



## Transporte de volumen en el Canal de Yucatán, calculado usando datos de sondeos de ADCP

### *Volume transport in the Yucatan Channel, calculated using ADCP survey data*

Libertad Rodas Fernández\*, Liliam Arriaza Oliveros\*, Jacqueline Simanca Cárdenas\* y  
Damián Montesino de Sologuren\*

\*Instituto de Oceanología. Ave 1ra No. 18406 e/ 184 y 186, Rpto. Flores, Playa, La Habana, Cuba.  
e-mail: [libertad@oceano.inf.cu](mailto:libertad@oceano.inf.cu)

### AGRADECIMIENTOS

A la tripulación del Buque Oceanográfico “Justo Sierra”, por su apoyo en el trabajo durante las campañas oceanográficas Canek, a la posibilidad de colaboración científica con los investigadores y técnicos del Departamento de Oceanografía Física del CICESE; muy especialmente nuestra sincera gratitud por su apoyo y enseñanza al Dr. José Luis Ochoa de la Torre.

### RESUMEN

Los cálculos del transporte de volumen empleando datos de sondeos de ADCP obtenidos durante las campañas oceanográficas Canek 4 (septiembre/1999), Canek 5 (junio-julio/2000) y Canek 6 (junio/2001) corroboraron las grandes fluctuaciones del parámetro en el estrecho de Yucatán. La contracorriente cubana se manifestó dentro del transporte de este estrecho fundamentalmente en el estrato 0-200 m. El mayor volumen de los períodos analizados se transportó en dirección al golfo de México durante Canek 6 (junio/2001), mientras que el mayor transporte hacia al mar Caribe ocurrió durante la campaña Canek 5 (20 de junio al 6 de julio de 2000) y representó del 16 al 36 % del agua que se movía por el canal, con un promedio de  $10.75 \pm 5.5$  Sv.

### ABSTRACT

Volume transport calculations using ADCP survey data from oceanographic cruises Canek 4 (September/1999), Canek 5 (June-July/2000) and Canek 6 (June/2001) corroborated the high fluctuations of this parameter in Yucatan Channel. The presence of Cuban countercurrent, mainly in the 0-200 m layer, was identified in this transport. The greatest volume of the analyzed periods was transported in the direction of the Gulf of Mexico, during Canek 6 (June/2001). While the greatest transport towards the Caribbean Sea occurred during Canek 5 (June 20 to July 6/2000), and represented from 16 to 36 % of water moving through the strait, with a mean value of  $10.75 \pm 5.5$  Sv.

**Palabras clave:** transporte, volumen, canal, Yucatán, Canek.

**Keywords:** transport, volume, channel, Yucatan, Canek.

### INTRODUCCIÓN

El canal 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 1 500 m y un umbral que supera escasamente los 2 000 m (Merino, 1997). Se conoce que este estrecho el agua se mueve fundamentalmente en dirección N y que existen flujos profundos a ambos lados, que se dirigen hacia el S (Rossov, 1971; Sukhovei *et al.*, 1980, Maul y Baig, 1983; Bunge *et al.*, 2002; Abascal *et al.*, 2003).

Varios autores han calculado el transporte de volumen por este estrecho utilizando mediciones directas y modelación numérica. 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 Sverdrup (Sv;  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en noviembre de 1989 y de 29 Sv en abril de 1991. Por su parte, 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  $22.5 \pm 1$  Sv, consistiendo de 33 Sv hacia el golfo de México y 8 Sv de salida al mar Caribe. Sheinbaum *et al.*, (2002) establecieron el transporte medio a través del canal de Yucatán en  $23,8 \pm 1$  Sv, calculado a partir de mediciones continuas de ADCP y correntómetros durante un período de 10 meses. 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 %. Los resultados de Dong *et al.*, (2002) son de corrientes estimadas con un modelo numérico ejecutado por un año, donde obtuvieron que el transporte medio en el canal de Yucatán es de 26 Sv. Oey *et al.*, (2005) destacaron la presencia de transporte en dirección sur por todo el borde este del canal de Yucatán. 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  $20.3 \pm 1.2$  Sv (Jouanno *et al.*, 2008) y un máximo de 32 Sv (Morey *et al.*, 2003); ambos estimados a partir de modelación numérica. En ese trabajo también se analizaron los volúmenes con dirección al Caribe y su desviación estándar.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos utilizados en el cálculo del transporte de volumen 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 Oceanología de Cuba. Durante los veranos de 1999, 2000 y 2001 se realizaron once transectos transversales al canal de Yucatán, con más de veinte calas o sondeos oceanográficos de ADCP y CTD en cada transecto (Tabla 1, Figura. 1). El campo de velocidades y direcciones de las corrientes marinas se obtuvo cada 1 m en la vertical, comenzando en los 2 ó 5 m hasta cerca del fondo y en la horizontal a una distancia de entre 7 y 13 km, con el barco a la deriva. Se utilizó un ADCP marca “Workhorse” (perfilador de corrientes por efecto Doppler), de la compañía Teledyne RD Instruments de Estados Unidos de América.

