

ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE VOLUMEN Y CALOR EN EL CANAL DE YUCATÁN

Lic. Cleofé Alvarez Valladares ⁽¹⁾

Lic. Yanmichel A. Morfa Ávalos ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias del Mar (ICIMAR) Ave. 1ra No.18406, Rpto. Flores, Playa, Cuba.
cleo.alvalladares@gmail.com

⁽²⁾ Instituto de Meteorología (Insmet), Loma de Casablanca, Regla, Apdo. 17032, Cuba.
yanmichel.morfa@insmet.cu

Resumen

Fueron calculados y analizados el transporte de volumen y calor a través de una sección vertical del Canal de Yucatán usando los datos de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) obtenidos durante la campaña oceanográfica Canek 34 que se desarrolló desde julio del 2013 hasta junio del 2014. Los registros de datos utilizados en esta investigación fueron filtrados usando el algoritmo de Lanczos de paso bajo con una frecuencia de corte de 40 hr^{-1} para eliminar las oscilaciones inerciales, de marea y otras de alta frecuencia. Debido a que las fluctuaciones de baja frecuencia predominan en toda la sección, los datos fueron sub-muestreadas a intervalos de 12 horas. Los estimados del transporte se realizaron mediante la interpolación de los datos dispersos de la componente normal del flujo y la temperatura hacia una rejilla regular bidimensional empleando un esquema de interpolación óptima. Se encontró que, la estructura de la velocidad media de la corriente genera variaciones significativas del valor del transporte a través del canal. Los valores medios del transporte para el Canek 34 fue de $22.48 \text{ Sv}(10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ y $1.62 \text{ PW}(10^{15} \text{ W})$. La distribución de la temperatura media a través del canal presenta fuertes gradientes asociados a la contracorriente cubana, razón principal de la baroclinicidad de la zona.

Palabras claves: transporte de volumen, flujo de calor, corrientes marinas

Abstract

The volume and heat transports were calculated and analyzed through a vertical section of the Yucatan Channel using the data from Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) survey during the oceanographic Canek program from July 2013 to June 2014 (Canek 34). The data records were low-pass filtered using Lanczos algorithm with a cut-off frequency of 40 h^{-1} to remove inertial and tidal oscillations. Since low-frequency fluctuations predominate across the section, the data was sub-sampled at 12-hour intervals. Transport estimates were carried out interpolating the scattered data of both, the component of the velocity normal to the section and temperature onto a structured two-dimensional grid using an optimal interpolation scheme. It was found that, the structure of the average velocity of the current generates significant variations in the value of transport through the channel. Transport mean values for Canek 34 were $22.48 \text{ Sv}(10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ and $1.62 \text{ PW}(10^{15} \text{ W})$. The distribution of the mean temperature through the channel presents strong gradients associated with the Cuban Counter-Current, which is responsible for the baroclinicity in the area.

Key words: Transport of volume, heat fluxes, sea currents.

Introducción

El estrecho de Yucatán es la única conexión entre el Golfo de México y el Mar Caribe, tiene aproximadamente 210 km de ancho, una profundidad media de 1500 m y un umbral que supera escasamente los 2000 m (Merino, 1997). En su extremo oriental, frente al cabo de San Antonio, la pendiente del fondo es abrupta y sobrepasa los 1000 m de profundidad a unos pocos kilómetros de la costa. En su extremo occidental, frente a cabo Catoche, sobre la península yucateca, la pendiente del fondo es suave y cae sobre una plataforma continental bastante amplia, ubicada al noroeste del estrecho.

