

Corrientes marinas, temperatura y salinidad de las aguas cubanas; posible evolución futura

Marine streams, temperature and salinity in Cuban Waters; possible future evolution



<https://cu-id.com/2377/v31n1e06>

✉ Ida Mitrani Arenal^{1*}, ✉ Javier Cabrales Infante¹, ✉ Axel Hidalgo Mayo²,
✉ Osvaldo Enrique Pérez López³, ✉ Alejandro Vichot Llano¹

¹Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

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

³Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

RESUMEN: Se presenta un breve análisis acerca de investigaciones oceanográficas ejecutadas en aguas cubanas, que abordaron la distribución espacio-temporal y cambios ocurridos durante las últimas décadas en la temperatura, la salinidad y las corrientes marinas, con inclusión de la influencia del cambio climático previsto. Se abordan en primer lugar los estudios realizados por autores cubanos para las aguas cercanas al territorio nacional y posteriormente, por autores foráneos en los mares Interamericanos, identificados como el Caribe Extendido. Se incluyen las valoraciones acerca de los probables cambios a largo plazo, realizadas a partir de salidas de modelos climáticos con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Se exponen ejemplos de posibles impactos en la biodiversidad y la afectación por huracanes al territorio nacional.

Palabras clave: Estructura termohalina, corrientes marinas, Mar Caribe, cambio climático.

ABSTRACT: A brief analysis of oceanographic researches, carried out in Cuban waters is presented, which addressed the space-temporal distribution and changes that have occurred during the last decades in temperature, salinity and marine currents, including the influence of predicted climate change. The studies, carried out by Cuban authors in the waters near the national territory, are addressed first and later, those by foreign authors in the Inter-American seas, identified as the Wider Caribbean. Assessments about the probable long-term changes are included, made from outputs of climate models with the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Examples of possible impacts on biodiversity and hurricane behavior around the national territory are presented.

Keywords: Thermohaline structure, marine streams, Caribbean Sea, climate change.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático previsto es preocupación no solo de la comunidad científica internacional, sino de toda la humanidad. Estos cambios incluyen todos los hábitats a escala planetaria, donde están incluidos los océanos, que ocupan las tres cuartas partes de la Tierra. En los reportes del Panel Intergubernamental

de Cambio Climático, desde el quinto (IPCC, 2013) hasta el VI (IPCC, 2021), se confirma la certeza de un aumento en la temperatura y salinidad del océano global. Para Cuba, que es un estado insular, particular importancia reviste el estudio de sus aguas y los posibles cambios de los parámetros oceanográficos, entre los que se destacan la circulación y sobre todo la estructura termohalina, que influyen en el desarrollo de los ciclones tropicales y la biodiversidad marina.

*Autor para correspondencia: Ida Mitrani Arenal. E-mail: ida.mitrani@insmet.cu

Recibido: 02/09/2024

Aceptado: 03/10/2024

Conflicto de intereses: Los autores del artículo científico, declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores: Dr. Ida Mitrani Arenal- Concibió la idea general del artículo. Organizó y dirigió toda la búsqueda bibliográfica e indicó las características de la información necesaria. Incluyó una corta descripción de impactos del cambio climático previsto. Redactó el artículo. Lic. Javier Cabrales Infante y Dr. Alejandro Vichot Llano- Analizaron el procesamiento de datos y salidas, provenientes de los modelos globales usados por autores nacionales y foráneos. MSc. Osvaldo Enrique Pérez López y MSc. Axel Hidalgo Mayo- Analizaron la información relacionada con datos *in situ*, registros de huracanes e inundaciones costeras.

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/)

Desafortunadamente, no se cuenta con suficientes datos instrumentales obtenidos *in situ* en aguas cubanas, especialmente en aguas profundas, dado lo costoso que resulta la obtención de estos en el presente, pero se encuentran libremente disponibles en Internet varias bases de datos que incluyen registros obtenidos desde satélites y boyas, aunque estas últimas algo alejadas del entorno cubano, así como re-análisis y salidas de modelos oceánicos globales o acoplados, que pueden brindar alguna información de calidad. Tanto investigadores cubanos como foráneos, con inclusión de los autores del presente texto, han publicado algunas investigaciones realizadas a partir de las fuentes de información disponibles y si bien no son numerosas para aguas cubanas, al menos permiten conocer las características generales de la oceanografía general en el área y su posible evolución por el cambio climático previsto.

MÉTODOS

Se procedió primeramente a la consulta de los documentos de IPCC, principalmente de los reportes de 2013 y 2021, con especial atención a la información referente a los mares interamericanos y al área tropical del Atlántico Norte.

Posteriormente se procedió a una revisión de las publicaciones existentes de autores cubanos, relacionadas con las particularidades oceanográficas de las aguas cubanas en lo referido a estructura termohalina (con inclusión de la distribución de las masas de agua) y corrientes marinas, así como a su posible evolución por el cambio climático previsto. En segunda instancia, se revisaron publicaciones recientes de autores foráneos, donde fueron utilizadas salidas de diversos modelos numéricos climáticos para valorar el cambio a mediano y largo plazo con los escenarios intermedio RCP4.5 y extremo RCP 8.5, en los mares aledaños a Cuba. Dada la importancia de estos cambios en la actividad ciclónica, se incluyeron las proyecciones descritas por documentos IPCC y diversos autores, acerca del posible comportamiento de los ciclones tropicales en el área del Caribe extendido, localizado en los 5°-30°N y los 55°-100°W, que incluye al Golfo de México y al área de las Bahamas.

Una vez establecidos los posibles cambios en el ambiente oceanográfico, antes mencionados, se procedió a la búsqueda de ejemplos de impactos importantes, como son la generación de inundaciones costeras, así como la influencia en la biodiversidad, específicamente en los corales y las especies comerciales.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Desde el V Reporte de IPCC, emitido en 2013, en el capítulo referido a los océanos (Hartman *et al.* 2013) se describe el incremento de la temperatura superficial oceánica (Tso) en 0.61 (0.55 a 0.67) °C entre los períodos 1850-1900 y 1986-2005. También se manifiesta que en los primeros 75 m ha habido un calentamiento acelerado de 0.11 (dentro del rango 0.09-0.13)°C por década en el período 1971-2010, con la posibilidad de que este cambio haya alcanzado profundidades de más de 700 metros entre 1957 y 2009.

En el capítulo 2 del VI reporte IPCC (Gulev *et al.*, 2021), se expresa que los estudios paleo-climáticos muestran que desde la última glaciación, hace más de 11 mil años, nunca el calentamiento global había sido tan rápido, como el detectado desde 1971. Con respecto al reporte de 2013, se describen valores muy similares de 0,69 (0.54 a 0.79)°C, señalando que la diferencia con lo reportado en IPCC (2013), de 0.08°C, es un aporte de la obtención de nuevas observaciones.

En el Capítulo 9 (Fox-Kemper *et al.* 2021) del VI Reporte de IPCC, se manifiesta con gran certeza que la temperatura superficial oceánica se incrementó en 0.88°C (0.68 a 1.01)°C desde el período pre-industrial (1850-1900) hacia el período (2011-2020) y en el orden de 0.6°C (0.44 a 0.74)°C desde 1980 hasta el 2020. Se expresa que las proyecciones entre los períodos 1995-2014 y 2081-2100, para escenarios de bajas emisiones (RCP1-2.6) implican como promedio un incremento de 0.86 (0.43 a 1.47, rango más probable)°C y en el entorno de 2.89 (2.01 a 4.07, rango más probable) °C en escenarios RCP5-8.5.