Tabla 1. Períodos de mediciones de los transectos transversales durante cada crucero Canek.

*Table 1. Measurement periods of transversal transects during each Canek cruise.*

Crucero	Período de medición
Canek 4	1 <sup>o</sup> – 11/Septiembre/1999
Canek 5	20/Junio – 6/Julio/2000
Canek 6	31/Mayo – 4/Junio/2001

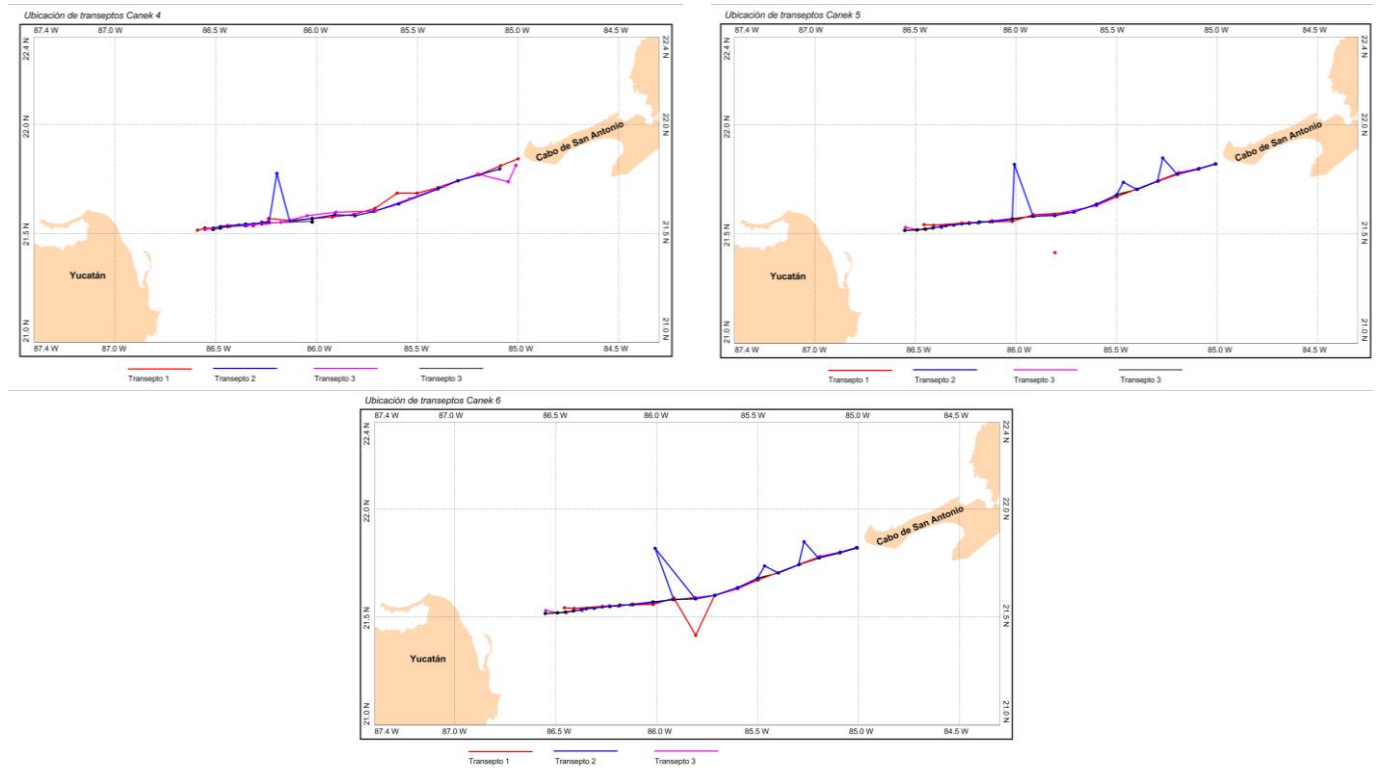


Figura 1. Ubicación de los transectos oceanográficos durante las campañas Canek 4 (septiembre 1999), Canek 5 (junio-julio 2000) y Canek 6 (junio 2001).

Figure 1. Location of oceanographic transects during the cruises Canek 4 (September 1999), Canek 5 (June-July 2000) and Canek 6 (June 2001).

En el presente trabajo se calcularon y analizaron los valores del transporte de volumen para los transectos transversales realizados durante las campañas Canek 4, Canek 5 y Canek 6, utilizando la ecuación (Tomzack y Stuart, 2001).

$$Tv = \int_0^x \int_0^H Vndzdx \quad (1)$$

donde:

$Vn$ - es la velocidad normal al transecto para el cual se realizó el cálculo (como una matriz del número de niveles por el número de estaciones),

$H$ - es la profundidad,

$dx$ - es un vector cuyas componentes fueron las distancias entre estaciones,

y  $dz=10$  metros.

El objetivo de este trabajo fue mostrar las fluctuaciones del transporte de volumen a través del canal de Yucatán en una escala temporal de algunas horas, empleando datos que tienen una cobertura horizontal y vertical mucho mayor que la de los anclajes. También se destacó el valor de los volúmenes transportados en dirección al mar Caribe, que en los niveles superficiales del lado cubano del estrecho coincidieron con la manifestación de la contracorriente cubana.