

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/268931174>

Spatial and temporal variability of oceanic eddies in the southwestern region of Cuba.

Article · February 2012

CITATIONS

0

READS

40

2 authors:



[Alina Rita Gutiérrez Delgado](#)

Instituto de Oceanología

13 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)



[A. C. Alvarez](#)

Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada

33 PUBLICATIONS 89 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



CONSERVATION LAWS, RIEMANN PROBLEM AND APPLICATIONS [View project](#)

All content following this page was uploaded by [Alina Rita Gutiérrez Delgado](#) on 01 December 2014.

The user has requested enhancement of the downloaded file. All in-text references [underlined in blue](#) are added to the original document and are linked to publications on ResearchGate, letting you access and read them immediately.



Variabilidad espacial y temporal de los remolinos oceánicos en la región suroccidental de Cuba

Spatial and temporal variability of oceanic eddies in the southwestern region of Cuba

Alina Rita Gutiérrez Delgado y Amaury Álvarez Cruz

Instituto de Oceanología
Calle 1ra entre 184 y 186 Rpto. Flores, Playa, La Habana, Cuba.
alina@oceano.inf.cu, alinarita@gmail.com, amaurya@ama.cu

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mucho a los revisores anónimos por sus valiosas recomendaciones, en especial al que sugiere utilizar funciones empíricas ortogonales complejas (FEOC). El método FEOC debe reducir el número de modos hallados con FEO, aunque las particularidades del sentido físico deben ser semejantes, según lo reportado por Lin (2010). Agradezco también el trabajo de los editores de la revista.

Resumen

Un estudio de los remolinos oceánicos se realizó en la región SW de Cuba (19° - 22° N, 80° 40'- 86° 30'W). Este comprendió la localización de los vórtices y sus escalas asociadas. La caracterización del campo de remolinos tuvo en cuenta su posición, orientación, diámetro y área. La variabilidad espacial y temporal de la serie de corrientes se determinó por el método de las componentes principales. La data primaria provino de los mapas de alturas dinámicas de 18 cruceros oceanográficos, de imágenes de corrientes obtenidas con el Modelo Global de Circulación Oceánica y Climatología Avanzada, y de una serie de corrientes de los satélites ERS1/2. Este estudio demostró que existen dos tipos de mecanismos orientadores de los remolinos oceánicos. La topografía favorece que los remolinos más estables estén situados de forma casi paralela a las isobatas. Las corrientes marinas condicionan que el eje principal del remolino esté orientado en la dirección del flujo principal. Las mayores concentraciones de vórtices se observaron al W de la Isla de la Juventud, también abundaron cerca de las Islas Caimán y en la dirección del flujo principal del Caribe hacia el canal de Yucatán. Las primeras tres componentes espaciales corroboraron que en la región de interacción océano-plataforma del SW de Cuba predominan vórtices cuyas dimensiones (38-40km) son del orden del Radio de deformación de Rossby y como promedio son más pequeños que los vórtices del resto de la región analizada. Sin embargo, la necesidad de un alto número de componentes para explicar la varianza de la serie, sugiere que el campo de vórtices tiene una alta variabilidad.

Abstract

A study of oceanic eddies was carried out to the southwest of Cuba. It showed the eddy location and scales. Eddies were characterized in function of their position, orientation, diameter and area. The Principal Component Method (PCA) was used to characterize the spatial and temporal variability of oceanic eddies from a current speed data series. The primary information used came from dynamic height maps of 18 oceanographic cruisers, currents images obtained with Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling (OCCAM) and a current speed data series from ERS1/2 satellites. This study showed that there exist two orientation types of oceanic eddies. Topography favours that coherent eddy are located quasi parallel to the isobaths. Marine currents determine that the eddy's main axis appears oriented in the direction of the mainstream. Eddies are concentrated mainly on the west of the Isle of Youth, around Cayman Islands and following the direction of the mainstream in the Caribbean towards the Yucatan channel. The first three spatial components corroborated the predominance of coherent eddies with dimensions of Rossby deformation Radius (38-40km) in the ocean-atmosphere interaction zone, where eddies were smaller, on average, than in the rest of the examined region. However, a great number



of components are needed to explain the eddy variance, which suggests that the eddy field has a high variability.

Palabras claves: Remolinos oceánicos, Mar Caribe, funciones empíricas ortogonales.

Keywords: Ocean eddies, Caribbean Sea, empirical orthogonal functions.

I. INTRODUCCIÓN

Los movimientos con períodos mayores que la marea e inerciales son dominados por lo que ahora denominamos remolinos de mesoescala. Los remolinos de mesoescala tienen dimensiones de 50-200 km, períodos de algunos meses, viajan algunos km por día, y las corrientes rotatorias son del orden de 0.1 ms^{-1} (Brown, Colling, Park, Phillips, Rothery & Wright, 1993). Los remolinos son comúnmente generados en regiones del océano donde hay marcadas discontinuidades de densidad, como son las fronteras entre diferentes masas de agua o zonas de frentes (Flór, 2010).

Los estudios de remolinos en el Mar Caribe, revelan que estos se forman debido a la interacción de la corriente del Caribe con la topografía, por forzamientos externos como el esfuerzo del viento o bien procedentes de otras regiones, como la zona de retroflexión de la corriente Norte de Brasil (Johns, Townsend, Fratantoni & Wilson, 2003). En la actualidad, una suficiente resolución, ha permitido examinar que la actividad de los remolinos de mesoescala puede producir importantes efectos en la circulación general (Jouanno, Sheinbaum, Barnier, Molines, Debreu & Lemarié, 2008). La primera evidencia publicada de la actividad de los remolinos en el Caribe, fue el descubrimiento de dos remolinos al W de las Antillas Menores. Una mejor comprensión de estas estructuras se logra a partir de 23 boyas lanzadas entre 1975 y 1977 (Molinari, Spillane, Brooks, Atwood & Duckett, 1981). Mayores detalles del campo de remolinos se logran con la liberación de 212 boyas de deriva durante los años 1998-2000 (Richardson, 2005). Este lanzamiento incluye regiones cercanas al S de Cuba, lo que permitió esclarecer algunas características físicas de estos remolinos en aguas cubanas.

En Cuba, las mediciones de cruceros oceanográficos permiten conocer las características más relevantes de la circulación oceánica al SW de Cuba (Victoria *et al.*, 1991; Gallegos, Victoria, Zavala, Fernández & Penié, 1996; Gutiérrez, Pérez, Barbeito, Moreau, 1998, 1999). Las corrientes marinas en la zona de interacción con la plataforma cubana tienen velocidades promedios que generalmente no exceden 51 cms^{-1} ; aunque al SE de la Isla de la Juventud se han registrado corrientes que sobrepasan los 150 cms^{-1} provocadas por el choque del fuerte flujo del Caribe con la plataforma cubana (Gutiérrez, Vega, García, Moreau & Dieguez, 2005). Esta región parece ser dominada por la formación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos que interaccionan con la plataforma cubana, favoreciendo en algunos tramos de costa la entrada de aguas oceánicas a la plataforma y viceversa. La compleja dinámica conduce a la recirculación y al hundimiento (García, 1991).

