

TESIS DEFENDIDA POR  
BÁRBARA ZAVALA TRUJILLO  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Antoine Badan Dagon  
*Director del Comité*



---

Dr. José Luis Ochoa de la Torre  
*Miembro del Comité*



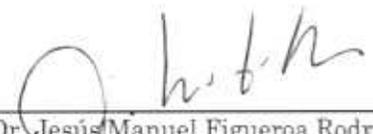
---

Dr. Luis Zavala Sansón  
*Miembro del Comité*



---

Dr. Eugenio Méndez Méndez  
*Miembro del Comité*



---

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez  
*Coordinador del programa de posgrado en  
Oceanografía Física*



---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Encargado del Despacho de la Dirección  
de Estudios de Posgrado*

<<25>> de <<agosto>> de 2008.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

---

**LA MUERTE DE UN REMOLINO**

Descripción de los procesos que genera la disipación de remolinos cálidos en las proximidades del talud occidental del Golfo de México.

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**BARBARA ZAVALA TRUJILLO**

Ensenada, Baja California, México, agosto de 2008

**RESUMEN** de la tesis de **BÁRBARA ZAVALA TRUJILLO**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **OCEANOGRAFÍA FÍSICA**. Ensenada, Baja California. Agosto de **2008**.

## **LA MUERTE DE UN REMOLINO**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Antoine Badan Dangon  
Director de Tesis

La circulación en el Golfo de México occidental está influenciada en gran medida por los remolinos cálidos que se desprenden de la Corriente de Lazo y se propagan hacia el oeste, para disiparse en las cercanías del talud Mexicano. Con el fin de tener una mejor descripción de los procesos que resultan de la colisión de un remolino cálido con el talud continental en el oeste del Golfo de México y conllevan a su disipación, hemos analizado los datos obtenidos de cinco anclajes colocados durante el periodo de agosto 2004 hasta noviembre 2005 frente a las costas de Tamaulipas, configurados en forma de antena para registrar la circulación oceánica desde el borde de la plataforma hasta las profundidades abisales, y a lo largo de una porción del talud continental. Estas observaciones se complementaron con datos de altimetría satelital. Dos remolinos cálidos emitidos por la Corriente de Lazo (Titanic y Ulysses) llegaron al área de estudio durante el periodo de muestreo. El centroide de estos remolinos, durante su traslación, se mantuvo siempre en aguas de profundidad mayor a 2000 m, disipándose entre los 21.5 – 25° latitud N y 93.5– 97° longitud W, frente a las costa de Tamaulipas, México. El campo de velocidades registradas nos sugiere que predominan tres regimenes diferentes en la región de disipación: una capa superficial por encima de los 500 metros de profundidad, influenciada principalmente por los remolinos; un nivel profundo sobre el talud, alrededor de los 2000 m con una corriente persistente hacia el sur y una capa de transición entre las dos primeras (de 500 a 1900 m ) donde los procesos son un reflejo de los generados por las perturbaciones en la superficie. La circulación media alrededor de los 500 m de profundidad para los anclajes sobre el talud continental tiene una dirección costa afuera, pero el eje de máxima variabilidad se da perpendicular a la costa. En cambio, alrededor de los 2000 m de profundidad, el

flujo medio es hacia el sur y las elipses de variación se orientan con la batimetría en esa misma dirección. Una evaluación de la densidad de energía cinética presente en la región de los anclajes en base a la altimetría satelital muestran que ésta aumenta alcanzando un máximo con la llegada de cada remolino y disminuye cuando éste se fracciona y se disipa. La tasa de decaimiento es sorprendentemente similar de un remolino a otro, del orden de  $0.13 \times 10^{-5} \text{ watts} \cdot \text{m}^{-3}$ . Los procesos de circulación sobre el talud que acompañan la disipación de los remolinos genera un intercambio vigoroso de masa y energía entre la plataforma y las aguas mas profundas, como lo ejemplifica el momento en que Titanic y Ulises desaparecen por completo.

**Palabras Clave:** Remolinos anticiclónicos, Golfo de México, decaimiento, Corriente de Lazo, circulación costera.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **BÁRBARA ZAVALA TRUJILLO** as partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **PHYSICAL OCEANOGRAPHY**. Ensenada, Baja California, México. August 2008.

## **THE DEATH OF AN EDDY**

The circulation in the Eastern Gulf of Mexico is mainly modulated by the Loop Current. Warm eddies that are shed from this current propagate westwards and become an important mechanism driving the circulation and thermodynamics of the western Gulf of Mexico. A set of five moorings deployed in front of the coast of Tamaulipas, western Gulf of Mexico, provided fourteen months (from August 2004 to November 2005) of surface to bottom observations of currents and temperature that document the processes associated with the collision and dissipation of two warm mesoscale eddies with the continental slope. Two Loop Current eddies (Titanic and Ulysses) were identified reaching the study area during the observation period. The core of these eddies, during their translation, remained always in water deeper greater than 2000 m, dissipating between 21.5 - 25 ° N latitude and 93.5-97 ° W longitude, off the coast of Tamaulipas, Mexico. The velocity field suggests three different regimes: a coastal region, the continental slope currents, and the abyssal circulation. Over the slope, three different layers can be identified; a surface layer (above 500 m depth), influenced by eddies and others transients, a deep layer (below 1900 m) with a persistent southerly current and a transition layer (from 500 to 1900 m) that separates them. The variance ellipses over the slope at ~ 500 m depth were perpendicular to the coast and the flow had an offshore direction. In contrast, around 2,000 m depth the mean flow is to the south and the orientation of the mayor axis is along the bathymetry. At the northernmost 2000-m mooring, the axis of maximum variation is oriented with the bathymetry, but at the southernmost 2000-m mooring it is perpendicular to the coast. The kinetic energy density was observed in the study area, using satellite altimetry data. Energy peaks were observed when an eddy arrived and decreased when it dissipates. The dissipation rate is surprisingly similar for all eddies, on the order of  $0.96 \times 10^{-9} \cdot \text{watts}$  ( $0.13 \times 10^{-5} \text{ watts} \cdot \text{m}^{-3}$ ). The circulation processes over the slope during the dissipation of the eddies generate a vigorous exchange of mass and energy between the shelf and the deeper waters, as illustrated when Titanic and Ulysses disappear.

**Keywords:** Anticyclones eddies, Gulf of Mexico, Loop Current, energy decrease.

## **DEDICATORIA**

A LA MONSTRITA MÁS HERMOZA “MI AHIJADA” Y SOBRINA VIOLETA.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano que siempre han estado para apoyarme y darme soporte en cuanto proyecto esté realizando.

A mi director de tesis Dr. Antoine Badan Dagon †, por su apoyo y paciencia durante el desarrollo de la tesis. Al mi comité conformado por Dr. José Luis Ochoa de la Torre, Dr. Luis Zavala Sansón y Dr. Eugenio Méndez Méndez, por su tiempo invertido y dedicación.

Al CICESE y su personal por su apoyo durante mi estancia en la institución. Al CONACYT por otorgarme la beca durante dos años y poder realizar los estudios.

A mis compañeros y amigos de la maestría, Axel, Felipe, Sarahí y Rita por compartir esos momentos de estudios y diversión durante estos años.