Con respecto a la salinidad, en ambos reportes IPCC (2013, 2021), se expresa lo mismo: se ha observado un ligero aumento de salinidad en las áreas con exceso de evaporación y una disminución en las áreas con aumentos de las lluvias, así como en las aguas subpolares por fusión de los hielos. Según Gulev *et al.* (2021), se tiene la certeza de un aumento en el contraste de salinidad entre altas y bajas latitudes desde 1950 y ello ha influido en el debilitamiento de los intercambios meridionales, sobre todo el del Atlántico, identificado por su sigla en inglés, AMOC¹ (Atlantic Meridional Overturning Circulation), al disminuir la flotabilidad de las masas de agua procedentes de áreas de gran evaporación, como son las latitudes subtropicales del Atlántico. Desde el reporte de 2013, se señala que en el período 1950-2008, se aprecia que el contraste latitudinal ha aumentado en 0.13 psu, dentro de un intervalo de (0.08-0.17) psu. También se ha observado que en

¹ Se refiere al sistema de transporte en el Atlántico, consistente en el traslado de aguas cálidas de baja densidad, de sur a norte, sobre las frías y densas aguas de altas latitudes nórdicas, que se hundeen y trasladan hacia el sur, como parte de la circulación global.

general el Atlántico es más salobre y el Pacífico, menos. En este capítulo, un gráfico del océano planetario muestra que en los años 1950-2019, se aprecia un aumento de salinidad entre (0.02-0.04) psu/década en Caribe, no hay cambio significativo en el Golfo de México y un máximo de 0.05 psu/décadas en el entorno de las Antillas Menores. Pero en ninguno de los dos documentos se refiere una cifra hacia el futuro, ni siquiera en los capítulos especialmente referidos a los océanos, manifestando que la salinidad es muy dependiente de la evaporación y de los aportes de agua fresca.

Acerca de la circulación oceánica, en los Reportes de IPCC (2013, 2021) aparece señalado que durante el siglo XX no se han observado cambios importantes ni en los sistemas de corrientes marinas, ni en los giros anticiclónicos de circulación oceánica, ni en los transportes meridionales. Se considera que no hay evidencias importantes, de cambios observados en los transportes meridionales oceánicos antes del año 2000 y poco significativos en las primeras décadas del siglo XXI; no se espera una gran variación en el transporte meridional del Atlántico antes del 2100, pero todas las salidas de modelos y para todos los escenarios, indican con alta probabilidad que estos transportes pudieran ser más lentos, aunque no se espera un colapso abrupto antes de 2100.

La transportación por AMOC, es un importante factor modulador del clima, sobre todo en el hemisferio occidental, que mueve enormes volúmenes de agua. A esta circulación tributa el sistema de la corriente del Golfo, que involucra a las corrientes que circundan al territorio cubano. Frajka-Williams *et al.* (2019) refiere que en el entorno de los 26°N, en mediciones realizadas en 2004-2017, AMOC presentó un flujo medio de $17 \pm 4,4 \text{ Sv}^2$, en correspondencia con mediciones hechas por Bryden *et al.* (2005), quien hace notar un debilitamiento desde 23 Sv en 1957 hasta menos de 15 Sv en 2004 y sin embargo, después de un ajuste estacional de las observaciones, se reduce a un cambio desde 20 Sv a 17 Sv, es decir, de solo -3 Sv, pero aún así, es una disminución.

En el capítulo 9 del VI reporte de IPCC, Fox-Kemper *et al.* (2021) señala que los estudios paleoclimáticos indican una gran estabilidad de AMOC en los últimos 8000 años. Por otra parte, se muestran gráficos de las salidas de modelos acoplados CMPI5 y CMPI6³ para la latitud de 35°N, donde se aprecia poco cambio en el período histórico (1850-2011) si bien durante el Siglo XX y hasta el 2004, aparece un fortalecimiento, con anomalías del orden de 2 Sv; posteriormente aparece un declive entre -2 y -5 Sv hacia el 2050 desde los escenarios de bajas emisiones

hasta los de alta, mientras que para 2100 los de bajas emisiones se conservan en ese rango pero con RCP8.5 pueden llegar a -10 Sv; es muy probable que se vuelva más lenta a lo largo del siglo XXI, en todos los escenarios previstos. Esto significa que AMOC puede debilitarse desde un 24 (intervalo entre 4 y 46) % en las proyecciones asociadas a RCP1-1.6 hasta un 39 (intervalo 17entre 55)% con RCP8.5, pero estos valores se consideran de baja confianza, debido a que se considera que tanto en los procesamientos observacionales como en la modelación, no están presentes todos los procesos naturales clave. Existe una confianza media en que la caída no implicará un colapso abrupto antes de 2100.

Es válido señalar que aunque existe baja confianza en grandes cambios en AMOC, persiste la gran confianza en el futuro debilitamiento, pero esta es una característica cualitativa basada en la comprensión física del proceso, debido a que la fusión de hielos y glaciales con un aumento de temperatura pueden aligerar la densidad de las aguas de altas latitudes y estas ganar flotabilidad, mientras que un aumento de salinidad en las áreas subtropicales de gran evaporación, puede hacer más pesadas las aguas cálidas y estas perderían flotabilidad.

Acerca del sistema de la corriente del Golfo, que no solo tributa a AMOC sino también al giro anticiclónico del Atlántico Norte, se espera poco cambio. Fox-Kemper *et al.* (2021), dentro del reporte VI reporte IPCC, refiere que es el más potente flujo del Atlántico Norte, transportando sobre 30 billones kg/s de agua en las cercanías de la costa oriental de Estados Unidos, con temperaturas que sobrepasan a su entorno en 5-15°C y velocidades de más de 1 m/s; esta particularidad de involucrarse en la circulación AMOC y en el giro anticiclónico del Atlántico la relacionan directamente con los futuros cambios en ambas circulaciones. Los CMPI5 y CMPI6, muestran un debilitamiento en la velocidad del sistema de la corriente del Golfo, desde las Antillas menores, el entorno cubano y hasta la salida al Atlántico, muy pequeño; incluso en el escenario RCP8.5 para el espesor de 100 m desde la superficie, sería del orden de -0.05 hasta -0.1 m/s en 2081-2100, con respecto a 1995-2014. No se espera que se fortalezca.

Con respecto a los ciclones tropicales (CTs), en el VI Reporte de IPCC (2021), se refiere que si bien no se detecta un posible aumento en la formación de estos eventos, se aprecia un aumento en la frecuencia de huracanes intensos, de categorías 3-5, cuya aparición ha aumentado en las últimas cuatro décadas a escala global. En el Capítulo 11, Seneviratne *et al.* (2021) confirman que en las últimas cuatro décadas,

² Un Sverdrupp es una unidad de flujo; un Sv = $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$

³ CMIP5 y CMIP6 se refiere a los conjunto de modelos acoplados de intercomparación de diversos forzamientos, en las fases 5 y 6 de los grupos de experimentos

a la par que se ha notado un incremento en la frecuencia de huracanes de gran intensidad (aunque no de huracanes en general), con un gran aumento en la velocidad de sus vientos máximos, se ha notado una disminución en la velocidad de traslación, fundamentalmente en aquellos que impactan a las costas de Estados Unidos desde el Atlántico desde 1900, lo cual implica mayor peligro por lluvias intensas e inundaciones para esa área.

En las investigaciones de [Yoshida et al. \(2017\)](#), que tributan a [IPCC \(2021\)](#), se realizaron simulaciones numéricas de 5000 años, utilizando las salidas de un conjunto de modelos acoplados de 100 miembros, disponibles en d4PDF (Database for Policy Decision-making for Future climate changes, por sus siglas en inglés), con escenario RCP 8.5 y proyección de cambio de Tso en 4°K hacia 2090, pasado el período histórico de 1951-2010 y prolongado en 60 años hacia el futuro. Los resultados muestran, con alta confianza, que a escala global habrá una disminución en la ciclogénesis del 33% para todas las categorías de CTs, así como una disminución en un 13 % los de categorías 4-5, aunque estos pudieran presentarse con vientos máximos más intensos. Se destacan como excepción algunas regiones y en especial, el área norte-central del Pacífico.

Estudios posteriores, realizados por [Knutson et al. \(2020\)](#) y que tributaron a [IPCC \(2021\)](#), se basan en las proyecciones de la actividad de CTs a partir de salidas de modelos climáticos globales CMIP5 que simulan los forzamientos antropogénicos con escenario RCP8.5 e incremento de temperatura global planetaria en 2°C. Se destaca un aumento en intensidad de los CTs con un incremento de sus vientos máximos durante su tiempo de vida del 5%, dentro del rango (1-10)%. Como consecuencia, se manifiesta que aumentaría la proporción de huracanes con categoría 4-5 en un 13%, con una confianza de media a alta. También a escala global, se ha apreciado una disminución en la velocidad de traslación. No obstante, todos los estudios indican una disminución general en frecuencia, hacia la segunda mitad del siglo XXI, aunque la proporción de huracanes intensos aumente en cantidad con respecto al total. En general, estos estudios confirman las apreciaciones de [Yoshida et al. \(2017\)](#).