Pillsbury (1890) fue uno de los primeros en obtener mediciones directas en el Canal de Yucatán, refiriendo corrientes fuertes (170 cm/s a la profundidad de 6.3 m) fluyendo hacia el Norte en el lado occidental del canal, mientras que encontró flujos hacia Sur al Este de la zona. El flujo hacia el Norte en el lado occidental es conocido como la corriente de Yucatán y los flujos dirigidos hacia el Sur en el lado oriental se nombraron como contracorriente cubana (Rossov, 1971; Emilsson 1971; Sukhovei et al., 1980; Gallegos y Czitrom, 1996; Ochoa et al. 2001). La temperatura en el canal de Yucatán revela un estrato homogéneo desde la superficie hasta aproximadamente los 80 m de profundidad (capa mezclada), con temperaturas entre 26.5 y 28.5 °C. Las aguas superficiales con temperatura fuera de estos rangos se encuentran sobre la plataforma continental de Yucatán (Gallegos et al., 1991).

Numerosas investigaciones se han desarrollado sobre el cálculo del transporte de volumen y calor en canales y estrechos dentro de ellas figuran: El transporte estimado por Schmitz y Richardson, (1968) fue de 30 Sv y por Sukhovei *et al.*, (1980) de 43 Sv, luego Gallegos *et al.*, (1998 a y b), estimaron el flujo neto por encima de los 1000 m con dirección al golfo de México, en un volumen de 21 Sv, en noviembre de 1989 y de 29 Sv en abril de 1991. Sheinbaum J., Candela J., Badan A., y Ochoa J. en el 2002 los que estudiaron la estructura y transporte del flujo en el Canal de Yucatán obteniendo que el valor neto del mismo era de 23.8 ± 1 Sv. Ochoa *et al.*, (2003), al analizar seis perfiles de ADCP/CTD correspondientes a las primaveras de 1997 y 1998 y en el invierno de 1998 y 1999 encontraron que: los transportes oscilaban de 20 a 31 Sv con un promedio neto de 22.5 ± 1 Sv, consistiendo de 33 Sv hacia el golfo de México y 8 Sv de salida al mar Caribe. En 2004, Ochoa y Arriaza concluyen que los períodos de mediciones en el canal de Yucatán son consistentes en la obtención de valores inferiores a los 28 Sv (22.0 a 23.6 Sv), con un nivel de confianza del 90 %. . Pérez Santos y Shneider (2010) exponen una recopilación de los resultados del transporte de volumen por Yucatán, obtenido de mediciones in situ y modelación, con un valor mínimo de 20.3 ± 1.2 Sv (Jouanno *et al.*, 2008) y un máximo de 32 Sv (Morey *et al.*, 2003); ambos estimados a partir de modelación numérica. Chang y Oey (2010) calcularon el transporte de calor en el Golfo de México considerando el forzamiento de viento.

El objetivo del trabajo es el cálculo del transporte de volumen y calor en el Canal de Yucatán, para ello se emplearon los datos de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) y CTD (Conductivity Temperature Depth) medidos in-situ. Posteriormente se realiza un análisis de la estructura de las corrientes y la temperatura a lo largo del canal, concluyendo con el cálculo y análisis del transporte de volumen y calor.

Materiales y Métodos

Los datos utilizados en el cálculo del transporte de volumen y calor fueron obtenidos dentro del marco del proyecto de colaboración CANEK: “Estudio de la circulación y el intercambio a través del Canal de Yucatán”, entre el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) de México y el Instituto de Ciencias del Mar.

La estimación óptima de campos escalares en ambientes costeros y oceánicos es fundamental dentro de los estudios oceanográficos. La reconstrucción de los datos es un proceso que forma parte del anterior, por lo que es necesario implementar técnicas de interpolación que minimicen el error y sean un fiel reflejo de la variable medida. Por lo general, las variables medidas presentan carencia de información espacial y, por otra parte, los campos obtenidos siempre están involucrados dentro de otros procesos, que evalúan otras variables y parámetros.

