temperatura global, atribuido a las actividades humanas, que tiene la capacidad de producir efectos importantes sobre la circulación general de la atmósfera, uno de los factores fundamentales que definen el clima del planeta. También, están cambiando las condiciones del entorno físico-geográfico, lo cual tiene mayor relevancia en la modificación gradual de las características locales del clima.

Los modelos climáticos predicen una tendencia ascendente de la temperatura superficial y un rápido incremento de la temperatura en latitudes altas. Sin embargo, no presuponen que el clima se calentará debido al aumento de los niveles de gases de efecto invernadero. Predicen, cómo los gases de efecto invernadero interactuarán con las transferencias de radiación y otros procesos físicos. El enfriamiento o calentamiento es por tanto un resultado, no un supuesto, de los modelos (Hansen, 2000).

Estos argumentos fundamentan la importancia atribuida al trabajo realizado durante décadas por Dzerdzevskii y sus colaboradores, construyendo con rigor y homogeneidad una base de datos diarios de extraordinario valor científico, que permite evaluar las principales características climáticas de los MEC, a partir de criterios de clasificación de los flujos predominantes en superficie y en el nivel medio de la troposfera de 500 hPa. Su aporte es una visión adecuada y coherente de las direcciones principales y puntos de bloqueo de los flujos globales y regionales de masa y energía, asociados al funcionamiento de los principales sistemas sinópticos: las bajas y altas presiones.

Se dispone entonces, de una información consistente para evaluar los efectos que el proceso de calentamiento global está produciendo sobre los MEC, de donde se infieren múltiples conclusiones de carácter aplicado, todas asociadas a una cadena sucesiva de interacciones físicas que se desarrolla desde la escala global hasta el nivel local o de impacto.

Resulta relevante que se obtienen evidencias sobre el posible inicio de los efectos del calentamiento global sobre los procesos hemisféricos que afectan la región de América del Norte y el Caribe, estando la fecha ubicada alrededor del año 1931, o sea, mucho antes de ser reconocido este problema por la comunidad internacional.

Además, se aprecia como esta interacción o respuesta de la CGA al comportamiento de la temperatura media del sistema climático se manifiesta en ciclos o etapas de unos 40 años. En los primeros ciclos de la serie temporal analizada, la dinámica de la CGA logró estabilizar el diferencial de energía entre latitudes, pero eso no se logra en el ciclo actual, el cual mantiene desde 1980 una tendencia creciente al aumento de los flujos meridionales, a cambio de una reducción considerable de los intercambios zonales. Esto se refleja en el aumento reciente de los fenómenos meteorológicos peligrosos y de los efectos meteoro-tropicales extremos que afectan a el hemisferio Norte, incluyendo el continente norteamericano, el Caribe y Cuba.

CONCLUSIONES

En el hemisferio Norte durante el período 1899-2019 los grupos de circulaciones zonales (I y II) disminuyen gradualmente sus frecuencias anuales desde la década de los años 30 del pasado siglo XX.

El grupo de circulación III (meridionales del norte) ha mantenido su predominio durante gran parte del periodo de estudio y el grupo IV (meridionales del sur) presentó un rápido crecimiento desde inicios de la década de los años 70 del siglo XX, con oscilaciones en las primeras dos décadas del siglo XXI.

Se demuestra la existencia de correlaciones entre las anomalías en las circulaciones zonales y meridionales del hemisferio Norte y las anomalías de la temperatura media global, que son -0.66 y 0.68 respectivamente, con significación estadística al nivel de confianza de 99 %.

Solo cuatro MEC (11a, 12a, 13w y 13s), de los 41 subtipos definidos por Dzerdzeevskii, fueron considerados predominantes durante el largo periodo de estudio analizado. A las anomalías en sus frecuencias de ocurrencia se asocian las significativas variaciones ocurridas en las circulaciones atmosféricas durante las últimas cuatro décadas.

Presentan tendencias significativas crecientes tres de los cuatro MEC predominantes (13s, 12a y 13w), con puntos de cambios en los años 1955, 1959 y 1961 respectivamente, al nivel de confianza de 95 %. El MEC 11a no tiene una tendencia definida.

Los procesos de la circulación atmosférica son un factor determinante en la formación del clima regional. Por tanto, los cambios observados durante las décadas recientes, en las principales características multianuales y estacionales de las circulaciones, pueden asociarse al incremento del riesgo climático con consecuencias adversas para la sociedad y la economía en el presente y el futuro.

