

Variaciones en las circulaciones oceánica y atmosférica. Su influencia en la formación de huracanes en el Atlántico Norte

Variations in oceanic and atmospheric circulations. Its influence on the formation of hurricanes in the North Atlantic



<http://opn.to/a/d0XBI>

Milena Alpizar-Tirzo ^{1*}, Ramón Pérez-Suárez ¹, Pedro Roura-Pérez ¹

¹Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

RESUMEN: La variabilidad que poseen los ciclones tropicales en su formación ha sido relacionada con las variaciones que ocurren en las circulaciones atmosférica y oceánica. Algunos de los factores que se han considerado que influyen en esta variabilidad son los patrones de teleconexión. El objetivo del estudio es determinar la relación que existe entre las variaciones que se producen en las circulaciones oceánica y atmosférica con la formación de huracanes en el Atlántico Norte. Mediante el uso del Análisis de las Componentes Principales y el Análisis de Regresión Lineal, se determinó que el principal factor modulador de la formación de huracanes es la temperatura superficial del mar, donde los altos valores son los más favorables. Estos altos valores modulan a la vez el efecto de cada uno de los factores en la formación de los huracanes. Otros como El Niño-Oscilación del Sur y la Oscilación del Atlántico Norte también ejercen gran influencia en la formación de los huracanes. Se determinó además un índice que es capaz de expresar más del 40 % de la reducción de la varianza de la formación de los huracanes del Atlántico Norte, que combina el efecto que producen varios factores. Se seleccionaron los dos factores con los cuales se determinó un índice, el cual expresa más del 39 % de la reducción de la varianza de la formación de los huracanes que puedan afectar a Cuba. Estos índices son útiles para el diagnóstico de los huracanes en el Atlántico Norte y en Cuba.

Palabras clave: huracanes, patrones de teleconexión, variabilidad, Análisis de las Componentes Principales, Análisis de Regresión Lineal.

ABSTRACT: The variability of the tropical cyclones in their formation has been related to the variations that occur in the atmospheric and oceanic circulation. Some of the factors that have been considered to influence this variability are teleconnection patterns. The objective of this study is to determine the relationship between the variations occurring in oceanic and atmospheric circulation with the formation of hurricanes in the North Atlantic. Using Principal Component Analysis and Linear Regression Analysis, it was determined that the main modulating factor of hurricane formation is the sea surface temperature, where high values are the most favorable. These high values modulate both the effect of each of the factors in the formation of the hurricanes. Others such as El Niño-Southern Oscillation and the North Atlantic Oscillation also have great influence on the formation of hurricanes. An index that is capable of expressing more than 40 % of the reduction in the variance of North Atlantic hurricane formation, which combines the effect of several factors, was also determined. The two factors with which an index was determined, which expressed more than 39 % of the reduction of the variance of the formation of the hurricanes that may affect Cuba, were selected. These indices are useful for the diagnosis of hurricanes, in the North Atlantic and in Cuba.

Keywords: hurricanes, teleconnection patterns, variability, Analysis of Principal Components, Linear Regression Analysis.

*Autor para correspondencia: Milena Alpizar-Tirzo. E-mail: milena.alpizar@insmet.cu

Recibido: 19/06/2018

Aceptado: 06/11/2018

INTRODUCCIÓN

El número anual de ciclones tropicales que se originan en el océano Atlántico Norte posee una alta variabilidad interanual y multianual. Numerosos estudios indican que esta variabilidad se debe a la interacción de varios factores entre los que se destacan: las altas temperaturas superficiales del mar (TSM) en el Atlántico; la ocurrencia de fuertes eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), y la existencia de la fase Oeste en la oscilación cuasi bienal del viento ecuatorial estratosférico (QBO). También se han incluido otros como el Patrón Pacífico Norteamérica (PNA), Oscilación del Este del Atlántico (EA) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) ([Rogers, 1990](#); [Landsea, 1992](#); [Camargo et al., 2010](#); [Camargo y Sobel, 2010](#)).

En los últimos años muchos estudios han cuestionado el comportamiento de los ciclones tropicales en la cuenca Atlántica; donde hasta el año 2005 se había manifestado con un aumento de la actividad. Gray y Klotzbach (2008) reafirman que independientemente de las tendencias mundiales, existe un consenso general de que la actividad de los ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico ha aumentado dramáticamente desde 1995, similar a las cantidades de actividad observadas desde finales de la década de 1940 hasta mediados de la década de 1960.

Uno de los principales factores necesarios en la formación de huracanes es la temperatura superficial del mar ([Chang y Madala, 1980](#); [Bender et al., 1993](#); [Landsea, 2000](#)). El ENOS, por otro lado, regula la actividad de los huracanes en el Atlántico Norte a través de cambios en los vientos troposféricos superiores en el cinturón de latitud $0 - 18^\circ N$ y los factores dinámicos anómalos asociados. Por lo tanto, la formación de ciclones en el Atlántico es, en general, mucho más sensible a las influencias de El Niño que en las otras regiones de ciclones tropicales ([Gray, 1984](#); [Goldenberg y Shapiro, 1996](#); [Camargo et al., 2007](#); [Sabbatelli et al., 2007](#); [Kim et al., 2011](#)).

En un estudio realizado por [Limia et al., \(2000\)](#) se expresa que las variaciones interanuales y multianuales de la actividad de huracanes sobre Cuba está modulada por las

variaciones de la temperatura del mar en la región del océano Pacífico centro oriental y principalmente, por las variaciones en la temperatura del mar en la franja tropical del océano Atlántico. Determinaron además para la región de Cuba los efectos que provoca el evento ENOS en la frecuencia de formación de los huracanes; donde obtuvieron que la fase más favorable para la frecuencia de huracanes fue la fase neutra con un 60 % de frecuencia de formación de huracanes.

Se ha demostrado que la NAO ([Hurrell, 1995](#)) también afecta a los ciclones tropicales de la cuenca del Atlántico, principalmente a través de alteraciones en las corrientes de dirección y consecuentemente en las trayectorias de ciclones tropicales. También ha adquirido una fuerte influencia en la variabilidad interanual e interestacional de la actividad de ciclones tropicales en el Atlántico Norte, produciendo un aumento (disminución) de la actividad de ciclones tropicales durante la fase positiva (negativa) de la misma ([Larson et al., 2005](#)).

Posteriormente [Ballester et al., \(2010\)](#) reafirman que la actividad ciclónica en toda la cuenca atlántica ha mantenido su tendencia al incremento presentado desde la última década del siglo XX, dado fundamentalmente por el aumento continuado en el trimestre agosto-octubre. La recuperación de la actividad ciclónica en la cuenca del Caribe, después de un periodo de baja frecuencia, se debe al restablecimiento de las condiciones oceánicas y atmosféricas.