Y finalmente a todos aquellos que estuvieron conmigo durante mis estudios de maestría, que a pesar del pasar del tiempo y/o la distancia continúan a mi lado.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTOS .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
<b>I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II ANTECEDENTES .....</b>	<b>4</b>
<b>III ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>7</b>
<b>IV DATOS .....</b>	<b>9</b>
IV.1 SERIES DE TIEMPO .....	11
IV.2 DATOS DE ALTIMETRÍA .....	13
<b>V RESULTADOS .....</b>	<b>14</b>
V.1 CAMPO DE VELOCIDADES .....	14
<i>V.1.1 Velocidad Media.....</i>	<i>14</i>
<i>V.1.2 Descripción de las astillas.....</i>	<i>17</i>
V.2 ALTIMETRÍA .....	26
V.3 SERIES DE TIEMPO Y DATOS DE ALTIMETRÍA .....	32
<b>VI DISCUSIONES.....</b>	<b>38</b>
<b>VII CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>VIII BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>52</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 1. BATIMETRÍA DEL GOLFO DE MÉXICO. EL RECUADRO REPRESENTA LA ZONA DONDE SE COLOCARON LOS ANCLAJES. ....	8
FIGURA 2. BATIMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACIÓN DE LOS CINCO ANCLAJES FRENTE A LAS COSTAS DE TAMAULIPAS, EN EL GOLFO DE MÉXICO. ....	9
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LOS ANCLAJES EN EL GOLFO DE MÉXICO, SOBRE EL TALUD CONTINENTAL. ....	10
FIGURA 4. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LOS ANCLAJES MMS1, MMS2, MMS3 Y MMS4. ....	12
FIGURA 5. REGISTRO DE LA TEMPERATURA DE UN ADCP EN EL ANCLAJE MMS5 A 1245 M (FIGURA SUPERIOR), Y DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL INSTRUMENTO (FIGURA INFERIOR). ....	12
FIGURA 6. ELIPSES DE VARIACIÓN. (A) A LA IZQUIERDA CORRESPONDE A ~ 400 M DE PROFUNDIDAD Y (B) A LA DERECHA A ~ 750M. ....	15
FIGURA 7. ELIPSES DE VARIACIÓN A 30 M DEL FONDO. EL FLUJO MEDIO SOBRE LA PLATAFORMA Y EL TALUD CONTINENTAL PRESENTA UNA DIRECCIÓN SUR. ....	15
FIGURA 8. CIRCULACIÓN MEDIA ( $\text{cm s}^{-1}$ ) SOBRE EL TALUD CONTINENTAL CORRESPONDIENTE A LOS ANCLAJES MMS1, MMS4 Y MMS5. LA VELOCIDAD ZONAL Y SU DESVIACIÓN ESTÁNDAR SE MUESTRAN EN LA PARTE SUPERIOR; Y LA VELOCIDAD MERIDIONAL EN LA PARTE INFERIOR. ....	17
FIGURA 9. ESQUEMA DE LA VELOCIDAD HORIZONTAL (U,V) PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES CORRESPONDIENTE AL ANCLAJE MMS1. ....	18
FIGURA 10. ESQUEMA DE ASTILLAS CORRESPONDIENTE AL MMS2 LOCALIZADO SOBRE EL TALUD CONTINENTAL EN LA ISÓBATA DE LOS 2000 M. ....	20
FIGURA 11. ESQUEMA DE ASTILLAS CORRESPONDIENTE AL ANCLAJE MMS3, EN LA ISÓBATA DE LOS 2000 M. ....	21
FIGURA 12. ESQUEMA DE ASTILLAS PARA EL ANCLAJE MMS4, UBICADO EN LA PARTE NORTE SOBRE LA ISÓBATA DE LOS 2000 M. ....	22
FIGURA 13. ESQUEMA DE ASTILLAS PARA EL ANCLAJE MMS5, LOCALIZADO EN LA PARTE ABISAL DEL GOLFO A 3500 M. ....	23
FIGURA 14. ESPECTROS DE VARIANZA CORRESPONDIENTE A MMS5 A 30 METROS DEL FONDO. EL LADO IZQUIERDO ES EL CORRESPONDIENTE A LA VELOCIDAD ZONAL Y EL LADO DERECHO A LA VELOCIDAD MERIDIONAL. ....	24

## Índice de figuras (*continuación*)

FIGURA 15. ESPECTROS DE VARIANZA CORRESPONDIENTES A LOS ANCLAJES SOBRE EL TALUD CONTINENTAL, A 30 METROS DEL FONDO EN TRES ÉPOCAS DIFERENTES DEL AÑO. ( --- ) PERÍODO DE SEPTIEMBRE – ENERO, ( - - - ) PERÍODO DE ENERO A JUNIO Y ( - - - ) PERÍODO DE JUNIO A NOVIEMBRE.....	25
FIGURA 16. ALTIMETRÍA DEL GOLFO DE MÉXICO (CM) DE AGOSTO HASTA DICIEMBRE DE 2004, DONDE SE OBSERVA A ULYSSES (27°N – 88°W) Y TITANIC (22°N – 95°W) EN FIGURA ( A ). .....	27
FIGURA 17. ALTIMETRÍA DEL GOLFO DE MÉXICO (CM), SE OBSERVA LA SEPARACIÓN DE ULYSSES ( A ) Y SU UNIÓN ( E ) DURANTE EL PERIODO COMPRENDIDO DE DICIEMBRE DEL 2004 HASTA MAYO DE 2005.....	28
FIGURA 18. DISTANCIA ENTRE LOS REMOLINO ULYSSES N Y ULYSSES S, SEPARADOS DURANTE CUATRO MESES ANTES DE UNIRSE Y VOLVER A FORMAR UN SOLO ULYSSES. ....	29
FIGURA 19. ALTIMETRÍA DEL GOLFO DE MÉXICO (CM) DONDE SE OBSERVA EL DESVANECIMIENTO DE ULYSSES Y EL PASO DE VORTEX, DURANTE EL PERIODO DE AGOSTO HASTA DICIEMBRE DE 2004. ....	30
FIGURA 20. TRAYECTORIA DE LOS CUATRO REMOLINOS ANTICICLÓNICOS DESPRENDIDOS DE LA CORRIENTE DE LAZO DURANTE LOS PERIODOS DE DICIEMBRE DE 2003 HASTA NOVIEMBRE DE 2005. EL RECUADRO ROJO INDICA LA ZONA DONDE SE DISIPARON LOS REMOLINOS.....	31
FIGURA 21. EN LA FIGURA SUPERIOR SE MUESTRA LA TEMPERATURA REGISTRADA A ~ 700M PARA CUATRO ANCLAJES Y LA FIGURA INFERIOR REPRESENTA LA SALINIDAD TOMADA A ~ 695 M. ....	33
FIGURA 22. ESQUEMA HORIZONTAL DE ASTILLAS CORRESPONDIENTES A LOS ~ 60 M DE PROFUNDIDAD PARA LOS ANCLAJES MMS1 AL MMS4 DONDE SE IDENTIFICA TITANIC (T), ULYSSES (U), VORTEX (V) Y LOS CICLONES C1, C4 Y C5. ....	35
FIGURA 23. ESQUEMA DE ASTILLAS A ~700 M DE PROFUNDIDAD PARA LOS ANCLAJES MMS2 AL MMS5, DONDE SE IDENTIFICAN TITANIC (T), ULYSSES (U), VORTEX (V) Y LOS CICLONES C1 Y C4. ....	36
FIGURA 24. DENSIDAD DE ENERGÍA CINÉTICA INTEGRADA EN LA COLUMNA DE AGUA PARA CADA UNO DE LOS ANCLAJES (VER EQ. 2). LA LÍNEA ROJA REPRESENTA EL TIEMPO QUE ESTUVO PRESENTE UN REMOLINO ANTICICLÓNICO Y LA LÍNEA AZUL UNO CICLÓNICO. ....	41
FIGURA 25. DENSIDAD DE ENERGÍA CINÉTICA INTEGRADA EN LA COLUMNA DE AGUA (EC) CALCULADA EN BASE A LA ALTIMETRÍA (EC <sub>0</sub> ) PARA LOS ANCLAJES MMS2, MMS3 Y MMS4 UBICADOS SOBRE LA ISÓBATA DE LOS 2000 M. ....	42
FIGURA 26. ÁREA, RECUADRO NEGRO, UTILIZADA PARA CALCULAR IEC Y OBSERVAR EL TIEMPO DE DISIPACIÓN DE LOS REMOLINOS ANTICICLÓNICOS.....	44

### Índice de figuras (*continuación*)

FIGURA 27. ÍNDICE DE ENERGÍA CINÉTICA CORRESPONDIENTE AL ÁREA COMPRENDIDA ENTRE LOS 21.4° - 26.6° N Y 92° - 96.7° W DURANTE EL PERIODO DE MUESTREO A PARTIR DE LOS DATOS DE ALTIMETRÍA. LA ECT SE MULTIPLICÓ POR $\rho_o$ (1022.9 KG·M <sup>-3</sup> ) PARA OBTENER UNIDADES DE JOULE.....	45
FIGURA 28. FLUJOS DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LAS FRONTERAS DEL ÁREA INTEGRADA. LAS SERIES SE MULTIPLICARON POR $\rho_o$ (1022.9 KG·M <sup>-3</sup> ) PARA OBTENER UNIDADES DE WATT. ....	47
FIGURA 29. ESQUEMA DE ASTILLAS PARA LOS ANCLAJES MMS2 (LADO IZQUIERDO) Y MMS3 (LADO DERECHO) A DIFERENTES PROFUNDIDADES. SE OBSERVA EL FLUJO HACIA EL SUR AL MOMENTO QUE ULYSSES PASA SOBRE LOS ANCLAJES.....	48

