

Particularidades de la estructura termohalina y sus tendencias en aguas cubanas

Dra. Ida Mitrani Arenal y MSc. Oscar Onoe Díaz
Rodríguez, Instituto de Meteorología.

1. Temperatura del agua

Resumen

Se describen algunas particularidades de la estructura termohalina en los niveles superficiales y subsuperficiales de las aguas cubanas y sus tendencias temporales, en lo referente a la distribución vertical de la temperatura del agua. La información utilizada proviene de 53 cruceros realizados en aguas cubanas, fuera de la zona de plataforma, durante el período 1966-2000, con participación de especialistas de distintas instituciones cubanas y de otras naciones como la Unión Soviética y México. Se analizaron los cursos anuales de la temperatura superficial así como sus posibles cambios temporales, con inclusión del espesor de la capa isotérmica y la profundidad de localización de la isoterma de 26°C, por ser esta última la temperatura crítica para la formación y desarrollo de los ciclones tropicales. Se arribó a la conclusión de que ha ocurrido un aumento de la temperatura en las aguas superficiales y subsuperficiales cubanas, con aumento en el espesor de la capa isotérmica y de la profundidad de localización de la isoterma de 26°C.

Introducción

Para los científicos del mundo son inquietantes los posibles cambios en la temperatura planetaria, debido a las fuerzas de la naturaleza y a la influencia de la actividad humana (IPCC, 1996; 2002). Desde la segunda mitad del siglo xx se está prestando gran atención a las fluctuaciones a largo plazo de la temperatura del mar (Barnett 1980, 1984; Paltridge y Woodruff 1981; Antonov 1990). En estas investigaciones son de gran utilidad todas las observaciones oceánicas disponibles (WMO, 1995a).

Por otra parte, para el desarrollo de los ciclones tropicales es de gran importancia el estado de la superficie marina y el espesor de la capa isotérmica (WMO, 1995b). Para el archipiélago cubano, el tema reviste particular interés debido a su peculiar localización geográfica y a la manifiesta influencia del océano en el estado del tiempo y el clima.

Existen algunos estudios integrales de los mares cercanos a Cuba, desarrollados con datos de expediciones oceanográficas. Entre los más importantes se tienen los realizados por García (1981a, b, 1996) y Siam y García (1981), los ejecutados en colaboración cubano-rusa a bordo de buques de investigación en 1979 y 1981, por especialistas del INSMET (Moreno *et al.* 1985; Mitrani *et al.* 1985), los de colaboración cubano-mexicana entre 1989 y 1990 (Victoria *et al.* 1990, Gallegos *et al.* 1996, Gallegos *et al.* 1998a, Gallegos *et al.* 1998b, Gallegos *et al.* 2000).

Todos contaron con datos de menos de diez cruceros dentro de las aguas cubanas, lo cual limita la visión temporal acerca del tema tratado. En una etapa posterior se cuenta con los desarrollados por Mitrani (2001), Mitrani *et al.* (2002), Mitrani y Díaz (2001, 2002, 2004), con datos de 38 expediciones entre 1966 y 1993.

En el presente trabajo se utilizó la información de 53 cruceros realizados en 1966-2000 para el análisis de la estructura térmica vertical, con énfasis en su variabilidad temporal y tendencias del curso anual.

Materiales y métodos

Información utilizada

El área de interés se localiza entre los 87° y 73°W y entre los 25° y 18°N (Fig. 1). La información procede de las bases de datos HIDROMET (1966-1993) y GEOCUBA (1977-2000).¹ Se recopilaron los datos hidrometeorológicos procedentes de 53 cruceros realizados en los mares adyacentes al archipiélago cubano en 1966-2000, por especialistas del Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP), del Instituto de Oceanología (IDO), del Instituto de Meteorología (INSMET) y de la Empresa GEOCUBA, a distancias de hasta 200 km de la línea costera, en ocasiones con la colaboración de especialistas de la ex URSS, con inclusión además de los resultados de la expedición Yuca II a bordo del buque mexicano «Justo Sierra».

Se realizaron 7614 estaciones (Fig. 2) con observaciones en los niveles estándar de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000 y 1200 m.

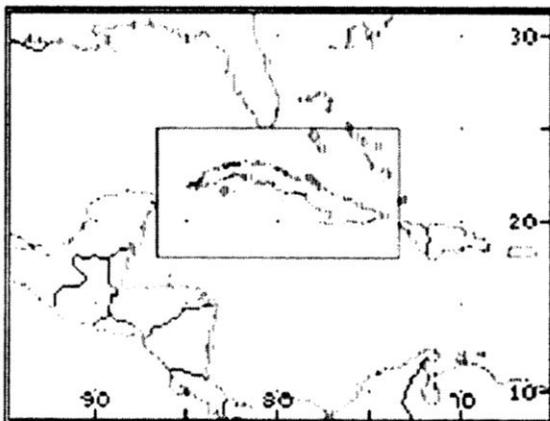


Fig. 1. Área de interés en el presente trabajo de investigación.

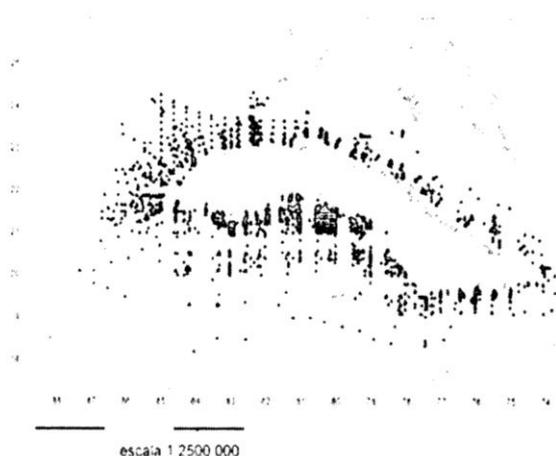


Fig. 2. Estaciones realizadas por los 53 cruceros, en 1966-2000.

En las expediciones cubano-soviéticas, durante la década de los sesentas y a bordo del «Ulises» hasta 1993, las mediciones se ejecutaron con Boteñas Nansen y termómetros de profundidad cerrados y abiertos, también con aplicación de la metodología descrita por GOIN (1965, 1977). La temperatura del agua fue registrada con termómetros de mercurio reversibles de escala -2 a 35 °C y precisión ± 0.02 °. Ya desde los 70 se utilizaron sonda-batómetros automatizados, de distintas procedencias, con precisión en el entorno de 10^{-2} °C. Las mediciones de temperatura del agua en superficie se realizaban con termómetros de cubeta.

En los muestreos más recientes (posteriores a 1996), a bordo del «Ulises» y del buque mexicano

«Justo Sierra» se han podido utilizar sondas oceanográficas (CTD), capaces de medir la temperatura en toda la columna de agua, hasta profundidades de 2000 m.

Determinación de las características de la estructura térmica

Se determinó el espesor de la capa isotérmica. Como frontera inferior se tomó la profundidad donde la temperatura del agua es menor que la superficial en $0,5$ °C. Este criterio fue establecido por Levitus (1982) para la elaboración del *Atlas Climatológico del Océano Mundial* y posteriormente utilizado la elaboración del *Atlas Oceánico Mundial* de la NOAA, a partir los argumentos expuestos por Monterrey y Levitus (1997) de que en efecto estos criterios se corresponden con los niveles de frontera entre la capa mezclada y la capa de fuertes gradientes. Ese criterio ya fue utilizado antes por Mitrani *et al.* (2002). Se procedió a la localización de la isoterma de 26 °C, que es la temperatura crítica favorable para el desarrollo de los ciclones tropicales, el espesor de la capa isotérmica a partir de la profundidad de localización de la isoterma de 26 °C.

Deido a la irregularidad de los datos disponibles en el análisis de las posibles tendencias de los elementos meteorológicos y oceanográficos en las aguas cubanas se decidió no promediar por años, sino utilizar los cursos anuales promediados en general y compararlos con los promedios de los períodos 1966-1980 y 1981-2000 tomando en cuenta que estudios recientes indican como punto de cambio de la temperatura planetaria al año 1980 (Jones, 1996; Jones y Palutikof, 2005).

Resultados y discusión

Curso anual de la estructura térmica en aguas cubanas

La temperatura de la superficie marina Tso (Fig. 3a) presenta un curso medio anual bien marcado, con el mínimo en febrero, del orden de los 25 °C y el máximo en septiembre, en las cercanías de los 30 °C, con desviación media cuadrática de 0 a 2.8 °C (Fig. 3b). Los valores extremos absolutos en los datos disponibles han sido de hasta 31 °C de máximo, al sur de Isla de la Juventud y los mínimos de 24 °C, al norte de Pinar del Río y La Habana. Testimonios recientes indican que en septiembre-octubre de 2005, las aguas del Golfo de México alcanzaron temperaturas de hasta 32 °C.

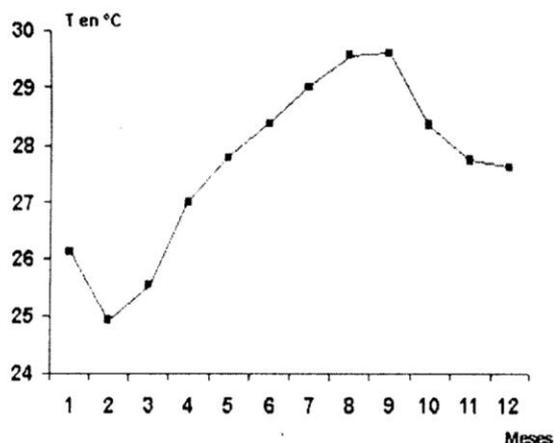


Fig. 3a. Curso medio anual de Tso en aguas cubanas.

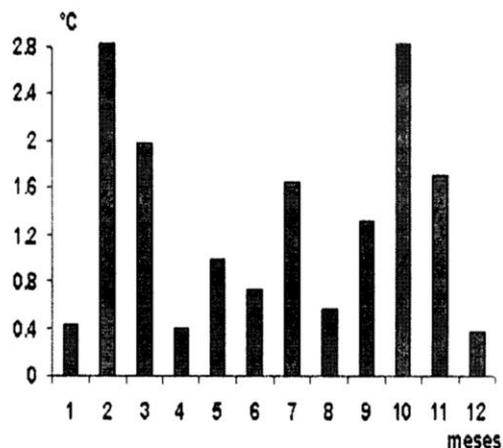


Fig. 3b. Desviación media cuadrática del Curso medio anual de Tso.

En la figura 4a se representan los cursos medios anuales de la temperatura superficial del mar (Tso) para los periodos 1966-1980 y 1981-2000. Se observan algunas diferencias entre las curvas y en efecto hay una correspondencia con el criterio de que los años 1966-1980 fueron más fríos que la media.