Los factores antes mencionados fueron estudiados de forma individual, pero no en su plena relación con respecto a la variabilidad de la formación de los huracanes en el Atlántico Norte. Se requiere entonces conocer cómo pueden actuar de forma combinada y cuáles serían los principales moduladores de esta variabilidad de la frecuencia de formación de los huracanes. En el presente trabajo se analiza estos procesos que caracterizan la circulación atmosférica considerándolos de forma conjunta, en el periodo 1951 – 2016. El objetivo principal de este estudio es determinar la relación existente entre las variaciones de las circulaciones oceánica y atmosférica con la formación de huracanes en el océano Atlántico Norte. Cuba, por su ubicación

geográfica en el Mar Caribe, es uno de los países vulnerables a la afectación de los ciclones tropicales que se forman en el Atlántico Norte. Debido a esto es importante tener conocimiento de cómo todos estos factores influyen en la formación de los huracanes y cómo puede afectar a las islas del Caribe.

MATERIALES Y MÉTODOS

La región de estudio seleccionada es la zona del océano Atlántico Norte, comprendida aproximadamente entre los 5° N y 60° N y 10° W y 100° W (Figura 1). Es una de las principales regiones ciclogénicas del planeta; constituye la tercera más activa, donde se forman como promedio 12 tormentas al año.

Se analizó el periodo de 1951 – 2016 , para recopilar las frecuencias anuales de la formación de huracanes en el océano Atlántico Norte (H ATL), tomado del archivo HURDAT del Atlantic Oceanographical and Meterological Laboratory (AOML); así como los años en que Cuba fue afectada por huracanes (H Cuba). En este caso se consideraron los huracanes que afectaron a Cuba cuando sus centros cruzaron sobre su territorio, o a una distancia tal que hayan ocasionado sobre él vientos máximos sostenidos propios de este tipo

de tormenta, según la cronología de Pérez et al., (2013).

Se consideraron los índices climáticos NAO, PNA, QBO, SOI, IE y EA para los meses de enero a diciembre. También se consideraron los valores medios de TSM del Atlántico (TSM ATL) y los valores de TSM del Pacífico en la región Niño 3 (TSM PAC) (tabla 1).

Para el tratamiento de los datos se determinaron dos etapas fundamentales: la primera donde se analizan todos los datos en el periodo anual, y la segunda donde solo se eligen los datos en los meses de mayo-noviembre. Los datos fueron obtenidos de los archivos del Climate Prediction Center, de la NOAA (www.cpc.noaa.gov). A partir del uso del software estadístico Statistica 7.0 se aplicaron tres métodos principales a los datos de estudio, para lo cual fue necesario la estandarización inicial:

- el análisis de correlación,
- el Análisis de Componentes Principales (ACP),
- el Análisis de Regresión Lineal Múltiple (ARLM).

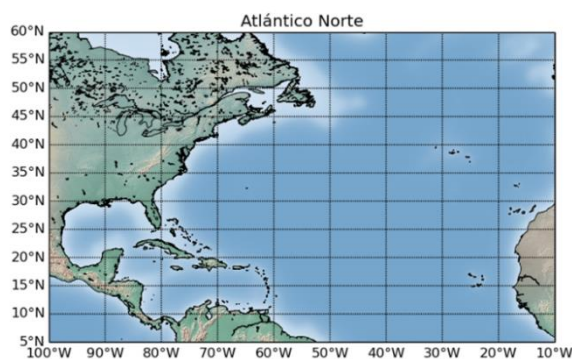


Figura 1. Región de estudio

Tabla 1. Términos utilizadas

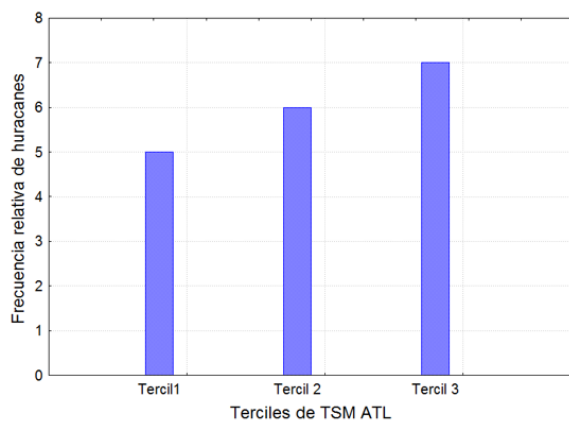
NAO	Oscilación del Atlántico Norte
PNA	Patrón Pacífico de Norteamérica
QBO	Oscilación Quasibienal
SOI	Índice de la Oscilación del Sur
IE	Índice El Niño
EA	Oscilación del Este del Atlántico
TSM ATL	Temperatura superficial del mar en el océano Atlántico
TSM PAC	Temperatura superficial del mar en el océano Pacífico

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la temperatura superficial del mar en el Atlántico

Teniendo en cuenta los valores de la TSM ATL (correspondientes a la región comprendida entre los $5^{\circ} N$ y $20^{\circ} N$, y los $30^{\circ} W$ y los $60^{\circ} W$), se analizó su influencia en la formación de huracanes. Se dividieron los valores de la TSM ATL por terciles, denominándose como de temperaturas frías, frescas y cálidas a los terciles primero, segundo y tercero respectivamente. Se obtuvieron los siguientes resultados para la TSM media del periodo mayo-noviembre (Figura 2).

En el Atlántico se pudo observar que el mayor número de huracanes por año se corresponde con los de TSM más cálidas, no habiendo mucha diferencia entre las TSM frías y frescas. La mayor frecuencia relativa de años con al menos un huracán en Cuba se tiene cuando los valores de TSM son más cálidos. Entre los valores obtenidos para las TSM frías y frescas existe una mayor diferencia, siendo la TSM fresca la que tiene mayor frecuencia. En ambas series hay mayor número de huracanes con los valores de TSM más cálidos. Los datos antes descritos indican que los altos valores de la TSM ATL se asocian a una mayor frecuencia de huracanes en el océano Atlántico Norte y a su vez de la afectación a Cuba; esto coincide con lo expresado por (Gray, 1984; Emanuel y Gray, 2005; Ballester *et al.*, 2010).



Análisis de El Niño-Oscilación del Sur

Cuando se analizó la influencia que ejerce el evento ENOS en la frecuencia de huracanes se obtuvo que se tienen mayores valores de frecuencia durante la fase neutra y la fase AENOS, con respecto a la fase ENOS (Figura 3).