## Índice de Tablas

TABLA I. UBICACIÓN Y PROFUNDIDAD EN LAS QUE SE COLOCARON LOS ANCLAJES. ....	10
TABLA II. RADIO DE LOS REMOLINOS ANTICICLÓNICOS AL MOMENTO DE LLEGAR A 98° W Y DISTANCIA DE MÁXIMO ACERCAMIENTO A LA COSTA. ....	31
TABLA III. RADIO DE LOS REMOLINOS CICLÓNICOS QUE SE GENERARON EN LAS CERCANÍAS DE LOS REMOLINOS CÁLIDOS. ....	32
TABLA IV. FACTOR PROPORCIONAL ( $\alpha$ ) PARA LOS DISTINTOS ANCLAJES, CON SU RESPECTIVA INCERTIDUMBRE ( $\varepsilon$ ), LA CUAL ESTÁ DEFINIDA COMO ( $\varepsilon = EC - \alpha EC_G$ ). ....	43
TABLA V. TASA DE DISIPACIÓN PARA CADA REMOLINO ANTICICLÓNICO QUE AFECTÓ EL ÁREA DE ESTUDIO. ....	46

# I INTRODUCCIÓN

La circulación del Golfo de México esta influenciada en gran medida por los remolinos cálidos que se desprenden de la Corriente de Lazo, y que forman parte integral de la dinámica y termodinámica del golfo. Los remolinos anticiclónicos son estructuras que provienen normalmente de corrientes intensas, las cuales son hidrodinámicamente inestables, aunque el mecanismo preciso por el cual se desprenden sigue siendo un misterio. Una vez que se separa el remolino, su comportamiento es totalmente independiente de la corriente.

Los remolinos en cuestión consisten de grandes masas de agua en rotación anticiclónica que son más salinas y cálidas, pero menos densas que las circundantes. Estos remolinos son generados por el estrangulamiento del meandro que forma la Corriente de Lazo y se desprenden en intervalos aproximados de 6 a 11 meses (Sturges *et al.*, 2000; Leben, 2005); poseen además un tiempo de vida que abarca desde semanas hasta alrededor de un año. La configuración de estos remolinos consiste de una lente de agua cálida con una elevación de la superficie del océano, a la que le corresponde un hundimiento de la termoclina debido a que capturan agua de la zona donde fueron formados, trasladándola hacia otras regiones. Por ello constituyen un mecanismo importante de distribución de sal, momentum y otras propiedades oceanográficas dentro del golfo. Las dimensiones de estos remolinos llegan a ser de 100

hasta 400 km de diámetro (Elliott, 1982), extendiéndose frecuentemente a una profundidad de ~800 metros (Vukovich, 1986), con velocidades internas tangenciales de 50 - 70  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  registradas a distancias de 50 - 80 km sobre el radio del remolino (Lewis *et al.*, 1989). Tras desprenderse de la Corriente de Lazo, se propagan hacia el oeste - suroeste del golfo (Ichiye, 1962; Elliott, 1982) con una velocidad del orden de 5  $\text{km}\cdot\text{día}^{-1}$  (Vukovich, 2006). El movimiento zonal hacia el oeste de los remolinos es bien conocido (Vukovich, 2006), y se debe al efecto que causa la variación latitudinal del parámetro de Coriolis (efecto beta) en el remolino, y el desplazamiento meridional de las partículas que lo rodean al momento de su traslación, las cuales van adquiriendo vorticidad relativa e inducen a que el remolino se propague hacia el oeste (Cushman-Roisin *et al.*, 1990).

Al momento que el remolino se desprende de la Corriente de Lazo y comienza a trasladarse, se relaciona con diversos factores físicos y dinámicos que se le presentan en la zona donde se desarrolló. Intercambia lentamente propiedades en las direcciones horizontal y vertical con las aguas que los rodean, interactúa con corrientes fuertes, paredes y escalones presentes en la topografía o induce ondas que se dispersan. Estos procesos conducen a la destrucción paulatina de los remolinos, de tal forma que su diámetro se habrá reducido un ~30% al momento que alcanzan el talud continental al oeste del Golfo de México (Vukovich y Crissman, 1986, Vukovich, 2006), donde opera la mayor parte de su disipación. Esta disipación es importante, porque en ese proceso ocurre una redistribución de momentum, vorticidad y otras propiedades termodinámicas en el océano, de la que resulta corrientes y un reacomodo de masa que afectan la región en donde ocurre el proceso. Igualmente tiene una importancia considerable porque es un proceso que impacta al intercambio de agua sobre el talud y

sobre la plataforma continental y en el bombeo de nutrientes. Desde el punto de vista práctico, las actividades petroleras se ven afectadas por el paso de los remolinos, que provocan el paro de operaciones por cuestiones de seguridad debido a las altas velocidades que provocan el arrastre o torsión de estructuras de la plataforma.

Sabiendo que estos remolinos se desprenden de la Corriente de Lazo y llegan al talud continental de México, se colocaron anclajes frente a las costas de Tamaulipas para detectar los procesos que acompaña a la disipación de un remolino. Este trabajo sintetiza con base a observaciones de correntómetros, los procesos físico-oceanográficos que resultan de la colisión de un remolino cálido, proveniente de la Corriente del Lazo, con el talud continental, además de la circulación que resulta de la presencia y disipación del remolino.

## II ANTECEDENTES

La importancia de los remolinos ha suscitado numerosos estudios anteriores, teóricos, numéricos y de observaciones para entender su dinámica y comportamiento, en particular de los remolinos anticiclónicos que se desprenden de la Corriente de Lazo.

Elliott (1982) fue uno de los primeros que propuso que los remolinos anticiclónicos provenientes de la Corriente de Lazo son una parte integral de la circulación de la cuenca. Concluye, utilizando datos hidrográficos, que los anillos generalmente se mueven hacia la frontera oeste con una velocidad de traslación media de  $2.1 \text{ km}\cdot\text{día}^{-1}$ , al igual que son el mecanismo principal por el cual se redistribuye la sal en la cuenca.

Vukovich y Crissman (1986) y Vukovich (2006), con varias décadas de datos obtenidos a partir de cruceros hidrográficos, imágenes de satélites y datos de altimetría, proponen que los anillos viajan hacia el oeste del golfo con una velocidad media de 5 km por día, siguiendo tres trayectorias principales, por el talud norte, cruzando por el centro del golfo y por una trayectoria hacia el sur; también observaron que a los 150 días de desprenderse los remolinos de la Corriente de Lazo, su diámetro había disminuido en un 45% y a los 300 días se había reducido a un 30% de su tamaño inicial. Por otro lado, Vukovich y Waddell (1991) siguieron la evolución de dos remolinos desprendidos de la Corriente de Lazo, hasta que estos chocaron con el talud continental del Golfo de México occidental. Observaron que al chocar, el remolino toma una forma elíptica, apareciendo un remolino ciclónico mucho más pequeño (100 km)

asociado al anticiclónico y que en el momento en el que el anillo se mueve hacia el talud continental se desarrolla en la capa superficial, entre el remolino y la costa, un flujo hacia el norte de agua más cálida.