Otro autor que se debe considerar, es [Jewson \(2023\)](#), que utilizando las proyecciones descritas por [Knutson et al. \(2020\)](#), se refiere a la frecuencia de huracanes intensos que tocarían tierra, con un incremento del 16% a escala global, de aumentar la Tso global en 2°C, aunque estos resultados muestran gran incertidumbre. Para el Atlántico, el autor identifica cuatro regiones: 1. Golfo de México, 2. Caribe, 3. Antillas Menores+Atlántico Tropical (0-25°N) y 4-Atlántico subtropical (25-45°N). Señala que en las áreas 2,3,4, todas las tormentas de categoría 1-5, muestran aumentos en la frecuencia media como

resultado del cambio climático, no así en el área 1. También señala que la llegada a tierra aumentará en todas las regiones, en 6%, 11%, 11%, and 5%, respectivamente.

A continuación, se describen los cambios observados en aguas cubanas y posible evolución futura.

1. Circulación oceánica en el entorno cubano

Las corrientes marinas, identificadas como los movimientos horizontales del océano planetario, son las encargadas de re-distribuir el calor y demás propiedades físico-químicas de las aguas oceánicas. Entre los principales factores que determinan su dirección y velocidad se cuentan el campo de viento, los gradientes de presión hidrostática (dependientes de la distribución de densidad del agua), las mareas y la sinuosidad de los continentes y del fondo marino.

En el entorno cubano, en aguas de plataforma y costeras, predomina la influencia de la geografía local y de las corrientes de marea astronómica, que también son generalmente débiles, pero pueden fortalecerse en las pasas entre los cayos y en los canales de entrada de bahías de bolsa, aunque como promedio no será mucho más de 1 m/s ([Mitrani et al. 2020](#)). En presencia de eventos severos, las mareas pueden mitigar los efectos de las inundaciones costeras en fase de vaciante o bien fortalecer los daños de estos eventos, si coinciden con fase de llenante.

En aguas profundas, la velocidad de las corrientes marinas depende fundamentalmente de dos componentes ([Egorov 1974](#), [Weber 1983](#), [Stewart, 2000](#); [Mitrani 2017](#)):

- La componente eólica, dependiente de la tensión del viento. Esta dependencia puede alcanzar hasta 1 km de profundidad, si bien su vez el océano influye en los movimientos atmosféricos, puesto que la fricción superficial modula a su vez a la tensión del viento.
- La componente termohalina, también llamada geostrofica, dependiente de la distribución de la temperatura (termo) y salinidad (halina), que determinan la distribución de la densidad del agua.

Las diferencias de densidad generan planos inclinados, donde las aguas menos densas se dilatan y se trasladan sobre las más densas. Así, en el Atlántico las cálidas y ligeras aguas tropicales se trasladan hacia altas latitudes por la superficie oceánica, mientras las densas y frías aguas polares se trasladan hacia los trópicos, sumergidas debajo de las aguas cálidas. De este modo, la circulación planetaria actúa como regulador del clima terrestre, sobre todo en los países insulares.

En las aguas profundas que rodean a Cuba, se han identificado cuatro corrientes permanentes ([ICH, 1989](#)):

- La corriente del Caribe, como continuación de la rama de las corrientes Ecuatoriales que se adentran en el mar Caribe a través del arco de las Antillas, hacia el oeste.
- La corriente de Yucatán, que atraviesa el canal de ese mismo nombre, se adentra en el golfo de México y conforma un sistema de vórtices anticiclónicos, identificados como corriente de Lazo.
- La corriente de La Florida, saliente del Golfo de México desde la corriente de Lazo, que se incorpora a la Corriente del Golfo, al norte de las provincias centrales cubanas.
- La corriente de las Antillas, que nace como otra rama de las corrientes Ecuatoriales y bordea el Arco de las Antillas, para también incorporarse a la corriente del Golfo, sobre el norte de las provincias orientales cubanas.

Si bien en los ejes de estas corrientes permanentes, se presentan velocidades de más de 1 m/s en áreas alejadas de las costas de Cuba, en las cercanías se caracterizan por ser muy débiles, con velocidades promedio de 0.2 m/s hasta poco más de 0.6 m/s en sus ejes (Mitrani et al. 2020), aunque se puede observar una aceleración del movimiento al paso de eventos meteorológicos severos, como son los sistemas frontales y los ciclones tropicales.

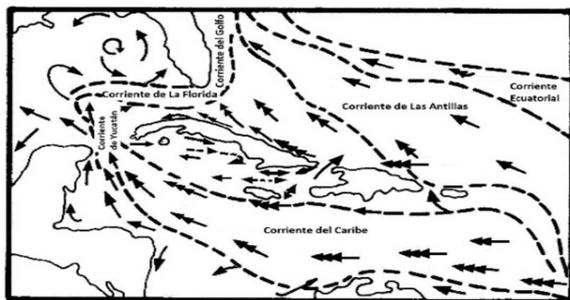


Figura 1a. Circulación oceánica en aguas aledañas a Cuba; cada cabeza de saeta indica 0,5 nudos que equivale a 0.25 m/s (ICH 1989; Mitrani 2017)

En las Figuras 2 a, b se muestra la componente geostrofica, calculada por especialistas de GEOCUBA con los datos 1066-2000, que aparecen en Mitrani et al. (2017). Obsérvese que esta componente caracteriza mejor a la llamada “contracorriente cubana”, que aparece como compensadora del transporte de las corrientes permanentes. La velocidad máxima se observa en la corriente de Lazo, en el orden de 1 m/s, a decenas de kilómetros de la línea costera cubana.

En lo que respecta a posibles cambios en la velocidad de las corrientes permanentes en condiciones habituales, se aprecia lo siguiente:

Según refieren Carracedo et al. (1919), de un análisis de la componente geostrofica para aguas cubanas y mareas aledañas a Cuba, realizado con datos altimétricos satelitarios de la base COAST WATCH/NOAA en 1993-1918, no se aprecian cambios importantes en la velocidad de las corrientes marinas. Es válido señalar que los valores obtenidos para las aguas cubanas, se corresponden con los resultados obtenidos por los especialistas de GEOCUBA para 1966-2000, publicados en Mitrani et al. (2017).

En las investigaciones de Bustos & Ricardo (2021), analizando salidas de diversos modelos climáticos con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, se encontró que la componente termohalina no muestra alteraciones hacia los próximos 100 años, puesto que los posibles aumentos en temperatura y salinidad oceánica,

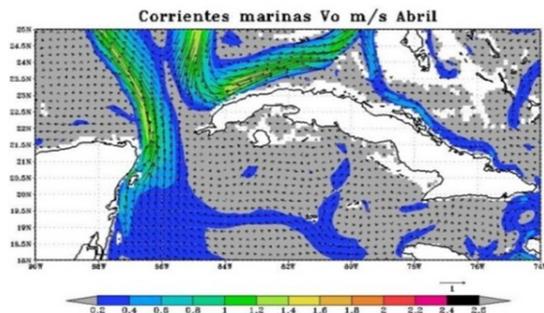


Figura 1b. Corrientes marinas sumarias en un mes de gran intensidad. (Re-análisis del 01/abril/2010, disponible en HYCOM, 2024)

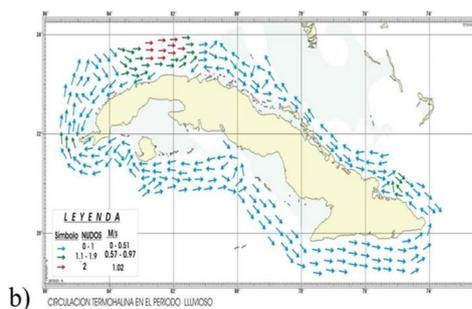
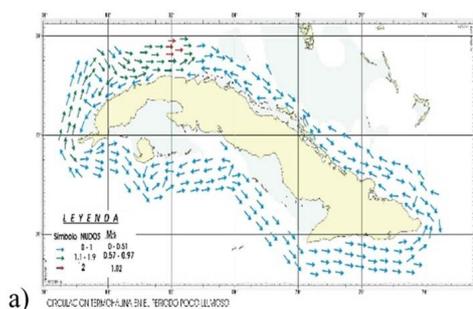


Figura 2. Circulación termohalina (geostrofica) en aguas cubanas, 1966-2000 (tomado de Mitrani et al. 2017)

se compensan de modo tal que no se aprecian variaciones en la distribución de la densidad del agua en el Caribe.