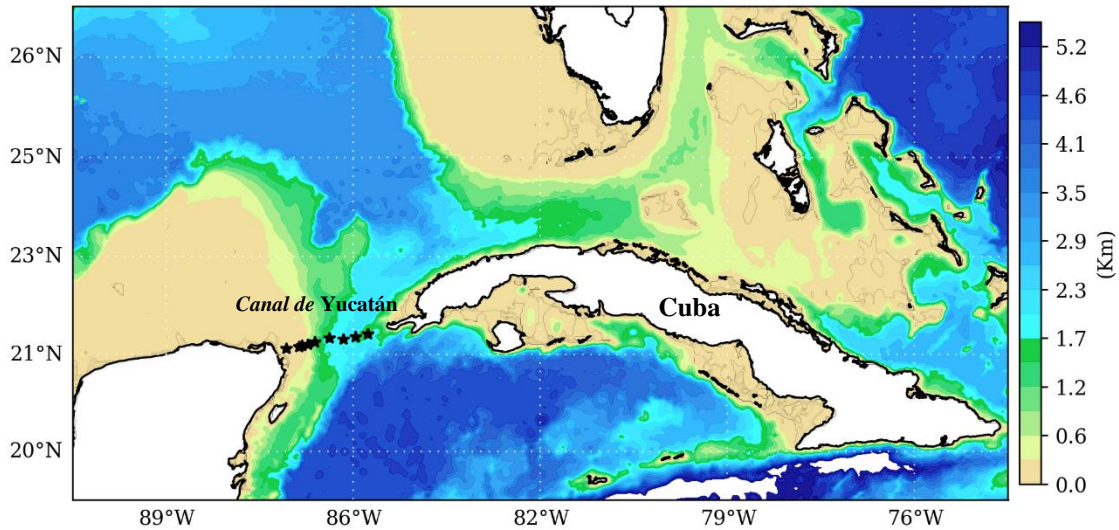


Fig. I Mapa del Golfo de México y el Mar Caribe, donde se indican la localización de los pasajes mencionados en el texto y la localización de los anclajes colocados durante el Programa Canek, en el Canal de Yucatán.

Para el análisis de los datos de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) y CTD (Conductivity Temperature Depth) medidos in-situ desde 1 de julio del 2013 hasta 30 de junio del 2014 se realizó un corte en la vertical, el cuál fue orientado de manera que se disminuyera la distancia entre las observaciones (Figura I) y los puntos de rejilla, lo cual minimiza los errores en la interpolación. Para el caso del Canal de Yucatán se construyó desde los 86.77° hasta 84.80° de longitud Oeste y los 21.50° hasta 21.85° de latitud Norte, y desde la superficie hasta la máxima profundidad.

Los registros de datos utilizados en esta investigación fueron filtrados con un paso bajo usando un filtro de Lanczos con una frecuencia de corte de 40 horas para eliminar las oscilaciones inerciales, de marea y otras de alta frecuencia (Walter y Heston, 1982; Thompson, 1983, Abascal et al, 2003), y sub-muestreadas a intervalos de 12 horas.

Se utilizó un método de mapeo objetivo, descrito en, Roemmich (1983), el cual consiste en una interpolación óptima a partir de datos dispersos hacia una rejilla bidimensional estructurada. Este método utiliza una escala grande para estimar el campo medio y otra pequeña para estimar la variabilidad, las cuales se basan en la distancia a la cual se encuentran correlacionados los datos, tanto en la vertical como en la horizontal. La malla generada para la interpolación es no uniforme en la dirección vertical siendo más densa respecto a la cantidad de niveles cerca de la superficie con una resolución promedio 20 m, en la horizontal se utilizó aproximadamente 0.02 grados de longitud. Las escalas grandes utilizadas fueron de 150 km en la horizontal significativa y 1.5 km en la vertical, en el caso para las escalas pequeñas fueron de 90 km en la horizontal significativa, 400 m en la vertical y el valor mínimo esperado del dato in-situ es de 0.1 m/s, de acuerdo con las escalas de correlación estimadas a partir de los mismos datos.

