

# Análisis de la variabilidad interanual del flujo a través del canal de Yucatán con datos de satélite

## Analysis of the year-on-year change of the flow through the Yucatan channel with satellite data

Cristhian Juárez-Águila,<sup>1</sup> Gabriela Athié,<sup>2,3</sup> Juan Matías Méndez-Pérez,<sup>3</sup> Julio Sheinbaum<sup>4</sup> y David Salas-Monreal<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Secretaría de Marina – Armada de México. E-mail: [cjuarezaguila@gmail.com](mailto:cjuarezaguila@gmail.com)

<sup>2</sup> Cátedra CONACYT – Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías (ICIMAP), Universidad Veracruzana, Veracruz, México. Calle Hidalgo No. 617, Col. Río Jamapa, CP 94290. Boca del Río, Veracruz, México. (+52) 229 9567070, ext. 116. E-mail: [gathie@uv.mx](mailto:gathie@uv.mx), autor de correspondencia

<sup>3</sup> Universidad Veracruzana, México. E-mail: [matias.mendezp@gmail.com](mailto:matias.mendezp@gmail.com), [davsalas@uv.mx](mailto:davsalas@uv.mx)

<sup>4</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, México. E-mail: [julios@cicese.mx](mailto:julios@cicese.mx)

### RESUMEN

Como parte del giro subtropical del Atlántico norte, la corriente de Yucatán es forzada de forma remota por el rotacional del esfuerzo del viento en el Atlántico norte. Sin embargo, estudios recientes sugieren que el ciclo estacional del flujo a través del canal de Yucatán (Tyuc) es parcialmente forzado por los vientos alisios en el Caribe. En el presente trabajo, se analizó la variabilidad interanual del Tyuc a partir de un proxy calculado con 23 años de datos de altimetría y se comparó con datos de viento de reanálisis y de presión media reducida al nivel del mar. Se observó una señal con un período de 4 años aproximadamente, la cual es aparentemente forzada por los vientos alisios en el Caribe y por el Sistema de Alta Presión Subtropical del Atlántico norte. Además, los resultados sugieren que las anomalías de presión originadas por el fenómeno de *El Niño* en el este del Pacífico tropical, son un regulador importante de los gradientes de presión entre la parte oeste del Atlántico y el este del Pacífico. Esto representa un factor importante para la intensidad del viento, teniendo a su vez, un impacto importante en la variabilidad interanual del Tyuc. Esta relación se observó durante el período de 1999-2000 cuando el Tyuc fue particularmente bajo, aparentemente como consecuencia de la relajación de los vientos alisios, lo que a su vez coincidió con un período de *La Niña* anómalamente largo (33 meses).

*Palabras clave:* corrientes marinas, canal de Yucatán, variabilidad interanual, índice oceánico de *El Niño*.

### ABSTRACT

As part of the subtropical gyre of the North Atlantic, the Yucatan Current is forced remotely by the rotational of wind power in the the north Atlantic Ocean. However, recent studies suggest that the seasonal cycle of the flow through Yucatan channel (Tyuc) is partially forced by trade winds of the Caribbean Sea. Here, the year-on-year change of Tyuc was analyzed from a proxy calculated using 23 years of altimetry data; these results were compared with the reanalysis wind data.as well as the sea level mean pressure data. A signal was observed with a period of ~4 years, which is apparently forced by the trade winds of the Caribbean Sea and by the North Atlantic Subtropical High Pressure System. In addition, the results suggest that pressure anomalies caused by *El Niño* phenomenon in the eastern tropical Pacific Ocean are an important regulator of pressure gradients between the western Atlantic Ocean and the eastern Pacific Ocean. This may modify wind intensity; therefore it has a significant impact on the year-on-year change of Tyuc. This relationship was observed during the 1999-2000 period when Tyuc was particularly low, apparently as a consequence of relaxing trade winds which in turn coincides with an anomalous long *La Niña* event (33 months).

*Keywords:* Marine currents, Yucatan Channel, interannual variability, oceanic *El Niño* index.