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El transporte de volumen durante los periodos analizados presentó grandes fluctuaciones temporales (Tabla 2). El mayor valor (56 Sv) se manifestó en un tiempo de 34 hrs durante el transecto 2 de Canek 6 (2-3 de junio/2001), mientras el mínimo (33 Sv) ocurrió durante el transecto 3 de Canek 4 (9-10/septiembre/1999) en un tiempo de 35 hrs. Los volúmenes totales y con dirección al golfo de México aquí calculados superaron reportados por otros autores. Esta diferencia está dada en unas ocasiones porque con anterioridad el transporte se calculó solamente hasta 1000 m de profundidad (Schmitz y Richardson, 1968, Sukhovei *et al.*, 1980 y Gallegos *et al.*, 1998 a y b) y en otras, por la frecuencia de nuestras mediciones en la vertical y en la horizontal; que tuvieron una discreticidad más alta; así como por el limitado largo de las series usadas (algunas horas).

Los volúmenes totales calculados resultan superiores al volumen medio reportado para el canal de Yucatán por Sheinbaum *et al.*, (2002) de  $23.8 \pm 1$  Sv y por Ochoa *et al.*, (2003), entre 22 y 23.6 Sv con un 90 % de confianza, debido a que estos autores aplican filtros de baja frecuencia para atrapar los movimientos subinerciales.

El mayor volumen promedio total fue de 49.7 Sv y las mayores fluctuaciones de volumen ( $\sigma=7.09$ ) ocurrieron durante Canek 6, sin embargo el transporte en dirección al Caribe fue de solo 3.7 Sv. Las mayores fluctuaciones del volumen en esta dirección ocurrieron durante la campaña Canek 5, con un valor promedio de  $10.75 \pm 5.5$  Sv. Aquí se reportó el valor máximo del transporte de todos los transectos (19 Sv), ocurrido durante 38 horas del transecto 3 de Canek 5.

Tabla 2. Transporte de volumen a través del canal de Yucatán (veranos de 1999 a 2002).

Table 2. Volume transport through Yucatan Channel (summers from 1999 to 2002).