En la práctica, es deseable eliminar cualquier señal determinista bien resuelta (de espacio largo / tiempo) de los datos en primer lugar para que la interpolación se aplique a un conjunto de datos con una varianza reducida. (Por ejemplo, un ciclo estacional o variabilidad espacial de longitud de onda muy larga).

Se calcularon y analizaron los valores del transporte de volumen y calor para las secciones transversales realizados durante la campaña Canek 34 utilizando las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$T_v = \iint_{00}^{xH} Vn dz dx \quad (1)$$

donde

Vn es la velocidad al transepto para el cual se realizó el cálculo

H es la profundidad

dx , dz son los pasos de rejilla en las direcciones horizontal y vertical respectivamente.

$$T_c = \rho Cp \iint_{00}^{xH} (Vn * T) dz dx \quad (2)$$

ρ es la densidad tomada como el valor promedio que se utiliza para aguas oceánicas: 1028 kg/m^3 ,

Cp es valor promedio del calor específico,

T es la temperatura.

Resultados

La estructura de las corrientes a través del Canal de Yucatán (Figura IIa) se compone de la Corriente de Yucatán que fluye hacia el Golfo de México en capas superiores de la parte oeste del canal, con valores que alcanzan los 1.0 m/s y la contracorriente de Yucatán meridional debajo de ella, la cual fluctúa en el tiempo alcanzando valores de hasta 0.15 m/s. En el lado cubano, los flujos hacia el sur (Contracorriente cubana) están presentes tanto en la superficie como en profundidad con valores cercanos a los 0.2 m/s. La desviación estándar de la velocidad a través de toda la sección vertical del canal es grande con respecto a su media, las mayores fluctuaciones ocurren desde los 400 m incrementándose hasta la superficie (Figura IIc). Las regiones con mayor desviación estándar coinciden con las zonas donde se encuentran la corriente de Yucatán y la contracorriente cubana alcanzándose valores de 0.5 y 0.2 m/s respectivamente.

La distribución de la temperatura media a través del canal muestra la baroclinicidad asociada con las corrientes predominantes (Ochoa et al., 2001). Los máximos de temperatura media a lo largo del canal se localizan del lado cubano con valores de hasta 24 °C (Figura IIb). Los cambios en la curvatura de las isotermas también pueden verse en profundidad debido a las contracorrientes de Yucatán y Cuba. Grandes gradientes verticales de temperatura se muestran a lo largo de la termoclina, ubicada alrededor de la isoterma de 20 °C, y sobre la ladera occidental; las desviaciones estándar de temperatura más grandes también se encuentran allí (Figura IId) y cerca de la superficie, con valores máximos que oscilan 1.4 y 1.8 °C.