Queda solo la influencia de la componente eólica, que en condiciones habituales pudiera incrementarse ligeramente, de ocurrir un aumento en la velocidad del viento, que sería de poca importancia, acorde con lo referido por [Alonso et al. \(2019\)](#) para diversos escenarios, según se resume en la [Tabla 1](#).

Teniendo en cuenta que solo la componente eólica puede aportar algún cambio, se establece lo siguiente: puesto que esta componente puede alcanzar hasta el 3% de la velocidad del viento ([Egorov, 1974](#); [Weber, 1983](#); [Stewart 2000](#)), y que la velocidad del viento Alisio es como promedio de 3.8 m/s ([Vega et al. 1990](#)), el incremento esperado para aguas cubanas, de hasta 0.3 m/s para la velocidad del viento en el peor escenario (RCP8.5 en el período 2071-2098, ver [Tabla 1](#)) implicaría solo un ligero aumento de la velocidad de las corrientes marinas, del orden de 0.123 m/s. En aguas cercanas a la costa sur de Cuba, la velocidad de las corrientes se mantendría entre 0.2 y 0.4 m/s; en áreas de la costa norte (corrientes de Yucatán-Lazo-La Florida-las Antillas), como promedio pudiera llegar al entorno de 0.7 m/s en condiciones no perturbadas, sobre todo en la corriente de Lazo, pero a decenas de kilómetros de las aguas cubanas.

De lo anterior se deduce que en condiciones habituales, los posibles incrementos en la velocidad de las corrientes marinas no ofrecen peligro para actividades náuticas, ni harán aprovechable este recurso como fuente alternativa de energía renovable.

2. Temperatura y salinidad. Estructura termohalina

El área de interés para los estudios de estructura termohalina, se localiza entre 19-25°N y 72-86°W ([Figura 3](#)).

A partir de datos procedentes de expediciones oceanográficas de los años 1966-2000, se logró caracterizar la estructura termohalina (distribución vertical de temperatura, salinidad y densidad) de las aguas cubanas, así como la distribución vertical de las masas de agua por las curvas TS.

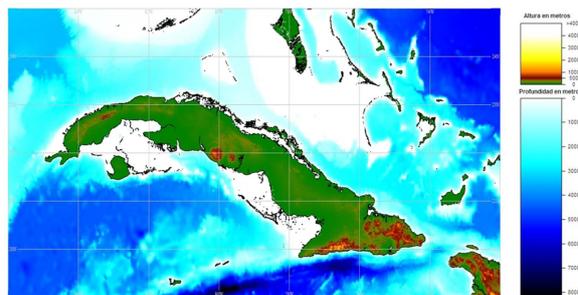


Figura 3. Batimetría de las aguas cubanas, tomada del Atlas GEBCO (2009)

La representación gráfica de los promedios anuales de temperatura superficial oceánica (Tso), salinidad superficial oceánica (Sso) y densidad convencional superficial oceánica (σ_t)⁴, aparecen en las [Figuras 4 a, b, c](#) ([Mitrani et al. 2008](#)).

En las [figuras 5 a, b, c](#) se muestran los perfiles verticales promedio de T, S, así como las curvas TS para identificar las masas de agua en los años 1966-2000 ([Mitrani et al. 2008](#); [2017](#)). Los puntos de cambio de la curva TS (Temperatura - Salinidad) indican la presencia de diversas masas de agua, que se transportan desde los océanos y se sumergen en dependencia de su densidad.

En las aguas cubanas, se ha identificado la distribución vertical de las masas de agua, típica de latitudes tropicales ([Tabla 2](#)), donde el máximo de temperatura se observa en las aguas superficiales y el de salinidad, en el entorno de 150 a 250 m de profundidad (ver [Mitrani et al. 2008](#); [2017](#)). En las aguas superficiales está presente la capa homogénea o mezclada, para la cual se asentó el intervalo promedio de temperatura durante el año; la frontera inferior se identifica como el nivel con 0,5°C de diferencia con la superficie; las aguas sub-superficiales todavía presentan curso anual en el entorno de los 200 m, aunque mucho más débil que las superficiales.

2.1. Cambios observados, por datos reales, a finales del siglo XX

En las aguas aledañas al Archipiélago Cubano, se han observado incrementos de salinidad y temperatura oceánicas en los años 1966-2000, desde la superficie

Tabla 1. Resumen de posibles cambios en la velocidad del viento sobre aguas aledañas a Cuba, de sur a norte, para diversos escenarios, tomado de los mapas de ([Alonso et al., 2019](#))

Períodos	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Aguas caribeñas	Aguas al norte de Cuba	Aguas caribeñas	Aguas al norte de Cuba
2011-2040	Entre 0 y 0,15 m/s	0,15 m/s	Entre 0 y 0.3 m/s	Entre 0.3 m/s y 0.2 m/s
2041-2070	Entre -0,15 m/s y 0	Entre 0.15 m/s y 0.2 m/s	Entre 0 y 0.2 m/s	0.3 m/s
2071-2098	Entre 0.15 m/s y 0.3 m/s	0.3 m/s	Entre -0.4 y 0	Entre 0.3 m/s y 0.2 m/s

⁴ Recordar que la densidad convencional es adimensional y es igual a la diferencia entre las densidades de agua destilada y de agua de mar, multiplicada por mil y dividida por la propia densidad de agua destilada.

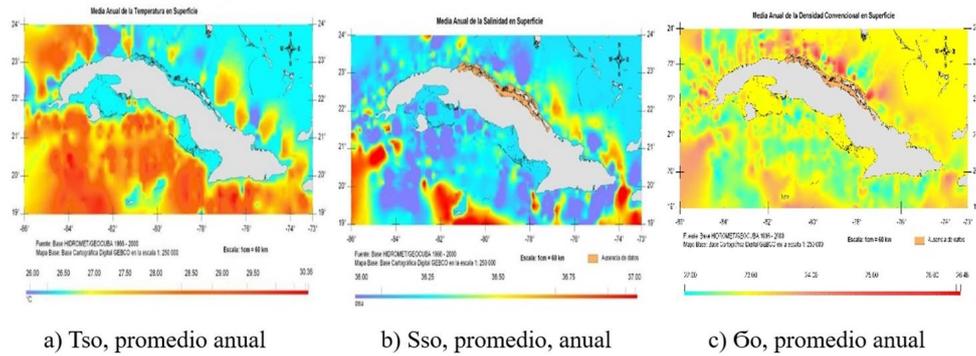


Figura 4. Tso, Sso y curva TS en aguas cubanas, por datos de expediciones 1966-2000 (Mitrani et al. 2008; 2017a, b)

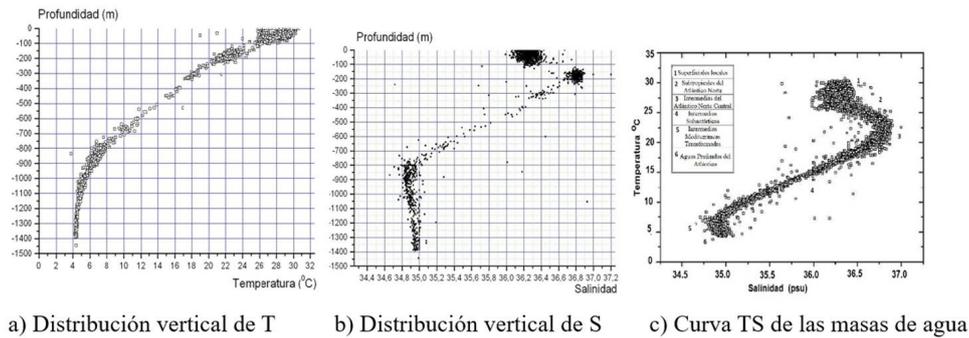


Figura 5. Estructura termohalina vertical de las aguas cubanas en los años 1966-2000 (Mitrani et al. 2008; 2017)

Tabla 2. Distribución vertical de las masas de agua en el entorno marino cubano. Los valores de temperatura (T °C) y Salinidad (S en psu ⁵) en las columnas, están ordenados desde superficie hasta la profundidad de 1400 m. Obsérvese que mientras la temperatura disminuye, la salinidad aumenta hasta el entorno de los 250 m y después disminuye.