Recibido: 18/3/19

Revisado: 17/7/19

Aceptado: 9/8/19

## INTRODUCCIÓN

El canal de Yucatán es un punto estratégico, ya que con tan solo 200 km de ancho, representa el único punto de intercambio entre las cuencas del Caribe y del Golfo de México (GoM) y como parte del giro subtropical del Atlántico norte, es corresponsable del transporte de aguas cálidas tropicales hacia latitudes altas y en consecuencia, la distribución global del calor en el Atlántico. Como consecuencia del cambio climático, se ha reportado que podría estar ocurriendo un cambio significativo en el transporte de masa de este sistema de corrientes, modificando a su vez la circulación global (Bryden *et al.*, 2005). Por lo tanto, es importante conocer el comportamiento de la variabilidad interanual en el canal de Yucatán y su conexión con los procesos atmosféricos de teleconexión, ya que puede ser un indicador de los cambios en las corrientes a nivel global.

El flujo promedio a través del canal de Yucatán (Tyuc; también conocido como transporte) es de aproximadamente 25 Sv (Sheinbaum *et al.*, 2003; Athié *et al.*, 2015; Candela *et al.*, 2019), con una variabilidad interanual de alrededor de 5 Sv (Athié *et al.*, 2015). El Tyuc presenta una estacionalidad principalmente anual con una intensificación en verano, parcialmente asociada con la intensificación de los vientos alisios en el Caribe noroccidental (Chang & Oey, 2012; Athié *et al.*, 2014). Estos vientos son originados a su vez por el movimiento e intensidad de la alta subtropical del Atlántico norte (NASH, por sus siglas en inglés) que consiste en un sistema de alta presión semipermanente localizado alrededor de los 30° N (Pérez *et al.*, 2010). Este sistema de alta presión impulsa a los vientos alisios del noreste hacia el Ecuador, donde convergen debido al choque con los vientos alisios del sureste formando así la Zona de Convergencia Intertropical. La NASH presenta un máximo en julio con valores de presión promedio de 1 025 hPa y llega a extenderse hacia el oeste del Atlántico norte; en consecuencia, los vientos alisios al sur de este sistema se intensifican y la Zona de Convergencia Intertropical se mueve hacia el norte, generando un incremento en los vientos sobre el mar Caribe, donde forman una corriente de chorro atmosférica conocida como el Jet de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés). Durante octubre cuando la presión en el centro de la NASH disminuye por debajo de los 1 020 hPa, el sistema se retrae hacia el este del Atlántico norte y en consecuencia los vientos alisios, así como el CLLJ se debilitan (Wang, 2007).

El objetivo del presente trabajo fue establecer un precedente de la variabilidad interanual del flujo a través del sistema mar Caribe – GoM a partir del estu-

dio del Tyuc, así como el impacto que pueden tener los procesos meteorológicos de teleconexión como la NASH y eventos extremos de gran escala, como el fenómeno de *El Niño*, sobre esta corriente de frontera oeste.