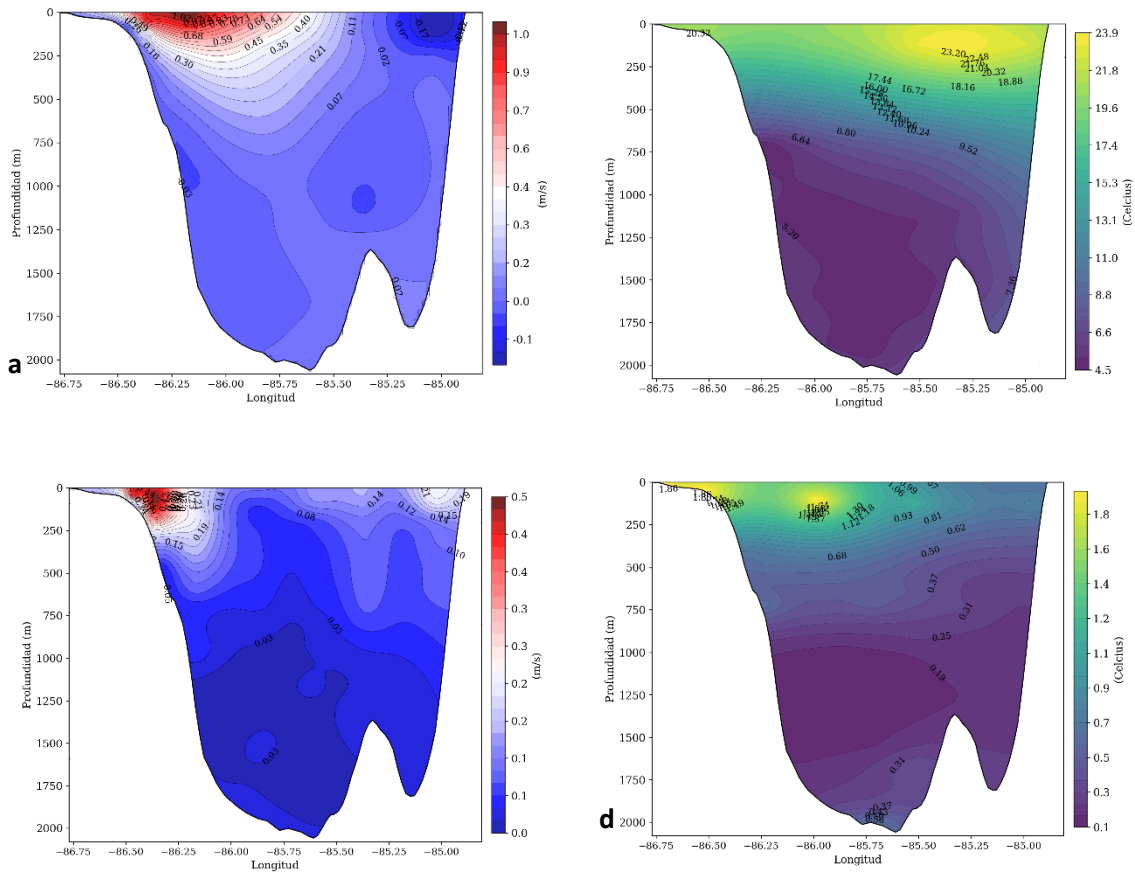


Fig. II Estructura de la corriente y temperatura media a través del Canal de Yucatán y su desviación estándar con respecto a su media. (a) Corriente media a través del Canal de Yucatán, (b) Temperatura media a través del Canal de Yucatán, (c) Desviación estándar de la corriente a través del canal con respecto a su media, (d) Desviación estándar de la temperatura a través del canal con respecto a su media.