En la figura 4b se aprecia que efectivamente las anomalías para el periodo 1966-1980, estuvieron en casi todos los meses por debajo de la media general, entre 0,2 y 1°C, sobre todo para los meses de verano, mientras que en el periodo 1981-2000 estuvo igual o por encima de la media entre 0,2 y 0,7°C, con un mayor incremento en los meses de verano.

De lo anterior se aprecia que la amplitud máxima de la disminución de la temperatura del agua entre los periodos 1966-1980 y 1981-2000 estuvo en el orden de 1,7°C.

En la figura 5a se refleja el curso medio anual del espesor de la *capa isotérmica* (Ht) y en la figura 5b, la desviación media cuadrática que indica una dispersión significativa, sobre todo en los primeros tres meses del año, que se encuentran bajo la influencia de los frentes fríos. Se aprecia que es menor en verano, con mínimos de profundidad en los meses de mayo-agosto (entre 40 y 50 m como promedio).

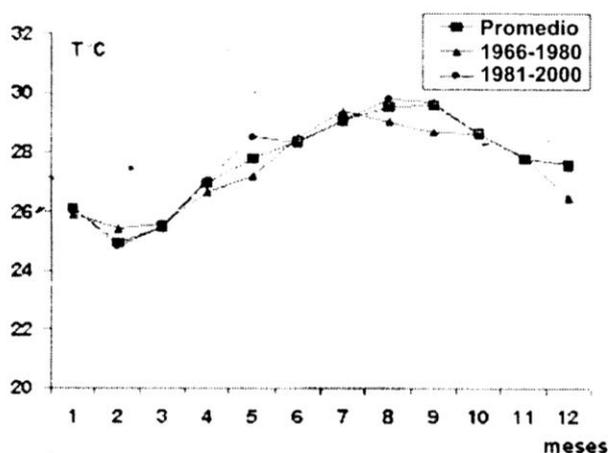


Fig. 4a. Cursos medios de Tso sobre aguas cubanas para los años 1966-1980 y 1981-2000.

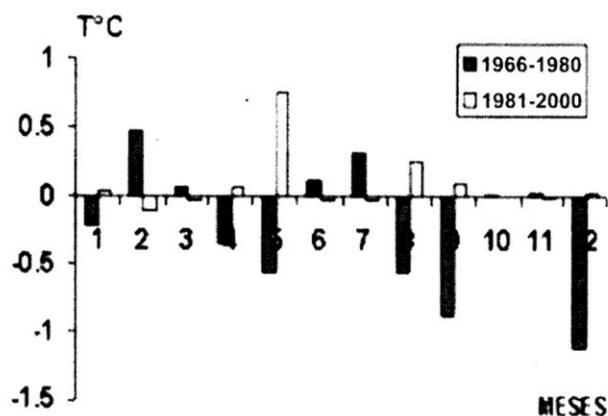


Fig. 4b. Anomalías del curso anual de Tso sobre aguas cubanas, en los periodos 1966-1980 y 1981-2000.

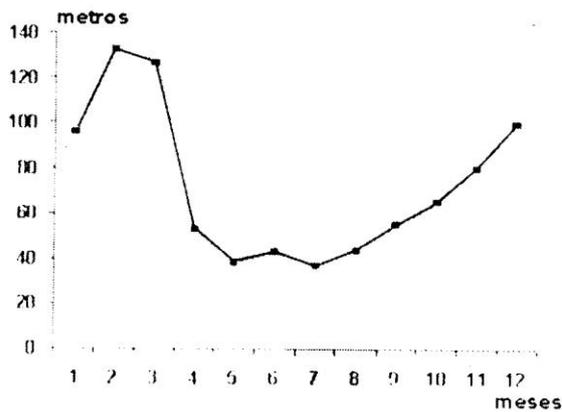


Fig. 5a. Curso medio anual de (Ht) en aguas cubanas.

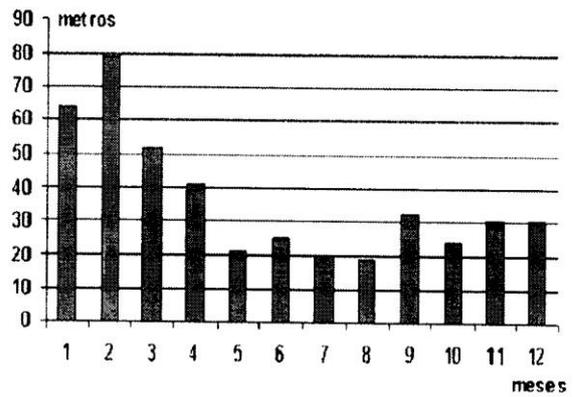


Fig. 5b. Desviación media cuadrática del curso medio anual de (Ht).

El calentamiento radiativo actúa durante estos meses de verano e incrementa el espesor de esta capa, de manera que en septiembre-octubre se profundiza más de 70 m como promedio, en un intervalo de variación de 10-80 m. Ya en el mes de diciembre comienza a aparecer la mezcla convectiva por enfriamiento. Además, se acelera la mezcla por turbulencia con el aumento de la intensidad del viento al paso de los frentes fríos, muy favorable a la producción de nutrientes (Melo *et al.* 2000). El máximo espesor se presenta en febrero, con 130 m como promedio, en un intervalo de variación de 60-150 m (Mitrani *et al.* 2000).

En la figura 6a se reflejaron los cursos medios para los períodos sesentas y setentas y ochentas y noventas y en la figura 6b, las anomalías con respecto al valor medio. Se aprecia que la capa isotérmica se ha profundizado. En los años 1966-1980 su espesor promedio se mantenía por debajo de la media en el orden de las decenas de metros, sobre todo en el período invernal, aunque en el período 1981-2000 aumentó hasta por encima de la media en varios metros.

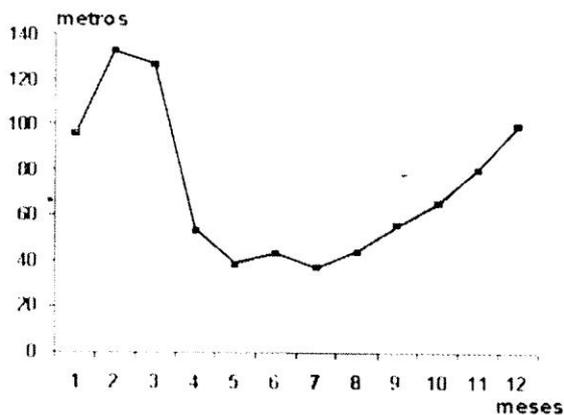


Fig. 6a. Cursos medios de Ht sobre aguas cubanas para los años 1966-1980 y 1981-2000.

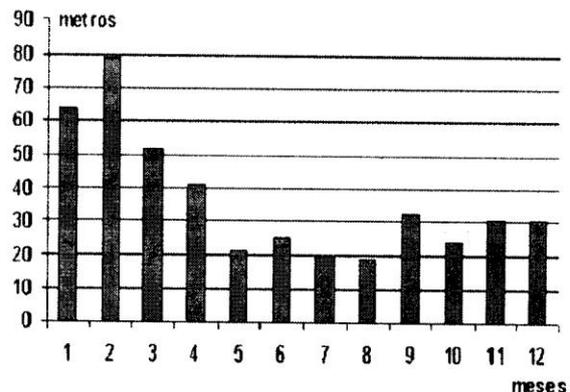


Fig. 6b. Anomalías del curso anual de Ht sobre aguas cubanas, en los períodos 1966-1980 y 1981-2000.

La isoterma de 26°C H_{26} (Figura 7a) muestra su mínima profundidad de febrero a marzo, en respuesta al enfriamiento superficial del invierno. La dispersión es considerable, con el máximo en la temporada invernal (Figura 7b).

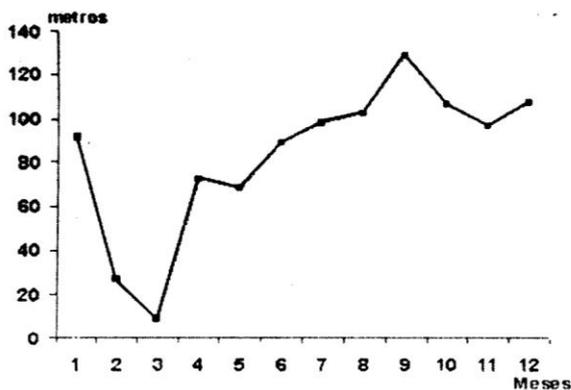


Fig. 7a. Curso medio anual de H_{26} en aguas cubanas.

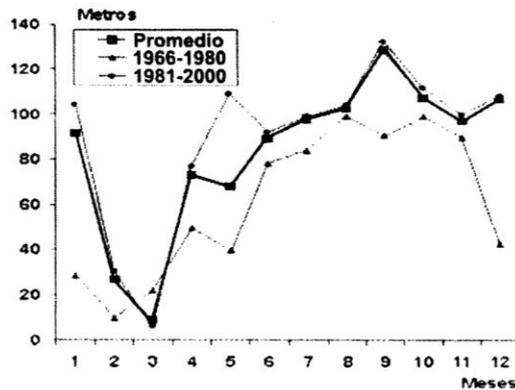


Fig. 8a. Cursos medios anuales de la profundidad de H_{26} en los periodos 1966-1980 y 1981-2000.

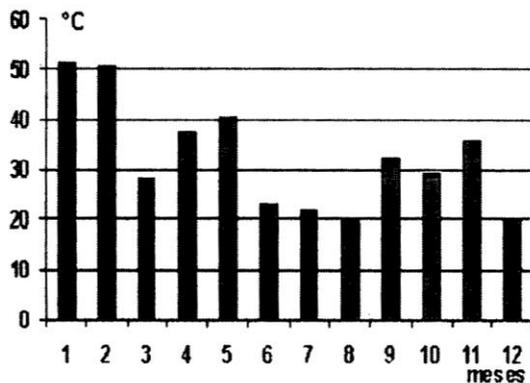


Fig. 7b. Desviación media cuadrática del curso medio anual de H_{26}

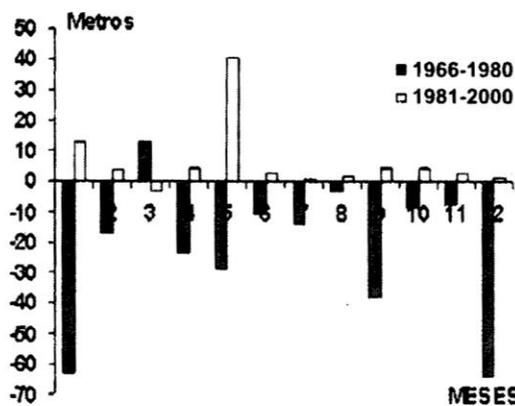


Fig. 8b. Anomalías del curso anual de H_{26} sobre aguas cubanas, en los periodos 1966-1980 y 1981-2000

La profundidad máxima promedio se presenta de agosto a octubre, con el valor pico de más de 130 m en septiembre, y dispersión baja, en coincidencia con la intensificación de la actividad ciclónica en esta época del año. En las figuras 8a y 8b se muestran los cursos medios y las anomalías durante los periodos estudiados. Se nota una profundización en los años ochentas y noventas desde varios metros hasta varias decenas de metros. En los años sesentas y setentas, la isoterma de 26°C como promedio se localizaba por debajo de la media desde una hasta varias decenas de metros. Tomando los valores extremos de ambos periodos, es posible establecer que la mayor diferencia entre los 1960-1970 y 1980-1990 es de una centena de metros.