## MATERIALES Y MÉTODOS

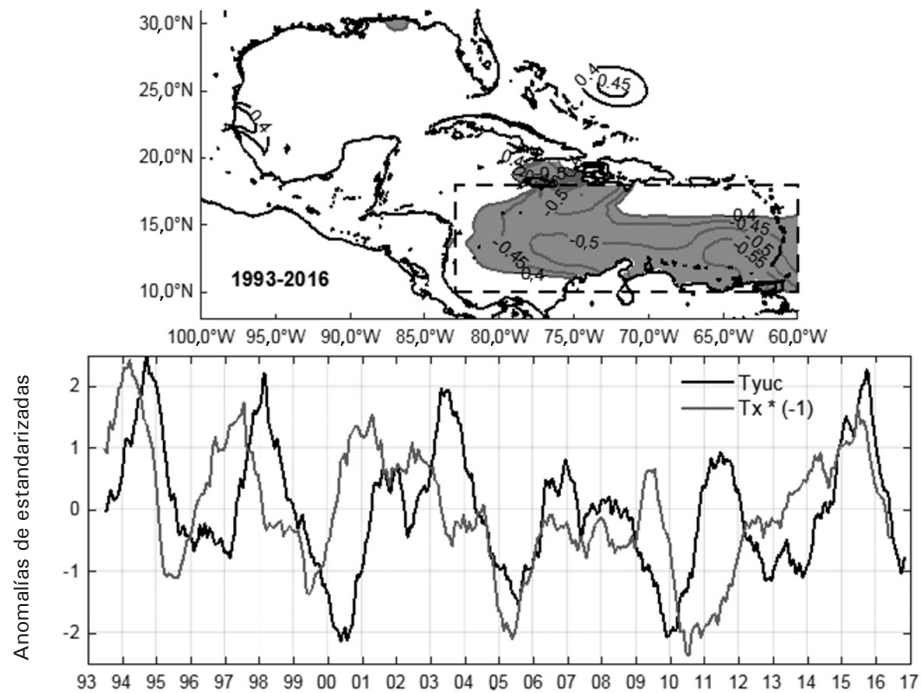
### *Descripción del área de estudio*

El área de estudio abarca toda la región occidental del Atlántico norte, entre los 100° W-25° W y los 10° N-50° N. Con respecto a la parte oceánica, se analizó el transporte de masa a través del canal de Yucatán (a una latitud de 20,5° N), el cual cuenta con 200 km de ancho y 2 040 m de profundidad; mientras que para la parte atmosférica se analizaron datos de viento en toda la región sur del mar Caribe y datos de presión atmosférica en el Atlántico norte, entre los 60° W-25° W y 20° N-50° N.

### *Descripción de los datos.*

La evolución temporal del flujo a través del canal de Yucatán, conocido como transporte (Tyuc), fue estimado a partir de datos de satélite del nivel del mar, mediante los productos diarios de Ssalto/Duacs – AVISO. El proxy se calculó usando la diferencia del nivel del mar entre un punto cercano a la península de Yucatán (86,875° W y 21,625° N) y a la isla de Cuba (84,625° W y 22,125° N). El método con el que fue calculado es descrito en detalle por Athié *et al.* (2015) y los datos fueron actualizados hasta diciembre de 2016. Athié *et al.* (2015) validan el proxy del Tyuc con datos de mediciones directas de velocidad y concluyen que este transporte representa de forma correcta un 60 % de la variabilidad con períodos superiores a 3 meses en el canal de Yucatán.

Se utilizaron datos diarios de viento de reanálisis ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) para calcular el esfuerzo del viento zonal (Tx; Berrisford *et al.*, 2011). Los datos fueron promediados dentro de la zona del CLLJ (12,5° N-17,5° N y los 80° W-70° W), indicada por el recuadro en la figura 1. Es importante tener en cuenta que el Tx representa principalmente a los vientos alisios con una dirección predominante del este, por lo que presentan valores negativos durante todo el año; de esta forma una intensificación del CLLJ está representada por anomalías negativas de Tx, mientras que un debilitamiento del CLLJ está representado por anomalías positivas del Tx.



**Fig. 1. Mapa de correlación entre el Tyuc y el Tx en el Caribe – GoM – Atlántico occidental (panel superior); solo están indicadas las correlaciones significativas al 95 % (valores negativos en gris y positivos en negro). Series de tiempo del Tyuc (negro) y el Tx (gris, multiplicado por (-1) para mayor claridad).**

Con el fin de determinar la intensidad y extensión de la NASH, se utilizaron datos mensuales de la presión media reducida al nivel del mar (SLP, por sus siglas en inglés), producto del Reanálisis II (Kanamitsu *et al.*, 2002) de la página del ESRL de la NOAA, con una resolución espacial de  $2,5^\circ$  en latitud y longitud. Finalmente se obtuvo la serie de tiempo del llamado Índice oceánico de *El Niño* (ONI, por sus siglas en inglés), el cual representa el estándar que la NOAA utiliza para identificar eventos cálidos ( $> 0,5^\circ\text{C}$ , *El Niño*) y fríos ( $< 0,5^\circ\text{C}$ , *La Niña*) en el océano Pacífico tropical. Este índice es calculado a partir de la media móvil de tres meses de las anomalías de temperatura superficial del mar para la región *El Niño* 3.4 (es decir, la franja comprendida entre  $5^\circ\text{N}$ - $5^\circ\text{S}$  y  $120^\circ\text{W}$ - $170^\circ\text{W}$ ).