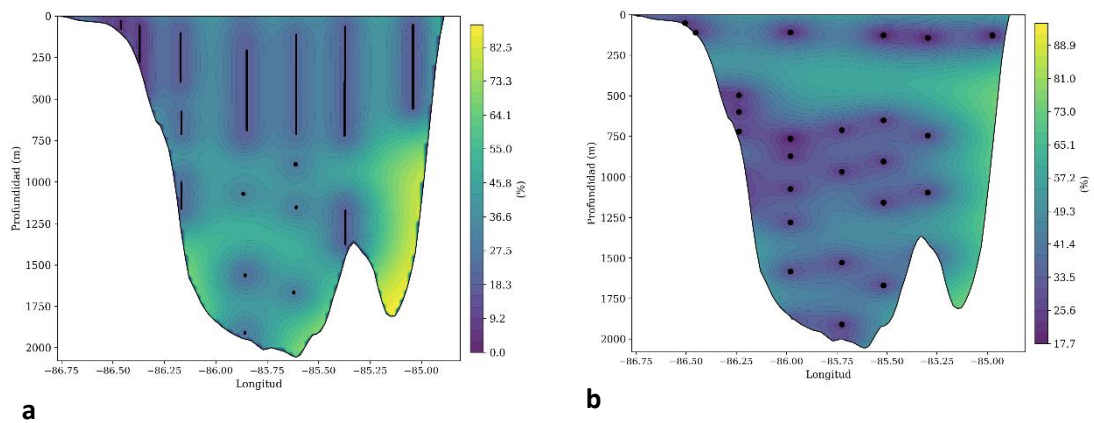


Fig. III Errores de interpolación para (a) velocidad y (b) temperatura. Los puntos representan la posición de los instrumentos. Los errores más grandes están localizados en las regiones vacías de datos, particularmente entre 800 y 1800 m de profundidad en la pendiente del lado cubano. El campo de temperatura muestra otra región de error relativamente alta entre 300 y 1800 en la pendiente del lado cubano.

La figura III muestra mapas de los errores de interpolación proporcionados por la interpolación óptima. Las cruces marcan la ubicación de los instrumentos. Tenga en cuenta que estos errores dependen únicamente de la posición de los instrumentos y de la estructura de error de señal y datos (matrices de covarianza), y no de los valores de datos reales. Los mayores errores se encuentran en regiones donde los datos son escasos, particularmente entre 800 y 1800 m de profundidad en la pendiente del lado cubano. El campo de temperatura muestra otra región de error relativamente alta entre 300 y 1800 en la pendiente del lado cubano y entre los 250 y 450 metros de profundidad para todo el canal (Figura IIIb). Estos mapas dan al lector una indicación de dónde los análisis que siguen pueden ser más confiables.

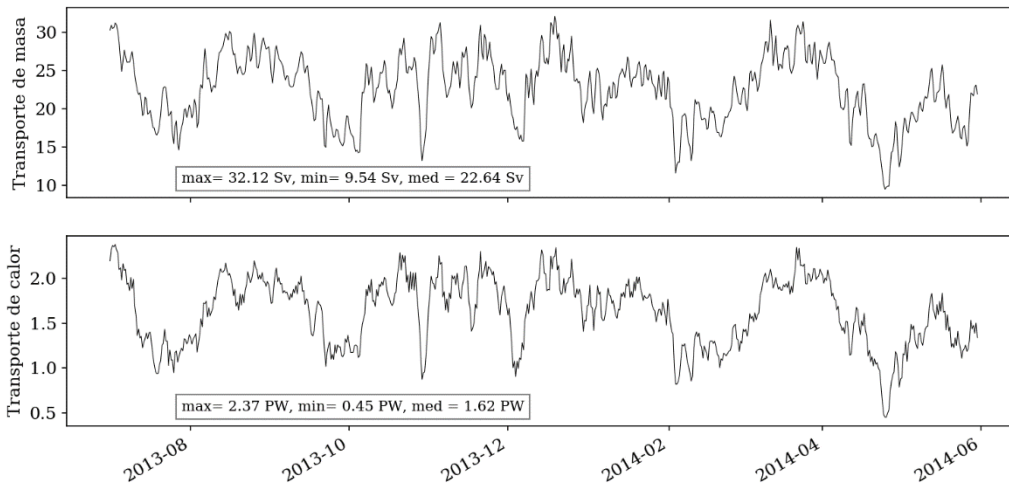


Fig. IV Serie temporal de transporte de volumen y calor a través del Canal de Yucatán, a partir de observaciones de corriente y temperatura objetivamente mapeadas.

El transporte de volumen y calor en el Canal de Yucatán durante la campaña oceanográfica Canek 34 presentó grandes fluctuaciones temporales, obteniéndose una media 22.51 Sv y 1.62 PW respectivamente (Figura IV). Lo cual representa para el transporte de volumen de 4-6 Sv menos que los 28 Sv aceptados oficialmente por [Gordon, 1967; Roemmich, 1981]. Los volúmenes totales y con dirección al golfo de México aquí calculados se ajustan en gran medida con los calculados por otros autores. Sin embargo, los volúmenes totales calculados solo varían de 1-2 Sv con respecto a los obtenidos por Sheinbaum et. al., (2002) de 23.8 ± 1 Sv y por Ochoa et al., (2003), entre 22 Sv y 23.6 Sv con un 90 % de confianza. Para el caso del transporte de calor el valor obtenido de su media varía aproximadamente en un PW con los 2.04 y 1.96 PW obtenidos por Chang y Oey en 2010. Los máximos y mínimos del transporte de volumen y calor coinciden temporalmente, obteniéndose valores de 32.12 Sv y 2.37 PW ;y 9.54 Sv, 0.45 PW respectivamente.