REFERENCIAS

- Alisov, B. P. (1950). Zonas climáticas de los países extranjeros [en ruso]. Edit. Geografía, Moscú. 284pp.
- Alisov, B. P. y Poltarau B.V. (1974). Climatología [en ruso]. Ed. Univ. Estatal de Moscú; 299 pp.
- Barry, R. y Carleton, A. (2001). Synoptic and Dynamic Climatology. 547-592 pp.
- Celeiro, M. (1999). Oscilaciones de las temperaturas del aire y las precipitaciones desde el pasado histórico en Cuba. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Geografía Tropical, La Habana, 200 pp.
- Dzerdzeevskii, B. L. (1962). Fluctuation of climate and of general circulation of the atmosphere in extra-tropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology-*Tellus*, Vol. 14, No 3. 328-336 pp.
- Dzerdzeevskii, B. L. (1968). Los mecanismos de la circulación de la atmósfera en el hemisferio norte en el siglo XX [en ruso]. Resultados de Investigaciones durante el Año Geofísico Internacional. Circulación Atmosférica. Ed. Inst. Geog. AC de la URSS, Moscú.
- Dzerdzeevskii, B. L. (1975). Selected works. General atmospheric circulation and climate [en ruso]. M. *Nauka*, 288 pp.
- Erdman, J. (2014). ¿Qué es un vórtice polar? La ciencia detrás de los brotes del Ártico. www.wunderground.com.
- Gibbens, S. (2017). El calentamiento del Ártico podría ser responsable de los inviernos más fríos en Norteamérica. *National Geographic*, 9, Noviembre; 4:19.
- GISS (2023). Base de datos de la temperatura media global 1880-2022. Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la NASA. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/temperatura-global/>
- Hansen, James (2000). One World: The Health & Survival of the Human Species in the 21st century. Health Press; 173-190 p. ISBN 0-929173-33-3.
- Henson, B. (2022). Las olas de frío invernales no contradicen el cambio climático. www.wunderground.com.
- Hoel, P. (1972). Introducción a la Estadística Matemática. Edición Revolucionaria, Instituto Cubano del Libro, 471 pp.
- IPCC (2013). Cambio Climático. Base de ciencia física. Bern, Suiza, 2 pp. www.climatechange2013.org
- Jáuregui, E. (2003). Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones Geográficas, No 50, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, México. 121-143 pp.
- Kononova, N. K. (2009). Clasificación de los Mecanismos Elementales de Circulación del hemisferio norte según el método de B.L. Dzerdzeevskii. Edit. Inst. Geog. AC de Rusia, Moscú. 372 pp. ISBN 978-5-89658-037-9.
- Kononova, N. K. (2010). Long-term fluctuations of the northern hemisphere atmospheric circulation according to Dzerdzeevskii classification. Institute of Geography, Russian Academy of Sciences. *Geography Environment Sustainability*, No 01. 25-43 pp.
- Kononova, N. K. (2016). Fluctuations of the Global Atmospheric Circulation in the XX-XXI Centuries. *Journal of Earth Science and Climatic Change*. doi: <http://doi.org/10.4172/2157-7617.1000350>.
- Kononova, N. K. y Lupo, A. R. (2020). Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries. *Atmosphere* 2020, 11, 255, 2-14 pp. <http://doi.org/10.3390/atmos11030255>.
- Lapinel, B. (1988). La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las lluvias en Cuba. [Tesis de Doctorado]. Instituto de Meteorología, 147 pp.
- Lebedeva, M., Lupo, A., Chendev, Y., Krimskaya O. y Solovyev A. (2019). Los cambios en las condiciones de las circulaciones atmosféricas y las características regionales del clima en dos localidades remotas durante el siglo XX. *Rev. Atmósfera*; Disponible en Internet: www.mdpi.com/journal/atmosphere doi: <http://doi.org/10.3390/atmos10010011>. 23 pp.
- Lecha, L. y Llanes A. (1988). Características estacionales de la circulación atmosférica sobre Cuba. *Rev. Cubana de Meteorología, Vol. 1, No 1*. La Habana, Cuba. 49-56 pp.

- Lecha, L., Paz L. y Lapinel B. (1994). El Clima de Cuba. Edit. Academia, La Habana, Cuba. ISBN 958-02-006-0. 186 pp.
- Lecha (2018). Biometeorological forecasts for health surveillance and prevention of meteor-tropic effects. *Int. Jour. Biomet. Special Issue*, 62(5): 741-771. ISSN 0020-7128.
- Lecha, L. (2019). Pronósticos biometeorológicos (eBook). Ed. Citmatel, La Habana; 210 pp. ISBN 978-959-237-752-3.
- Lecha, L., Guevara, A., Díaz, E. B., Sosa, A., Pena, E. y Pichardo, L. O. (2022). Cartografía de la mortalidad general en Cuba (2001-2020). Informe de Resultado del Proyecto P211LH007-016 "Evaluación del riesgo meteorotrópico extremo asociado a los procesos de la circulación atmosférica que influyen sobre Cuba". INSMET, 54 pp. (inédito).
- Linés, A. (1990). Cambios en el Sistema Climático. INM S. A-138.
- MEC (2019). Base de datos de la clasificación de los mecanismos elementales de circulación de Dzerdzeevskii 1899-2019. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Rusia. <http://atmospheric-circulation.ru/datas/>
- Planos, E., Vega R. y Guevara A. Ed. (2013). Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Inst. Meteorología, AMA-CITMA, La Habana, Cuba; 430 p.
- Ramírez, R. (2022). Los desastres naturales le han costado 750,000 millones a Estados Unidos en los últimos cinco años. *Cambio Climático*, CNN, artículo del 10/01/2022; visto en: Los desastres naturales le costaron a EE.UU. US\$ 750.000 millones en 5 años (cnn.com).
- Sávina, S. S. y Khmelevskaya L. V. (1984). La Circulación de la Atmósfera. Dinámica de los procesos de la circulación atmosférica durante el siglo XX [en ruso]. En: Materiales de las Investigaciones Meteorológicas, 9. Ed. Comité Geofísico de la URSS e Inst. Geog. de la AC de la URSS, Moscú; 116 pp.
- Soler, E., Sánchez, L. M., Lecha, L. B. y Verdecia Y. (2020a). Los mecanismos elementales de circulación en América del Norte y su relación con las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba. *Rev. Cub. Met.*, 26(sp): 1-18, ISSN: 2664-0880. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/544/980>.
- Soler, E., Lecha, L. B., Sánchez, L. M. y Verdecia Y. (2020b). Catálogo de los tipos de situaciones sinópticas que influyeron sobre Cuba 1970-2019. Resultado de Investigación, INSMET, Cuba, 60 pp. (inédito).
- Vitvitzkii, G. N. (1986). Influencias de la circulación atmosférica en la variabilidad del clima de la URSS en el período reciente [en ruso]. *Rev. Invest. AC de la URSS, Serie Geográfica*, 5; 5-20.