Todas las series de datos utilizadas fueron obtenidas para un período comprendido entre enero de 1993 y diciembre de 2016, y promediadas con un filtro de caja con una ventana corrediza de un año, de esta forma las series obtenidas representan únicamente la variabilidad interanual de las variables estudiadas entre julio de 1993 y julio de 2016.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de correlación de la variabilidad interanual entre el Tyuc y el Tx (Fig. 1), muestra valores significativos de correlación negativa de hasta  $-0,55$  en la zona del CLLJ (nivel de significancia del 95 %). Esto significa que una intensificación en Tyuc se relaciona de igual manera con una intensificación de Tx (los valores de correlación son negativos, debido al signo de Tx). Se promedió el Tx en la zona correspondiente al CLLJ para obtener una serie temporal y se multiplicó por  $(-1)$ , para facilitar su comparación con el Tyuc (Fig. 1, panel inferior). Tanto en el transporte como en el viento se observa una variación con período de aproximadamente 4 años, con un desfase de entre 5 y 8 meses, con el viento antecediendo al transporte, como esperado. La conexión entre el Tyuc y el Tx se mantiene durante casi todo el período analizado, a excepción de 2008-2012, donde la conexión se pierde y estas variables parecen comportarse de forma inversa. Cabe mencionar que el desfase observado en las series de tiempo, también fue obtenido en el cálculo de correlación del mapa presentado (Fig. 1, panel superior).

Debido a que el Tyuc se encuentra aparentemente relacionado con los vientos alisios a escalas interanuales, se analizó posteriormente la relación del Tx con la posición e intensidad de la NASH. A partir de la figura 1 se seleccionaron los años en los que el Tx fue considerado como intenso (débil), i.e. con anomalías superiores (menores) a 0,8 (-0,8). Se calcularon promedios de la SLP considerando solo los años con viento intenso: 1994, 1997, 2000, 2002, 2009, 2014 y 2015 (enero-diciembre); y promedios considerando solo los años con viento débil: 1995, 1999, 2005 y 2010 (Fig. 2). El promedio de SLP durante los años de viento intenso muestran una NASH intensa y extendida hacia el oeste del Atlántico, con valores superiores a 1 022 hPa en el centro; este comportamiento es representativo de los promedios anuales para los años individuales. El promedio de los años con viento débil presenta una NASH débil y retraída hacia el Atlántico central, con valores que apenas superan los 1 020 hPa.

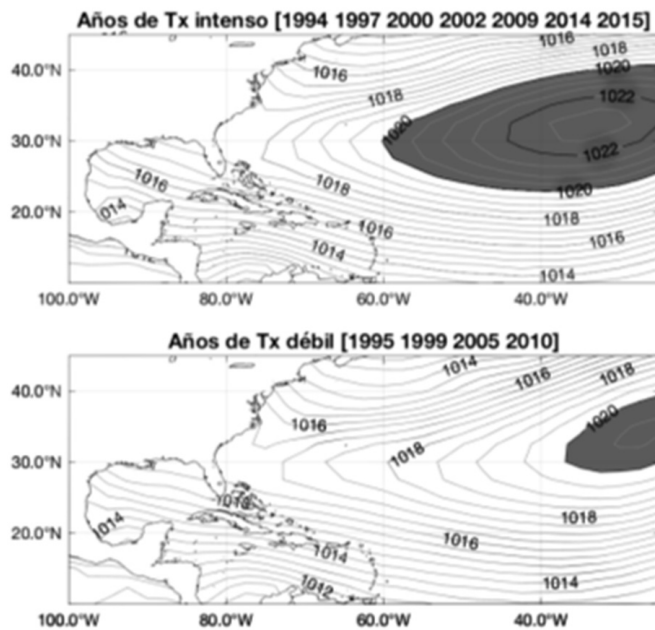


Fig. 2. Mapas promedio de la SLP, para los años en los que el Tx fue considerado intenso (panel superior) y para los años en que el Tx fue considerado débil (panel inferior). En gris se indican las isobaras mayores que 1 022 hPa en la zona de la NASH.