Conclusiones

- En las aguas aledañas al archipiélago cubano, la temperatura de la superficie marina presenta un curso medio anual bien marcado, con el mínimo en febrero, entre 24°C y 25°C y el máximo en septiembre, cercanas a 30°C. Se

pueden presentar valores extremos de 23°C y de más de 31°C.

- Las anomalías de la temperatura del agua para el periodo 1966-1980 en general estuvieron por debajo de la media, entre 0,2 y 1°C, sobre todo en verano, mientras que en el periodo 1981-2000 estuvo igual o por encima de la media entre 0,2 y 0,7°C con un mayor incremento en verano. La amplitud máxima de la variación de la temperatura del agua desde los años sesentas y setentas hacia los ochentas y noventas estuvo en el orden de 1,7°C en el mes de diciembre.
- La capa isotérmica es menor en verano, con mínimos de profundidad en los meses de mayo a agosto (entre 40 y 50 m como promedio). En septiembre-octubre se profundiza en más de 70 m como promedio, en un intervalo de variación de 10-80 m. El máximo se presenta en febrero, con 130 m como promedio, en un intervalo de variación de 60-150 m.

- *Se ha profundizado la capa isotérmica* porque en 1966-1980 su espesor se mantenía por debajo de la media en el orden de las decenas de metros, sobre todo en el período invernal; mientras que en los años 1981-2000 aumentó hasta por encima de la media en varios metros.
- *La isoterma de 26°C* muestra su mínimo espesor de febrero a marzo, en respuesta al enfriamiento superficial del invierno. El espesor máximo se presenta de agosto a octubre, con el pico en septiembre, de más de 130 m, en coincidencia con la intensificación de la actividad ciclónica en esta época del año.
- *Se nota una profundización de la isoterma de 26°C en los años 1981-2000*, desde varios metros hasta decenas de metros. En los años 1966-1980, como promedio se localizaba por debajo de la media. La mayor diferencia entre los sesentas-setentas y los ochentas-noventas es del orden de 70 metros, y se observa en enero, agosto y diciembre.

NOTAS

- ¹ La base de datos HIDROMET fue elaborada en 1994 por los especialistas del Instituto de Meteorología Isidro Salas García, Jesús Dole Chávez e Ida Mitrani Arenal, y por Benigno Hernández de la Torre, del Centro de Investigaciones Pesqueras. La de GEOCUBA fue recopilada por la MSc. Jarmila de la Empresa GEOCUBA en el 2005, con posterior revisión y elaboración en el 2006 de la Dra. Ida Mitrani Arenal, el MSc. Oscar Onoe Díaz Rodríguez y el Lic. Israel Borrajero Montejo, especialistas del Centro de Física de la Atmósfera del INSMET.
- ² Comunicación personal del MSc. Alejandro Morales, investigador de la Empresa GEOCUBA.

Bibliografía

- Antonov D. I. (1990): «Variaciones climáticas actuales en la estructura térmica vertical de la parte norte del Atlántico y del Pacífico». (En ruso), *Meteorologiya y Gidrometeorologiya*, no. 4, Gidrometeoizdat, Leningrado, 78: 87.
- Barnett T. P. (1984): «Long-term trends in surface temperature over the oceans» *Mon. Wea. Rev.*, vol. 112, no. 2, 303: 312.
- _____ (1980): «El papel del océano en el sistema climático global» (En ruso), *Izmeneniye Klimata*, Gidrometeoizdat, Leningrado, 209: 237.
- Gallegos A., I. Victoria, J. Zavala, M. Fernández e I. Penié (1996): «Hidrología en los estrechos del Mar Caribe Occidental». Informe Final de Proyecto del ICML (UNAM, México DF) y del IDO (CITMA, La Habana), 38 pp.
- Gallegos A., et al. (1998a): «Condiciones oceánicas en el Canal de Yucatán, el Estrecho de la Florida (Cayo Hueso-La Habana), el Canal Viejo de Bahamas, el Paso de los Vientos, el Estrecho de Colón y el mar del Caimán, en noviembre de 1989 y abril de 1991». Informe Final de Proyecto del ICML (UNAM, México DF) y del IDO (CITMA, La Habana) 46 pp.
- Gallegos A., I. Victoria, J. Zavala, M. Fernández e I. Penié (1998b): «Hidrología en los estrechos del Mar Caribe Occidental», *Revista de Investigaciones Marinas* (UNAM-UH), vol. 19, no. 1, 1: 37.
- Gallegos A. et al. (2000): «Condiciones Oceánicas en el Canal de Yucatán, el Estrecho de la Florida, el Canal Viejo de Las Bahamas, el Paso de los Vientos, el Estrecho de Colón y el Mar de Caimán en noviembre de 1989 y abril de 1991», vol. 1, Informe Científico Técnico, Instituto de Oceanología, 53 pp.
- García C. (1981a): «Temperatura de las aguas oceánicas de Cuba» (I) «Aguas Superficiales». *Rev. Cub. de Inv. Pesqueras*, vol. 6, no. 2, 1: 15.
- _____ (1981b): «Temperatura de las aguas oceánicas de Cuba» (II) «Aguas Sub-superficiales». *Rev. Cub. de Inv. Pesqueras*, vol. 6, no. 2, 16: 3.
- _____ (1996): «Oceanografía de la región norcentral de Cuba» (II) Estructura termohalina». *Rev. Cub. de Inv. Pesqueras*, vol. 20, no. 1, 35: 42.
- IPCC (1996): «Segunda Evaluación Cambio Climático-1995. Informe del grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático», OMM-UNEP-PNUMA, 71 pp.
- IPCC (2002): «Climate Change 2001. Synthesis Report. Contribution of working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», OMM, UNEP, 387 pp.
- Jones P. D., H. F. Díaz, P. M. Nelly y T. M. L. Wigley (1986): «Northern Hemisphere Surface air temperature variations» *J. Clim. Appl. Met.*, no. 25, 161: 179.
- Jones P. D. y J. Palutikof (2005): «Global temperature record» *Climatic Research Unit*, www.uea.ac.uk
- Levitus S. (1982): «Climatological Atlas of the World Ocean» *National Oceanic and Atmospheric Administration*, Professional Paper no.13, Rockville, Md. 173 pp.
- Melo N., et al. (2000): «Near-Surface Phytoplankton Distribution in the Western Intra-Americas Seas: The Influence of -El Niño- and Weather Events». *Journal Geophysics Research JGR*, vol. 105, no. C6, pp. 14,029-14,043, June 15.
- Mitrani, I. (2001): «Caracterización general de la capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba y su posible enlace con el desarrollo de los ciclones tropicales». *Revista Cubana de Investigaciones Marinas*, UNAM/UH, vol. 22, no. 2, pp. 81-92.
- Mitrani I., A. Moreno y O. Padilla (1985): «Algunos datos acerca de la capa activa oceánica en la región noroccidental del Caribe» (En ruso), *Tropicheskaya Meteorologiya*, Gidrometeoizdat, Leningrado, 186: 191.
- Mitrani I. y O. Díaz (2001): «Estructura termohalina de la capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba

2. Salinidad

Resumen

Se describen algunas particularidades de la estructura termohalina vertical en las capas superficial y subsuperficial de las aguas cubanas y sus tendencias temporales, en lo referente a la distribución vertical de la salinidad del agua de mar. La información utilizada proviene de cruceros realizados en aguas cubanas, fuera de la zona de plataforma, durante el período 1966-2000, con participación de especialistas de distintas instituciones cubanas y de otras naciones como la Unión Soviética y México. Se analizaron los cursos anuales de la salinidad y la densidad convencional, así como sus posibles cambios temporales, con inclusión de algunos parámetros, como son: espesor de la capa homogénea por densidad, máximo de salinidad y profundidad de localización. Se analizaron los cursos anuales del máximo de salinidad, de su profundidad de localización y del espesor de la capa isopícnica, así como sus posibles cambios temporales. Se arribó a la conclusión de que ha ocurrido un aumento de la salinidad en las aguas superficiales y subsuperficiales cubanas, con aumento en el espesor de la capa isopícnica, pero además, en el curso anual del máximo de salinidad aparecen picos que no se corresponden con el régimen anual de precipitaciones en el área, pero muestran una buena relación con algunas peculiaridades de la circulación oceánica en el Atlántico tropical.

Introducción

Son pocos los testimonios acerca del régimen de salinidad en los mares cercanos a Cuba. Existen algunos estudios integrales desarrollados con datos de expediciones oceanográficas. Entre los más importantes se tienen los realizados por García, (2000), los ejecutados en colaboración cubano-rusa a bordo de buques de investigación en 1979 y 1981 por especialistas del INSMET (Moreno *et al.* 1985; Mitrani *et al.* 1985), los de colaboración cubano-mexicana entre 1989 y 1990 (Victoria *et al.* 1990, Gallegos *et al.* 1996, 1998a, 1998b y 2000). Todos contaron con datos de menos de diez cruceros dentro de las aguas cubanas, lo cual limita la visión temporal acerca del tema tratado. En etapas posteriores se cuenta con los desarrollados por (Mitrani 2001; Mitrani y Díaz 2001, 2002; Mitrani *et al.* 2002), con datos de 38 expediciones entre 1966 y 1993.

En el presente trabajo se usó la información de 53 cruceros realizados en 1966-2000. Se realizó un análisis del comportamiento del máximo de salinidad, de su profundidad de localización y de la capa isopícnica, con énfasis en su variabilidad temporal y tendencias del curso anual.