Conclusiones

- La Corriente de Yucatán fluye hacia el Golfo de México en capas superiores de la parte oeste del canal, con valores que alcanzan los 1.0 m/s.
- En el lado cubano del Canal de Yucatán, los flujos hacia el sur (Contracorriente cubana) están presentes tanto en la superficie como en profundidad con valores cercanos a los 0.2 m/s.
- Los máximos de temperatura media a lo largo del canal se localizan del lado cubano con valores de hasta 24 °C. Los cambios en la curvatura de las isotermas también pueden verse en profundidad debido a las contracorrientes de Yucatán y Cuba.

- El transporte de volumen en el Canal de Yucatán durante la campaña oceanográfica presentó una media de 22.51 Sv.
- El transporte de calor en el Canal de Yucatán durante la campaña oceanográfica presentó una media de 1.62 PW.

Agradecimientos

Agradecemos a la tripulación del B / O Justo Sierra y a nuestro personal técnico por su participación en el programa Canek, a todo el personal del Departamento de Procesos Físicos del Instituto de Ciencias del Mar, que participó en el procesamiento de las series de datos medidas in situ del programa Canek.

Bibliografía

1. **Abascal, A. J., (2001).** Variabilidad del flujo en el Canal de Yucatán. M. Sc., tesis, CICESE.
2. **Abascal, A. J., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J. y Badan, A. (2003).** Analysis of flow variability in the Yucatan Channel. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, n°. C12, 3381.
3. **Arriaza, L., Rodas, L., Ramírez, O., Hernández, M., Simanca, J. (2004).** Caracterización histórica del transporte en los pasos principales de las aguas oceánicas adyacentes a Cuba. Informe de resultado del proyecto “Los procesos oceanográficos y su relación con especies marinas de interés comercial. Importancia regional y trascendencia extraregional - fase piloto”. Informe Final de Proyecto del IDO (CITMA, La Habana), 158 pp.
4. **Athié, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A., Ochoa, J. (2011).** Estructura de la corriente de Yucatán en los canales de Cozumel y Yucatán. *Ciencias Marinas*, Vol 37(4A), pp 471–492.
5. **Burkov, V. A., Galerkin, L. I. & Zubin, A. B. (1982).** New data on water exchange through the Yucatan Strait. *Dokl. Akad. Nauk. URSS*, 265 (1), 190-195.
6. **Bunge, L., Ochoa, J., Badan, A., Candela, J., Sheinbaum J. (2002).** Deep flows in the Yucatan Channel and their relation to changes in the Loop Current extension. *Geophysical Research Letters*, Vol. 107, n°. C12, 3233.
7. **Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan A. (2002).** The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, n° 22, 2059.
8. **Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan A. (2002).** Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, n° 3, 1040.
9. **Chang, Y y Oey, L. (2010).** Eddy and Wind-Forced Heat Transports in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 40, pp 2728-2742.
10. **Dong, S. K, Preller, R. H., Martin, P. J. (2002).** An experimental real-time sea ocean nowcast/forecast system for coastal prediction. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi.
11. **Gallegos, A., Victoria, I., Zavala, J., Fernández, M., Penié, I. (1998 a).** Hidrología en los estrechos del Mar Caribe Occidental. *Revista de Investigaciones Marinas (UNAM-UH)*, Vol. 19, No. 1, 1-37.
12. **Gallegos, A., Victoria, I., Zavala, J., Fernández, M., Barberán, J., Penié, I., Fernández, A., Marmolejo, C. (1998 b).** 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.
13. **Hamilton, P., Larsen, J. C., Leaman, K., Lee, T., Waddell, E., (2004).** Transports through the Straits of Florida. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 35.