Masas de Agua	Temperatura [°C]	Salinidad [psu]	Fronteras De Localización [M]
Superficiales locales	31-25	36.0-36.5	Decenas de metros (incluye el espesor de la capa mezclada)
Subtropicales del Atlántico Norte	25-22	36.6-36.9	Entre el límite de la capa mezclada y los 250 m
Intermedias del Atlántico Norte Central	22-8	35.0-36.6	250-800
Intermedias Subantárticas	8-4,5	34.8-35	800-1200
Intermedias Mediterráneas Transformadas	4.5 - 4	35	1200-1400
Aguas Profundas del Atlántico	< 4°C	<35	<1400

hasta los 500 m de profundidad, indicando que los cambios alcanzan desde la superficie hasta las masas de agua intermedias, según se aprecia en la Tabla 3 (Mitrani et al. 2016; 2021). Los cambios observados más importantes fueron los siguientes:

- Aumento de la temperatura de la superficie del mar en 0,7 °C, para una tendencia lineal de 0.02 °C/año
- Aumento del máximo de salinidad, situada entre 200 y 300 de profundidad, en 0,1 psu.
- Un aumento de algunas decenas en metros, de la profundidad de la capa mezclada.
- Un aumento de algunas decenas en metros, de la profundidad de la capa homogénea y de la isoterma de 26 °C.

- Aumento de la salinidad superficial entre 0.1 y 0.2 psu, con una tendencia lineal de 0.0028 a 0.0057 psu/año

Si bien en aguas cubanas, después del año 2000 no se han realizado expediciones oceanográficas en aguas profundas, y además no existen instalaciones para obtener mediciones “in situ” en aguas cubanas, otros autores de otras naciones han obtenido datos de aguas aledañas al país y también han logrado obtener y elaborar datos medidos desde satélites. Estas mediciones han mostrado que la temperatura y la salinidad en los mares que rodean a Cuba, han continuado en aumento durante las primeras décadas del siglo XXI, según se refleja en la Tabla 4, donde se han asentado los resultados obtenidos.

Tabla 3. Cambios en Temperatura (T) y Salinidad (S) por péntadas en 1966-2000, en las masas de las aguas cubanas. Los valores de temperatura (T) y Salinidad (S) en las columnas, están ordenados desde superficie hasta más de 500 m. Obsérvese que mientras la temperatura disminuye, la salinidad aumenta hasta el entorno de los 250 m y después disminuye.

Masas de agua	1966-1979		1980-1984		1985-1989		1990-2000	
	T [°C]	S [psu]						
Superficiales Locales (0-decenas m)	29-24	35.9-36.5	30-25	35.8-36.6	30-25	35.9-36.7	30-25	35.9-36.6
Sub-superficiales del Atlántico Norte Sub-Tropical (hasta 250 m)	24-20	36.8-36.6	25-21	36.7-36.8	25-22	36.7-36.9	25-22	36.7-37.0
Intermedias del Atlántico Norte Central (250-800 m)	20-8	36.6-35.0	21-8	36.6-35.1	22-8	36.7-35.1	22-8	36.7-35.1

Tabla 4. Evidencias de cambios en la temperatura y la salinidad en los mares que rodean a Cuba, hasta las primeras décadas del siglo XXI

Autores	Períodos analizados	Área de estudio	ΔT [°C]	ΔT/Δt [°C]	ΔS [psu]
Antuña et al. (2015)	1906-2005	Aguas Cubanas		0.75 °C/centuria	
		Entorno de Las Antillas menores		1.32 ±0.25 °C/centuria	
		Caribe Extendido (55-100° W; 5-25° N)		1.08 ± 0.32 °C/centuria	
Bustos & Ricardo (2021)	1960-2005	Caribe Extendido (55-95° W; 5-30° N)	0.89 ±0.56 °C		0.24±0.19 psu
Wang et al. (2022)	1970-2020	Golfo de México	1.0 ± 0.25 °C	0.193 °C/década	
Hibbert et al. (2023)	1982-2020 (agosto-noviembre)	Caribe Extendido (55-100° W; 5-25° N)	0.94 °C	0.24 °C/década	

Todos los resultados indican un incremento en el entorno de 1°C en las primeras décadas del siglo XXI con tendencias del orden de 0.02°C/año, en los mares aledaños a Cuba, en correspondencia con los incrementos detectados por datos de expediciones en los años 1966-2000 y por salidas de modelos climáticos globales (para aguas cubanas por Mitrani et al. 2008; 2016; 2021)

2.2 Cambios futuros, estimados por modelos numéricos

En el procesamiento de las particularidades de la estructura termohalina y posible evolución futura a largo plazo, se compararon los datos superficiales (Tso y Sso) de las expediciones oceanográficas en aguas cubanas de los años 1966-2000 con las proyecciones de modelos climáticos globales HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC y el CNRC-CM5 en el escenario de forzamiento de RCP 4.5. Las salidas de los modelos globales consultados, muestran que el incremento de Tos para el periodo 1966-2000 se

encuentra en el entorno de 0.02 °C /año, con una correlación temporal del 94%, mientras que para Sso indican desde 0.002 a más de 0.005 psu/año como promedio (es decir, ligeramente más bajo que lo observado), con una correlación temporal del 55%.

Según se muestra en la [Tabla 5](#), las salidas de los modelos estudiados indican que la Tso promedio anual en aguas cubanas, hacia el periodo 2030-2040 se incrementaría entre 0.4 y 1.0 °C y la Sso, entre 0.4 y más de 0.6 psu, mientras que hacia la segunda mitad del siglo XXI (2041-2100), la temperatura superficial oceánica aumentaría entre 1.4 y 2 °C y la salinidad, en el entorno de 0.5 psu. Es de esperar que el arribo del incremento de Tso a más de 2 °C sea durante o posterior a 2099, puesto que los modelos analizados muestran para este año el incremento de la temperatura superficial oceánica en aguas cubanas, en el entorno de los 2 °C. Para Sso, el posible incremento estaría en el orden de 0.5 a 0.8 psu.

Para el escenario de 8.5, se cuenta con los resultados obtenidos por Antuña et al. (2015) y Bustos & Ricardo (2021), resumidos en siguiente [Tabla 6](#).

Tabla 5. Posibles incrementos futuros de Tso y Sso en aguas cubanas con escenario RCP4.5, en el siglo XXI

Modelos globales	Período Pre industrial		2030-2040		Incremento		2041-2100		Incremento		1999		Incremento	
	Sos (psu)	Tos (°C)	Sos (psu)	Tos (°C)	ΔSos (psu)	ΔTos (°C)	Sos (psu)	Tos (°C)	ΔSos (psu)	ΔTos (°C)	Sos (psu)	Tos (°C)	ΔSos (psu)	ΔTos (°C)
CNRM-CM5	35.85	25.78	36.18	26.69	0,33	0,91	36,30	27.18	0,45	1,40	36,34	27,49	0,49	1,71
HadGEM2-CC	35,63	26,56	35,81	27,60	0,18	1,04	36,17	28,17	0,54	1,61	36,44	28,89	0,81	2,33
HadGEM2-ES	35,64	26,66	36,19	28,06	0,55	1,40	36,19	28,68	0,55	2,02	36,42	28,59	0,78	1,93
HadGEM2-AO	35,62	27,17	35,96	28,34	0,34	1,17	36,18	29,04	0,56	1,87	36,17	29,52	0,55	2,35

Tabla 6. Posibles incrementos de temperatura (Tso) y salinidad superficiales en mares aledaños a Cuba, durante los próximos 50 a 100 años, con el escenario RCP8.5. Se incluyen los valores obtenidos \pm el margen de error.

Autores	Períodos analizados	Área de estudio	ΔT [°C]	$\Delta T/\Delta t$	S [psu]
Antuña et al. (2015)	2005-2100	Entorno de Las Antillas menores Caribe Extendido (55-100° W; 5-25° N)		1.8 \pm 0.40 °C/centuria 1.76 \pm 0.39 °C/centuria	
Bustos & Ricardo (2021)	2005-2050 2005-2100	Caribe Extendido (55-95° W; 5-30° N) Caribe Extendido (55-95° W; 5-30° N)	3.60 \pm 0.43 4.33 \pm 0.17		0.92 \pm 0.19 1.28 \pm 0.1

De la [Tabla 6](#), se aprecia que para el escenario RCP8.5, se espera un incremento de Tso en el orden de 4°C y de Sso en el entorno de 1 psu. Las consecuencias del aumento de Tso y Sso se manifiestan, en primer lugar, en la actividad ciclónica.