Estudios previos sugieren que las anomalías de temperatura superficial del mar en el océano Pacífico oriental, asociadas a eventos de *El Niño* y *La Niña*, tienen un impacto en el comportamiento de la NASH

y en consecuencia el CLLJ, debido a los gradientes de presión entre el Pacífico oriental y la parte oeste del Atlántico (Wang & Lee, 2007; Wang, 2007). De esta forma, años *El Niño* ( $ONI > 0,5$ ) se asocian con una intensificación de Tx en el Caribe, en la zona del CLLJ; mientras que años *La Niña* ( $ONI < -0,5$ ), se asocian con un debilitamiento de los vientos alisios en la zona del CLLJ (Wang, 2007). En la figura 3 se observa que los años en donde el Tx se intensificó (indicados con línea gris continua), corresponden a un aumento en los valores del ONI en el Pacífico (períodos de *El Niño*); esto ocurre para todos los años seleccionados como intensos a excepción de 1994, donde el valor de ONI es cercano a cero. De la misma forma, los años en los que se observó un debilitamiento de Tx en el Caribe (indicados por la línea gris discontinua), corresponden a períodos en los que se observa una disminución del ONI con valores menores que  $-0,5$  (períodos de *La Niña*).

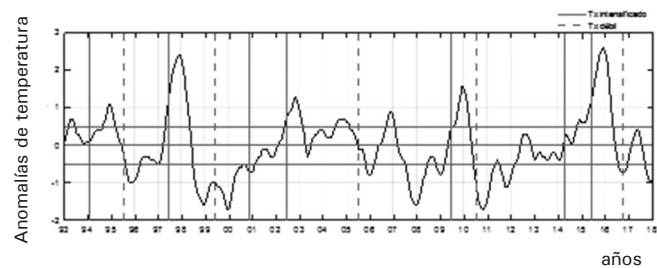
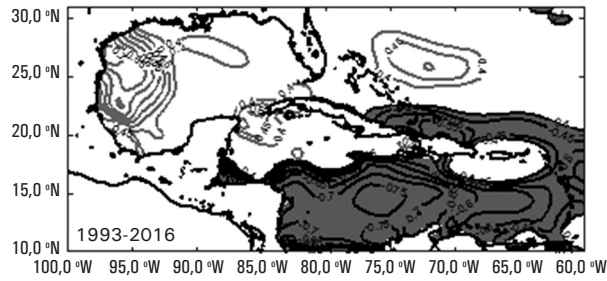


Fig. 3. Índice oceánico de *El Niño* (ONI). Se indican los años en los que el Tx fue considerado intenso (débil) con línea gris continua (discontinua). Las líneas horizontales grises indican las anomalías de  $\pm 0,5$  °C para identificar los años *Niño/Niña*.