La presente investigación tiene el propósito de contribuir al estudio de los remolinos oceánicos en la región suroccidental de Cuba. Este estudio esclarece la dinámica de los remolinos y demuestra que los altos por cientos de retención de larvas de especies marinas, nutrientes, y fitoplancton que se logran en la plataforma cubana se deben en gran medida, al campo de remolinos oceánicos que persiste en la región de estudio. La caracterización de los remolinos tiene en cuenta la posición, orientación, diámetro y área de los vórtices observados en los mapas de alturas dinámicas de 18 cruceros oceanográficos realizados en aguas cubanas, de imágenes de corrientes provenientes del OCCAM y de dos años de corrientes del ERS1/2 (Robinson, 2010). Los remolinos se identifican según el criterio de Okubo-Weiss

(Okubo, 1970; Weiss, 1991). El campo de vórtices más estables se distingue calculando el radio de deformación de Rossby. La variabilidad espacial y frecuencia temporal de los remolinos oceánicos se determina mediante el método de las componentes principales aplicado a una serie de vórtices extraída de los satélites ERS1/2.

La región de estudio es el hábitat de los primeros estadios de numerosas especies comerciales, entre ellas: la langosta *Panulirus argus*. La langosta constituye el primer renglón pesquero exportable de Cuba al reportar importantes ingresos a la economía cubana. Por esta razón el esclarecimiento de la dinámica de los remolinos oceánicos permite comprender la distribución y áreas de abundancia de larvas, huevos y nutrientes que derivan en la región.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Región de estudio

La región seleccionada para este estudio comprende las aguas oceánicas adyacentes a la región suroccidental de Cuba (cuadrícula 19°-22° N y 80°40'-86°30' W) (Figura1). La caracterización de los vórtices en la región suroccidental de Cuba se realizó en los polígonos A y B. Estos polígonos se dividen sobre la latitud de 21°N. Esta latitud marca la diferencia a partir de la cual la pendiente del fondo es más inclinada hacia la costa. El polígono A cubre la zona de interacción océano-plataforma, mientras que el polígono B enmarca la región oceánica.

En la región suroccidental de Cuba, la costa es baja en gran parte de su extensión. En esta se encuentra el golfo de Batabanó y numerosos cayos que forman el archipiélago de Los Canarreos. A este archipiélago, pertenece la Isla de la Juventud que, por su extensión, es la segunda en tamaño de todo el archipiélago cubano (ICH, 1982).

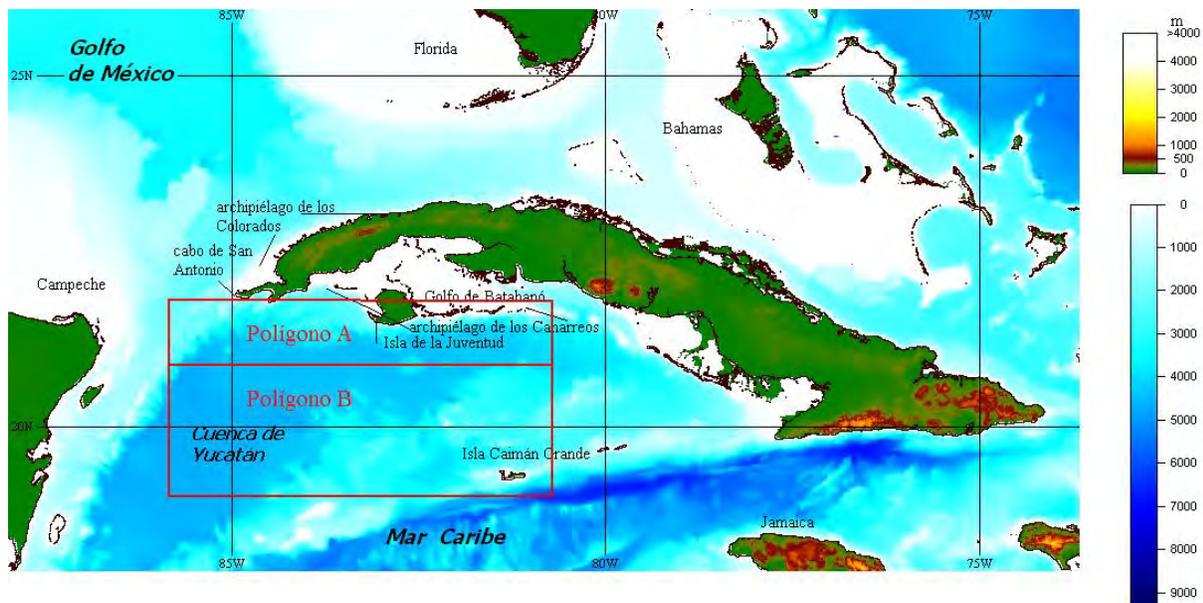


Figura1. El área de estudio se localiza al SW de Cuba (cuadrícula 19°-22° N y 80°40'-86°30' W). El polígono A cubre la zona de interacción océano-plataforma (21°-22° N y 80°40'-86°30' W). El polígono B limita la región oceánica (19°-21° N y 80°40'-86°30' W).

Figure 1. The study area is located southwest of Cuba (19°-22° N y 80°40'-86°30' W). Polygon A covers ocean - shelf interaction zone (21°-22° N and 80°40'-86°30' W). Polygon B delimits the ocean region (19°-21° N and 80°40'-86°30' W).

La topografía submarina es un elemento clave en la conexión oceánica de Cuba con el resto del Caribe. Los pasos y estrechos facilitan el paso de estructuras de mesoescala, las que pueden transportar calor y material particulado desde regiones lejanas hasta el SW de Cuba (Richardson, 2005). El SW de Cuba se encuentra enclavado en la cuenca de Yucatán con una profundidad promedio de 5 000 m. En la frontera W se localiza el estrecho de Yucatán con un umbral de 2 040 m. Otros rasgos topográficos que se localizan cerca de la región estudiada son la cuenca de Caimán (15°-20° N y 75°-80° W) con una profundidad máxima de 7 100 m y la Dorsal Caimán que limita el extremo SE.