Materiales y métodos

Información utilizada

El área de interés se localiza entre los 87° y 73°W y entre los 25° y 18°N (Fig. 1. Remítase a figura 1 de Temperatura). La información procede de las bases de datos HIDROMET (1966-1993) y GEOCUBA (1977-2000).¹ Se recopilaron los datos hidrometeorológicos procedentes de 53 cruceros realizados en los mares adyacentes al archipiélago cubano en

1966-2000, por especialistas del Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP), del Instituto de Oceanología (IDO), del Instituto de Meteorología (INSMET) y de la Empresa GEOCUBA, a distancias de hasta 200 km de la línea costera, en ocasiones con la colaboración de especialistas de la ex URSS, con inclusión además, de los resultados de la expedición Yuca II a bordo del buque mexicano «Justo Sierra». Se realizaron 7614 estaciones (Fig. 2. Remítase a figura 2 de Temperatura) con observaciones en los niveles estándar de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000 y 1200 m. Con los datos de temperatura y salinidad se calculó la densidad convencional.

En las expediciones cubano-soviéticas, durante la década de los años sesentas las mediciones de salinidad se realizaron en laboratorio, según las normas establecidas por GOIN (1965), a partir de muestras tomadas con Botellas Nansen. Se utilizaban salinómetros de fabricación soviética con diapasón de medición de 27-42 psu y precisión de 10⁻² psu. Ya desde los setentas se emplearon sonda-batómetros automatizados, de distintas procedencias, con diapasón de medición de 0-49 psu, que miden la conductividad eléctrica a partir de cual se determina la salinidad, con precisión de 10⁻³ psu, con aplicación de la metodología descrita por GOIN (1977).

En el buque «Ulises», las primeras mediciones (hasta 1993) se ejecutaron con muestras tomadas en Botellas Nansen también con aplicación de la metodología descrita por GOIN (1977). La determinación de la salinidad se realizó mediante un salinómetro inductivo Tsurumi Seiki Modelo E-2 con precisión 10⁻² psu y rango de medición 0-40 psu. En los muestreos más recientes (posteriores a 1996)

se ha podido utilizar sondas oceanográficas (CTD), al igual que en las expediciones mexicanas, a bordo del buque «Justo Sierra», capaces de medir la temperatura, salinidad y presión en toda la columna de agua, hasta profundidades de 2000 m, además de permitir la realización de mediciones directas de velocidad y dirección de la corriente, hasta los 1500 m. Para la salinidad, al diapason de medición de 0-49 psu, le corresponde un orden de precisión de 10^{-3} psu.

Determinación de las características de la estructura termohalina

Se determinaron los siguientes elementos: valor del máximo de salinidad, profundidad de localización del máximo de salinidad y espesor de la capa isopícnica.

Como frontera inferior de la capa isopícnica se tomó el nivel donde la densidad convencional es menor en 0,125 unidades de densidad con respecto a la superficie. Este criterio fue establecido por Levitus (1982) para la elaboración del *Atlas Climatológico del Océano Mundial*, posteriormente utilizado en la elaboración del *Atlas Oceánico Mundial de la NOAA*, a partir los argumentos expuestos por Monterrey y Levitus (1997) de que en efecto este criterio se corresponde con los niveles de frontera entre la capa mezclada y la capa de fuertes gradientes. Ese criterio ya ha sido utilizado antes por Mitrani *et al.* (2002).

Debido a la irregularidad de los datos disponibles, en el análisis de las posibles tendencias de los elementos meteorológicos y oceanográficos en las aguas cubanas se decidió no promediar por años, sino utilizar los cursos anuales promediados en general y compararlas con los promedios por períodos 1966-1980 y 1981-2000, tomando en cuenta que el punto de cambio de la temperatura planetaria se sitúa en 1980 (Jones 1996, Jones y Palutikof, 2005).

Resultados y discusión

Curso anual del máximo de salinidad y profundidad de localización en aguas cubanas.

En las figuras 3a y 3b se presentan el curso medio anual del máximo de salinidad (S_{max}) y la desviación estándar. Su valor oscila, como promedio, entre 36,2 y 37,2, con el mínimo localizado en abril y los máximos en noviembre y marzo, que son también los meses de máxima dispersión, aunque esta es realmente baja puesto que nunca sobrepasa los 2,8 psu.

En la figura 4a se refleja el curso medio anual de la profundidad de localización del máximo de salinidad (H_{smax}) y en la figura 4b, la desviación media cuadrática.

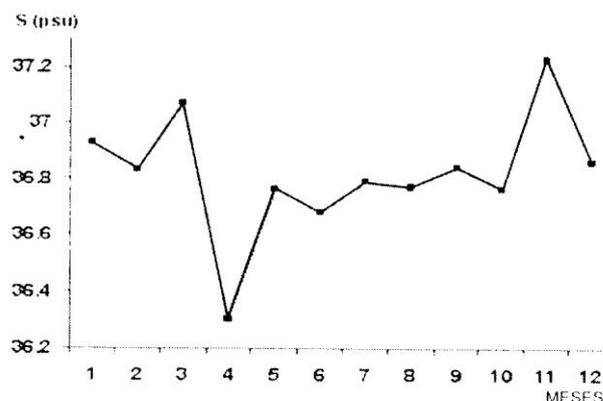


Fig. 3a. Curso medio anual de S_{max} en aguas cubanas.

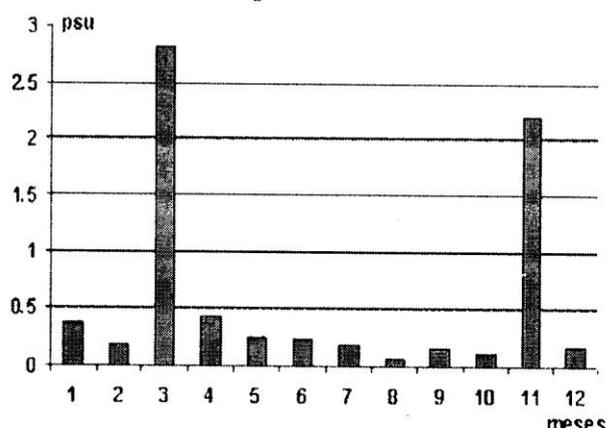


Fig. 3b. Desviación media cuadrática del curso medio anual de S_{max}

Es conocido que la ocurrencia de lluvia provoca una disminución de la salinidad, con acercamiento del máximo hacia la superficie, por lo cual se considera que los períodos de lluvia y sequía deben influir en el régimen anual de la salinidad, tanto en su valor como en su distribución vertical. Sin embargo, las distribuciones reflejadas en las figuras 3a, b y 4a, b, muestran que el régimen local de lluvias y sequía no siempre son determinantes, sino también el comportamiento del sistema de corrientes marinas, que en los «picos» de máxima salinidad es fundamental.

La presencia del período lluvioso local, definido de mayo a octubre sobre el archipiélago cubano (Lecha *et al.* 1994) y en general sobre los mares Interamericanos (Fernández y Díaz, 2005), conserva a S_{max} en el entorno de los 36,8 psu, muy por debajo de los valores de noviembre a marzo, cuando S_{max} se mantiene entre 36,8 y 37 psu durante

el período menos lluvioso, con excepción del mes de abril. En ese mes, por el contrario, se presenta el valor más bajo de todo el año, aunque el período poco lluvioso se extiende de noviembre a abril en el área, según indican Lecha *et al.*, 1994 y Fernández y Díaz, 2005. Se observa un aumento en Hsmax de diciembre a marzo, en la medida en que avanza el período poco lluvioso, con el máximo en marzo. Sin embargo, el valor más alto de Smax está en el mes de noviembre, mientras que los picos de Smax y Hsmax en el mes de marzo se corresponden con la evolución del período poco lluvioso sobre el archipiélago cubano.

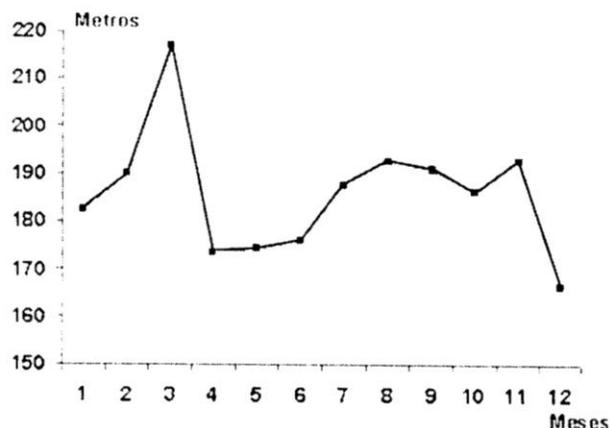


Fig. 4a. Curso medio anual de Hsmax en aguas cubanas.

La presencia de los mínimos del mes de abril se explica por el transporte de aguas con baja salinidad que realizan las corrientes ecuatoriales desde la zona centro-occidental del Atlántico y desde las costas sudamericanas en esta época del año (Fig. 5). En investigaciones realizadas en aguas de las corrientes ecuatoriales, en la zona centro-occidental del Atlántico se ha detectado la presencia de áreas con baja salinidad en el mes de abril (Moore and Todd, 1993). Según Foltz *et al.* (2004) se ha notado que la variación estacional de la salinidad en aguas del Atlántico centro-occidental y del Caribe, se encuentra estrechamente ligada al régimen de escurrimiento de los grandes ríos de América del Sur y a las fluctuaciones estacionales de la zona Intertropical de Convergencia (ITC).

Las investigaciones señalan que el movimiento hacia el sur de la ITC durante el verano austral conlleva a la aparición de una banda de lluvia en el mes de abril, al oeste de los 30°W y entre los 5°N y los 5°S, es decir, sobre la rama sur de la Corriente Ecuatorial, donde se genera una disminución de la salinidad. Por otra parte, es característico del cli-

ma de Brasil la ocurrencia de un período de intensificación de las lluvias sobre la Amazonia al sur de la línea del Ecuador en los meses de diciembre a abril, lo cual genera un notable aumento en el escurrimiento de los ríos (US Library 1997).

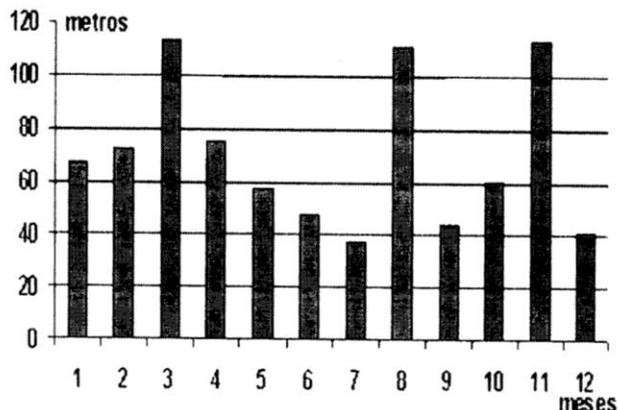


Fig. 4b. Desviación media cuadrática del curso medio anual de Hsmax.