Campañas y Transectos	Volumen total (Sv)	Transporte hacia el Caribe (Sv)	% hacia el Caribe	Transporte hacia el Golfo (Sv)	% hacia el Golfo	Duración en horas respecto al Volumen total (Sv)	Fecha
Canek 4 Transecto 1	35	3	9	32	91	68	1-4/9/1999
Canek 4 Transecto 2	48	5	11	43	89	39	7-9/9/1999
Canek 4 Transecto 3	33	4	12	29	88	35	9-10/9/1999
Canek 4 Transecto 4	42	3	7	39	93	26	10-11/9/1999
Promedio	39.5	3.75	9.75	35.75	87.75		
$\sigma$ (desv. standar)	6.86	0.96		6.40			
Canek 5 Transecto 1	43	7	16	36	84	35	20-21/6/2000
Canek 5 Transecto 2	43	8	19	35	81	49	21-23/6/2000
Canek 5 Transecto 3	53	19	36	34	64	38	26-28/6/2000
Canek 5 Transecto 4	42	9	22	33	78	47	4-6/7/2000
Promedio	45.25	10.75	23.25	34.50	76.75		
$\sigma$ (desv. standar)	5.19	5.56		1.29			

Campañas y Transectos	Volumen total (Sv)	Transporte hacia el Caribe (Sv)	% hacia el Caribe	Transporte hacia el Golfo (Sv)	% hacia el Golfo	Duración en horas respecto al Volumen total (Sv)	Fecha
Canek 6 Transecto 1	42	3	7	39	93	29	31/5 al 2/6/2001
Canek 6 Transecto 2	56	3	5	53	95	34	2-3/6/2001
Canek 6 Transecto 3	51	5	10	46	90	34	3-4/6/2001
Promedio	49.67	3.67	7.33	46	92.67		
$\sigma$ (desv. standar)	7.09	1.15		7.0			

Durante estos transectos siempre hubo transporte con dirección al mar Caribe, las mayores fluctuaciones en este sentido se reportaron durante la campaña Canek 5 (26-28/junio/2000) y del lado cubano del estrecho se manifestó entre la superficie y los 250 m y luego con marcada influencia entre 800 y 1100 m aproximadamente. Por el contrario, durante junio 2001 (Canek 6) el movimiento en este sentido fue solo de  $3.67 \pm 1.15$  Sv (Tabla 2).

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran los valores promedio del transporte de volumen en cada campaña. Se observa que los mayores volúmenes se transportaron fundamentalmente entre la superficie y los 250 m sobre la plataforma de Yucatán y hacia el lado mejicano del canal durante Canek 4 y Canek 5, coincidiendo con la posición conocida del eje de la corriente principal (Sukhovoi *et al.*, 1980, Burkov, 1982 y Maul y Baig, 1983; Sheinbaum *et al.*, 2002). Mientras que durante Canek 6 los volúmenes significativos abarcaron una mayor área del canal pero en los mismos niveles (Figura 3).