3. Actividad ciclónica y posible futuro, en el entorno cubano

Se puede notar una tendencia variacional en la ciclogénesis del Atlántico Norte. Con la tendencia de ocurrencia de recurva en longitudes más orientales ([Ortiz, 1988](#)), una disminución de la actividad ciclónica en el Mar Caribe, alejó a los huracanes de las costas de Cuba en las últimas tres décadas del Siglo XX ([Ballester & González, 1997](#)). A partir de 1953, se observó un aumento en la formación de ciclones tropicales por debajo de los 20°N y al oeste de los 55°W; sin embargo, es en la región caribeña al este de los 55° W donde se ha formado el 75% de los huracanes que han afectado a Cuba ([Limia et al., 2000](#)). Resulta de interés que entre 1910 y 1944 (35 años) ocurrieron 9 de los 10 huracanes más intensos que afectaron al país en el Siglo XX y de forma similar entre 1844 y 1888 (44 años) ocurrieron 5 de los 6 huracanes más intensos del Siglo XIX; sin embargo, los años 20 del siglo XX y el periodo entre 1973 y 1995 sobresalen por su mínima actividad sobre el territorio nacional ([Pérez Suárez et al. 1998](#)). Ello indica una cierta alternancia de afectación por huracanes intensos cada 2 a 4 décadas. Solo después de 1995 se ha notado un incremento en la actividad ciclónica del Atlántico, atribuible al aumento de Tso y del predominio de patrones de circulación atmosférica favorable, debido al predominio de la presencia de la fase NIÑA y neutra del evento ENOS ([Ballester et al. 2010](#)), pero no se valora como significativo ([Limia et al. 2011](#); [Pérez Suárez et al. 2011](#)).

En las primeras décadas del siglo XXI el incremento de afectación por CTs a Cuba ha sido notable, con una gran cantidad de eventos tocando tierra, en correspondencia con lo señalado por [Jewson \(2023\)](#) en su valoración de estos eventos a escala climática, quien señala un incremento de todos los huracanes y en especial de la proporción de categorías 4-5 para la cuenca del Atlántico. En 22 años, entre 2000 y 2022, unos 43 ciclones tropicales, en etapa de tormenta y/o huracán, han afectado al territorio

cubano para un promedio de 1,95 casos por año, sea por impacto directo en tierra (más del 65 %) o en su trayectoria por aguas aledañas a Cuba, ocasionando daños por fuertes lluvias, vientos intensos, marejadas e inundaciones costeras. Más de la mitad de los casos, afectaron a Cuba en la etapa de huracán. Un total de 22 ciclones tropicales han ocasionado inundaciones costeras de cierta importancia, para un comportamiento de al menos una inundación costera por año en algún punto del territorio cubano ([Mitrani et al. 2023](#)). Por otra parte, se ha notado un desplazamiento del corredor de huracanes hacia latitudes más altas, con incremento de trayectorias hacia el oeste. De hecho, se han identificado 15 casos que afectaron a la mitad occidental de Cuba. Este comportamiento ha estado acorde con los resultados obtenidos en simulaciones climáticas regionales, ejecutadas por [Martínez et al. \(2011\)](#).

Acerca de las valoraciones que se publicaron en el reporte [IPCC \(2021\)](#), donde se manifiesta una disminución de la actividad ciclónica a escala global durante el siglo XXI, no queda claro si este cambio es atribuible al cambio climático esperado o a la variabilidad multidecadal, propia del ritmo natural de estos eventos. En lo que respecta al Caribe extendido y al Atlántico Norte, téngase en cuenta que si bien en la actualidad se aprecia un período de alza de la actividad ciclónica, el período de baja deberá aparecer en la segunda mitad del siglo XXI, por lo que tiene sentido que hacia el 2050 y en años posteriores, se manifieste una disminución de la actividad ciclónica, haya o no cambio climático.

El auge o depresión de la actividad ciclónica se refleja en el régimen de inundaciones costeras. La serie más larga, disponible en Cuba, es la correspondiente al malecón habanero. En la [Figura 6](#), se muestra una actualización del comportamiento de las inundaciones costeras en La Habana, durante los siglos XX y XXI, con inclusión de un gráfico de medias móviles, que caracteriza las etapas de alta o baja actividad, pero siempre ascendente.

La biodiversidad costera y marina, también está sufriendo daños por factores antrópicos sobre el trasfondo de un clima cambiante. Se ha podido detectar lo siguiente:

- Daños de la flora y fauna en áreas costeras, plataforma y medio marino en general. Entiéndase

que en las aguas cubanas se aprecia una gran biodiversidad, con poco endemismo, dada la gran conectividad con los mares aledaños y el Atlántico. Se han identificado 5700 invertebrados, 1060 cordados (peces en su mayoría). Se cree que haya más de 10 500 especies marinas en aguas cubanas, y más del 30% están por descubrir (Capote *et al.* 2011). Cualquier cambio ambiental en aguas costeras y aledañas a Cuba, puede afectar a esta gran biodiversidad.

- Daños en el hábitat de especies comerciales, que en su mayoría viven entre la superficie y 200 m de profundidad, con temperaturas de menos de 30°C. Los datos acerca de las principales especies (Tabla 7) fueron tomados de los textos de Caballero-Aragón *et al.* (2016) y Mitrani *et al.* (2021)
- Blanqueamiento de los corales que se ha registrado desde hace varios años (Figura 7) desde las investigaciones de Carrodeaguas *et al.* (2001) y Alcolado & Rey Villar (2016), hasta el presente (Aguilera-Pérez & González-Díaz, 2024). Para que se tenga una idea del posible daño futuro, téngase en cuenta que los corales ocupan unos 3215 km del borde de la plataforma marina para un 98% y 3115 km del borde costero (Capote *et al.* 2011).

SUMARIO

- Las corrientes marinas en el entorno cubano pudieran mostrar un ligero incremento en velocidad para el futuro, pero no se aprecia cambio en la componente termohalina sino una dependencia de poca importancia, de la componente eólica, de 0 a 0.1 m/s para el escenario RCP4.5 y de poco más de 0.1 m/s para RCP8.5, de manera que la velocidad de las corrientes por el sur del país pudiera observarse entre 0.2 y 0.4 m/s, mientras que por el norte, pudiera pasar de 0.7 m/s como promedio, especialmente en la corriente de Lazo, a decenas de kilómetros de la línea costera noroccidental. Estos cambios no afectarían a las actividades náuticas, ni permitirían que las corrientes en aguas cubanas puedan aprovecharse como fuente alternativa de energía renovable.

Tabla 7. Principales especies comerciales en peligro, localizables en aguas someras con Tso < 30°C (Caballero-Aragón *et al.* 2016; Mitrani *et al.* 2021)

Nombre común en español	Nombre común en inglés	Nombre científico
Langosta	Caribbean Spine Lobster	Panulirus argus
Camarón blanco y rosado	White and Southern pink shrimps	Litopenaeus schmitti and farfantepenaeus notialis
Pargo criollo	Mutton Snapper	Lutjanus analis
Biajaiba	Lane Snapper	Lutjanus synagris
Caballerote	Gray Snapper	Lutjanus griseus
Bonito	Skipjack Tuna	Katsuwonus pelamis
Atún de aleta negra	Blackfin Tuna	Thunus Atlanticus
Cherna Criolla	Nassau Grouper	Epinephelus striatus

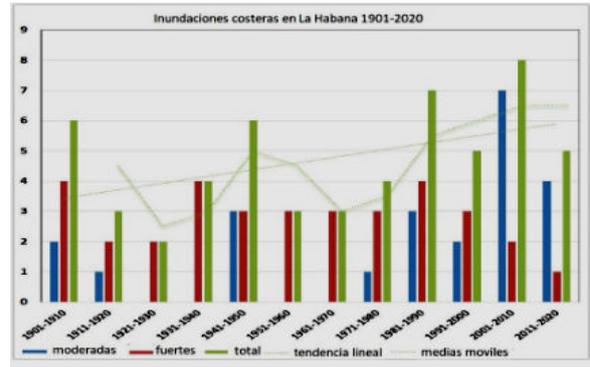
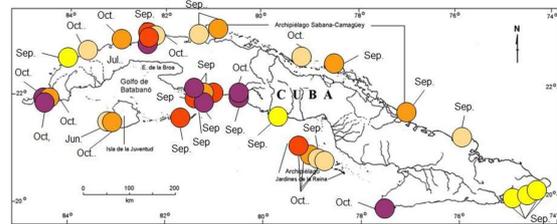


Figura 6. Comportamiento de las inundaciones costeras en La Habana, durante los últimos 120 años.