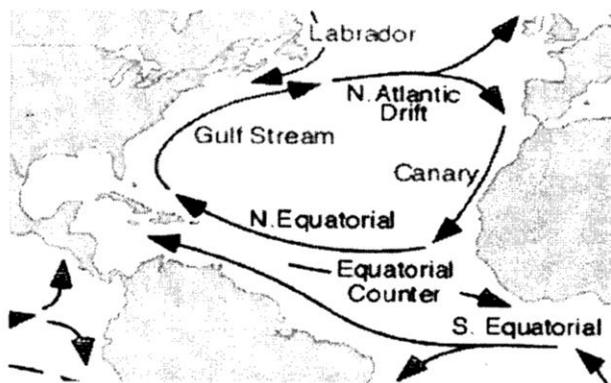


Fig. 5. Sistema de Corrientes del área norte y central del Atlántico (Pidwirni, 2004).

En los picos de noviembre, al parecer se manifiestan la acción combinada del comienzo del período poco lluvioso a escala local y el final de este mismo período sobre la Amazonia Brasileña, al sur de la línea del Ecuador (US Library 1997); es decir, tanto las condiciones climáticas a escala local como el sistema de las corrientes marinas, son favorables para el aumento de salinidad en aguas cubanas. Ya en diciembre, con el comienzo de las lluvias en el continente, vuelve a caerse Smax y Hsmax hasta que se impone el régimen climático local.

Con respecto a las tendencias de Smax y Hsmax, en las figuras 6a, b y 7a, b se aprecia la comparación de los cursos anuales promedio con los períodos 1966-1980 y 1981-2000, así como sus anomalías.

En las figuras 6a y 6b, como peculiaridades se aprecia que los picos de marzo-abril, en el período 1966-1980 estuvieron desplazados hacia febrero-marzo, además del evidente crecimiento de la salinidad en el período 1981-2000 para casi todos los meses. Esta situación se confirma con las mediciones realizadas en las Bahamas entre 1984 y 1993 (Vaughan y Molinari 1997), donde se detectó un aumento en la salinidad de las aguas superficiales y subsuperficiales.

En las figuras 7a y 7b se aprecia que Hsmax ha aumentado hasta más de seis decenas con respecto a los años sesentas y setentas y en el orden de una a cuatro decenas de metros con respecto al promedio.

La tendencia del acumulado anual de lluvia sobre territorio cubano para los años ochentas y noventas no presenta cambios significativos con respecto a décadas anteriores, sino una redistribución en su curso anual, donde a una ligera disminución en el período lluvioso se antepone un aumento en el período poco lluvioso y a la mayor frecuencia de eventos de intensa sequía le ha correspondido muy intensos eventos de lluvia (Gutiérrez *et al.*, 2000), además de que los días sucesivos con lluvia tienden al aumento (Álvarez *et al.*, 2002a, 2002b). Este régimen de precipitaciones puede ser la razón de que el curso anual de Hsmax en los ochentas y noventas sea más suave que en las décadas precedentes, aunque su profundización esté indicando un aumento en la evaporación.

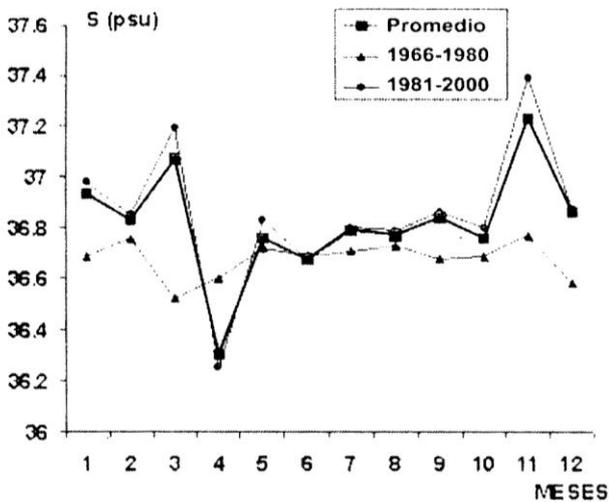


Fig. 6a. Cursos medios anuales de Smax en los periodos 1966-1980 y 1981-2000.

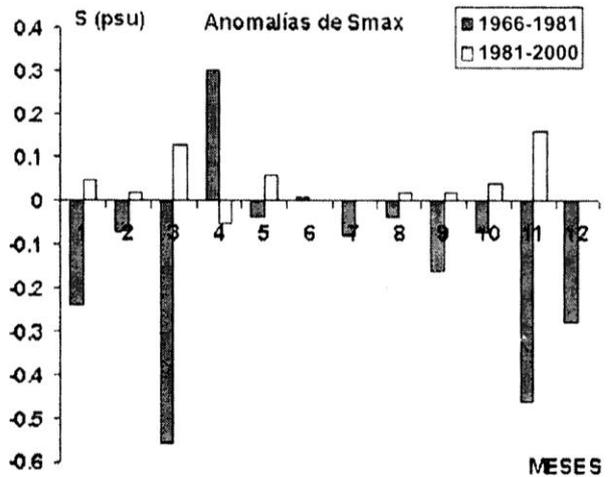


Fig. 6b. Anomalías del curso anual de Smax en los periodos 1966-1980 y 1981-2000.

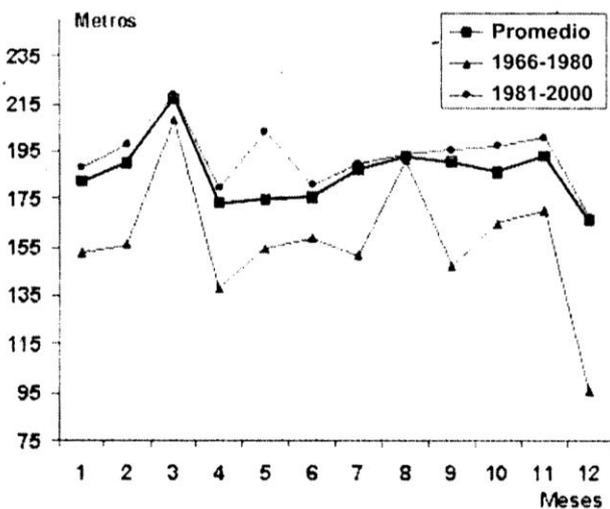


Fig. 7a. Cursos medios anuales de Hsmax en los periodos 1966-1980 y 1981-2000.

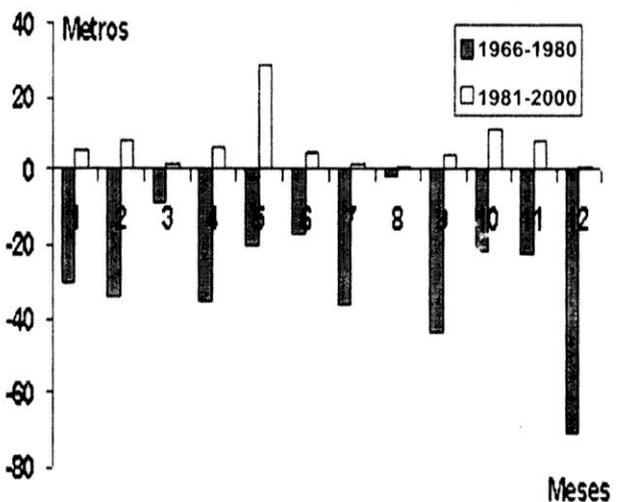


Fig. 7b. Anomalías del curso anual de Hsmax en los periodos 1966-1980 y 1981-2000.

Debido a la escasez de datos meteorológicos sobre aguas cubanas se hace difícil valorar si la evaporación superó o no al volumen de precipitaciones en los períodos estudiados. Pero en la tendencia de la salinidad en aguas cubanas se aprecia una correspondencia con el régimen evaporación-precipitaciones del Atlántico central, donde ya se tienen testimonios de un notable aumento de salinidad en latitudes tropicales y subtropicales, atribuido al aumento de la evaporación debido al calentamiento planetario. Con mediciones desde 1950 hasta 1990, se encontró un aumento de salinidad en los primeros 500 m de las aguas tropicales, del orden de 0,1 a 04 psu (Curry *et al.*, 2003). Otro estudio con series de datos promediadas por péntadas desde 1955 hasta 1998 apunta hacia un aumento de la salinidad, incluso en profundidades de más de 1500 m donde se manifiesta en el orden de 0,0005 psu/año en la zona tropical del Atlántico (Boyer *et al.*, 2005), aunque este criterio es bastante dudoso puesto que la exactitud de las observaciones solo es confiable hasta el orden de 10^{-2} . Obsérvese en la figura 6 que el aumento en aguas cubanas con respecto a la media alcanza hasta 0,2 psu y con respecto a los años 1966-1980, es de más de 0,5 psu.

Algunos modelos matemáticos globales apuntan hacia una disminución de velocidad en la velocidad de las corrientes termohalinas y de hecho, algunos apuntan hacia el colapso de la circulación planetaria termohalina (IPCC 2001). Partiendo de esta idea, en el máximo de salinidad los cambios de los picos febrero-marzo a marzo-abril, pudieran tener la siguiente explicación: es posible que en los años sesentas y setentas la corriente ecuatorial del sur fuese más rápida que en los años ochentas y noventas, razón por la cual, las aguas de los grandes ríos de Sudamérica con su máximo de lluvias de diciembre a marzo, alcanzaban las aguas cubanas en el propio mes de marzo; mientras que en las décadas siguientes, las dos ramas de la corriente ecuatorial alcanzan juntas las aguas cubanas, y por ello el desplazamiento hacia marzo-abril.

El espesor de la capa isopícnica y su dispersión Hs (Figuras 8a y b) presentan una variabilidad parecida a la isotérmica, pero con frecuencia Hs es menor que Ht y esta diferencia puede ser del orden de las decenas de metros. El máximo se corre hacia el mes de marzo, en correspondencia con el máximo de salinidad y valores muy bajos de temperatura del agua, mientras que los mínimos se presentan de mayo a julio con el comienzo del ascenso de julio a agosto. Esto indica que la dis-

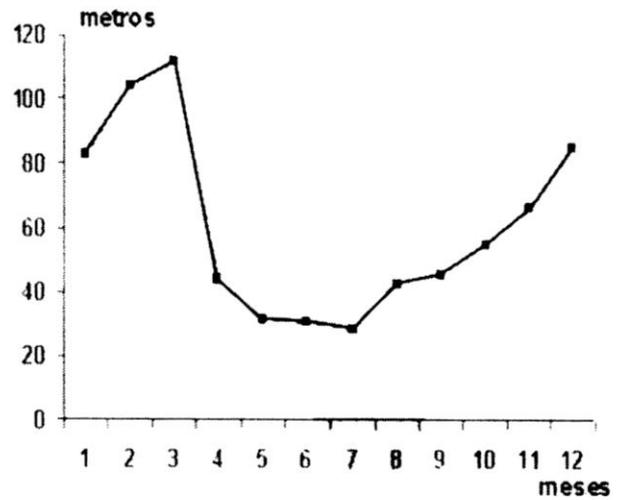


Fig. 8a. Curso medio anual de $H\sigma$, en aguas cubanas.