2.2 Datos

Los datos básicos del océano (temperatura, salinidad y presión) provienen de 18 cruceros oceanográficos realizados en aguas oceánicas adyacentes a la región suroccidental de Cuba entre los años 1968 y 2000 (Tabla 1). Los muestreos hidrológicos, se realizaron cada 2 km en estaciones cercanas a la costa y cada 9 km en estaciones más alejadas de la costa. Las mediciones se realizaron en los horizontes estándar, hasta 1200 m de profundidad. Las corrientes se calcularon aplicando el método geostrofico con un nivel de referencia de 1000m (Pond & Pickard, 1978). Las cartas de corrientes geostroficas y de alturas dinámicas se realizaron con el programa MATLAB7.0

Tabla 1. Cronología de 18 cruceros oceanográficos realizados en aguas cubanas.
Table 1. Chronology of 18 oceanographic cruises carried out in Cuban waters.

Cruceros oceanográficos al SW de Cuba					
10-11/1968	7-8/1982	8/1985	7/1988	6/1989	9/1998
8-9/1972	5/1984	11/1986	10-11/1988	7-8/1989	5/1999
5/1980	7/1984	12/1987	2/1989	9-10/1991	2/2000

A partir de las cartas de corrientes obtenidas por geostrofia, de las imágenes de corrientes procedentes del OCCAM (www.aoml.noaa.gov) (Fox, Haines, Cuevas & Webb, 2000) y de una serie de corrientes de dos años (1993-1994) asimilada con los satélites ERS 1/2 se caracterizan los remolinos oceánicos siguiendo el criterio de Okubo-Weiss (Okubo, 1970; Weiss, 1991). La caracterización de los remolinos contempla la posición, orientación, diámetro, área de los vórtices y sentido del giro. Las escalas características de los vórtices se obtienen promediando las dimensiones de los semiejes máximos.

La caracterización de los vórtices incluye la comparación de sus escalas características con el radio de deformación de Rossby (R_d) (Ver sub-epígrafe 2.3). Como parte del procesamiento se aplica el método de las componentes principales para conocer la variabilidad espacial y temporal de los remolinos oceánicos identificados en la serie de corrientes asimilada de los satélites ERS 1/2 (Ver sub-epígrafe 2.4).

2.3. Relación de la vorticidad y el radio de deformación

La caracterización de los vórtices incluye la comparación de sus escalas con el radio de deformación de Rossby, el cual fue calculado conociendo la frecuencia de Brunt-Väisälä N (s^{-1}). La frecuencia (N) se calculó por la ecuación: $N = [(g/\rho)(\partial\rho/\partial z)]^{1/2}$ donde g es la aceleración de la gravedad, $\partial\rho/\partial z$ es el gradiente de la densidad a la profundidad de la termoclina, ρ es la densidad media hasta la profundidad de la termoclina. El radio de deformación utilizando N se calcula como: $R_d = (N/f) h$, donde R_d es el radio de deformación, h es la profundidad máxima de la termoclina, f es el parámetro de Coriolis ($f = 2 \Omega \sin \lambda$), λ es la latitud y $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} s^{-1}$ es la velocidad angular de rotación de la tierra (Consultar a Cushman-Roisin, 1994).

2.4. Método de las componentes principales

El método de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF, por sus siglas en inglés) se utilizó con el propósito de proveer una descripción compacta de la variabilidad espacial y temporal de la serie de dimensiones de los vórtices en términos de funciones ortogonales. Los detalles del método pueden ser encontrados en la literatura especializada (Venegas, 2001).

Para el análisis de las EOF se preparó un programa en ambiente MATLAB 7.0. Con este método se separó la dependencia temporal y espacial de la serie de vórtices. El campo de dimensiones de los vórtices en cada instante se expresó como combinación lineal de las funciones propias. El método EOF transformó los datos de las mediciones sistemáticas de los diámetros de los vórtices que constituyen un conjunto de variables correlacionadas, en un conjunto de variables estadísticamente independientes y mutuamente ortogonales.

Los datos analizados fueron el diámetro y el sentido del giro de los vórtices. Con estos datos y aplicando el método se describe la variabilidad de los diámetros de los vórtices respecto al valor promedio de las sub-cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ en que se dividió la región. De esta manera se representaron las anomalías de las dimensiones y la posición de los remolinos.

El método puede describirse por los pasos: preparación de los datos, cálculo de la matriz de varianza y covarianza, componentes principales y autovalores y finalmente interpretación física y análisis de las componentes. Antes de aplicar el método se realizó un análisis estadístico a la serie de vórtices total (serie de ciclones más serie de anticiclones) con el propósito de explorar las características de los vórtices. Este análisis cuantifica la cantidad de vórtices distribuidos por sub-cuadrículas, el diámetro medio y la desviación estándar del diámetro de los vórtices.

2.4.1. Preparación de los datos

La región de estudio se dividió en sub-cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Los vórtices se digitalizaron a un intervalo de cinco días determinando su centro y la sub-cuadrícula a la cual pertenece, su radio y sentido horario o antihorario. Con esta serie de datos se construye una matriz cuyas columnas tienen el valor del diámetro en la correspondiente cuadrícula donde está ubicado el centro del vórtice. Es decir, la matriz de datos F se toma como $F_i(t_j) = \psi_i(t_j)$, $j=1, \dots, N; i=1, \dots, M$; donde $\psi_i(t_j)$ es el diámetro del vórtice en el instante de tiempo t_j . En el caso que no exista el vórtice en la cuadrícula i en instante t_j se toma $\psi_i(t_j)=0$. (Ver a Badii & Politi, 1997).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los remolinos a partir de cruceros oceanográficos.

Del total de vórtices registrados en la región suroccidental de Cuba, el 64% se localiza por encima de la latitud de 21° N, o sea en la zona de interacción océano-plataforma (Figura 1, Polígono A). Esto podría estar relacionado por la influencia de la topografía submarina y la fricción con los cayos. Según Richardson (2005) el flujo incidente sobre la Isla de la Juventud, crea una intensa cizalla, la cual resulta en la formación de pequeños e intensos ciclones. Un posible mecanismo que genera una mayor cantidad de vórtices hacia la costa, es el fraccionamiento de los vórtices grandes en otros más pequeños por efecto de la fricción con los cayos, así como también el irregular relieve del fondo puede propiciar la formación de pequeños vórtices.

De los 68 vórtices detectados en la zona de interacción océano-plataforma (Polígono A), los más abundantes aparecen en el 26% del total de las observaciones, con diámetros entre 25 y 35 km. El 15% lo ocupan remolinos entre 35 y 45 km. Los remolinos entre 15 y 24 km representan el 13% de las observaciones.