Teniendo en cuenta el estudio realizado anteriormente por (Limia *et al.*, 2000) de la relación entre el ENOS y la frecuencia de huracanes en Cuba, se realizó el mismo análisis mostrado en la figura anterior para la afectación de los huracanes a Cuba, donde se pudo observar que los resultados no coincidían con los descritos por Limia *et al.*, (2000) desde el punto de vista cuantitativo. Como aquellos autores utilizaron el periodo 1902 – 1998, se decidió realizar un análisis del periodo 1902 – 2016 y se pudo observar que había diferencias notables. Entonces se analizó el periodo 1995 – 2016 y se observó un aumento en la frecuencia de huracanes durante la fase neutra del evento ENOS; y una notable disminución para la fase AENOS en este último periodo, coincidente con valores de TSM ATL superiores al periodo 1970 – 1994 (Figura 4).

Análisis de algunos índices de teleconexión

En el Atlántico la fase negativa de la NAO continuó siendo más favorable por encima de la fase positiva; en el PNA y el EA se mostró las fases positivas más favorables. De igual forma sucede con la QBO, aunque las diferencias entre cada fase no son muy notables (Figura 5a).

El índice NAO mostró que en Cuba la fase más favorable en la frecuencia de afectación de huracanes fue la negativa, donde se evidencia una

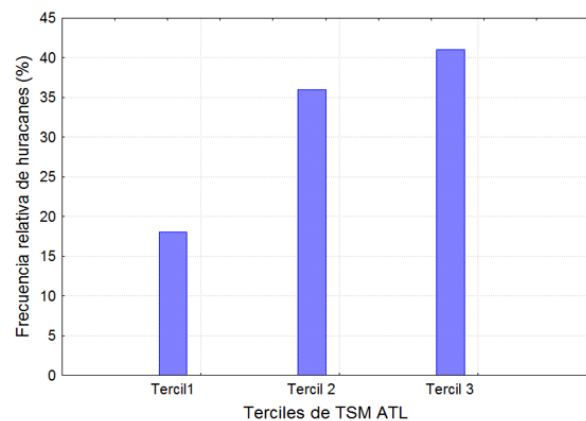


Figura 2. Frecuencia de huracanes en a) Atlántico Norte y b) Cuba vs terciles de TSM ATL en el periodo mayo-noviembre (1951-2016)

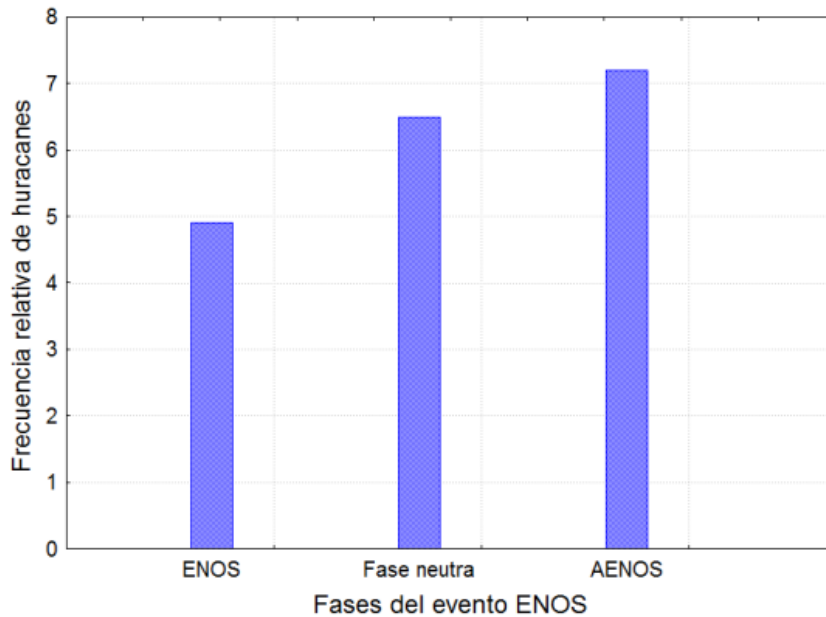


Figura 3. Frecuencia de huracanes en el Atlántico Norte en diferentes fases del evento ENOS (1951-2016)

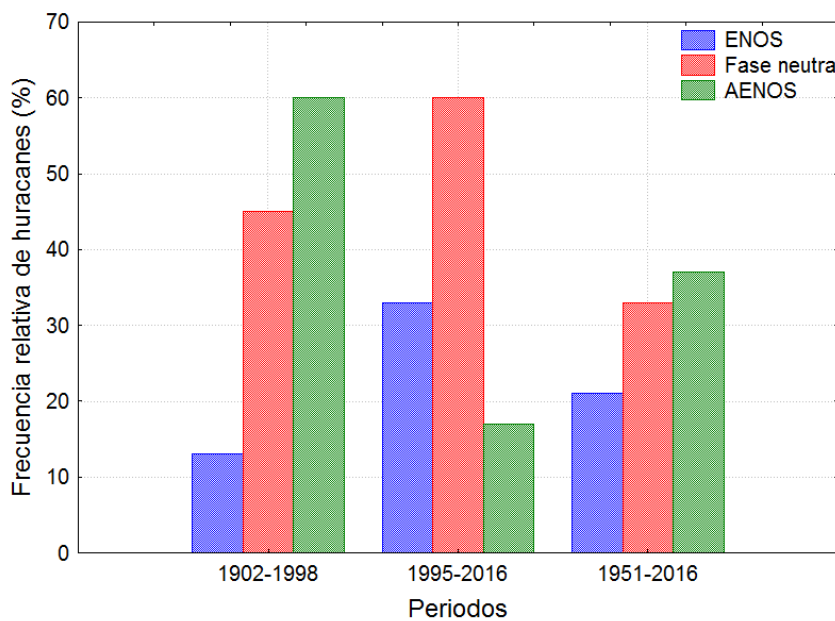


Figura 4. Frecuencia de huracanes que han afectado a Cuba en diferentes fases del evento ENOS (1902-1998, 1995-2016, 1951-2016)

notable diferencia con respecto a la fase positiva. Los índices PNA y EA presentan el mismo comportamiento, siendo la fase negativa la más favorable; y la fase negativa de la QBO mostró una menor frecuencia de afectación de huracanes en Cuba (Figura 5b).

Para el periodo mayo-noviembre los índices PNA, EA y QBO mostraron que la fase positiva favorece la frecuencia de formación de los huracanes en el Atlántico Norte. La NAO indica un comportamiento parecido al obtenido en el

periodo anual, aunque se observó una disminución (aumento) de los valores de las frecuencias para la fase positiva (negativa), (Figura 6a).