Nivel de blanqueamiento de corales en Cuba 2015 (junio - octubre)

- Nulo (0%)
- Pobre (1%-10%)
- Moderado (11%-30%)
- Alto (31%-50%)
- Muy alto (51%-75%)
- Casi total (75%-100%)



Red de Monitoreo Voluntario de Alerta Temprana en Arrecifes Coralinos

Figura 7. Mapa del Reporte DE BLANQUEAMIENTO DE CORALES (Alcolado & Rey-Villiers, 2016)

- No se aprecian cambios en la componente termohalina de aguas aledañas a Cuba, a diferencia con los cambios del transporte meridional del Atlántico (AMOC), que se muestra debilitado y con tendencia a continuar debilitándose, aunque es cierto que con valores de flujo muy pequeños. Tampoco se aprecia una relación con los cambios en el sistema de la corriente del Golfo, que aunque con valores muy pequeños, muestra un decrecimiento en su velocidad, mientras que en aguas aledañas a Cuba, se aprecia una pequeña aceleración por influencia eólica. Es probable que estos efectos se mitiguen a la salida al Atlántico de la corriente de La Florida, en la confluencia con la corriente de las Antillas.

- La temperatura de las aguas superficiales cubanas se ha incrementado en 1°C entre finales del siglo XX y principios del XXI, con un ritmo promedio de 0.02°C/año y la salinidad superficial, en más de 0.2 psu. Estos valores muestran una correspondencia positiva con los cambios globales descritos en IPCC (2021).
- Con el escenario RCP4.5 (moderado), los modelos globales indican que la Tso promedio anual en aguas cubanas, hacia el período 2030-2040 se incrementaría entre 0.4 y 1.0 °C y la Sso, entre 0.4 y más de 0.6 psu, mientras que hacia la segunda mitad del siglo XXI (2041-2100), la temperatura superficial oceánica aumentaría entre 1.4 y 2 °C y la salinidad, en el entorno de 0.5 psu.
- Con el escenario RCP8.5, estudios realizados por diversos autores a partir de salidas de modelos globales, indican que Tso puede alcanzar hasta 4°C por encima del período pre-industrial y Sso, más de 1 psu.
- Desde 1995, se ha manifestado un incremento en la actividad ciclónica del Atlántico pero la tendencia se había considerado poco significativa. Este comportamiento es atribuible al aumento de Tso y al predominio de fases NIÑA y neutra del evento ENOS. Sin embargo, el siglo XXI debuta con un aumento notable en la cantidad de eventos que han afectado a Cuba, sea sobre el territorio cubano o en el entorno costero. Entre 2000-2020 se contabilizan 43 casos, donde el 65% ha tocado tierra, en su mayoría en etapa de huracán.
- Si bien en el reporte IPCC (2021) se expresa que la actividad ciclónica global ha disminuido y de hecho tiende a disminuir hacia la segunda mitad del siglo XXI, aunque la proporción de huracanes mayores, con categorías 3-5 tiende a aumentar, no queda claro si en el Atlántico esto sea atribuible al cambio climático previsto que pudiera influir en los patrones de circulación atmosférica, o a la variabilidad natural de la actividad. Téngase en cuenta que en el presente hay una etapa de alza pero dentro de un par de décadas deberá aparecer un período de depresión.
- Entre los principales impactos en la biodiversidad, se aprecia el blanqueamiento masivo de los corales, ya observado desde 2016, y la posible extinción de diversas especies comerciales que viven entre la superficie y 50 m de profundidad.

AGRADECIMIENTOS

El colectivo de autores agradece el financiamiento en CUP del PROGRAMA SECTORIAL(PCTI) “Meteorología y Desarrollo Sostenible del País” y del PROGRAMA NACIONAL (PNCT) “Adaptación y Mitigación del Cambio Climático”, el apoyo

incondicional de los familiares y amigos que facilitaron el trabajo a domicilio, así como a los organizadores de los diversos congresos, fórum y muy en especial a la Revista Cubana de Meteorología, donde han sido divulgados la mayoría de los resultados de autores cubanos que respaldan al presente texto.

REFERENCIAS

- Aguilera-Pérez G.C. & P. González-Díaz (2024). Salud de los corales y su investigación en el Caribe y en Cuba. Coral health and its research in the Caribbean and Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*. Vol. 44, No. 1, 18-46, ISSN: 1991-6086. <https://revistas.uh.cu/rim/>; <https://doi.org/10.5281/zenodo.10999192>.
- Alcolado P.M. & N. Rey-Villiers. 2016. *Reporte de blanqueamiento de corales del año 2015 en Cuba*. Red de Monitoreo Voluntario de Alerta Temprana de Arrecifes Coralinos. Proyecto PNUD/GEF Sabana-Camagüey, Instituto de Oceanología (eds.). La Habana, Cuba, 6 pp. Available: <https://www.researchgate.net/publication/305075439>, Consulted: August 10, 2017.
- Alonso, Y., A. Bezanilla, A. Roque, Y. Martínez, A. Centella & I. Borrajero (2019) Wind resource assessment of Cuba in future climate scenarios. *Wind Engineering*, 43 (3), 311-326, <https://doi.org/10.1177/0309524X18780399>
- Alpizar-Tirzo M., R. Pérez-Suárez, P. Roura-Pérez (2019) Variaciones en las circulaciones oceánica y atmosférica. Su influencia en la formación de huracanes en el Atlántico Norte, *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 25, No. 1, 2019, E-ISSN: 0864-151X, disponible en <http://opn.to/a/d0XBI>
- Antuña-Marrero, J. C., O. H. Otterå, A. Robock & M. d. S. Mesquita, (2015) Modelled and observed sea surface temperature trends for the Caribbean and Antilles. *Int. J. Climatol*. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4466>.
- Ballester M., C. González (1997) Variaciones y Tendencias de la Ciclogénesis tropical en el Atlántico Norte. *Bol. SOMETCUBA*, Vol. 3 No. 1, La Habana. <http://www.met.inf.cu>
- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. 2010. *Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico*. La Habana: Editorial Academia, 170 p., ISBN: 978-959-270-175-5.
- Bustos Usta D. F. & R. R. Torres Parra (2021) Ocean and atmosphere changes in the Caribbean Sea during the twenty-first century using CMIP5 models. *J. Ocean Dynamics*, Vol 71, 757-777, <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01462-z>