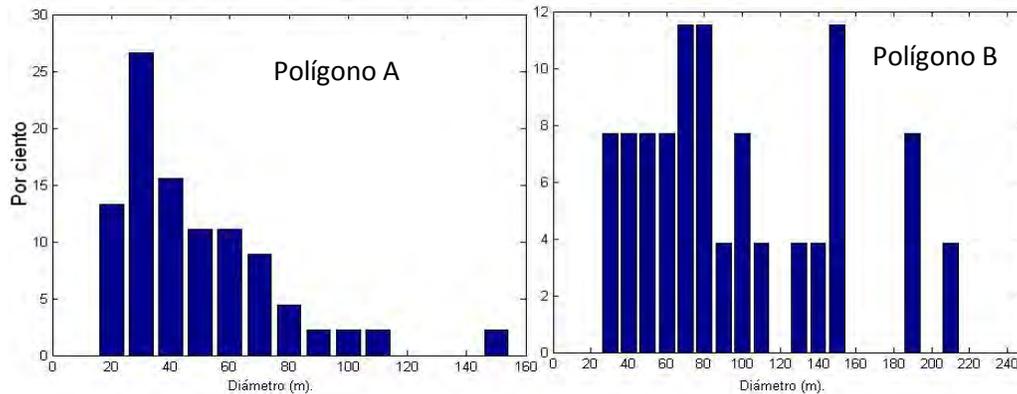


Figura 2. Por ciento de vórtices según el diámetro mayor (Cruceros oceanográficos).
 Figure 2. Percent of eddies according to bigger diameter (Oceanographic cruises).

En la región oceánica (entre 21° N y 19° N) se observan vórtices hasta 210 km en el 4% de las observaciones. Los vórtices más frecuentes tienen dimensiones entre 70 y 85 km en el 22% del total observado y entre 146 y 154 km en el 11%. Los remolinos entre 30 y 60 km aparecen en un 8%. Las dimensiones identificadas (entre 20 y 300 km) coinciden con las reportadas para el Mar Caribe en los estudios de seguimiento de boyas, simulaciones numéricas e imágenes de altimetría (Murphy, Hurlburt & O'Brien, 1999; Guerrero, 2005).

En la totalidad de la región, el área más frecuente es de aproximadamente 605 km² representando el 20% del total. A partir de un área de 7 298 km², disminuye la cantidad de vórtices observados. Los vórtices próximos a la plataforma tienen áreas entre 142 y 695 km² en el 26% de las observaciones; mientras los localizados por debajo de la latitud de 21° N, predominan entre 483 y 1 405 km² en el 11% del total.

La orientación espacial de los vórtices representa el ángulo entre la dirección norte y la dirección del eje mayor. El eje mayor de los vórtices, en la región de interacción océano-plataforma, está orientado en la dirección de 70° a 90°, en el 66% de los casos. La topografía submarina próxima a la plataforma orienta la dirección de los vórtices, de manera casi paralela a las isobatas; también la dirección del flujo principal del Caribe, predominante hacia el W, debe influir en la orientación de los remolinos.

En la región oceánica (Figura 1, Polígono B), el semi-eje mayor de los remolinos está direccionado entre 60° y 90° en el 43% del total de vórtices analizados y hacia 140° en un 15%. Las orientaciones principales de estos vórtices son hacia el W-NW, coincidiendo con la dirección de la corriente del Caribe. Esta particularidad de los remolinos oceánicos ha sido documentada en estudios que demuestran que los remolinos oceánicos viajan junto con la corriente del Caribe hasta salir por el estrecho de Yucatán (Carton & Chao, 1999).

A partir de las estadísticas descritas se distinguen dos tipos de mecanismos orientadores de los vórtices: por efecto de la topografía y por el efecto de la dirección del flujo principal.

3.2 Estabilidad de los vórtices

La estabilidad de los vórtices está relacionada con el R_d , determinado en función de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N), en la condición de una estratificación estable. La estabilidad de los vórtices en las temporadas de invierno y verano, se determina a partir de datos *in situ* de densidad del agua de mar, y de la profundidad máxima de la termoclina (150 m).

La distribución vertical de la densidad refleja los contrastes entre el verano y el invierno, en la capa de interacción océano-atmósfera. Durante el invierno, la acción de los vientos favorece la formación de una capa de mezcla homogénea, hasta aproximadamente 100 m de profundidad; mientras en el verano la estratificación del océano ocurre desde la superficie, hasta las capas más profundas. En la región la profundidad máxima de la piconclina y la termoclina (h) fue semejante durante el verano y el invierno, obedeciendo a las características hidrológicas del Caribe a estas profundidades.

En el verano, la densidad superficial es menor y su gradiente vertical es mayor que en el invierno (Tabla 2). Bajo estas condiciones de estratificación, es afectada la frecuencia de las oscilaciones inerciales, siendo mayores en verano. Esta característica podría favorecer la estabilidad de los vórtices durante esta estación del año. El valor calculado de IR_d predice la existencia de vórtices estables, de tamaño mayor en verano (septiembre) que en invierno (febrero). El diámetro más frecuente de los vórtices (31-39 km) es del orden del R_d en la zona de interacción océano-plataforma.

Tabla 2. Densidad media (ρ), gradientes verticales de densidad ($\partial\rho/\partial z$), frecuencia (N) y radio de deformación (R_d). La data primaria proviene de cruceros realizados al suroeste de Cuba, en los meses de febrero y septiembre, representativos del invierno y del verano, respectivamente.

Table 2. Average density (ρ), density vertical gradients ($\partial\rho/\partial z$), frequency (N), and deformation radius (R_d). Primary data come from cruisers carried out southwest of Cuba, in February and September (representative months for winter and summer).

Región SW	ρ (kg m ⁻³)	$\partial\rho/\partial z$ (kg m ⁻³)	N (s ⁻¹)	R_d (m)
Invierno(febrero)	1024.86	0.0172	0.0128	36836
Verano (verano)	1023.86	0.0181	0.0132	37806

3.3 Estudio de los remolinos a partir de imágenes de satélite

En este epígrafe se estudian los remolinos a partir de imágenes de alturas dinámicas obtenidas con el modelo OCCAM en el período 1996-1999. Se logra hacer coincidencias en fecha con 6 cruceros oceanográficos (diciembre 1997, mayo 1999, febrero 1996, 1997 y septiembre de 1996, y 1998). Los cruceros restantes se realizaron antes de la disponibilidad de información de altimetría.

El estudio de los vórtices en función de su diámetro indica que de los 71 vórtices detectados, los de diámetro entre 70-90 km y 130 km son más frecuentes en un 9 y 11%, respectivamente. Los vórtices de mayor diámetro (entre 166 y 248 km) aparecen en muy bajos porcentajes y podrían ser los menos estables. El vórtice de menor diámetro es de 26 km y el mayor de 248 km. Se puede observar que mientras la data procedente de los cruceros permite determinar escalas de los remolinos de 17 km, la procedente de la asimilación de altimetría tiene en cuenta escalas a partir de 26 km y esto responde a la resolución de los datos que se emplearon.