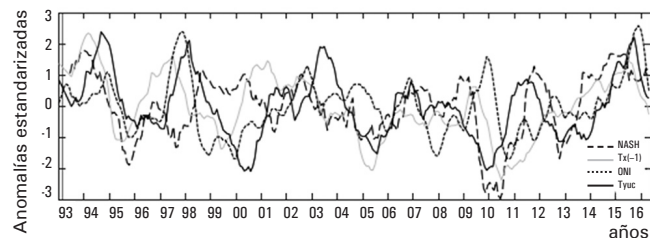
El mapa de correlación entre la serie temporal del ONI en el Pacífico y el Tx en cada punto del Atlántico occidental (Fig. 4) muestra dos zonas de correlación significativa relevantes para este trabajo: 1. El mar Caribe, al sur de los  $18^{\circ}$  N, justo sobre la zona del CLLJ, con correlaciones negativas de hasta 0,75 (nivel de significancia del 95 %), esto significa que períodos de *El Niño* ( $ONI > 0,5$ ) se correlacionan con una intensificación de Tx (valores negativos), mientras que períodos de *La Niña* ( $ONI < -0,5$ ) se correlacionan con un debilitamiento de Tx; 2. El occidente del Atlántico norte, al norte de  $24^{\circ}$  N y al este de  $80^{\circ}$  W, es decir, la zona de la NASH, con valores de correlación positivos de hasta 0,5 (nivel de significancia del 95 %), lo que indica que períodos de *El Niño* (*La Niña*) se asocian con una NASH intensa (débil).





**Fig. 4.** Mapa de correlación entre el ONI en el Pacífico oriental y Tx en cada punto del Caribe - GoM - Atlántico occidental. Solo se encuentran indicadas las correlaciones significativas al 95 %; valores negativos con contornos negros y los valores positivos con contornos grises.

El desfase obtenido para el análisis de correlación entre el ONI en el Pacífico y Tx en la zona del CLLJ es de entre 3 y 5 meses, con el Tx antecedendo al ONI. Se puede observar cierta correspondencia entre las series de tiempo de las variables atmosféricas NASH y Tx en el Atlántico, y el ONI en el Pacífico, así como con el Tyuc (Fig. 5) con diferentes desfases, que además varían en tiempo, donde el Tx y la NASH anteceden al ONI y al Tyuc. Esta figura muestra cómo la NASH está directamente relacionada con el Tx en el Caribe, el cual podría estar influenciado por los períodos de *El Niño* (*La Niña*) en el Pacífico, vía los gradientes de presión generados por la diferencia en la temperatura superficial del mar entre el Pacífico oriental y el Caribe; este gradiente de presión genera una intensificación (debilitamiento) del viento en el Caribe y como consecuencia se ve reflejado en la variabilidad interanual del Tyuc.



**Fig. 5.** Series de tiempo de: 1. SLP promediada dentro de la zona del NASH definida entre los 40° W-25° W y 25° N-40° N; 2. Esfuerzo zonal del viento (Tx) multiplicado por (-1) dentro de la zona indicada por el recuadro en la figura. 1; 3. ONI en el Pacífico oriental y 4. Tyuc.

En estudios previos se relacionan las variaciones interanuales del transporte en el estrecho de Florida con la Oscilación del Atlántico Norte (Baringer & Larsen, 2001; Lugo-Fernández, 2007). Cabe mencionar que en el presente trabajo se analizó la evolución temporal del índice de la oscilación del Atlántico norte (no se muestra); sin embargo, no se obtuvieron valo-

res de correlación significativos entre el Tyuc y este índice, por lo que se considera que estas dos variables podrían estar relacionadas a escalas mayores a las analizadas en este trabajo, como podrían ser escalas decadales.

En particular durante el período de 1999-2000 se midió un transporte relativamente bajo a través del canal de Yucatán (23.1 Sv; Ochoa *et al.*, 2003), comparado con los 27.6 Sv reportados para el período de 2012-2016 (Candela *et al.*, 2019). Esta disminución del transporte está relacionada con la variabilidad interanual, lo cual fue probado a partir de datos de AVISO, con el mismo proxy utilizado en este estudio (Athié *et al.*, 2015). En este artículo se sugiere que dicha disminución en el transporte podría estar relacionada con un período largo de *La Niña* en el Pacífico (33 meses), registrado entre julio de 1998 y febrero de 2001, el cual es el más largo documentado en los últimos 40 años. Entre 1973 y 1976 se registró otro período de *La Niña* con una duración de 36 meses, desafortunadamente, no se contaba con datos de AVISO de altimetría en esa época, por lo que no se puede comparar con alguna estimación del transporte en el canal de Yucatán.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo sugiere que los cambios interanuales del transporte en el canal de Yucatán presentan una periodicidad de 4 años y podrían estar asociados a los vientos alisios en el Caribe, así como a la intensidad y posición de la NASH en el Atlántico.