Respecto a estudios con modelos teóricos - numéricos, Csanady (1979) obtuvo, utilizando un modelo de dos capas, el tiempo de decaimiento de un remolino cálido en función del coeficiente fricción, concluyendo que la fricción lateral entre el flujo en rotación en el remolino y las aguas circundantes tiende a ser más importante en el decaimiento del remolino que la pérdida de masa. Zavala *et al.* (1998) y Nof (1999) estudiaron específicamente la colisión de un remolino cálido con una pared meridional occidental. Los primeros trabajaron con un remolino con vorticidad potencial diferente de cero y Nof (1999) con uno con vorticidad potencial nula, pero ambos encontraron que al momento de la colisión con la pared, el remolino mantiene su forma circular y por la parte sur - oeste del remolino, pegado a la frontera, existe una expulsión de masa hacia el sur, provocando su traslación hacia el norte, a lo que le llamaron “efecto cohete” (rocket effect). También Zavala *et al.*, (1998) obtuvieron de manera analítica y numérica el desplazamiento meridional del remolino al momento de alcanzar la frontera oeste. Utilizan dos parámetros adimensionales  $\beta$  y  $\varepsilon$  definidos como:

$$\beta = \frac{\beta_o R}{f_o} \quad \text{y} \quad \varepsilon = \frac{\omega}{f_o} \quad \text{donde involucran el radio del remolino } (R) \text{ y la}$$

frecuencia angular ( $\omega$ );  $f_o$  y  $\beta_o$  son el parámetro de Coriolis y la variación latitudinal. Llegaron a la conclusión que al tiempo que el vórtice interactúa con la pared, su movimiento hacia el sur o norte depende del radio inicial  $r = \varepsilon/\beta$ . Cuando el movimiento meridional es hacia el sur,  $r$  es mayor que 1, siendo consistente con la

solución analítica, lo que muestra que el movimiento meridional es necesario para que exista un balance con la fuerza ejercida por el muro. En cambio si  $r$  es menor que  $1$ , el remolino inicialmente se dirige al norte y posteriormente al sur, siendo este caso no concluyente de forma analítica debido a que el movimiento meridional depende de la distribución de la masa a lo largo del muro. Y finalmente Itoh y Sugimoto (2001) utilizaron un modelo con las ecuaciones primitivas en coordenadas sigma para ver el efecto de un remolino cálido al acercarse a una pendiente en el oeste. Obtuvieron, para el caso con la pendiente similar a la presente al oeste del Golfo de México, que el anillo se mueve primero hacia el suroeste (0 -50 días) y posteriormente al norte. Aun cuando la pendiente es suave, causa un efecto de imagen, al igual que si fuese una pared.

### III ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de México (figura 1), ubicado al este de México, entre los 80° – 98° longitud W y 18° – 32° latitud N, es un mar semicerrado el cual se comunica al este con el océano Atlántico por el estrecho de Florida y al sureste con el Mar Caribe por medio del canal de Yucatán. Tiene un área de  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$  y la parte central del Golfo de México es una cuenca que presenta una profundidad máxima de 3804 m y esta rodeada por una plataforma continental, de anchura variable, que en nuestra zona de interés es del orden de  $\sim 97 \text{ km}$ . Es una región afectada durante el verano por tormentas tropicales que con frecuencia llegan a tener intensidad de huracán y de septiembre a mayo por los “nortes”, vientos intensos asociados al paso de frentes invernales.

Del Canal de Yucatán al estrecho de Florida se forma la Corriente de Lazo, la cual conforma la parte inicial del sistema de la Corriente de Florida y la Corriente del Golfo. Esta corriente afecta en gran medida la circulación del Golfo de México, debido a los meandros y remolinos anticiclónicos que se desprenden de ella funcionan como uno de los principales mecanismos forzantes de la circulación anticiclónica que se presenta en el golfo occidental, reportada inicialmente por Elliott (1982). Otros de los factores que dictan la dinámica en el golfo son el transporte de masa que entra por el Canal de Yucatán,  $23 - 27 \text{ Sv}^1$  (Sheinbaum, 2002), y sale por el Estrecho de Florida; y la variación estacional de los vientos que provocan una corriente costera con dirección

---

<sup>1</sup> Unidad de medida para el transporte en la oceanografía la cual equivale a  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ .

sur durante el otoño e invierno, e invirtiendo su sentido en el verano debido a que los vientos provienen del sur (Morey *et al.*, 2005). Además, existen configuraciones semipermanentes de circulación ciclónica sobre la plataforma continental de Lousiana y Texas, EEUU y en la Bahía de Campeche, México (DiMarco *et al.*, 2005).

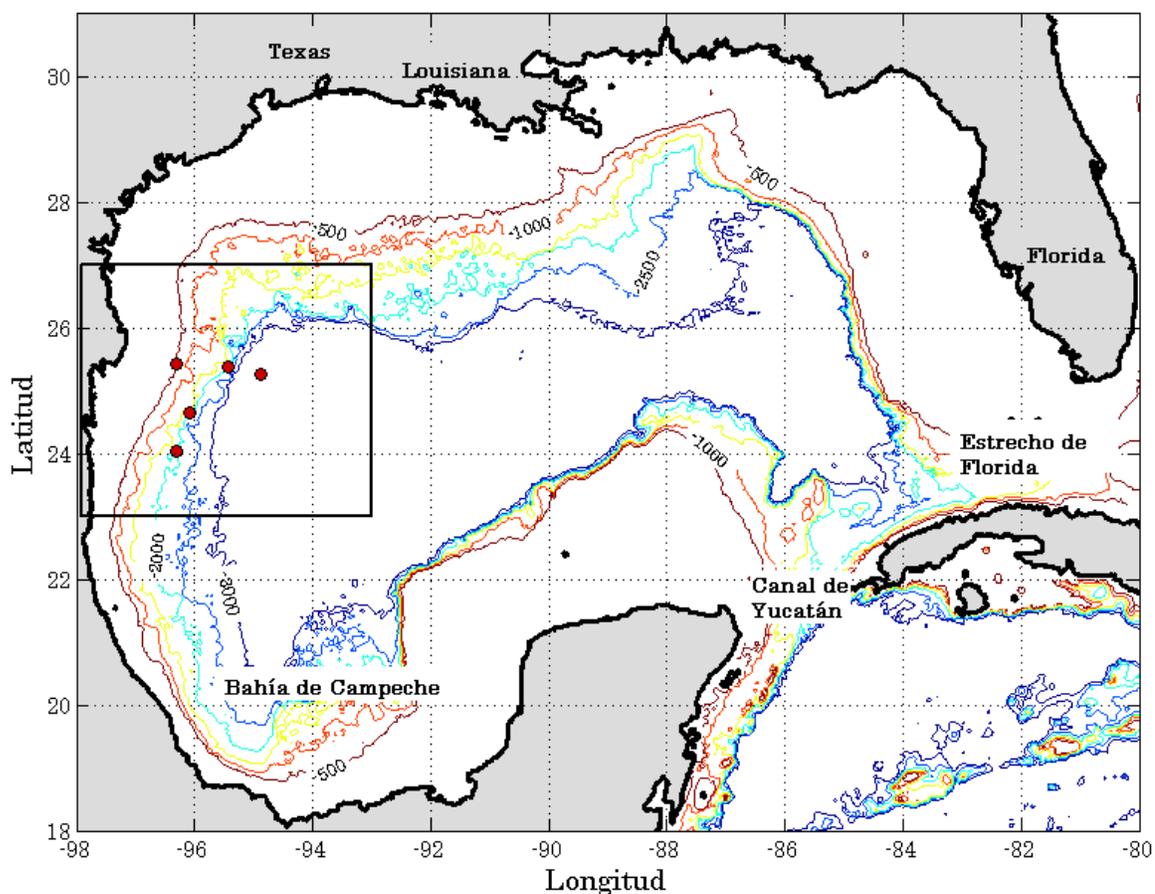
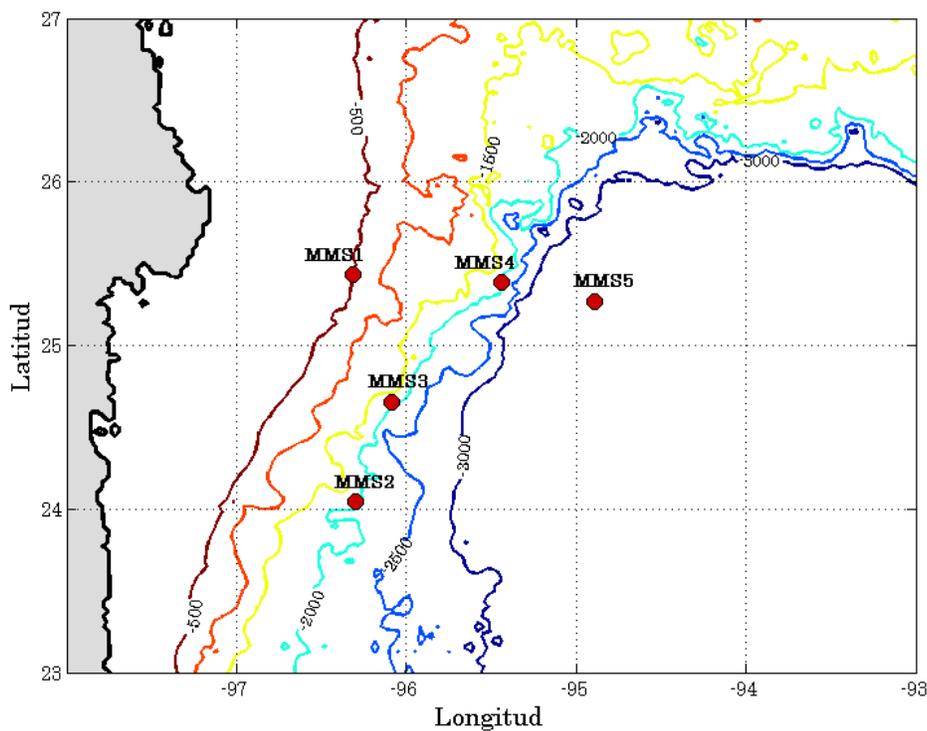


Figura 1. Batimetría del Golfo de México. El Recuadro representa la zona donde se colocaron los anclajes.