Los vórtices en la región de interacción océano-plataforma tienen dimensiones entre 66 y 84 km, en un 43% del total de las observaciones (Ver Figura 3). En el polígono B, el diámetro de los vórtices más frecuente, es de 160 km en el 10% y de 72 km en el 9% del total de casos. Al igual que en las observaciones de los cruceros, en el polígono B los vórtices más frecuentes, son mayores que en el polígono A.

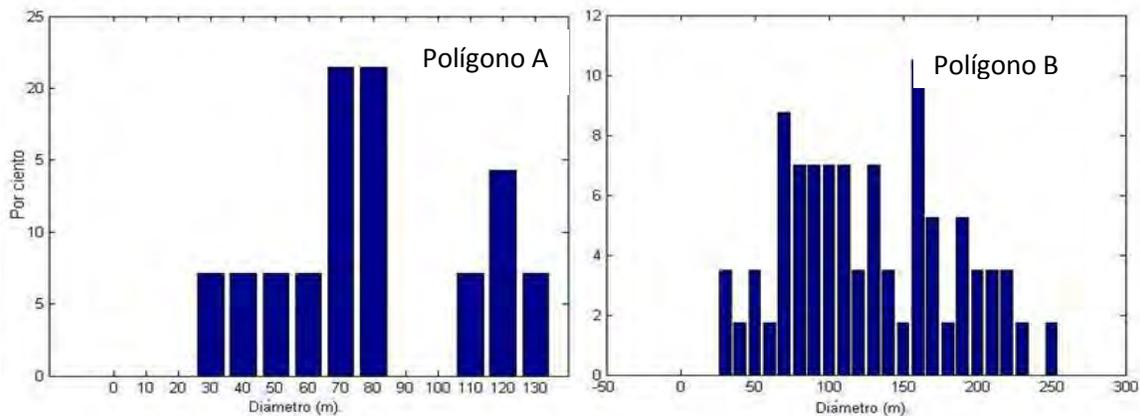


Figura 3. Por ciento de vórtices según su diámetro mayor (OCCAM).
 Figure 3. Percent of eddies according to bigger diameter (OCCAM).

La región de estudio se caracteriza por áreas de los vórtices de 5 472 km² y de 3 629 km² en el 10% y 8%, respectivamente. A partir de un área de 23 790 km² disminuye el porcentaje de los vórtices. Los vórtices próximos a la plataforma tienen áreas más frecuentes, de 3 880 km² y 5 465 km², en el 28% de las observaciones; mientras los localizados por debajo de la latitud de 21° abarcan mayores áreas (5 415 km², 12 880 km² y 20 622 km²) en un 45% y corresponden con los extensos remolinos que atraviesan el Caribe para salir por el estrecho de Yucatán. Estos remolinos por sus amplias dimensiones atrapan importantes concentraciones de materia en suspensión en el Caribe, las que trasladan hacia otras regiones caribeñas como se ha observado en recientes estudios (Flór, 2010; Lin, 2010).

La dirección principal de los vórtices alejados de la plataforma (Ver Figura 1, polígono B) es hacia (80°-90°) en el 38% del total analizado y hacia 170° en un 8%. Por encima de la latitud de 21° N el eje mayor de los vórtices está orientado en la dirección de 76° a 95° en el 29% de los casos, de 117° a 125° en un 14% y de 167° a 175° en el 21%. Coincidiendo con los remolinos encontrados por geostrofia, estos remolinos también se orientan con más frecuencia en el sentido del flujo principal del Caribe (W – NW).

Las características de los remolinos oceánicos observadas en el OCCAM coinciden en rasgos generales con los resultados de las observaciones geostroficas. Ambos análisis fueron útiles para corroborar que la combinación de la topografía con la dirección del flujo principal, parece ser el efecto que modula la orientación de los vórtices, en la región estudiada. Los vórtices próximos a tierra tienen menores dimensiones que los que se desarrollan en regiones más alejadas de la plataforma. La escala de trabajo condición a los resultados de las observaciones. La escala más frecuente de los vórtices conocida por el modelo es aproximadamente 2.4 veces mayor que R_d; mientras que en las mediciones geostroficas se observa que los vórtices de escala más frecuente son del orden del R_d. En cuanto a la forma de los remolinos detectados: la mayoría de ellos tienen una forma elíptica y una relación característica entre los semi-ejes que varía entre valores de 0.5 a 1.3, lo que confirma que los remolinos de forma elíptica son más estables.

3.4. Estadística básica de la serie de vórtices (serie ERS 1/2)

El análisis de dos años de la serie ERS 1/2 muestra mayor cantidad de vórtices a ambos lados de la Isla de la Juventud, Islas Caimán y en la dirección del flujo principal hacia el canal de Yucatán. Específicamente al W de la Isla de la Juventud se observan las mayores

concentraciones, generalmente producidos por la cizalla de la corriente con la Isla de la Juventud. La presencia de mayor cantidad de vórtices en la dirección del flujo principal hacia el canal de Yucatán coincide con el paso de grandes vórtices que atraviesan el Caribe para salir por el estrecho de Yucatán.

La distribución horizontal del diámetro promedio de los vórtices (Figura 4) corrobora vórtices más pequeños, en la zona de interacción océano-plataforma que los localizados por debajo de la latitud de 21° N. En las cercanías a la Isla de la Juventud el diámetro promedio de los vórtices (38- 40 km) coincide con el R_d (Tabla 2) sugiriendo vórtices más estables que los del resto de la región analizada. Por debajo de 21° N aparecen las mayores dimensiones de los vórtices (120 km). Esta estadística coincide con el análisis exploratorio realizado en las secciones (3.1 y 3.3).

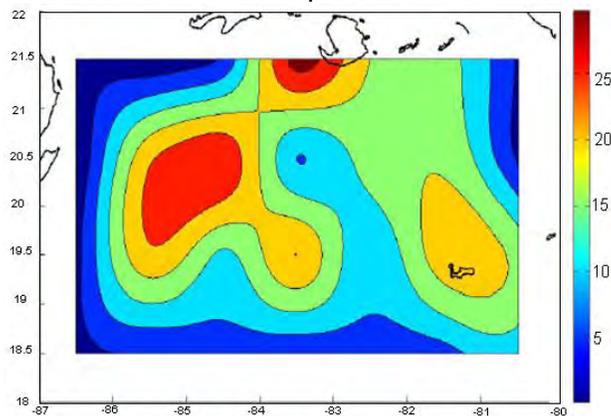


Figura 4. Distribución espacial del diámetro promedio de los vórtices. (Serie del ERS 1/2).
 Figure 4. Spatial distribution of eddy average diameter. (ERS 1/2 Series).