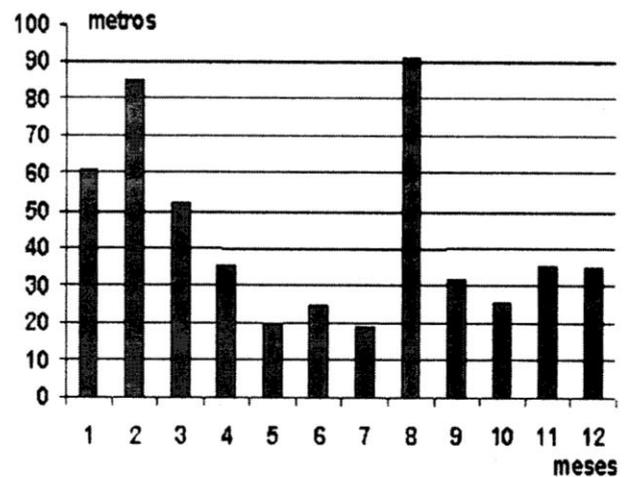


Fig. 8b. Desviación media cuadrática del curso medio anual de $H\sigma$.

tribución vertical de la temperatura no siempre es la principal determinante en la distribución de la densidad del agua, sino que hay gran influencia de la salinidad, la cual puede limitar el alcance de la mezcla vertical, cuando la frontera superior de la haloclina (capa de fuertes gradientes de salinidad) se localiza antes que la termoclina.

En general, el anterior criterio solo se planteaba para altas latitudes (Lamb, 1984), pero la existencia de esta particularidad ya había sido mostrada para las bajas latitudes del Atlántico por Sprintall y Tomczak (1990), en la zona de confluencia de las corrientes ecuatoriales, antes penetrar en los mares Interamericanos. Las evidencias muestran que esta característica se conserva en las cercanías de las costas de Cuba.

En las figuras 9a y b se aprecian las diferencias entre ambos períodos de estudio y las anomalías con respecto a sus valores medios. Se destaca un aumento en el espesor de la capa isopícnica en el orden de una decena con respecto al valor medio y de hasta cinco decenas de los años 1981-2000 con respecto a los 1966-1980, lo cual debe influir en la disminución de la velocidad de las corrientes de densidad.

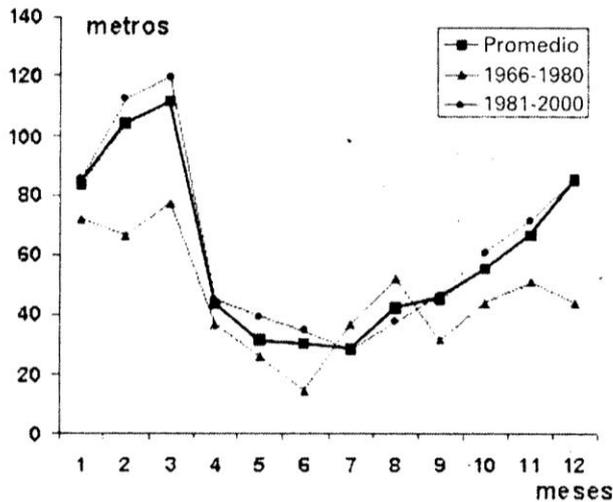


Fig. 9a. Cursos medios anuales de $H\sigma$, en los períodos 1966-1980 y 1981-2000.

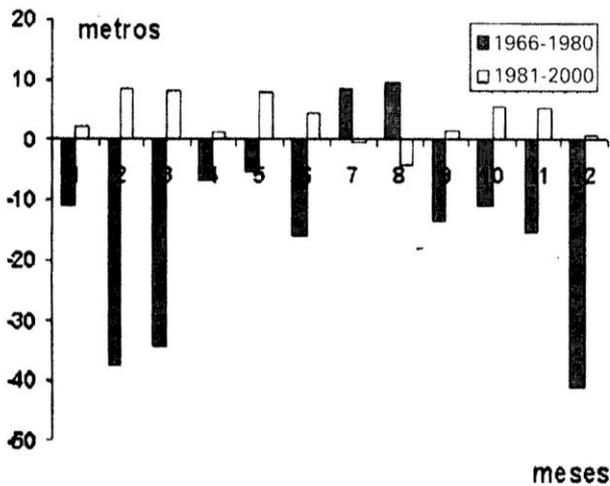


Fig. 9b. Anomalías del curso anual de $H\sigma$, en los períodos 1966-1980 y 1981-2000.

en los períodos 1966-1980 y 1981-2000.

Conclusiones

- El curso medio anual del máximo de salinidad (S_{max}) muestra oscilaciones entre 36,2 y 37,2 psu, con el mínimo localizado en abril y el máximo en noviembre. La presencia del período lluvioso sobre el archipiélago cubano,

la conserva en el entorno de los 36,8 psu de mayo a octubre, muy por debajo de los valores del período menos lluvioso, cuando S_{max} se mantiene entre 36,8 y 37 psu, con excepción del mes de abril, que por el contrario presenta el valor más bajo de todo el año.

- En el curso medio anual de la profundidad de localización del máximo de salinidad (H_{smax}) se observa un aumento de diciembre a marzo, en la medida en que avanza el período poco lluvioso, con el máximo en marzo. Sin embargo, el valor más alto le corresponde al mes de noviembre; mientras que los picos de S_{max} y H_{smax} en el mes de marzo se corresponden con la evolución del período poco lluvioso sobre el archipiélago cubano. Los mínimos del mes de abril se explican por el transporte de aguas con baja salinidad de las corrientes ecuatoriales en esta época del año, desde la zona centro-occidental del Atlántico y desde las costas de América del Sur.
- En los picos de noviembre se manifiesta la acción combinada del comienzo del período poco lluvioso a escala local y el final de este mismo período sobre la Amazonia brasileña; tanto a escala local como en el sistema de las corrientes marinas, las condiciones son favorables para el aumento de salinidad en aguas cubanas. Ya en diciembre, con el comienzo de las lluvias en el continente, vuelven a caerse S_{max} y H_{smax} hasta que se impone el régimen climático local.
- Se evidencia un crecimiento de la salinidad y profundización del máximo en el período 1981-2000 para casi todos los meses. En el período 1966-1980 H_{smax} ha aumentado en el orden de una a cuatro decenas de metros con respecto al promedio, y hasta más de seis decenas con respecto a los años sesentas y setentas. Se aprecia que los picos de marzo-abril, en el período 1966-1980 estuvieron desplazado hacia febrero-marzo. La posible explicación es que la rama sur de la corriente ecuatorial disminuyó su velocidad, de manera que en los años ochentas y noventas alcanza las costas de Cuba en abril, a la vez que la rama norte

en abril, a la vez que la rama norte

- El espesor de la capa isopícnica presenta una variabilidad parecida a la isotérmica, pero con frecuencia es menor en el orden de las decenas de metros. El máximo se corre hacia el mes de marzo, en correspondencia con el máximo de salinidad y valores muy bajos de temperatura del agua; mientras que los mínimos se presentan de mayo a julio con el comienzo del ascenso

de julio a agosto. Esto indica que hay gran influencia de la salinidad, la cual puede limitar el alcance de la mezcla.

- *Se destaca un aumento* en el espesor de la capa isopícnica, en el orden de una decena con respecto al valor medio y de hasta cinco decenas de los años ochentas y noventas con respecto a los sesentas y setentas, lo cual debe influir en la disminución de la velocidad de las corrientes de densidad en las aguas superficiales.

Bibliografía

Álvarez L., R. Álvarez e I. Borrajero (2002a): «Caracterización de las precipitaciones en la estación Casablanca y sus tendencias». *Rev. Cub. Met.*, vol.9, no. 1, 3: 11.

_____ (2002b): «Caracterización de las precipitaciones en la estación Camagüey y sus tendencias». *Rev. Cub. Met.*, vol. 9, no. 2, 28: 37.

Boyer T. P., S. Levitus, J. I. Antonov, R. A. Locarneni y H. E. García (2005): «Linear trend in salinity for the World Ocean» *Geophysical Research Letters*, vol. 32, 12 pp. (versión electrónica).

Curry R., B. Dackson e I. Yashaev (2003): «A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades», *Nature*, vol. 426, 826: 829.

Duxbury A. C. y A. B. Duxbury (1998): «Structure of the Ocean» *World Ocean*, Chapter 6, William C. Brown's Publishers, electronic version, web site: www.saddleback.cc.ca.us/faculty/valencia/ocean/textbook

FAS/SPP (1999): «The Water Planet» Unit 1, Federation of American Scientists, Sparce Policy Project, www.fas.org/spp/military/docaps/afwu

Fernández A. e Y. A. Díaz (2005): «Catálogo de Procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el Período 1979-1993». Instituto de Meteorología, Centro Provincial de Cienfuegos, Editora GEOCUBA Cienfuegos, 167 pp.

Foltz G. R., S. A. Gordsky y J. A. Carton (2004): «Seasonal salt budget of the northwestern Tropical Atlantic Ocean along 38° W» *J. Geophys. Res.*, vol. 109, 13 pp. (versión electrónica).

Gallegos A., I. Victoria, J. Zavala, M. Fernández e I. Penié (1996): «Hidrología en los estrechos del Mar Caribe Occidental Informe Final de Proyecto del ICML (UNAM, México DF) y del IDO (CITMA, La Habana) 38 pp.

Gallegos A. *et al.* (1998): «Condiciones oceánicas en el Canal de Yucatán, el Estrecho de la Florida (Cayo Hueso-La Habana), el Canal Viejo de Bahamas, el Paso de los Vientos, el Estrecho de Colón y el mar del Caimán, en noviembre de 1989 y abril de 1991». Informe final de proyecto del ICML (UNAM, México DF) y del IDO (CITMA, La Habana) 46 pp.

Gallegos A., I. Victoria, J. Zavala, M. Fernández e I. Penié (1998): «Hidrología en los estrechos del Mar Caribe

Occidental». *Revista de Investigaciones Marinas (UNAM-UH)*, vol. 19, no. 1, 1: 37.

Gallegos A. *et al.* (2000): «Condiciones Oceánicas en el Canal de Yucatán, el Estrecho de la Florida, el Canal Viejo de Las Bahamas, el Paso de los Vientos, el Estrecho de Colón y el Mar de Caimán en noviembre de 1989 y abril de 1991», volumen 1, Informe científico técnico, Instituto de Oceanología, 53 pp.