Al analizar la interacción de estos índices con las anomalías de TSM ATL se pudo observar como el comportamiento visto anteriormente se modifica. En el Atlántico Norte los resultados que se obtuvieron fueron similares. El EA y la QBO muestran, al igual que en Cuba, un incremento ante las anomalías de TSM ATL

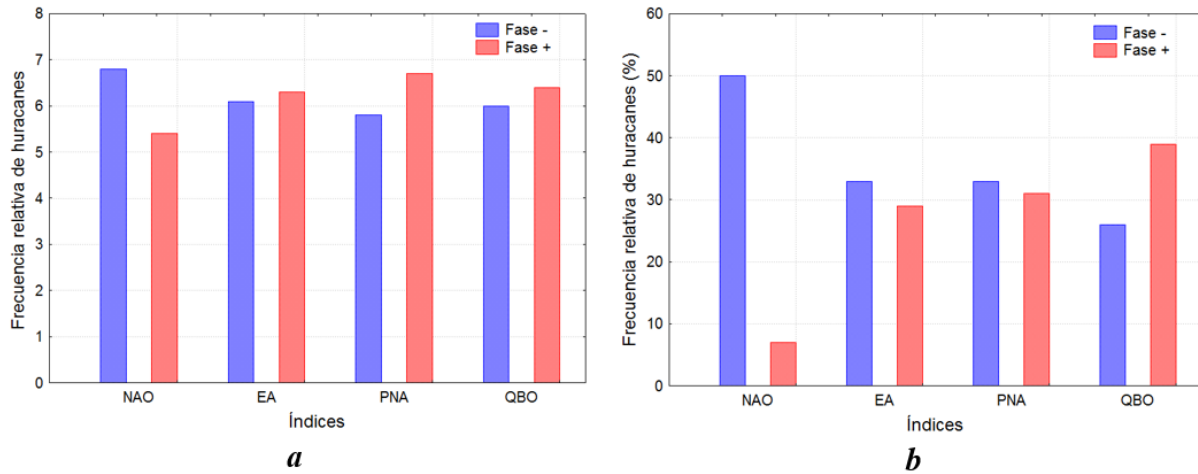


Figura 5. Frecuencia de huracanes en presencia de NAO, PNA, EA y QBO (periodo anual): a) Atlántico Norte; b) Cuba (1951-2016)

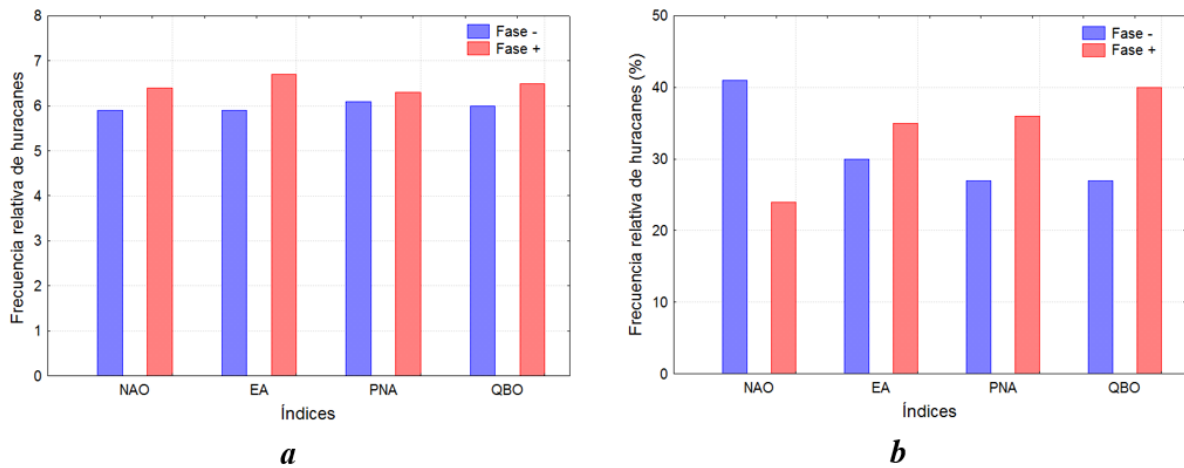


Figura 6. Frecuencia de huracanes en presencia de NAO, PNA, EA Y QBO (mayo-noviembre): a) Atlántico Norte; b) Cuba (1951-2016)

positivas, y una disminución en las negativas. El PNA aumenta con las anomalías negativas, y la fase positiva de la NAO con las anomalías positivas. La fase negativa de la NAO coincide con los resultados obtenidos para las anomalías negativas, donde se mostró una disminución de los valores de la frecuencia (Figura 7a).

En Cuba se pudo observar que los índices EA y QBO se comportan de forma similar ante la presencia de la TSM ATL. En presencia de las anomalías negativas ambas fases disminuyen las frecuencias, mientras que para las anomalías positivas muestran un incremento. El índice PNA mostró un aumento de las frecuencias ante la presencia de anomalías negativas, y una disminución ante las anomalías positivas. La NAO se comportó de manera diferente, donde se mostró un aumento de la actividad ciclónica para la fase positiva ante las anomalías positivas y

negativas. La fase negativa mostró una disminución para ambos valores de anomalías positivas y negativas (Figura 7b).

De manera general se pudo observar que los altos valores de la TSM ATL constituyen un factor positivo para la formación de huracanes en el Atlántico Norte. Así las anomalías positivas modifican la influencia de cada uno de los factores en la frecuencia de formación de huracanes en el océano Atlántico Norte; modulando significativamente el efecto del evento ENOS, al limitar el mismo, o sea, condicionando una frecuencia mayor de huracanes en presencia de dicho evento. Los restantes factores también sufren modificaciones en cuanto a sus efectos con respecto a la formación de huracanes.

Análisis de las Componentes Principales

Los resultados descritos con anterioridad no son suficientes para alcanzar el objetivo general de la presente investigación. Por ello se decidió utilizar un ACP para determinar cuáles factores son más importantes en relación a las variaciones de la formación de los huracanes en el océano Atlántico Norte.

Para el ACP se analizó la correlación lineal por Pearson. Se obtuvo que las variables que tienen mayor coeficiente de correlación con respecto a los huracanes en el Atlántico son: TSM ATL, NAO e IE; mientras que en Cuba son: TSM ATL y NAO, en ambos periodos (Tabla 2).

Atlántico Norte

En el Atlántico Norte las variables seleccionadas fueron H ATL, TSM ATL, NAO y el IE. En el periodo anual se obtuvieron dos factores, los cuales representan el 75,2 % de la variabilidad, y cumplen con los tres criterios considerados (Figura 8).

El primer factor indica que cuando existen altos valores de la TSM ATL y bajos valores del índice NAO se asocia con una fuerte frecuencia de formación de huracanes en el Atlántico Norte. El segundo factor explica que cuando existen bajos valores del IE se relaciona con una alta frecuencia de formación de huracanes en el Atlántico Norte (Tabla 3).