Se propone que esta conexión podría ser influenciada por los períodos de *El Niño* y *La Niña* en el Pacífico oriental, alterando la intensidad de los vientos alisios en el Caribe y por lo tanto el transporte en el canal de Yucatán a escalas interanuales.

La señal interanual del transporte representa el ~ 15 % de la varianza total de la serie, mientras que la señal estacional representa el ~ 30 %, lo anterior estimado únicamente a partir del proxy de AVISO; asimismo se observaron cambios en la variabilidad del sistema, ya que esta conexión no fue observada durante los años 2008-2014.

## RECOMENDACIONES

Es necesario realizar estudios con mayor detalle de la variabilidad interanual del transporte en el canal de Yucatán y su relación con el viento de gran escala en el Atlántico norte (Candela *et al.*, 2019). Continuar entendiendo la conexión aquí sugerida entre el Tyuc y

los fenómenos atmosféricos de teleconexión, verificar nuevamente el papel de la Oscilación del Atlántico norte, así como los desfases registrados entre las variables atmosféricas y las oceánicas.

## REFERENCIAS

- Athie, G., Sheinbaum, J., Romero, A., Candela, J. & Ochoa, J. (2014). *Measurements in the Yucatan-Campeche area in support of the Loop Current dynamics study*. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study BOEM 2014-669, 159 pp.
- Athié, G., Sheinbaum, J., Leben, R., Shannon, M. & Candela, J. (2015). Inter-annual variability in the Yucatan Channel flow. *Geophys. Res. Lett.* Doi: 10.1002/2014GL062674.
- Baringer, M. & Larsen, J. (2001). Sixteen Years of Florida Current Transport at 27° N. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (16), 3179-3182. Doi: 2001GL013246.
- Berrisford, P. *et al.* (2011). The ERA-Interim archive Version 2.0, ERA Report Series 1, ECMWF, *Shinfield Park. Reading, UK*, 13177.
- Bryden, H. L., Longworth, H. R. & Cunningham, S. A. (2005). Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature*, 438 (7068), 655-657. Doi: 10.1038/nature04385.
- Candela, J. *et al.* (2019). The flow through the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 49, 1381-1401. Doi: 10.1175/JPO-D-18-0189.1.
- Chang, Y. L. & Oey, L. Y. (2012). Why does The Loop Current tend to shed more eddies in summer and winter? *Geophys. Res. Lett.*, 39, L05605. Doi: 10.1029/2011GL050773.
- Dee, D. P. *et al.* (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553-597, <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J. J., Fiorino, M. & Potter, G. L. (2002). NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of American Meteorological Society*, 83, 1631-1643.
- Lugo-Fernández, A. (2007). Is the Loop Current Chaotic Oscillator? *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 1455-1469. Doi: 10.1175/JPO3066.1.
- Ochoa, J., Badan, A., Sheinbaum, J. & Candela, J. (2003). CANEK: Measuring transports in the Yucatán Channel. In O.U. Velasco, J. Sheinbaum & J. Ochoa (Eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics. A tribute to the scientific work of Pedro Ripa*, Kluwer, pp. 275-286.
- Pérez, I., Schneider, W., Sobarzo, M., Montoya, R., Valle, A. & Garcés, J. (2010). Surface wind variability and its implications for the Yucatan basin Caribbean Sea dynamics. *J. Geophys. Res.*, 115, C10052. Doi: 10.1029/2010JC006292.
- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A. & Ochoa, J. (2002). Flow structure transport in the Yucatan Channel. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (3). Doi: 10.1029/2001GL013990.
- Wang C. (2007). Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *J. Climate*, 20. Doi: 10.1007/s00382-007-0243-z.
- Wang, C. & Lee, S. K. (2007). Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02703. Doi: 10.1029/2006GL028579.