García C. (1996): «Oceanografía de la región norcentral de Cuba» (II) Estructura termohalina. *Rev. Cub. de Inv. Pesqueras*, vol. 20, no. 1, 35: 42.

Gutiérrez T., A. Centella, M. Limía y M. López (2000): «Impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba». Informe de resultado científico del INSMET, en soporte técnico, Biblioteca INSMET, La Habana, Cuba.

INSMET (1991): *Resumen Climático de Cuba*, Editorial Academia, La Habana, 127 pp.

Lamb P. J. (1984): «On the Mixed Layer Climatology of the North and Tropical Atlantic» *Tellus*, vol. 36A, no. 3, 292: 305.

Lecha L., L. Paz y B. Lapinel (1994): «El clima de Cuba» Editorial Academia, La Habana, 196 pp.

Levitus S. (1982): «Climatological Atlas of the World Ocean» *National Oceanic and Atmospheric Professional Paper no.13*, Rocsvile, Md. 173 pp.

Mitrani I., A. Moreno y O. Padilla (1985): «Algunos datos acerca de la capa activa oceánica en la región noroccidental del Caribe» (En ruso), *Tropicheskaya Meteorologiya*, Guidrometeoizdat, Leningrado, 186:191.

Mitrani I. (2001): «Caracterización general de la capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba y su posible enlace con el desarrollo de los ciclones tropicales». *Revista Cubana de Investigaciones Marinas*, UNAM/UH, vol. 22, no. 2, pp. 81-92.

Mitrani I. y O. Díaz (2001): «Estructura termosalina de la capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba y su influencia en la formación de los ciclones tropicales». *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 8, no.1, La Habana, 18:24.

Mitrani I., O. Díaz, A. Calnick e Y. Juantorena (2002): «La capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba». Informe de resultado científico, Biblioteca del INSMET, La Habana, 59 pp.

Mitrani I. y O. Díaz (2002): «La estructura termosalina vertical por zonas geográficas, en aguas cubanas» *Rev. Cub. Met.*, vol. 9, no. 2, 3: 7.

Monterrey G. and S. Levitus (1997): «Seasonal variability of mixed layer depth for the World Ocean – NOAA Atlas» NEDIS, Washington D.C., 100 pp.

Moores C. N. K. and G. A. Maul (1998): Intra-Americas Sea Circulation, *The Sea*, cap. 7, vol. II, John Wiley & Sons, 183: 208.

Moores W. S. and J. F. Todd (1993): «Radium isotopes in the Orinoco Estuary and Eastern Caribbean Sea», *J. Geophys. Res.*, vol. 98, 2233: 2244.

- Pidwirni, M. (2004): «Introduction to the Hydrosphere» Chapter 8, *Fundamentals of Physical Geography*, Department of Geography, Okanagan University College, web site: www.physicalgeography.net.
- Sprintal J. y M. Tomczak (1990): «Salinity considerations in the tropical surface mixed layer» *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*, no. 54, 1: 5.
- US Library (1997): «Brazil climate» U. S. Library of Congress, U.S. Board on Geographic Names, www.bgn.gov
- Vaughan S. L. and R. L. Molinari (1997): «Temperature and salinity variability in the Deep Ocean Western Boundary Current». *J. Phys. Oceanography*, AMS, vol. 27, 749: 761.
- Victoria I., et al. (1990): «Caracterización Oceanográfica de la Fosa de Jagua y la Zona Económica Exclusiva al sur de Cuba» Informe final de proyecto, IDO, La Habana, 125 pp.

Agradecimientos

Deseo manifestar mis agradecimientos a la MSc. Jarmila Pérez, el MSc. Alejandro Morales y el Ing. Jorge Viamontes, de la Empresa GEOCUBA por su ayuda en la elaboración de los datos, al Lic. Roberto Piñeiro, del Centro de Investigaciones Pesqueras, a la Ing. Libertad Rodas, del Instituto de Oceanología, así como al Dr. Alfredo Moreno, del Instituto de Meteorología, por la revisión de los textos y valiosos consejos.

3. Masas de agua

Resumen

Se describen algunas particularidades de la estructura termohalina vertical de las aguas cubanas en lo referente a la distribución vertical de las masas de agua. La información utilizada proviene de cruceros realizados durante el período 1966-2000, con participación de especialistas de distintas instituciones cubanas y de otras naciones como la Unión Soviética y México. Se analizó la distribución media vertical de la temperatura y la salinidad hasta los 1500 m de profundidad. Posteriormente, se determinó la distribución de las masas de agua mediante la utilización de las curvas TS. Se arribó a la conclusión de que en los primeros 1400 m están presentes cinco estratos: las aguas superficiales locales, tres estratos de aguas intermedias y a continuación las aguas profundas.

Introducción

Debido a la escasez de información oceanográfica no son frecuentes en la bibliografía disponible los estudios acerca de la composición de las masas de agua en los mares interamericanos y menos aún, de las aguas cubanas. Uno de los antecedentes más completos encontrados por los autores del presente texto, corresponde a Gallegos *et al.* (1998a,b, 2000), donde se presenta un análisis de la distribución vertical de las masas de agua en los mares adyacentes a Cuba, utilizando datos de tres expediciones oceanográficas en los meses de mayo de 1964, noviembre de 1989 y abril de 1991. Luego, Mitrani y Díaz (2001), Mitrani *et al.* (2002) y Mitrani y Díaz (2002) puntualizaron las particularidades de esta distribución, con datos de ocho cruceros entre 1966 y 1993. En el presente trabajo, ya se contó con 15 cruceros más, hasta el año 2000 y esta nueva información permitió apreciar nuevos detalles en las aguas intermedias.

En la bibliografía consultada se manifiesta que ha habido cambios en la distribución vertical de las masas de agua en el Atlántico, debido a que han variado los valores de temperatura, salinidad y densidad que caracterizan a las masas de agua en su lugar de origen (Curry *et al.*, 2003). Con la cantidad de datos disponibles en la presente investigación, es difícil juzgar si ha habido cambios en las características y fronteras entre las masas de agua más allá de los 500 m de profundidad. Sin embargo, el volumen actual de información permitió un análisis más cuidadoso y a mayor profundidad.

Materiales y métodos

Se utilizó la información procedente de las bases de datos HIDROMET y GEOCUBA. De la primera, se escogieron los ocho cruceros entre 1986 y 1993, que incluyeron observaciones hasta los 1200 m de profundidad, para un total de 834 estaciones distribuidas en torno a todo el archipiélago cubano.

De la segunda se utilizaron 15 cruceros (1655 estaciones), con lo cual se aumentó la cantidad de datos hasta 2489.

El análisis de la distribución vertical de las masas de agua se realizó hasta los 1400 m de profundidad, por el tradicional método de las curvas TS, descrito por Mamaev (1970) y FAS/SPP (1999).

Resultados y discusión

Las masas de agua en torno a Cuba

En las figuras 1 y 2 se reflejan los perfiles verticales promediados por meses de la temperatura del agua y de la salinidad, mientras que en la figura 3 aparece la curva TS. Obsérvese que las mayores fluctuaciones anuales ocurren por encima de los primeros 250 m y prácticamente después de los 350 m, en el entorno de los 17 °C y los 36,3 psu de salinidad, los valores convergen y varían poco durante el año. Las distribuciones obtenidas son muy parecidas y esto se demuestra en la superposición de todas las curvas. En la distribución vertical de la salinidad se aprecia como puntos notables un máximo de salinidad en el entorno de los 200 m y un mínimo en el entorno de los 800 m.

En la figura 3 ya se puede apreciar la distribución de las curvas TS, con la correspondiente superposición de todas las líneas, en correspondencia con las distribuciones de las figuras 1 y 2.

Desde la superficie y hasta una profundidad del orden de varias decenas de metros, se localizan las aguas superficiales locales, con temperaturas que generalmente se encuentran entre los 25 y 30 °C con salinidad entre 36 y 36,2 psu. El máximo de salinidad subsuperficial es característico de las aguas troposféricas y es común que en la zona tropical se encuentre sumergido. Por lo general este máximo indica que el origen de la masa de agua se encuentra en las regiones oceánicas de circulación anticiclónica (Mamaev, 1970; Gallegos

et al., 1998). En la zona de estudio, esta masa de agua sería la subtropical del Atlántico Norte, con espesor entre los 100 y 250 m de profundidad. Presenta temperaturas entre los 25 y 21°C, y salinidades de 36,6 a 36,9 psu. Antes del mínimo de salinidad, entre los 300 y 800 m se observa un estrato con temperaturas entre 10 y 20°C, y salinidades entre los 34,2 y 36,5 psu. Estas propiedades recuerdan las aguas del Atlántico Norte Central, aunque con la temperatura un poco más baja.

El mínimo de salinidad indica la presencia de aguas intermedias o de transición, que suelen ser

de origen subártico, subantártico o mediterráneas (FAS/SPP 1999). Este mínimo de salinidad se encuentra en los 900 m y con valores en el entorno de los 34,7 psu de salinidad y de 4 a 9°C de temperatura. Esta agua ocupa entre los 800 m y los 1200 m de profundidad; con solo estos datos es difícil definir si proceden del hemisferio norte o del sur. Atendiendo a la salinidad, esta es inferior a la que caracteriza a las masas subárticas, mientras que las temperaturas son mayores. Pero ambas propiedades presentan valores mayores que las aguas subantárticas.

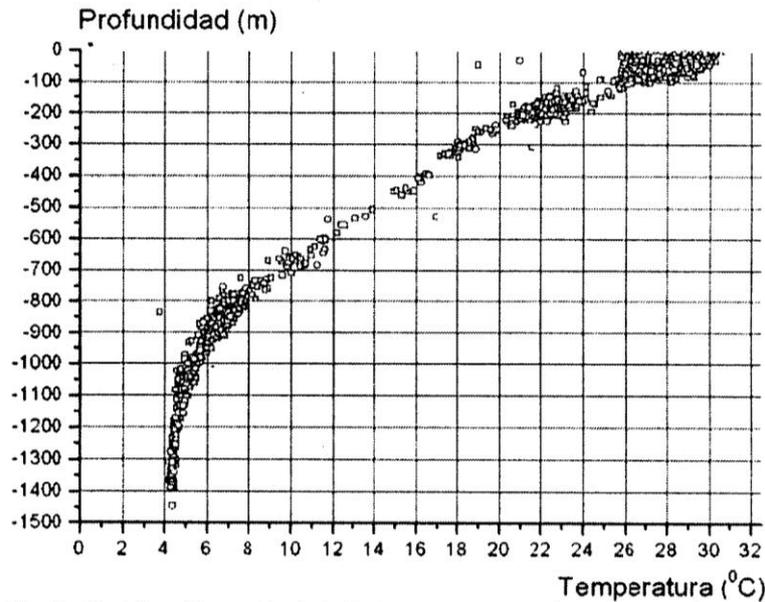


Fig. 1. Distribución vertical de la temperatura en las aguas cubanas.