Tabla 3. Factores coordinados de las variables, basado en las correlaciones en el periodo anual en el Atlántico Norte

Variables	Factor 1	Factor 2
H ATL	0,8137	-0,1589
IE	-0,2665	0,9362
NAO	-0,7300	-0,0286
TSM ATL	0,7988	0,4481

En el periodo mayo-noviembre se puede observar que los factores representan el 76,1 % de la variabilidad. El primer factor explica que cuando existen altos valores de la TSM ATL y bajos valores de la NAO se asocia a la alta frecuencia de formación de huracanes en el

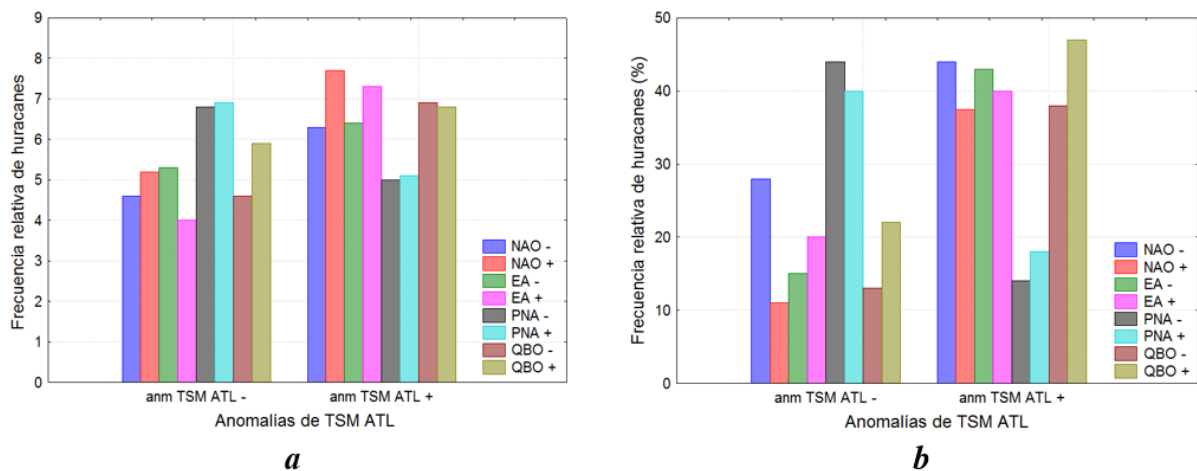


Figura 7. Frecuencia de huracanes en a) Atlántico Norte y b) Cuba (anm TSM ATL vs NAO, EA, PNA, QBO), (1951-2016)

Tabla 2. Matriz de correlaciones para los periodos anual y mayo-noviembre

Variables	Periodo anual		Variables	Periodo mayo-noviembre	
	H Cuba	H ATL		H Cuba	H ATL
IE	-0,1169	-0,2812	IE	-0,1653	-0,3660
NAO	-0,3859	-0,3247	NAO	-0,3472	-0,2526
TSM ATL	0,2728	0,5302	TSM ATL	0,2569	0,5214
EA	0,0500	0,0600	EA	0,0950	0,1464
PNA	0,0249	0,1724	PNA	0,0923	0,1151
QBO	0,1454	-0,0473	QBO	0,1759	-0,0124
SOI	0,1031	0,2365	SOI	0,0268	0,1012
TSM PAC	-0,0432	-0,1575	TSM PAC	-0,0437	-0,1686

Atlántico Norte. El segundo factor explica que cuando existen bajos valores del IE se relaciona con una alta frecuencia de formación de huracanes en el Atlántico Norte (Figura 9, Tabla 4).

Cuba

En Cuba las variables seleccionadas fueron: H Cuba, TSM ATL, NAO e IE. Se obtuvieron dos factores que representan el 71,1 % de la variabilidad. El primer factor explica que cuando

existen altos valores de la TSM ATL y bajos valores de la NAO se asocia con una alta frecuencia de formación de huracanes que puedan afectar a Cuba. El segundo factor explica que cuando existen bajos valores de IE se asocian con una alta frecuencia de formación de huracanes en Cuba (Figura 10, Tabla 5).

En el periodo mayo-noviembre se obtuvieron dos factores que representan el 70,4 % de la variabilidad. El primer factor explica que cuando

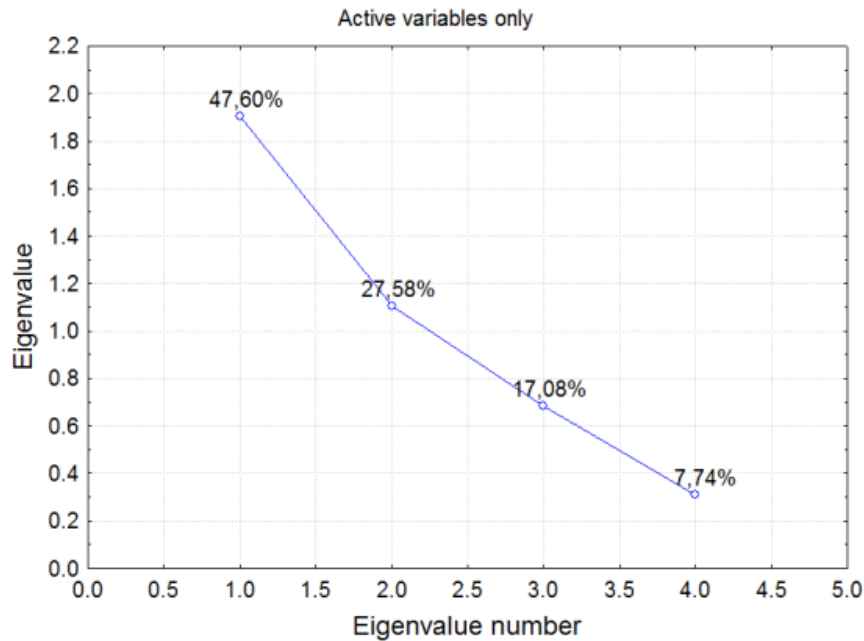


Figura 8. Matriz de correlación de los valores propios en el periodo anual en el Atlántico Norte (1951-2016)