## IV DATOS

En asociación con otros anclajes situados en aguas territoriales de EEUU se distribuyeron cinco anclajes entre los  $94^{\circ}$  -  $97^{\circ}$  longitud W y  $24^{\circ}$  -  $26^{\circ}$  latitud N sobre el talud continental, frente a las costas de Tamaulipas, México (figura 2).



**Figura 2.** Batimetría del área de estudio y localización de los cinco anclajes frente a las costas de Tamaulipas, en el Golfo de México.

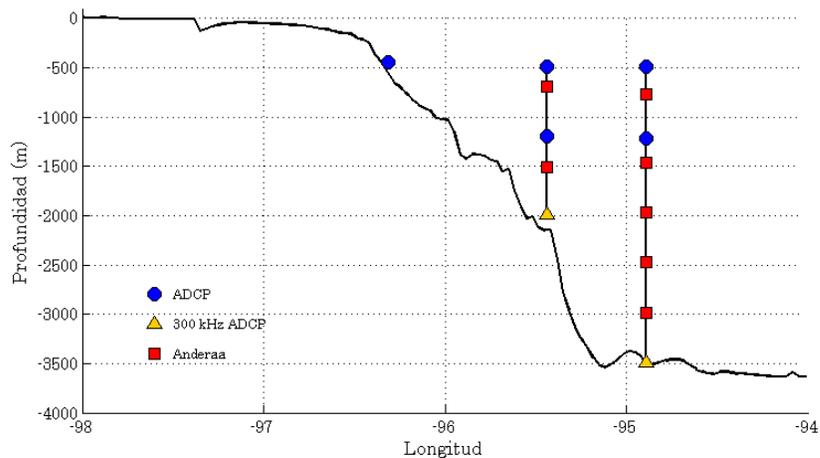
Dichos anclajes fueron colocados en agosto del 2004 y recuperados en noviembre del 2005, con excepción del anclaje MMS1, que requirió ser recolocado en

diciembre de 2004, obteniendo así observaciones de velocidades, temperatura y salinidad en niveles específicos desde el fondo hasta la superficie. Los tirantes de agua en los que se colocaron fueron de aproximadamente 500 m, 2000 m y 3500 m (tabla I).

**Tabla I. Ubicación y profundidad en las que se colocaron los anclajes.**

Anclaje	Longitud W (°)	Latitud N (°)	Profundidad (m)
MMS1	96.31	25.43	445
MMS2	96.30	24.04	2003
MMS3	96.08	24.65	1996
MMS4	95.43	25.38	2000
MMS5	94.88	25.27	3524

La distribución vertical de los instrumentos en los anclajes se muestra en la figura 3. La boya subsuperficial en la parte superior de cada anclaje cuenta con un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) el cual registró cada 30 minutos las velocidades de los primeros 500 m superiores de la columna de agua. Para observar el resto de la columna se distribuyeron cuatro ADCP's en los cuatro anclajes más profundos, además de once correntómetros Anderaa que registraron velocidades cada hora (figura 3). Todos los instrumentos contaban con un sensor de temperatura.



**Figura 3. Distribución vertical de los anclajes en el Golfo de México, sobre el talud continental.**

Desafortunadamente, dos de los ADCP's no funcionaron, uno ubicado en la parte superior del anclaje MMS5 (489 m) y el otro en aguas intermedias (1198 m) en el anclaje MMS3, por lo que se perdió en parte la capacidad de registrar la llegada de los remolinos a la zona de estudio.

#### *IV.1 Series de Tiempo*

Las series de tiempo obtenidas de los instrumentos recibieron el siguiente tratamiento. De los datos registrados cada 30 minutos, se obtuvo un promedio para convertirlos en datos horarios por medio de un filtro construido de la siguiente manera:

$$\tilde{u}_t = 0.25 * u_{t-j} + 0.5 * u_t + 0.25 * u_{t+j} \quad (1)$$

donde  $\tilde{u}_t$  es la serie de salida,  $u_{t+j}$  es la serie de entrada con  $j = \pm 1$  para la muestra media hora anterior o posterior a  $j = 0$ , diezmándose la serie a datos horarios.

Posteriormente a los datos horarios de velocidad y temperatura se les aplicó un filtro paso bajo de Lanczos con un periodo de corte de 48 horas para separar frecuencias superiores a la inercial ( $0.848 \text{ dia}^{-1}$ ) y fueron diezmados en intervalos de seis horas.

Cada anclaje contaba con un sensor de presión que permitió determinar el desplazamiento vertical del instrumento, causado por el balance dinámico de tensión, arrastres y flotación del anclaje. Para comparar este movimiento en los cinco anclajes, se tomó el registro del instrumento más cercano a la superficie y se sustrajo la media y

así el movimiento de todos los anclajes quedó con el mismo nivel de referencia. Del anclaje MMS1 al MMS4 el máximo desplazamiento vertical fue de 5.4 m (figura 4).

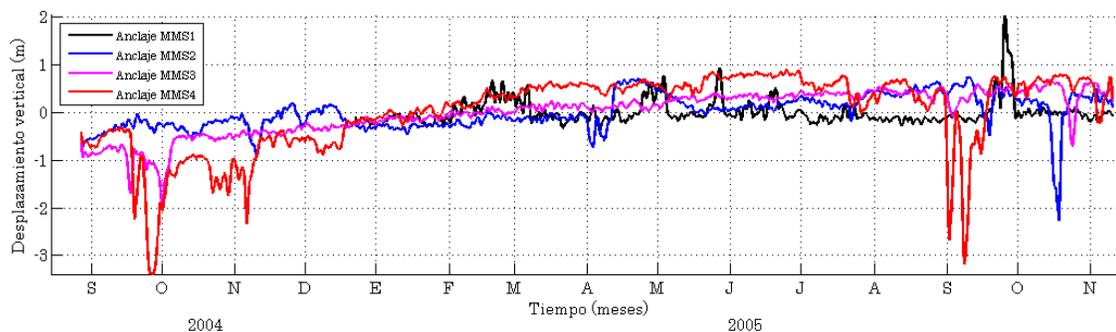


Figura 4. Desplazamientos verticales de los anclajes MMS1, MMS2, MMS3 y MMS4.

De los cinco anclajes el máximo desplazamiento vertical se registró en el MMS5, cuyo valor fue de 71 metros y que ocurrió a mediados de marzo (figura 5).

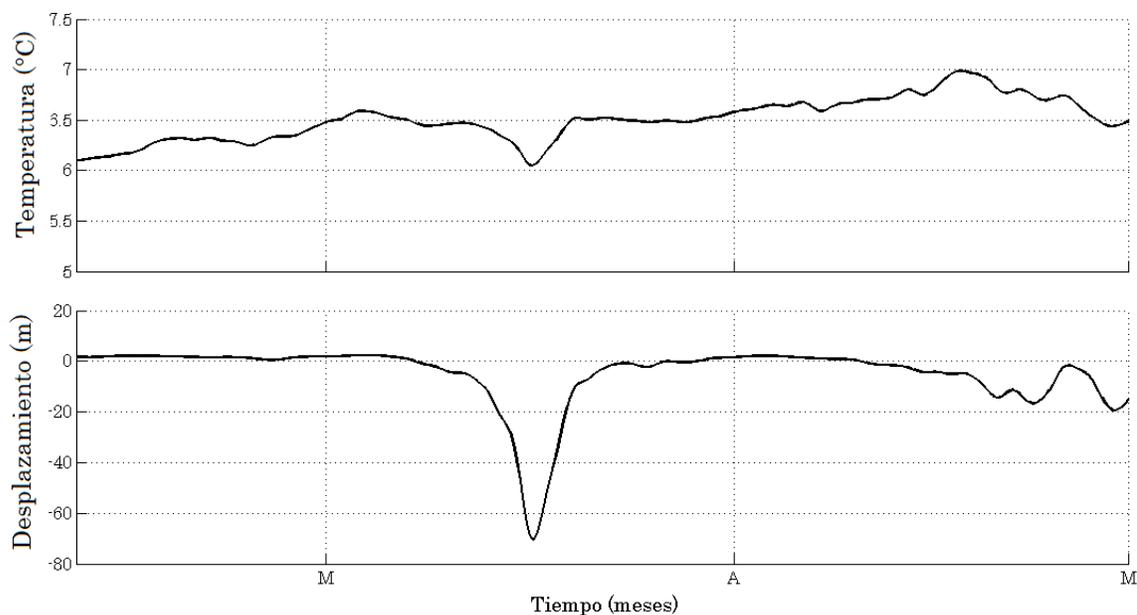


Figura 5. Registro de la temperatura de un ADCP en el anclaje MMS5 a 1245 m (figura superior), y desplazamiento vertical del instrumento (figura inferior).