En la región próxima a la plataforma cubana, los vórtices anticiclónicos tienen dimensiones entre 20 y 50 km, mientras los ciclónicos se desarrollan entre 35 y 50 km. Por debajo de la latitud de 21° N, los vórtices anticiclónicos tienen mayores dimensiones (entre 60 y 120 km) que los vórtices ciclónicos (entre 10 y 100 km).

3.5 Análisis de las componentes principales de la serie del ERS 1/2

El análisis de la variabilidad espacial de las dimensiones de los vórtices en la región estudiada muestra que el 93% de la variabilidad se explica con las primeras 15 componentes espaciales (17.38, 15.61, 10.99, 8.58, 7.19, 6.76, 5.24, 4.66, 4.19, 2.94, 2.64, 2.31, 2.07, 1.65, 1.43). Es decir, se requiere de un número alto de componentes para explicar la variabilidad de los datos y por tanto existe una gran variabilidad de patrones espaciales de los remolinos. La alta variabilidad de la serie de vórtices sugiere la existencia de una compleja dinámica en la región, cuya frecuencia temporal parece responder al esfuerzo del viento del Mar del Caimán.

Desde el punto de vista físico la selección de cuántas componentes son necesarias para describir el comportamiento dinámico se realiza teniendo en cuenta indicios de cierta regularidad como la retención de partículas en la plataforma cubana (Gutiérrez *et al.*, 2009), el análisis estadístico anterior, y el comportamiento fractal de los vórtices. Finalmente se escoge un número menor de componentes para explicar la física del fenómeno. El criterio seguido es el siguiente: se toman las tres primeras componentes que explican el 44% de la variabilidad total, pues a partir de la cuarta componente la pendiente del porcentaje de variabilidad que explican las componentes decrece rápidamente.

La primera componente espacial representa el 17% de la varianza total. El patrón observado indica que existe la mayor variabilidad en las regiones I y II localizadas entre los 84.8° W y 86.5° W (Figura 5 A). Este primer patrón sugiere que cuando en la región I se hallan las mayores anomalías negativas de las dimensiones de los vórtices, en la región II se encuentran las mayores anomalías positivas, y viceversa. Al SW de Cuba (18.5° N-21.5° N y 80.5° W-84.5° W) la variabilidad de las dimensiones de los vórtices es significativamente menor que en las regiones I y II.

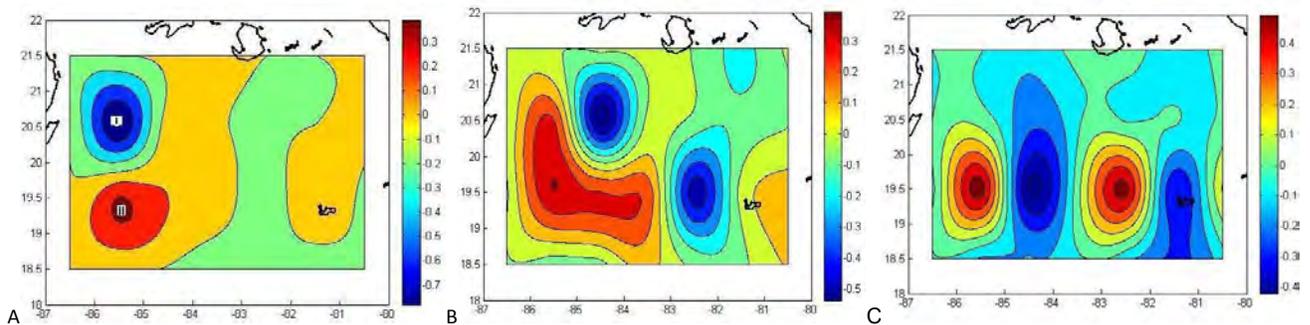


Figura 5. Variabilidad espacial de las dimensiones de los vórtices. De derecha a izquierda: A-Primera componente, B- Segunda componente, C-Tercera componente.

Figure 5. Spatial variability of eddy size. From right to left: A- First component, B-Second component, C-Third component.

Al SW de Cuba las dimensiones de los vórtices varían poco y son similares al R_d , concordando con los resultados de las (secciones 3.1, 3.3 y 3.4). La frecuencia temporal de ocurrencia del primer patrón espacial EOF1 se muestra a través de la primera componente temporal (PC1) (Figura 6). El análisis de PC1 indica picos positivos y negativos que manifiestan la frecuencia temporal del cambio. Los picos negativos aparecen en los meses de invierno (enero), verano (agosto-septiembre), mientras que los positivos son observados en los meses de primavera (abril-mayo) y otoño (noviembre). La variabilidad temporal de la PC1 está asociada a la variabilidad espacial, por tanto para los meses de PC1 positiva, la anomalía de las dimensiones de los vórtices en la región II es negativa, mientras que la anomalía de las dimensiones de los vórtices en la región I es positiva y de forma inversa en el caso contrario.

Se conoce que las dimensiones de los remolinos pueden influir sobre la retención de las partículas. En este caso, las variaciones temporales de las dimensiones de los vórtices en las regiones I y II podrían influir sobre la dispersión de partículas cercanas a la costa E de la península de Yucatán, aunque parece poco probable que incidan sobre la región inmediata al golfo de Batabanó, por encontrarse más alejadas. En la zona de interacción océano-plataforma del SW de Cuba, las variaciones temporales no son determinantes sobre el primer patrón espacial que se caracteriza por vórtices con dimensiones semejantes. Por consiguiente, las variaciones temporales no implican una mayor o menor retención. En esta región, el campo de vórtices en cualquier época del año muestra vórtices estables, caracterizados por retener las partículas durante períodos prolongados.