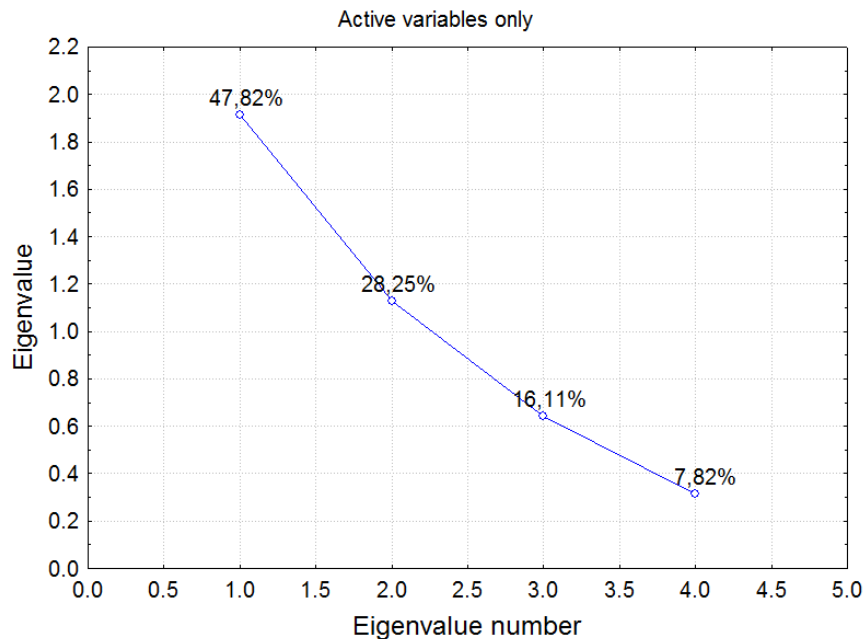


Figura 9. Matriz de correlación de los valores propios en el periodo mayo-noviembre en el Atlántico Norte (1951-2016)

Tabla 4. Factores coordinados de las variables, basado en las correlaciones en el periodo mayo-noviembre en el Atlántico Norte

Variables	Factor 1	Factor 2
H ATL	0,7980	-0,3311
IE	-0,3306	0,8674
NAO	-0,6917	-0,3948
TSM ATL	0,8295	0,3349

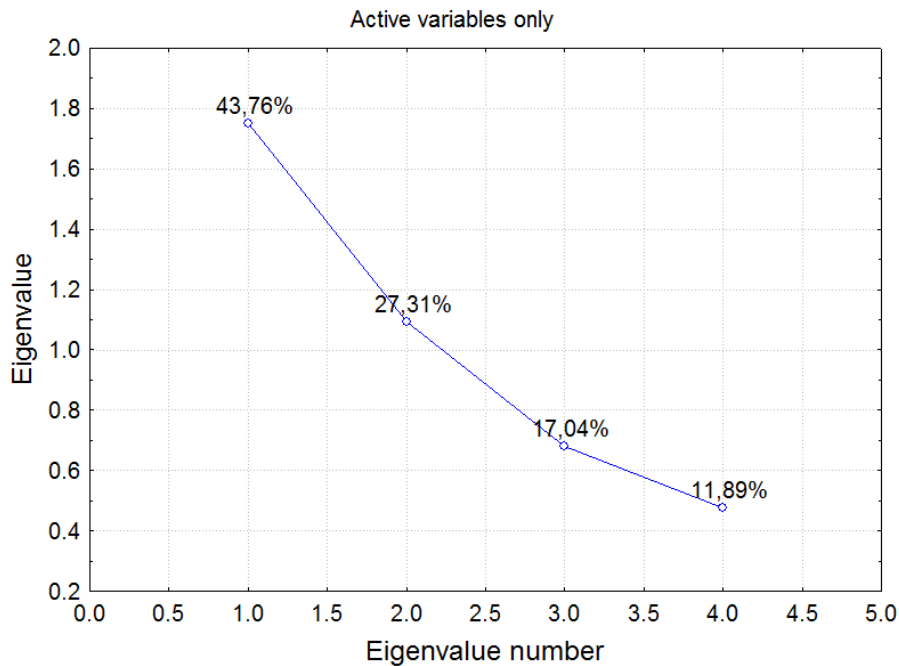


Figura 10. Matriz de correlación de los valores propios en el periodo anual en Cuba (1951-2016)

Tabla 5. Factores coordinados de las variables, basado en las correlaciones en el periodo anual en Cuba

Variables	Factor 1	Factor 2
H Cuba	0,7153	-0,1595
IE	-0,1606	0,9288
NAO	-0,8297	0,0722
TSM ATL	0,7242	0,4463

existen altos valores de la TSM ATL y bajos valores de la NAO se asocia con una alta frecuencia de formación de huracanes que puedan afectar a Cuba. El segundo factor explica que cuando existen bajos valores de IE se asocian con una alta frecuencia de formación de huracanes (Figura 11, Tabla 6).

El ACP mostró que los factores que explican la mayor parte de la variabilidad de la formación de huracanes en el Atlántico Norte y la afectación a Cuba son la TSM ATL y la NAO; el resto de esta variabilidad corresponde al efecto que provoca el IE en dicha formación (Tabla 6).

Análisis de Regresión Lineal Múltiple. Atlántico Norte

Uno de los objetivos de esta investigación es definir un nuevo índice capaz de explicar las variaciones interanuales de la formación de los huracanes en el Atlántico Norte, a partir de la combinación de varios factores, de forma que podamos apreciar cómo los mismos actúan de conjunto. Para lograr este objetivo se decidió utilizar el ARLM, siguiendo el proceso de selección de predictores paso a paso.

Para el ARLM es necesario tener en cuenta la correlación R , el R^2 ajustado y el nivel de

significación p . Se exigió una R superior al 50 %, un R^2 ajustado superior al 35 % y un nivel de significación de $p < 0,0005$.

Al aplicar el análisis de selección de predictores paso a paso se obtuvo que la frecuencia anual de formación de huracanes en el océano Atlántico quedaba integrada por la TSM ATL y el IE, tanto para el periodo anual como para el periodo mayo-noviembre. Sin embargo, teniendo en cuenta la importancia del índice NAO, tanto en el análisis de correlación como en el ACP, así como por consideraciones de carácter meteorológico, se decidió agregar dicha variable

en las ecuaciones de regresión múltiple lineal correspondientes.

En el periodo anual en el Atlántico Norte al realizar el análisis se obtuvo una ecuación de un coeficiente de buena correlación del 63,6 un R^2 ajustado del 37,6, resultando ser altamente significativo ($p < 0,00000$). Se obtuvo además que el intercepto y las variables IE y TSM ATL son altamente significativas (Tabla 7).