Durante este movimiento la temperatura disminuyó  $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$  y, dado que la desviación estándar de la serie de tiempo de la temperatura es de  $\pm 0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no se consideró necesario hacer correcciones de la temperatura asociadas con la variación en profundidad. Este movimiento se debió aparentemente a un evento en que se intensificó la corriente cerca del fondo.

#### *IV.2 Datos de Altimetría*

Para la visualización de los remolinos se utilizaron datos de anomalías del nivel del mar basados en datos multisatelitales (Topex-Poseidon, Jason-1 y GFO), los cuales están disponibles en el sitio de internet de AVISO<sup>2</sup>; estos datos cuentan con una resolución espacial de  $1/3^{\circ}$  y una resolución temporal de 3.5 días. Los datos de AVISO permiten observar y caracterizar la existencia de remolinos en el área de estudio, en particular para el periodo de muestreo de los cinco anclajes.

---

<sup>2</sup> <http://las.aviso.oceanobs.com/las/servlets/dataset>

## V RESULTADOS

### *V.1 Campo de Velocidades*

#### **V.1.1 Velocidad Media**

Se obtuvo la velocidad media de los cinco anclajes a diferentes profundidades y sus respectivas elipses de variación. En la totalidad de los casos se mostró que la media es inferior a las elipses de variación como se observa en las figuras 6 y 7.

En la región más somera, sobre los ~500 m, se tuvo que el flujo medio presentó una dirección sur con su eje de máxima variabilidad paralelo a la costa. A la misma profundidad, pero con los anclajes sobre el talud continental, el flujo medio presentó una dirección perpendicular a la costa; hacia el noreste para los anclajes MMS2 y MMS3 y sureste para el anclaje MMS4. El eje de máxima variabilidad se orientó con la batimetría para el caso del anclaje MMS4 y de manera perpendicular para los anclajes MMS2 y MMS3. Este comportamiento del flujo medio en los anclajes sobre el talud se presenta hasta aproximadamente los 800 m de profundidad, pero con una magnitud menor (figura 6).

Más cerca del fondo, el flujo medio se orienta de nuevo con la batimetría girando en sentido anticiclónico hasta tomar una dirección sur. En la figura 7 se tienen las elipses de variación, para los cinco anclajes, sobre 30 m del fondo y se observa que el eje de máxima variabilidad está orientado con la batimetría, a excepción del anclaje

MMS3. En la parte abisal, el flujo presentó una dirección zonal hacia el oeste, y sobre la plataforma y el talud continental el flujo tuvo una dirección hacia el sur.

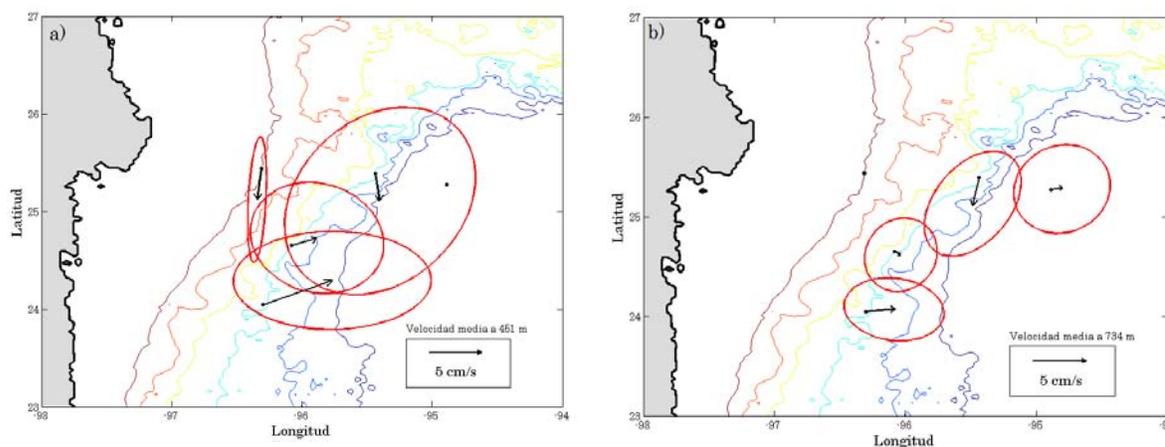


Figura 6. Elipses de variación. ( a ) A la izquierda corresponde a  $\sim 400$  m de profundidad y ( b ) a la derecha a  $\sim 750$  m.

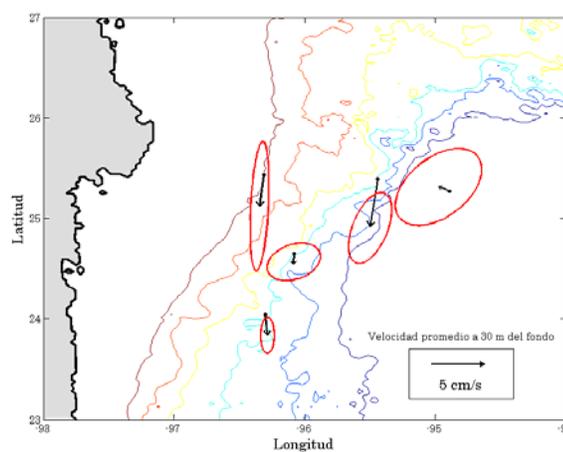


Figura 7. Elipses de variación a 30 m del fondo. El flujo medio sobre la plataforma y el talud continental presenta una dirección sur.

Este flujo hacia el sur forma una capa límite profunda la cual ha sido previamente reportado por Welsh y Inoue (2000) y DeHaan y Sturges (2005). Los

últimos autores proponen que el flujo medio en la parte profunda del golfo presenta una dirección ciclónica en la parte este y oeste del golfo con velocidades del orden de 1 a  $2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a una profundidad de 2000 m y argumentan que los factores que contribuyen a este mecanismo son el estiramiento de los vórtices y la rectificación de las ondas topográficas. Por otro lado, Welsh y Inoue (2000) explican que el flujo toma una dirección ciclónica debido a que se forman un dipolo ciclónico – anticiclónico debajo del anillo cálido desprendido de la Corriente de Lazo; el anillo anticiclónico decae más rápido que el ciclónico, por lo que este último domina el flujo profundo.

En la figura 8 se muestra la circulación media sobre el talud continental. Durante el periodo de muestreo, se obtuvo que la velocidad zonal ( $u$ , este - oeste) se presentó más intensa y con dirección este en la superficie ( $6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y llegando a los  $2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  antes de los 500 m. En el resto de la columna de agua las velocidades son débiles, menores a  $1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , y solo en la parte más profunda del anclaje MMS4 se logra ver una pequeña intensificación, alcanzando una velocidad de  $1.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  con dirección este. Esta velocidad registró su mayor variabilidad sobre la superficie en el anclaje MMS4, antes de los 500 m. La velocidad meridional ( $v$ , norte - sur) es menos constante sobre el talud continental con respecto a su magnitud y dirección. Se observa que en la región más somera (MMS1) principalmente tiene dirección norte, solamente cerca del fondo cambian su dirección hacia el sur. En cambio sobre  $\sim 2000 \text{ m}$  (MMS4), se registró que la velocidad media presentó principalmente una dirección sur, llegando a registrarse las velocidades más intensas en el fondo de  $\sim 6.6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Y en la parte abisal (MMS5) la velocidad media tiene dirección norte con intensidades menores a  $1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . La mayor variabilidad se observó arriba de los 500 m.