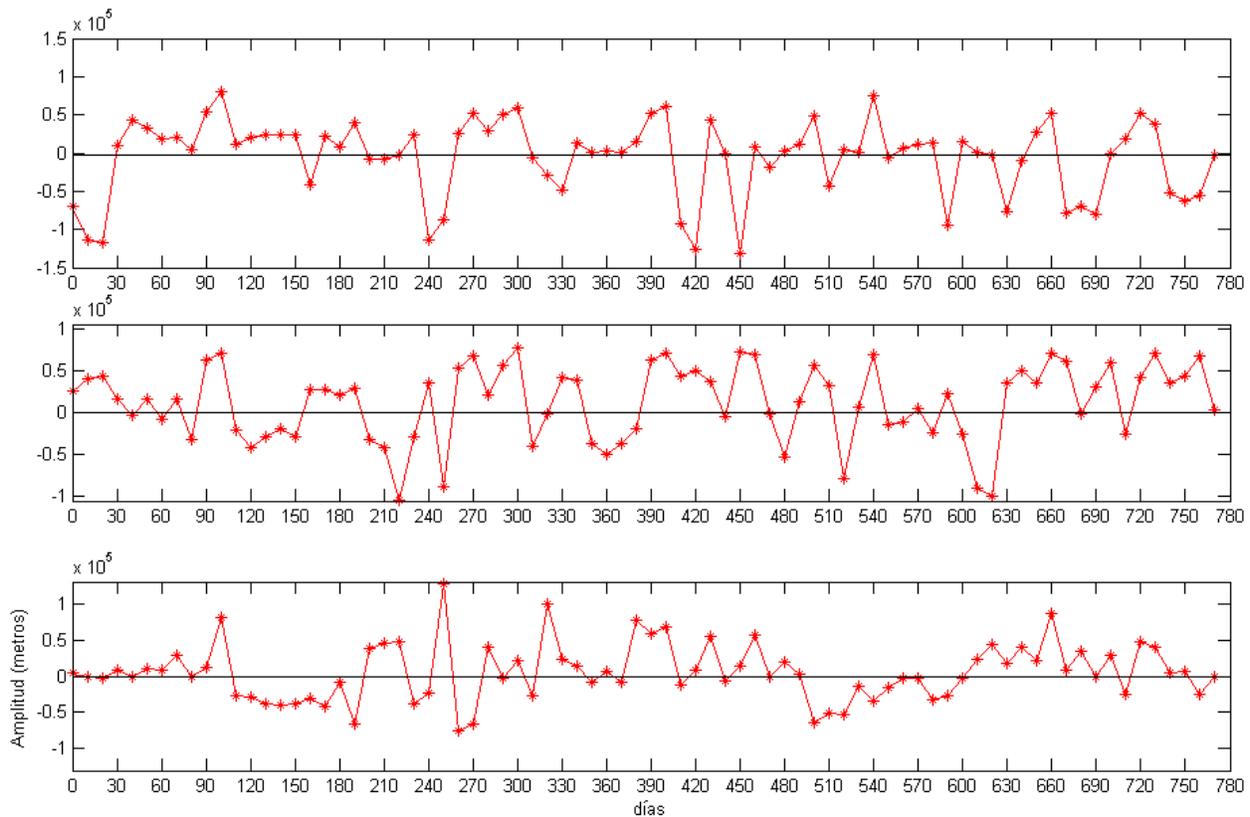


Figura 6. Primeros tres modos temporales.
 Figure 6. First three temporal modes.

La segunda componente espacial (Figura 5B) muestra en el 16% de la varianza que las mayores anomalías negativas y positivas aparecen hacia la parte W del área estudiada, en el sentido diagonal de la cuadrícula. Esta variabilidad de las dimensiones de los vórtices responde a la interacción de varias escalas de vórtices, entre ellas los grandes vórtices anticiclónicos que atraviesan la región del Caribe para salir por el estrecho de Yucatán. Las máximas anomalías de las dimensiones de los vórtices se corresponden a estas estructuras anticiclónicas, las cuales desarrollan dimensiones de hasta 200 km (Carton & Chao, 1999). Otra característica observada es el estrechamiento de los grandes remolinos cuando se disponen vía canal de Yucatán. De manera similar, el análisis de funciones empíricas complejas desarrollado por Lin (2010) muestra las mayores amplitudes de los remolinos en el sentido de las grandes estructuras que atraviesan el Caribe dirigidas hacia el canal de Yucatán y el estrechamiento de los remolinos durante el paso por el canal. Específicamente, al SW de Cuba, se observa una correlación más baja con relación a los grandes vórtices que fluyen atravesando el área estudiada.

La PC2 muestra que los picos positivos de la anomalía pertenecen también a los meses de primavera (abril, mayo y junio), mientras los picos negativos aparecen en invierno (enero y febrero), verano (agosto y septiembre). La frecuencia temporal de los picos positivos y negativos, tanto de la primera como de la segunda componente, concuerdan con los eventos bianuales del esfuerzo del viento del Mar del Caimán y con la intensidad del transporte en el canal de Yucatán. Ambos eventos son fuertes en verano e invierno y débiles en otoño y primavera (Chang y Oey, 2012). En el caso de la segunda componente, en los meses de verano

(agosto y septiembre) e invierno (enero y febrero), se localizan extensas áreas en color rojo donde aparecen los remolinos de mayores dimensiones de la cuadrícula, unidos a remolinos de las más pequeñas dimensiones. Durante la primavera y el otoño este patrón se invierte, mientras que el sur inmediato a Cuba se mantiene estable. En la zona de interacción océano-plataforma del SW de Cuba, las anomalías de las dimensiones de los remolinos son pequeñas y aún más, al E de la Isla de la Juventud. Hacia esta región las fluctuaciones estacionales del viento no parecen determinar las dimensiones de los remolinos y al parecer otros factores pudieran estar actuando de manera simultánea. La segunda componente vuelve a demostrar estabilidad al SW de Cuba que propicia retención.

Las simulaciones numéricas de las trayectorias de larvas de langosta liberadas al SW de Cuba en el período 1995-2000 corrobora que la presencia de vórtices estables durante largos períodos de tiempo es el factor que determina la magnitud de la retención de partículas al SW de Cuba (Gutiérrez, Álvarez y Baisre, 2012). Esta particularidad de los remolinos oceánicos concuerda con estudios anteriores que reportan las mayores concentraciones de fitoplancton, nutrientes, bacterias y larvas de langosta al SW de Cuba (Gutiérrez, *et al.*, 2009). También, Richardson (2005) encuentra que los remolinos de mayor tiempo de residencia en el Caribe se localizan, al SW de Cuba.

La tercera componente espacial exhibe el 11% de la varianza total. Las mayores anomalías se localizan por debajo de la latitud de 20° N. Por encima de esta latitud, la anomalía de las dimensiones de los vórtices es menor indicando la presencia de vórtices más estables al SW de Cuba, de igual manera que las componentes anteriores (Figura 5C). El tercer modo representa la alternancia de los remolinos de mayores y menores anomalías que viajan junto al flujo principal del Caribe. La tercera componente temporal muestra picos positivos en las cuatro estaciones climáticas. Los meses representativos de estos picos son enero, abril, septiembre, octubre y noviembre. Los picos negativos aparecen en mayo y julio. El tercer patrón observado se encuentra en todas las épocas climáticas, indicando de alguna manera, que además del viento, otros factores interactúan en diferentes escalas propiciando la compleja dinámica de los remolinos oceánicos.