A partir del análisis de la información anterior se obtuvo la siguiente ecuación de regresión:

$$y_{ATL} = 6.17 - 0.91 * IE - 0.05 * NAO + 1.48 * TSMATL \quad (1)$$

la cual define al nuevo índice (Índice para el diagnóstico de los huracanes en el periodo anual

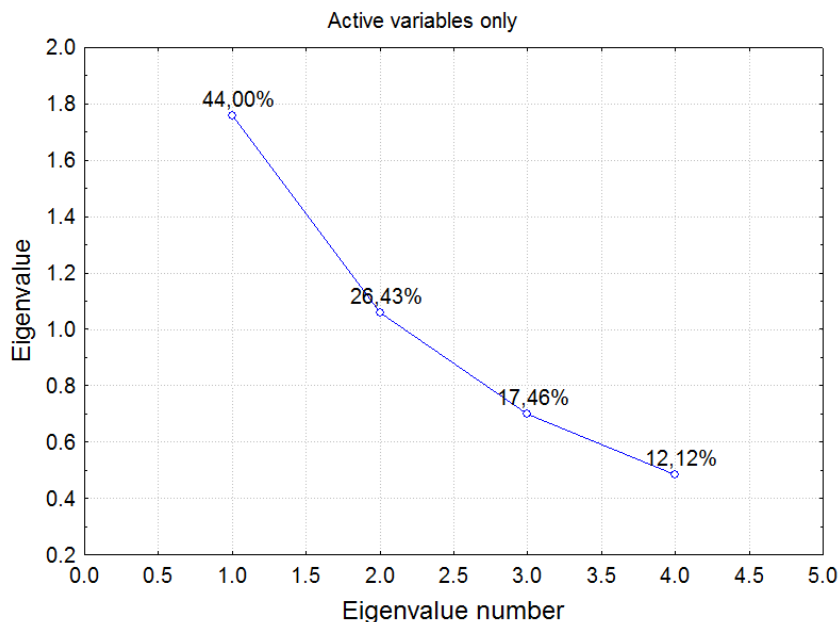


Figura 11. Matriz de correlación de los valores propios en el periodo mayo-noviembre en Cuba (1951-2016)

Tabla 6. Factores coordinados de las variables, basado en las correlaciones en el periodo mayo-noviembre en Cuba

Variables	Factor 1	Factor 2
H Cuba	0,6747	0,3149
IE	-0,1678	-0,9162
NAO	-0,8264	0,1584
TSM ATL	0,7704	-0,3055

Tabla 7. Análisis de Regresión Lineal Múltiple en el periodo anual en el Atlántico Norte

R= 0,6360 R ² = 0,4045 Adjusted R ² = 0,3757 p < 0,00000 Std.Error of estimate: 2,0677						
	Beta	Std.Err. - of Beta	B	Std.Err. - of B	t(62)	p-level
Intercept			6,1665	0,2545	24,228	0,000000
IE	-0,3494	0,1017	-0,9144	0,2661	-3,4366	0,001057
NAO	-0,0197	0,1126	-0,0515	0,2946	-0,1749	0,861659
TSM ATL	0,5655	0,1121	1,4801	0,2934	5,0441	0,000004

en el Atlántico Norte: IHANa) que combina la acción de la TSM ATL, IE y la NAO.

Al realizar el análisis para el periodo mayo-noviembre en el Atlántico Norte se obtuvo una ecuación similar, con un buen coeficiente de correlación múltiple de 64,4 %, un R^2 ajustado del 38,7 % , resultando ser altamente significativo ($p < 0,00000$). Se obtuvo que el intercepto y las variables IE y TSM ATL son altamente significativos (Tabla 8).

A partir del análisis de la información anterior se obtuvo la ecuación de regresión:

$$y_{ATL} = 6.17 - 0.99 * IE + 0.09 * NAO + 1.43 * TSM \text{ ATL} \quad (2)$$

Donde se define al nuevo índice (Índice para el diagnóstico de los huracanes en el periodo mayo-noviembre en el Atlántico Norte: IHANmn), combinando la acción de la TSM ATL, IE y la NAO.

Análisis de Regresión Lineal Múltiple. Cuba

Al realizar el ARLM en Cuba se obtuvo que este método no es adecuado debido a que resultó tener baja correlación, y no ser estadísticamente significativo. Por ello se decidió obtener una expresión para Cuba a partir de la combinación del ACP y el ARLM.

En el ACP se seleccionaron las variables IE, NAO y TSM ATL, donde se obtuvieron dos factores. El primer factor (F_1) explica que existen bajos valores de NAO en presencia de altos valores de TSM ATL; mientras que el segundo factor (F_2) solo representa altos valores del IE.

$$F_1 = - 0.87 * NAO + 0.87 * TSM \text{ ATL} \quad (3)$$

$$F_2 = 0.998 * IE \quad (4)$$

Tomando como variable dependiente los huracanes en Cuba, y como variables independientes los dos factores obtenidos en el ACP se realizó el ARLM. En el periodo anual a pesar de no obtener una buena correlación, resultó ser altamente significativo. Se obtuvo que el intercepto y el primer factor son altamente significativos (Tabla 9).

A partir del análisis de la información anterior se obtiene la ecuación de regresión:

$$y_{Cuba} = 0.41 - 0.22 * F_1 - 0.07 * F_2 \quad (5)$$

Donde se define al nuevo índice (Índice para el diagnóstico de los huracanes en Cuba en el periodo anual: IHCa)

Se realizó el ACP en el periodo mayo-noviembre donde se seleccionaron las variables IE, NAO y TSM ATL, donde se obtuvieron dos factores. El primer factor (F_3) explica que existen bajos valores de NAO en presencia de altos valores de TSM ATL; mientras que el segundo factor (F_4) solo representa altos valores del IE.

$$F_3 = 0.86 * NAO - 0.84 * TSM \text{ ATL} \quad (6)$$

$$F_4 = 0.967 * IE \quad (7)$$

En este periodo a pesar de no obtener una buena correlación, resultó ser altamente significativo. Se obtuvo que el intercepto y el primer factor son altamente significativos (Tabla 10).

Tabla 8. Análisis de Regresión Lineal Múltiple en el periodo mayo-noviembre en el Atlántico Norte

R= 0,6441 R²= 0,4149 Adjusted R²= 0,3866 p < 0,00000 Std.Error of estimate: 2,0496						
	Beta	Std.Err. - of Beta	B	Std.Err. - of B	t(62)	p-level
Intercept			6,1666	0,2523	24,443	0,000000
IE	-0,3787	0,0973	-0,9909	0,2547	-3,891	0,000246
NAO	0,0374	0,1126	0,0978	0,2946	0,332	0,740919
TSM ATL	0,5480	0,1125	1,4342	0,2944	4,8716	0,000008

Tabla 9. Análisis de Regresión Lineal Múltiple en Cuba en el periodo anual

R= 0,4077 R²= 0,1662 Adjusted R²= 0,1398 p < 0,00325 Std.Error of estimate: 0,629						
	Beta	Std.Err. - of Beta	B	Std.Err. - of B	t(63)	p-level
Intercept			0,4091	0,0775	5,2786	0,000002
F_1	-0,3927	0,1150	-0,2217	0,0649	-3,4134	0,001126
F_2	-0,1099	0,1150	-0,0720	0,0753	-0,9561	0,342672

Tabla 10. ARLM en Cuba en el periodo mayo-noviembre

R= 0,3861 R²= 0,1490 Adjusted R²= 0,1220 p<0,00620 Std.Error of estimate: 0,63609						
	Beta	Std.Err. - of Beta	B	Std.Err. - of B	t(63)	p-level
Intercept			0,4091	0,0783	5,2249	0,000002
F_3	0,3518	0,1162	0,1948	0,0644	3,0274	0,003571
F_4	-0,1589	0,1162	-0,1077	0,0788	-1,3671	0,176445

A partir del análisis de la información anterior se obtuvo la ecuación de regresión:

$$y_{Cuba} = 0.41 + 0.19 * F_3 - 0.11 * F_4 \quad (8)$$

Donde se define al nuevo índice (Índice para el diagnóstico de los huracanes en Cuba en el periodo mayo-noviembre: IHCmn).