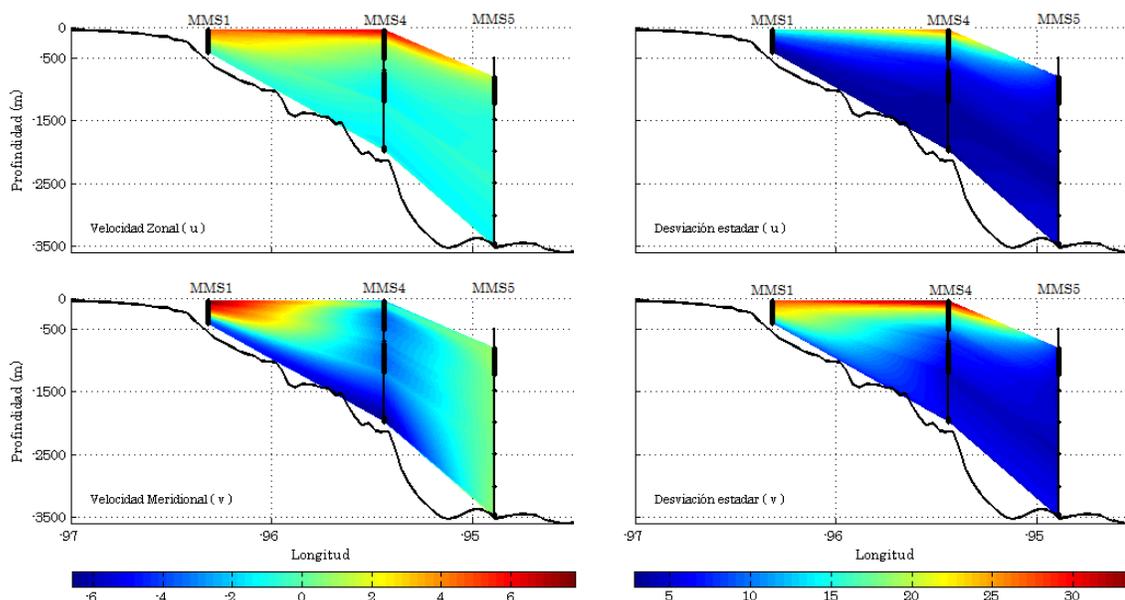


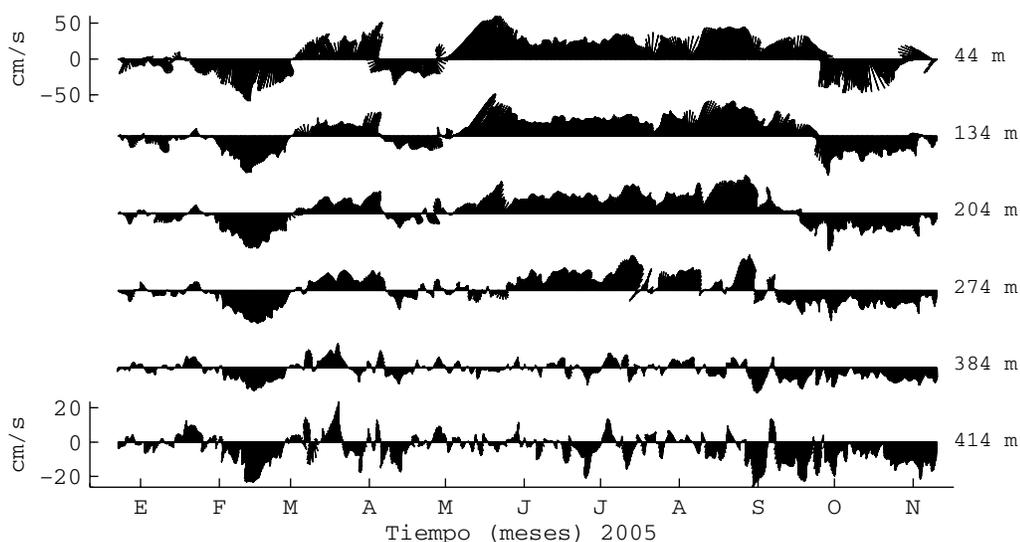
Figura 8. Circulación media ( $\text{cm s}^{-1}$ ) sobre el talud continental correspondiente a los anclajes MMS1, MMS4 y MMS5. La velocidad zonal y su desviación estándar se muestran en la parte superior; y la velocidad meridional en la parte inferior.

### V.1.2 Descripción de las astillas

Con los vectores de velocidad horizontal ( $u, v$ ) de cada uno de los anclajes se graficaron las series de tiempo a diferentes profundidades, mostrando en las figuras solo las que se consideran representativas, para así observar su comportamiento a lo largo de la columna de agua.

El anclaje más somero MMS1 (figura 9), se encuentra en la isóbata de los 500 m y es el más cercano a la costa. Se observó que las velocidades en dicho anclaje tienen una dirección predominante hacia el norte - sur; cambiando el sentido en periodos de uno a dos días y manteniendo la misma dirección por espacios de uno hasta ocho meses. En las primeras capas superficiales, arriba de los 250 m, existe una gran

coherencia en el comportamiento de la corriente, y la intensidad de las velocidades van disminuyendo conforme a la profundidad. Esto se observa claramente a mediados de marzo de 2005, donde la corriente es de  $34 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a 44 m y de  $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a 204 m; y a inicios de mayo de 2005 con velocidades de  $83 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a 44 m y de  $46 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a 204 m, siendo en este mes donde se registró la máxima velocidad durante el periodo de muestreo. En cambio, en las capas subsecuentes, después de los 300 m, se sigue manteniendo el cambio en la dirección de la corriente, pero el tiempo que mantiene la misma dirección es menor, perdiéndose de esta forma la coherencia con las capas superficiales.



**Figura 9. Esquema de la velocidad horizontal (u,v) para diferentes profundidades correspondiente al anclaje MMS1.**

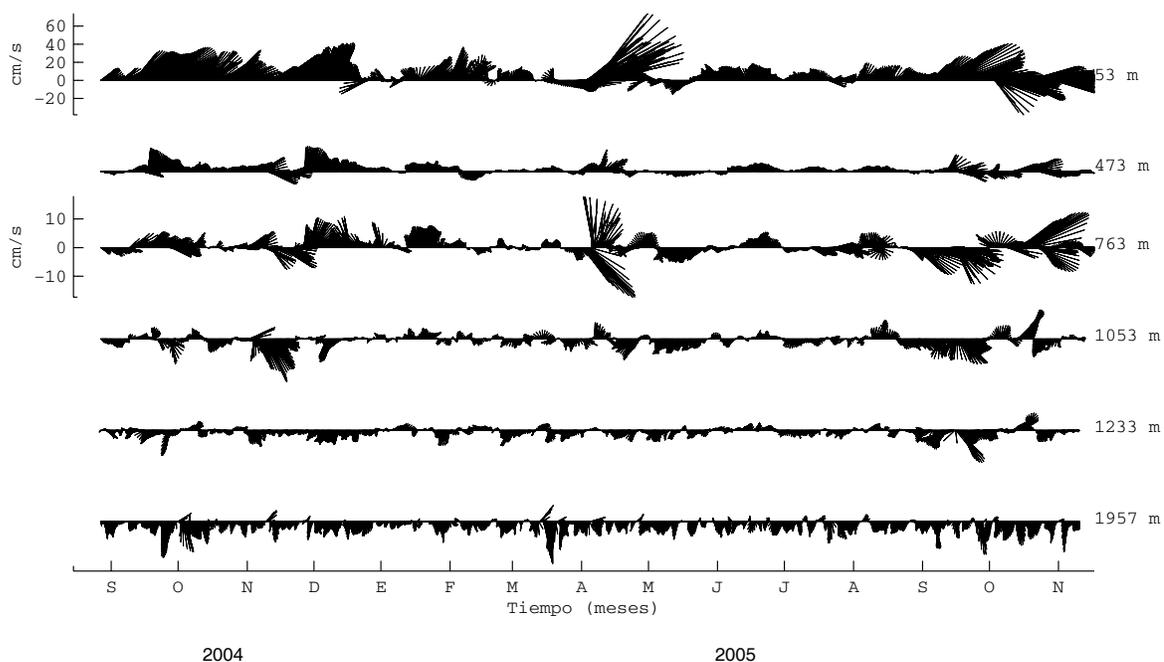
Sin embargo, existen dos periodos donde se observó que la corriente es coherente a lo largo de toda la columna de agua pero disminuyendo su magnitud conforme se acerca al fondo; uno durante febrero de 2004 y el otro en octubre de 2005; registrando

velocidades de  $59 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $49 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  en la superficie y de  $23 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $0.8 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  en el fondo, respectivamente (figura 9). Esto se debió a la presencia de remolinos ciclónicos y a que en estos meses los valores del rotacional del viento son mínimos (Sturges, 1993 y DiMarco *et.al.*, 2005) por lo que no causan una intensificación del flujo hacia el norte.