La determinación de los patrones dominantes fue útil para corroborar el comportamiento de los remolinos en la zona de interacción océano-plataforma al SW de Cuba. Las tres primeras componentes espaciales confirman que en la zona de interacción océano-plataforma del SW de Cuba predominan vórtices estables con dimensiones de aproximadamente 40 km y del orden del R_d . Estos vórtices como promedio son más estables que los vórtices del resto de la región y propician la retención de las partículas por períodos prolongados de tiempo. La necesidad de un alto número de componentes para reconstruir la varianza de la serie en toda la región sugiere que el campo de vórtices tiene una alta variabilidad influenciada principalmente por el tensor del viento del Mar del Caimán, aunque deben existir otros factores interactuando de manera simultánea a diferentes escalas, específicamente en la zona de interacción con la plataforma cubana.

REFERENCIAS

- Andrade, C.A. & Barton, E.D. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, vol. 105, n. 26, pp. 191–201.
- Badii, R. & Politi, A. (1997). *Complexity hierarchical structures and scaling in physics* (first ed.). New York: Cambridge University Press. (311 pp)
- Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., & Wright, J. (1993). *Ocean Circulation*. Oceanography Course Team. (Pergamon, Oxford, England). (238 pp).



- Carton, J.A. & Chao, Y. (1999). Caribbean Sea eddies inferred from TOPEX/POSEIDON altimetry and 1/6 Atlantic Ocean model simulation. *J. Geophys. Res.*, vol. 104, pp. 7743–7752.
- Cushman-Roisin, B.(1994). *Introduction to geophysical fluid dynamics*. New Jersey: A Paramount Communications Company (120 pp).
- Chang, Y. & Oey, L. (2012). Why does the loop current tend to shed more eddies in summer and winter? *Geophys. Res. Lett.*, 39 (L05605), pp. 1-7.
- Flór, J.-B. (Ed.). (2010). *Fronts, Waves and Vortices in Geophysical Flows*. Lect. Notes Phys. 805 (Springer, Berlin Heidelberg). (192 pp).
- Fox, A., Haines, K., Cuevas, B. & Webb, D. (2000). Altimeter Assimilation in the OCCAM Global Model Part I: A twin experiment. *J. of Marine Systems*, vol.26, pp 303-322.
- García, C., Chirino, A., y Rodríguez, J. (1991). Corrientes geostróficas en la Z.E.E al Sur de Cuba. *Rev. Cub. Inv. Pesq.*, 12 (1-3), pp. 29-38.
- Gallegos, A., Victoria, I., Zavala, J., Fernández, M., y Penié, I. (1996). *Hidrología de los Estrechos del Mar Caribe Occidental*, parte 2. (Resultados científicos). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Autónoma de México.
- Guerrero, L. (2005). Identificación y seguimiento de remolinos en el Mar Caribe. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, carretera de Ensenada. Baja California. México.
- Gutiérrez, A., Álvarez, A., Frías, P.& Alfonso, I.(2009). *Informe final del proyecto: Los procesos oceanográficos y su relación con especies marinas de interés comercial. Importancia regional y trascendencia extraregional*. Publicado en el compendio de 10 años de trabajo del P.R.: Protección del Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible Cubano (1999-2009). ISBN978-959-300-06-2.
- Gutiérrez, A., Baisre, J., & Álvarez, A. (2012). Dispersión de larvas de langosta en el Caribe basada en simulaciones numéricas. *Rev. Cub. Inv. Pesq.*, 29 (1).
- Gutiérrez, A., Pérez, J., Barbeito, R., & Moreau, P. (1998). *Estudio de las características hidrológicas y de la circulación de las aguas alrededor de Cuba durante septiembre de 1998*. Informe inédito, GEOCUBA Estudios Marinos, C. Habana. Cuba.
- Gutiérrez, A., Pérez, J., Barbeito, R., & Moreau, P. (1999). *Estudio de las características hidrológicas y de la circulación de las aguas alrededor de Cuba durante mayo-junio 1999*. Informe inédito, GEOCUBA Estudios Marinos, C. Habana. Cuba.
- Gutiérrez, A., Vega, F., García, R., Moreau, P., & Dieguez, A. (2005). *Características hidrodinámicas de las aguas oceánicas en la región suroccidental de Cuba durante abril de 2005*. Informe inédito. Proyecto: Influencia de las condiciones oceanográficas en el ciclo de vida de larva de la langosta *P. argus* y de peces de interés comercial. (año 2005-2006). Instituto de Oceanología. C. Habana. Cuba.
- Instituto Cubano de Hidrografía. (1982). *Derrotero de las costas de Cuba*. Tomo I y II. La Habana, Cuba. (250pp).
- Johns, W.E., Townsend, T.L., Fratantoni, D.M., & Wilson, W.D. (2003). Cross gyre transport by North Brasil Current ring. In: Goni, G. Malanotte-Rizzoli. 300P. (Eds.), *Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean. Elsevier Oceanographic Series*, (411-441 pp).
- Jouanno, J., Sheinbaum, J., Barnier, B., Molines, J. M., Debreu, L., & Lemarié, F. (2008). *The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: Simulations and characteristics with an embedded model*. *Ocean Modelling*, 23, pp. 82-101.
- Lin, Y. (2010). *Circulation and associated variability in the Intra-Americas Sea: The role of Loop Current intrusion and Caribbean eddies*. Ph.D. Thesis, Dalhousie University, Nova Scotia.



- Molinari, R.L., Spillane, M., Brooks, I., Atwood, D., & Duckett, C.(1981). Surface currents in the Caribbean Sea deduced from Lagrangian observations. *J. Geophys. Res.*, vol.86, pp. 6537–6542.
- Murphy, S. J., Hurlburt, H. E., & O'Brien, J. J.(1999). The connectivity of eddy variability in the Caribbean Sea, The Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, vol. 104, pp. 1431–1453.
- Okubo, A. (1970). Horizontal dispersion of flutable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep-Sea Res.*, 17, pp. 445-454.
- Pond, S. & Pickard, G. L. (1978). *Introductory dynamic oceanography*. Oxford: Pergamon Press. (318pp) .
- Richardson, P. L. (2005). Caribbean current and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Research*, vol. 52 pp429–463.
- Robinson, I. S. (2010). *Discovering the Ocean from Space. The Unique Applications of the Satellite of Oceanography*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.(1-105 pp).
- Venegas, S. A. (2001). *Statistical Methods for Signal Detection in Climate*. Danish Center for Earth system science (Report 2). Denmark: University of Copenhagen. (1-96 pp).
- Victoria, I., Cabal, A., García, R., Hernández, M., Puente, M. & Ramírez, O. (1991). *Caracterización Oceanográfica de la Fosa de Jagua y la Zona Económica Exclusiva al Sur de Cuba* (Informe inédito). Instituto de Oceanología. La Habana, Cuba.
- Weiss, J. (1991). The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics. *Physica D.*, vol. 48., pp. 273-294.

Recibido: abril de 2012.

Aceptado: noviembre de 2012.