- Bryden, H. L., Longworth, H. R., and Cunningham, S. A. (2005). Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature* 438, 655-657. doi: <https://doi.org/10.1038/nature04385>
- Caballero Aragón H., P.M. Alcolado, N.Rey-Villiers, S. Perera Valderrama, J. González Méndez (2016) Coral communities condition in varying wave exposure: The gulf of Czones, Cuba. *Revista de Biología Tropical*, (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744) Vol. 64 (1) 95-109, March 2016, digital versión. Available: <https://www.researchgate.net/publication/292965190>. Consulted: July 15, 2017
- Capote López R. P., I. Mitrani Arenal & A. G. Suárez (2011) Conservación de la biodiversidad cubana y cambio climático en el archipiélago cubano. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, Vol.1, No.1, 1-25, ISSN: 2304-0106. Available: <https://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/issue/view/1/showToc>. Consulted: June15, 2024
- Carracedo-Hidalgo D., D. Reyes-Perdomo, A. Calzada-Estrada, D. Chang-Domínguez & A. Rodríguez-Pupo (2019) Caracterización de las corrientes marinas en mares adyacentes a Cuba. Principales tendencias en los últimos años. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 25, No. 3, ISSN: 2664-0880. Available: <http://opn.to/a/NVxYB>. Consulted: June16, 2024
- Carrodegua C., G. Arencibia, N. Capetillo (2001) Consideraciones sobre el estado ambiental de los arrecifes coralinos cubanos. *Technical Report*, Center of Fisheries Research, Havana, Cuba. Available: <http://ambientis.org/ecologia/corales.html>. Consulted: June 18, 2022
- Egorov N. I. (1974) *Oceanografía Física* (En ruso), Guidrometeoizdat, Leningrado, 455 pág.
- Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, & Y. Yu. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211-1362, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.
- Frajka-Williams E, Ansong IJ, Baehr J, Bryden HL, Chidichimo MP, Cunningham SA, Danabasoglu G, Dong S, Donohue KA, Elipot S, Heimbach P, Holliday NP, Hummels R, Jackson LC, Karstensen J, Lankhorst M, Le Bras IA, Lozier MS, McDonagh EL, Meinen CS, Mercier H, Moat BI, Perez RC, Piecuch CG, Rhein M, Srokosz MA, Trenberth KE, Bacon S, Forget G, Goni G, Kieke D, Koelling J, Lamont T, McCarthy GD, Mertens C, Send U, Smeed DA, Speich S, van den Berg M, Volkov D & Wilson C (2019) Atlantic Meridional Overturning Circulation: Observed Transport and Variability. *Journal Frontiers in Marine Science*; 6:260. doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00260>
- Goldenberg Sb, Landsea Cw, Mestas-Nuñez Am, Gray Wm. 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*; 293 (5529): 474-9 pp
- Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287-422, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>.
- Hartmann, D.L. et al., (2013). Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, A. J. Boschung, Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 159-254, doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.008>.
- Hibbert, K; E. Glenn ; ,T.M. Smith, J. E. González Cruz (2023) Changes to Sea Surface Temperatures and Vertical Wind Shear and Their Influence on Tropical Cyclone Activity in the Caribbean and the Main Developing Region. *J. Atmosphere*, Vol. 14, No.999. <https://doi.org/10.3390/atmos14060999>.
- HYCOM (2024) Re-analysis data. Available; <https://www.hyc-m.com/hycom/dataserver>. Consulted: June 23,2024
- ICH. (1989) Derrotero de las costas de CUBA, Región Marítima del Norte y Sur. Tomo 1 y 2. Instituto Cubano de Hidrografía, La Habana. 432 pp

- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Jewson, S. 2023. "Tropical Cyclones and Climate Change Global Landfall Frequency Projections Derived from Knutson et al.". Bulletin of American Meteorological Society, 104(5) E1085-E1104, DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0189.2>
- Knutson, T.; Camargo, S. J.; Chan, J. C. L.; Emanuel, K.; Ho, C.-H.; Kossin, J.; Mohapatra, M.; Satoh, M.; Sugi, M.; Walsh, K. & Wu, L. 2020. "Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming" Bulletin of the American Meteorological Society, 101(3) E303-E322, DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1>
- Limia, M., R. Pérez y R. Vega. (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. 100pp.
- Martínez D.,I. Borrajero , Bezanilla A. & Centella A. 2011. La ocurrencia de ciclones tropicales en el Caribe y México y el calentamiento global. Aplicación de un modelo climático regional. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, Vol. 12, 17-30, ISSN: 1729-3790, ISSN: 1729-3790 Available: <http://www.iga.cu/publicaciones/revista/index.htm>, Consulted: June 21, 2016
- Mitrani I.& Díaz O. (2008) "Particularidades de la estructura termohalina y sus tendencias en aguas Cubanas" *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 14, No. 1, 54-73. Available: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/issue/view/24>. Consulted: June 20, 2024
- Mitrani Arenal I., Díaz-Rodríguez O.O., Vichot-Llamo A., Cabrales Infante J., Bezanilla Morlot A.& Hidalgo Mayo A. (2021) Temperatura y salinidad en las aguas cubanas, posible evolución futura e implicaciones (2021) *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 27, No. 4, <https://doi.org/toc/2664-0880>
- Mitrani I. (2017) "Meteorología Marina", Ed. INSMET/AMA/CITMATEL, ISBN: 978-959-300-060-4 (en soporte digital), La Habana, Cuba, 270 pp. <http://www.citmatel.inf.cu>. Consulted: 14/05/2023
- Mitrani I., E. García, A. Hidalgo, I. Hernández Baños, I. Salas, R. Pérez, O. O. Díaz, A.Vichot, A. Pérez, R. Cangas, L. Alvarez, O. E. Pérez , C. M. Rodríguez, A. L. Pérez, A. Morales, J. Viamontes, J. Pére & J. A. Rodríguez (2017) "Las inundaciones costeras en Cuba . Estructura termohalina y su influencia en las inundaciones", Ed. INSMET/AMA/CITMATEL, ISBN:978-859-237-728-8 , La Habana, Cuba, 160 pp, available: <https://www.citmatel.inf.cu>
- Mitrani Arenal I., Javier Cabrales Infante (2020) Potencial energético de las corrientes marinas en aguas cubanas, *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 26, No. 3, julio-septiembre 2020, ISSN: 2664-0880, <http://opn.to/a/x3S1m>.
- Mitrani Arenal I., Cabrales Infante J., & Hidalgo Mayo A. (2023). Inundaciones costeras en territorio cubano, causadas por eventos meteorológicos severos, durante los años 2000-2022. *Revista Cubana de Meteorología* , Vol. 30, No. sp., 2024, ISSN: 2664-0880, <https://cu-id.com/2377/v30nspe01>
- Ortiz R. (1988) "Una observación sobre las trayectorias de los huracanes y perturbaciones ciclónicas" *Rev. Cub. Met.* Vol.1 , No. 1, 66:68
- Pérez Suárez R., M. Ballester , C. González, M. Limia. 1998. Los ciclones tropicales de Cuba. Variaciones y tendencias observadas. *Memorias de la Conferencia Científica sobre Ciclones Tropicales "Rodríguez in Memoriam"*, WMO/SOMETCUBA/ INSMET (Eds.), 7-9/mayo/1998, La Habana, 30-33 pp
- Pérez Suárez R., C. Fonseca, B. Lapinel, C. González, E. Planos, V. Cutié, M. Ballester, M. Limia, R. Vega. 2011. Segunda Evaluación de las Variaciones y Tendencias del Clima en Cuba. *Memorias del II Congreso Internacional de Cambio Climáticos de la VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo*, Instituto de meteorología, La Habana, Cuba, 4- 8 de julio de 2011, en soporte digital, 15 pp, ISBN: 978-959-300-018-5
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, & B. Zhou (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

- [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513-1766, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Stewart R. H. (2000) Introduction To Physical Oceanography, Department of Oceanography, Texas A & M University Editions, 351 pp. Available: <https://www.uv.es/hegigui/Kasper/por%20Robert%20H%20Stewart.pdf>. Consulted: June 27, 2024
- Vega R., Sardiñas M. E., Nieves M. E. &, Centella A. (1990) "Análisis estadístico-climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba" *Informe Final de Resultado Científico*, Biblioteca INSMET, 60 pag.
- Wang Z., T. Boyer, J. Reagan & P. Hoganu (2022) Upper-Oceanic Warming in the Gulf of Mexico between 1950 and 2020. *Journal of Climate*, vol.36, 2721-2734. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0409.1>.
- Weber J. E. (1983) Steady Wind- and Wave-Induced Currents in the Open Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 13, 524-530 pp, [https://doi.org/10.1175/15200485\(1983\)013<0524:SWAWIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200485(1983)013<0524:SWAWIC>2.0.CO;2)
- Yoshida, K., Sugi, M., Mizuta, R., Murakami, H., & Ishii, M. (2017). Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, 9910-9917. <https://doi.org/10.1002/2017GL075058>

Ida Mitrani Arenal. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología.

Javier Cabrales Infante. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología. E-mail:javier.cabrales@insmet.cu

Axel Hidalgo Mayo. Centro Meteorológico de Holguín, Instituto de Meteorología. E-mail:javier.cabrales@insmet.cu

Alejandro Vichot Llano. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología. E-mail:alejandro.vichot@insmet.cu

Oswaldo Enrique López: Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología. E-mail:enrique.lopez@insmet.cu.