CONCLUSIONES

1. La temperatura superficial del mar en el océano Atlántico es el principal factor modulador de la formación de huracanes en el océano Atlántico Norte, y de su afectación a Cuba.
2. Los valores positivos de la NAO incrementan la frecuencia de formación de huracanes en el océano Atlántico Norte. En Cuba se favorece la afectación de huracanes en la fase negativa, lo cual no había sido reflejado en estudios anteriores.
3. La fase cálida del ENOS deprime la frecuencia de huracanes en el océano Atlántico. El índice IE resultó ser el que mejor representa al evento ENOS en relación con la formación de huracanes en el océano Atlántico.
4. La TSM ATL regula la influencia de los demás factores en la frecuencia de huracanes, modulando significativamente el impacto del ENOS y la NAO. Las anomalías cálidas incrementan la frecuencia de huracanes, mientras que las frías la disminuyen. Este efecto se observa además al combinarse con cualquiera de los restantes factores.
5. La relación de la QBO con la frecuencia de la formación de huracanes se anula cuando las aguas del Atlántico están más cálidas y permanece cuando están más frías.
6. Se definió a partir del ARLM un índice que combina la acción de la TSM ATL, NAO y el IE, el cual es capaz de explicar más del 40 % de la reducción de la varianza de la frecuencia anual de los huracanes en el Atlántico Norte.

7. Se definió un índice, a partir de la combinación del ACP y ARLM, que depende de los factores F_1 y F_2 en el periodo anual, y F_3 y F_4 en el periodo mayo-noviembre. Este índice permite realizar el diagnóstico de la frecuencia de huracanes que afectan a Cuba.

REFERENCIAS

- Ballester, M., González, C. y Pérez, R. (2010) *Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico*. R. Carreiro, Ed., La Habana, Cuba.
- Bender, M.A., Ginis, I. y Kurihara, Y. (1993) Numerical Simulations of Tropical Cyclone-Ocean Interaction With a High-Resolution Coupled Model. *Journal of Geophysical Research*, 98(93), 245-263.
- Camargo, S.J., Emanuel, K.A. y Sobel, A.H. (2007) Use of a Genesis Potential Index to Diagnose ENSO Effects on Tropical Cyclone Genesis. *Journal of Climate*, 20, 4819-4834, <https://doi.org/10.1175/JCLI4282.1>
- Camargo, S.J. y Sobel, A.H. (2010) Revisiting the Influence of the Quasi-Biennial Oscillation on Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate*, 23, 5810-5825. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3575.1>
- Camargo, S.J., Sobel, A.H., Barnston, A.G. y Klotzbach, P.J. (2010) The influence of natural climate variability, and seasonal forecasts of tropical cyclone activity. J.C.L. Chan and J.D. Kepert. *Global Perspectives on Tropical Cyclones*, 2da edición, de Science to Mitigation. World Scientific Series on Earth System Science in Asia, vol. 4, ISBN 978-981-4293-47-1
- Chang, S.W. y Madala, R.V. (1980) Numerical simulation of the influence of sea surface temperature on translating tropical cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37, 2617-2630.

- Goldenberg, S.B., y Shapiro, L.J. (1996) Physical mechanisms for the association of El Niño and west Africa rainfall with Atlantic major hurricane activity. *Journal of Climate*, 9, 1169-1187.
- Gray, W.M. (1984) Atlantic Seasonal Hurricane Frequency Part I. *Monthly Weather Review*, 112, 1649-1668.
- Hurrell, J.W. (1995) Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation : Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269, 676-679, extraído de <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
- Kim, H.M., Webster, P.J. y Curry, J.A. (2011) Modulation of North Pacific Tropical Cyclone Activity by Three Phases of ENSO. *Journal of Climate*, 24, 1839-1849. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3939.1>
- Landsea, C.W., y Gray, W.M. (1992) The strong association between western Sahelian monsoon rainfall and intense Atlantic hurricane. *Journal of Climate*, 5, 435-453. Extraído de http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/LandseaGray_JclimateMay1992.pdf
- Landsea, C.W. (2000) El Niño-Southern Oscillation and the seasonal predictability of tropical cyclones. Editado por H. F. Diaz and V. Markgraf, en "El Niño: Impacts of Multiscale Variability on Natural Ecosystems and Society".
- Larson, J., Zhou, Y. y Higgins, R.W. (2005) Characteristics of Landfalling Tropical Cyclones in the United States and Mexico : Climatology and Interannual Variability. *Journal of Climate*, 18, 1247-1262, extraído de <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JCLI3317.1>
- Limia, M., Pérez, R. y Vega, R. (2000) Climatología de los ciclones tropicales que han afectado a Cuba. En "Los ciclones tropicales de Cuba, su variabilidad y su posible vinculación con los cambios globales". Informe científico. Instituto de Meteorología. La Habana. 100 pp
- Pérez, R. (2013) Cronología de los Huracanes de Cuba. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba. 7 pp
- Rogers, J.C. (1990) Patterns of low frequency monthly sea level pressure variability and associated wave cyclone frequencies. *Journal of Climate*, 3, 1364-1379, extraído de [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442\(1990\)003<1364:POLFMS>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442(1990)003<1364:POLFMS>2.0.CO;2)
- Sabbatelli, T.A. y Mann, M.E. (2007) The influence of climate state variables on Atlantic Tropical Cyclone occurrence rates. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D17114, doi:10.1029/2007JD008385, 2007
- Shapiro, L.I.J. (1987) Month- to- month variability of the Atlantic tropical circulation and its relationship to tropical storm formation. *Monthly Weather Review*, 115, 2598-2614.

Milena Alpizar-Tirzo. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: milena.alpizar@insmet.cu
Ramón Pérez-Suárez. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: ramon.perez@insmet.cu
Pedro Roura-Pérez. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: pedro.roura@insmet.cu

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

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/)