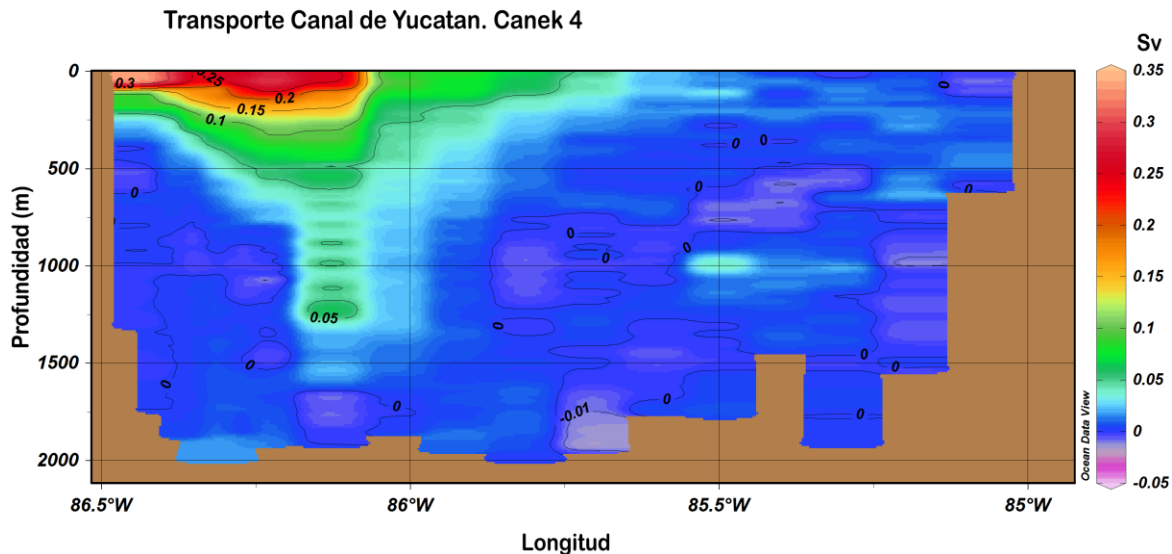


Figura 2. Perfil transversal del transporte promedio de volumen en el canal de Yucatán, durante la campaña Canek 4 (septiembre de 1999).

Figure 2. Transversal profile of mean volume transport at Yucatan Channel, during Canek 4 (September 1999).

Transporte Canal de Yucatan. Canek 5

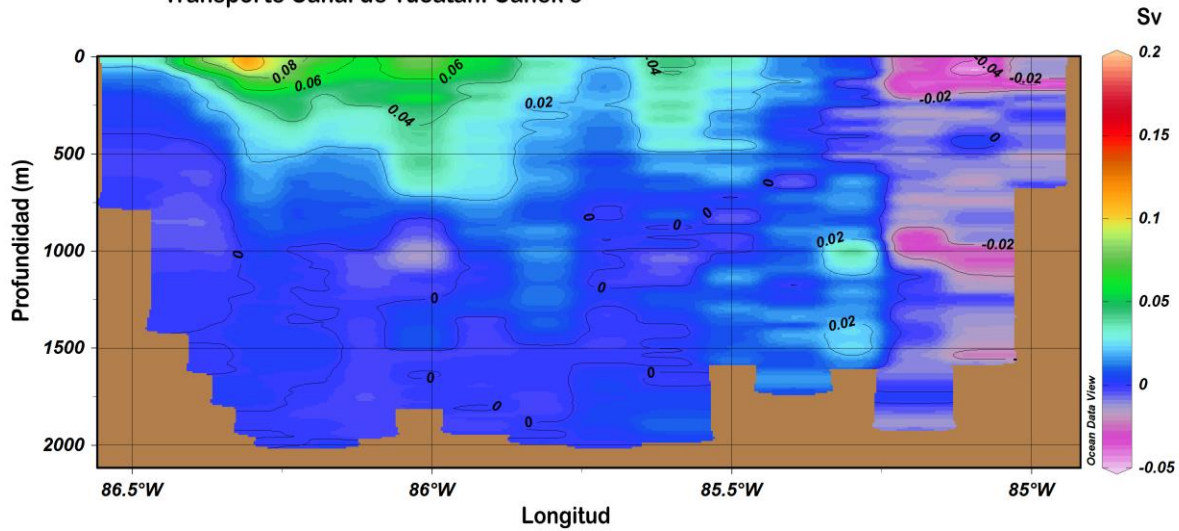


Figura 3. Perfil transversal del transporte promedio de volumen en el canal de Yucatán, durante la campaña Canek 5 (junio de 2000).

Figure 3. Transversal profile of mean volume transport at Yucatan Channel, during Canek 5 (June 2000).