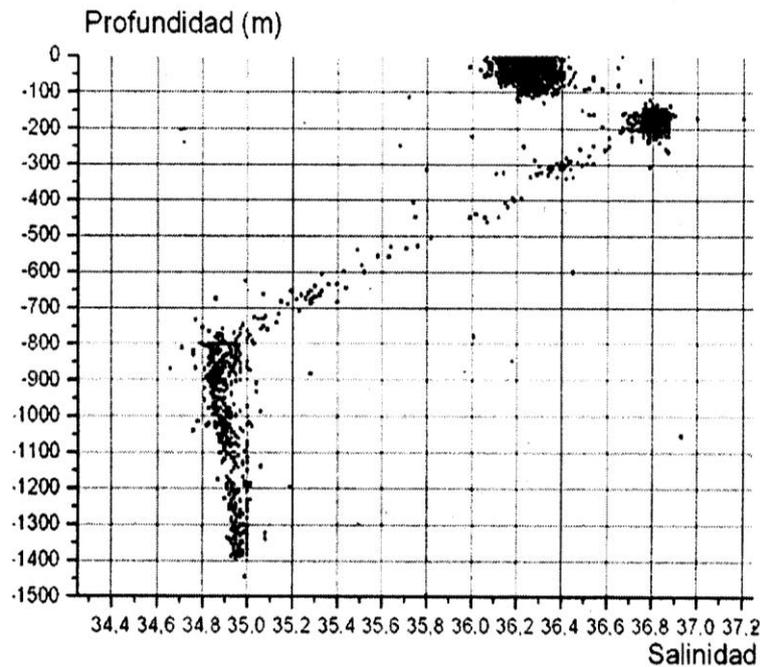


Fig. 2. Distribución vertical de la salinidad en las aguas cubanas.

En el estudio realizado por Gallegos *et al.* (1998a y b), el autor planteó que atendiendo a su composición química, esta masa de agua es de origen subantártico. Desafortunadamente, en el presente trabajo no se contó con el conjunto de parámetros químicos y bioquímicos para un análisis más riguroso cuando no queda claro el origen de una masa de agua, según lo recomendado por Tomzack y Pole (2002), por lo que el punto de vista de Gallegos *et al.* (1998a y b) es difícil de refutar. No obstante, es válido destacar la evidente contradicción entre su clasificación y lo que se manifiesta a partir de los indicadores de temperatura y salinidad

A continuación de las intermedias se presentan las aguas estratosféricas, procedentes de altas latitudes. Las del hemisferio norte se caracterizan por un máximo de salinidad (Mamaev, 1970; FAS/SPP, 1999). Según se muestra en la figura 3 se presentan con temperaturas por debajo de los 5°C y salinidad del orden de 35 psu, parecidas a las aguas profundas del Atlántico norte, procedentes de la zona donde confluyen las corrientes frías del Labrador y de Groenlandia.

La primera peculiaridad se manifiesta en que la forma de los perfiles cambia en el entorno de los 1200 m, de manera que el estrato entre 800 y 1200 m la salinidad está sobre los 34,8, pero a partir de los 1200 m hay un aumento hacia los 35 psu. Es notable también que la temperatura del agua, entre los 800 y 1200 m disminuye de 8 hacia 4,5 °C, mientras que posteriormente se mantiene en el entorno de los 4°C, aunque aún en el nivel de 1400 m está igual o por encima de los 4°C, con salinidad en el entorno de los 35 psu.

Estas peculiaridades indican la presencia de tres masas de aguas intermedias: a) intermedias del Atlántico Norte Central, b) intermedias subantárticas y c) mediterránea transformada, cuya presencia en el Triángulo de Las Bermudas fue indicada por Zubin *et al.* (1987). A continuación, las Aguas Profundas del Atlántico, acorde con las descripciones de Behl (1997), Duxbury and Duxbury (1998) y FAS/SPP (1999).

En la tabla 1 se presenta la distribución propuesta por los autores del presente texto.

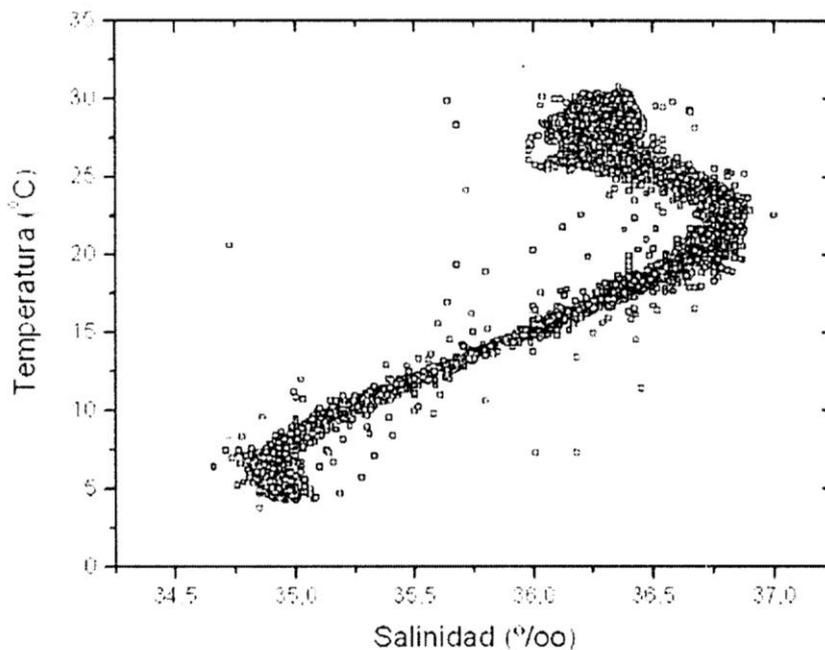


Fig. 3. Distribución de las masas de agua en torno a Cuba, a partir del análisis de las curvas TS con datos de 23 cruceros realizados entre 1966 y el 2000.

Tabla 1. Distribución vertical de las masas de agua en las mareas adyacentes a Cuba

MASAS DE AGUA	TEMPERATURA [°C]	SALINIDAD [psu]	FRONTERAS DE LOCALIZACIÓN [M]
Superficiales locales	25-31	36.0-36.5	Decenas de metros (espesor de la capa homogénea)
Subtropicales del Atlántico Norte	22-25	36.6-36.9	Entre el límite de la capa homogénea y los 250 m
Intermedias del Atlántico Norte Central	8-22	36.9-35.0	250-800
Intermedias subantárticas	4,5 – 8	35.0-34.8	800-1200
Intermedias mediterráneas transformadas	4.5 – 4	34.8-35.0	1200-1400
Aguas profundas del Atlántico	4°C	>35	> 1400

Conclusiones

- El análisis de la distribución vertical de las masas de agua indican la presencia de cinco estratos desde la superficie hasta los 1400 m de profundidad. A continuación del estrato de aguas superficiales y subsuperficiales se distinguen tres tipos distintos de aguas intermedias: del Atlántico Central, Antárticas y Mediterráneas transformadas, mientras que las aguas profundas del Atlántico se localizan por debajo de los 1400 m.
- Debido a la escasez de datos no es posible confirmar la ocurrencia de un cambio en los niveles de localización de las diferentes masas más allá de los 500 m de profundidad en los últimos 40 años, pero se puede asegurar que en las capas superficiales ha habido un aumento de salinidad y temperatura.

Bibliografía

- Behl R. (1997): «Atlantic Ocean water masses» Updated on September 1997 by R.Behl, Department of Geosciences Home Page, Pennsylvania State University, www.geosc.psu.edu
- Curry R., B. Dackson e I. Yashaev (2003): «A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades». *Nature*, vol. 426, 826: 829.
- Duxbury A. C. y A. B. Duxbury (1998): «Structure of the Ocean» *World Ocean*, Chapter 6, William C. Brown's Publishers, electronic version, web site: www.saddleback.cc.ca.us/faculty/valencia/ocean/textbook
- FAS/SPP (1999): «The Water Planet» Unit 1, Federation of American Scientists, Sparce Policy Project, www.fas.org/spp/military/docaps/afwu

Gallegos A. *et al.* (1998): «Condiciones oceánicas en el Canal de Yucatán, el Estrecho de la Florida (Cayo Hueso-La Habana), el Canal Viejo de Bahamas, el Paso de los Vientos, el Estrecho de Colón y el mar del Caimán, en noviembre de 1989 y abril de 1991». Informe final de proyecto del ICML (UNAM, México DF) y del IDO (CITMA, La Habana), 46 pp.

Gallegos A., I. Victoria, J. Zavala, M. Fernández e I. Penié (1998): «Hidrología en los estrechos del Mar Caribe Occidental». *Revista de Investigaciones Marinas (UNAM-UH)*, vol. 19, no. 1, 1: 37.

Gallegos A. *et al.* (2000): Condiciones Oceánicas en el Canal de Yucatán, el Estrecho de la Florida, el Canal Viejo de Las Bahamas, el Paso de los Vientos, el Estrecho de Colón y el Mar de Caimán en noviembre de 1989 y abril de 1991, Volumen 1, Informe científico técnico, Instituto de Oceanología, 53 pp.

Mamaev O. I. (1970): TS-análisis de las aguas del océano mundial. [En ruso] Leningrado, Guidrometeoizdat, 363 pp.

Mitrani I. y O. Díaz (2001): «Estructura termosalina de la capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba y su influencia en la formación de los ciclones tropicales». *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 8, no.1, La Habana, 18: 24.

Mitrani I., O. Díaz, A. Calnick y Y. Juantorena (2002): «La capa activa oceánica en los mares cercanos a Cuba». Informe de resultado científico, Biblioteca del INSMET, La Habana, 59 pp.

Mitrani I. y O. Díaz (2002): «La estructura termosalina vertical por zonas geográficas, en aguas cubanas». *Rev. Cub. Met.*, vol. 9, no. 2, 3: 7.

Tomzack M. y R. Pole (2002): «Water masses and circulation in the permanent thermocline of the Atlantic Ocean» www.scieng.flinders.edu.au/research/ocean

Agradecimientos

Los autores del presente texto desean manifestar su agradecimiento a la MSc. Jarmila Pérez, al MSc. Alejandro Morales y al Ing. Jorge Viamontes, de la Empresa GEOCUBA por falicitarnos los datos de 15 expediciones, así como al Lic. Roberto Piñeiro, del Centro de Investigaciones Pesqueras, a la Ing. Libertad, del Instituto de Oceanología así como al Dr. Alfredo Moreno por la revisión del texto y oportunos consejos.