14. **Ionita, D. A., Di Lorenzo, E., Lynch, J. (2009).** Effect of lower sea level on geostrophic transport through the Florida Straits during the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, Vol. 24, PA4210.
15. **Lo, W., Dahms, H. y Hwang, J. (2014).** Water mass transport through the northern Bashi Channel in the northeastern South China Sea affects copepod assemblages of the Luzon Strait. *Zoological Studies*, 53:66.
16. **Maul, A. G. y Baig, S. R. (1983).** A three year continuous current meter record from the sill of Yucatan Strait. *Abstract, EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, 64 (18): 233.
17. **Merino, M. (1997).** Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems*, 13, 101-121. DOI: 10.1016/S0924-7963(96)00123-6.
18. **Ochoa, J., Badan, A., Sheinbaum, J. y Candela, J. (2003).** CANEK: Measuring Transport in the Yucatan Channel. Departamento de Oceanografía Física, CICESE Ensenada, Baja California, México.
19. **Ochoa, J. & Arriaza, L. (2004).** Observación de estadísticas no gaussianas en corrientes próximas a Cabo San Antonio, Cuba. *Rev. Invest. Pesq. No.1*. ISSN- CUB 0138-8456.
20. **Oey, L., Ezer, T. y Lee, H. (2005).** Loop Current, Rings and Related Circulation in the Gulf of Mexico: A Review of Numerical Models and Future Challenges, *Geophysical Monograph Series* 161, 31-56.
21. **Peréz-Santos, I., y Schneider, W. (2010).** Oceanografía de la Cuenca de Yucatán, Mar Caribe: Implicaciones dinámicas, observaciones y modelos numéricos. Editorial Academia Española, ISBN: 978-3-8454-9263-6, 148 pp.
22. **Rodas, L., Arriaza, L., Simanca, J. y Montesino, D. (2013).** Transporte de volumen en el Canal de Yucatán, calculado usando datos de sondeos de ADCP. Serie Oceanológica, n° 13.
23. **Roemmich, D. (1983).** Optimal Estimation of Hydrographic Station Data and Derive Fields. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 13, pp 1544-1549.
24. **Rousset, C. y Beal, L. M. (2010).** Observations of the Florida and Yucatan Currents from a Caribbean Cruise Ship .Division of Meteorology and Physical Oceanography, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, Miami, Florida.
25. **Schlitz, R. J. (1973).** Net total transport and net transport by water mass categories for Yucatan Channel, based on data for April 1970, Ph.D. dissertation, 106 pp., Texas A&M Univ., College Station, Tex.
26. **Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A. y Ochoa, J. (2002).** Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 3. 1040, doi: 10.1029/2001GL013990, 2002.
27. **Schmitz, W. J. Jr. y Richardson, W. S. (1968).** On the transport of the Florida Current. *Deep-Sea Res.*, 15, 679–693.
28. **Smith R. (2008).** Mass Transport and Internal Flow Patterns at Windward Passage.
29. **Sukhovei, V. F., Korotaev, G. K. y Shapiro, H. B. (1980).** Hidrología del mar Caribe y el Golfo de México. *Editorial Hidrometeoizdat, Leningrado. URSS*. 39 – 110 pp.
30. **Tomzack, M. y Stuart, G. J. (2001).** Regional Oceanography: An introduction. *pdf version 1.0 (December 2001)* matthias.tomczak@flinders.edu.au
31. **Vranes, K., Gordon, A. y Ffield, A. (2002).** The heat transport of the Indonesian Throughflow and implications for the Ocean budget. *Deep-sea Research*, Vol. II, No. 49. 1391-1410 pp.