Transporte Canal de Yucatan. Canek 6

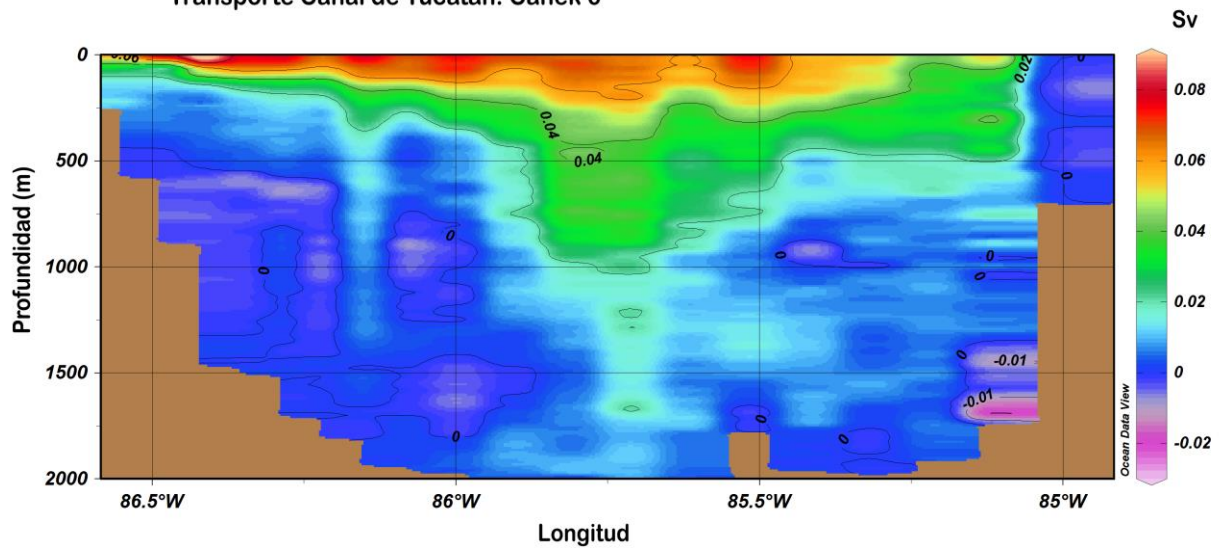


Figura 4. Perfil transversal del transporte promedio de volumen en el canal de Yucatán, durante la campaña Canek 6 (junio de 2001).

Figure 4. Transversal profile of mean volume transport at Yucatan Channel, during Canek 6 (June 2001).

Los transportes de volumen hacia el Caribe en los estratos superficiales del lado cubano del canal, son una evidencia clara de la presencia de la contracorriente cubana, que se manifestó en todos los transectos analizados fundamentalmente en el estrato 0- 200 m.



## CONCLUSIONES

1. El mayor transporte de volumen hacia el mar Caribe ocurrió durante la campaña Canek 5 entre el 26 y 28 junio de 2000 y fue de 19 Sv.
2. Los transportes de volumen hacia el Caribe, en el lado cubano del estrecho, son una evidencia clara de la presencia de la contracorriente cubana.
3. La contracorriente cubana se manifestó fundamentalmente en el estrato 0 – 200 metros.

## REFERENCIAS

- Abascal, A. J., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J. L. & Badan, A. R. F. (2003). Analysis of flow variability in the Yucatan Channel. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 108(C12): 3381 p. (PA: 9214).
- 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.*
- 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.
- 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. *Journal Geophys. Res.*, 107(C12), 3233, doi: 10.1029/2001JC001256.
- 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.
- 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.
- 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.
- Maul, A. G. & 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.
- 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
- Ochoa, J. L., Badan, A. R. F., Sheinbaum, J. & Candela, J. (2003). CANEK: Measuring transport in the Yucatan Channel. En: O.U. Velasco Fuentes, J. Sheinbaum y J. Ochoa, Editores, "Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics". *Kluwer Academic Publishers*. ISBN: 1-4020-1589-5. 275-286 p. (PA: 12339)
- 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.
- Oey, L., Ezer, T. & 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.

Pérez-Santos, I., & 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.

Rossov, V. V. (1971): El Sistema de Corrientes del Mediterráneo Americano. (Diciembre de 1966). Instituto de Oceanología. *Serie Oceanológica* No. 9.

Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A. & Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 3. 1040, doi:10.1029/2001GL013990, 2002.

Schmitz, W. J. Jr. & Richardson, W. S. (1968). On the transport of the Florida Current. *Deep-Sea Res.*, 15, 679–693.

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.

Sukhovoi, V. F., Korotaev, G. K. & Shapiro, H. B. (1980). Hidrología del mar Caribe y el Golfo de México. Editorial Hidrometeoizdat, Leningrado. URSS. 39 – 110 pp.

Tomczak, M. & Stuart, G. J. (2001). Regional Oceanography: An introduction. *pdf version 1.0* (December 2001) [matthias.tomczak@flinders.edu.au](mailto:matthias.tomczak@flinders.edu.au)

Recibido: enero de 2013.

Aceptado: diciembre de 2013.