Los anclajes MMS2, MMS 3 y MMS 4, localizados en la isóbata de los 2000 m sobre el talud continental, muestran un comportamiento similar entre ellos. En la capa superficial están influenciados por los remolinos o perturbaciones que pasan por el área de estudio. Se puede ver como algunas de estas perturbaciones se transmitieron a través de la columna de agua, solo que las velocidades generadas son atenuadas con la profundidad, llegando en algunos casos a observarse tal influencia hasta aproximadamente los 400 m.

La figura 10 muestra las astillas correspondientes al anclaje MMS2, el cual registró las velocidades en la parte sur del área de estudio sobre el talud continental. En las capas superficiales, durante septiembre a diciembre de 2004 se observó que la corriente presentó dirección noreste; a inicios de abril de 2005 se registró un flujo intenso ( $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con dirección este, influenciando hasta una profundidad de  $\sim 600$  m; desde mayo hasta inicios de septiembre de 2005 el flujo tuvo una velocidad por debajo de los  $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , incrementándose en septiembre de 2005 hasta los  $80 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  con una dirección hacia fuera de la costa. Entre los  $\sim 700$  m y los 1000 m, a inicios de abril de 2005 se presentó una corriente intensa con una magnitud de  $24 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y dirección sureste la cual duró aproximadamente tres días; posteriormente en un día y medio el flujo cambia de sentido hacia el norte alcanzando una magnitud de  $18 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y manteniéndose por poco menos de tres días. En las capas más profundas, entre los 1920 y 1990 m se registró una corriente hacia el sur que es persistente en casi todo el

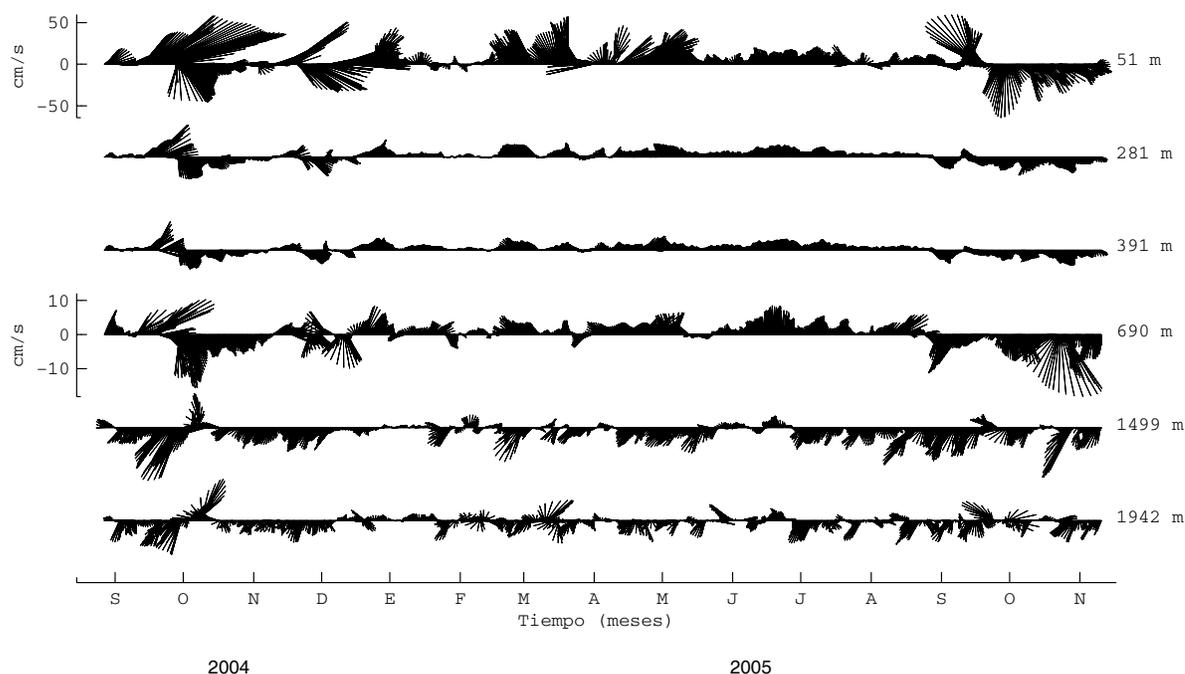
periodo de muestreo siendo más intensa a finales de septiembre de 2004 ( $12.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y a mediados de marzo de 2005 ( $15 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 10.** Esquema de astillas correspondiente al MMS2 localizado sobre el talud continental en la isóbata de los 2000 m.

El anclaje MMS3 (figura 11) fue el que registró la máxima velocidad superficial de los cinco anclajes durante el periodo de muestreo a finales de septiembre de 2004 teniendo una magnitud de  $145 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  con dirección noreste. Además se presentaron otros periodos con altas velocidades como son en noviembre ( $87 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y diciembre ( $80 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) del mismo año y a mediados de abril ( $88 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y septiembre ( $80 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) de 2005, siendo el segundo parte de un giro ciclónico. El campo de velocidades mostró alta coherencia dentro de los primeros 690 m, al igual que las capas de los 1450 m hasta los 1974 m. Se ignora el comportamiento entre los 690 m y 1450 m debido a la ausencia de

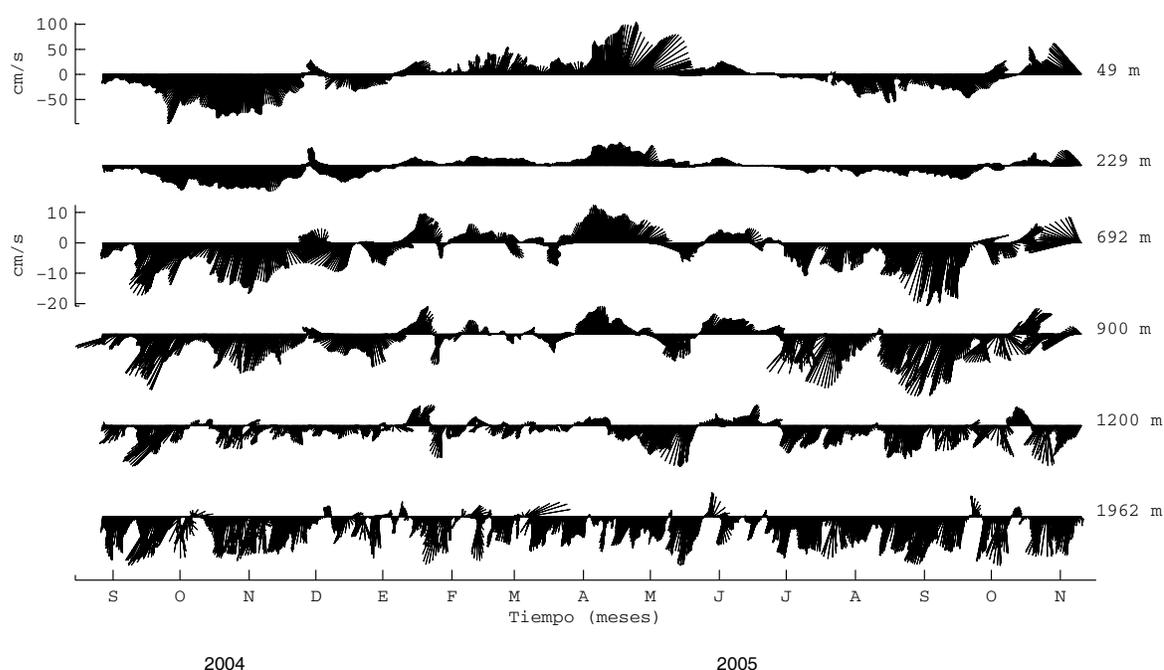
datos. Sin embargo a partir de los 1450 m se observó una corriente hacia el sur, pero con periodos en los que la corriente varía de dirección, como es el caso en octubre de 2004, donde la velocidad cambia su sentido mediante un giro ciclónico que duró aproximadamente ocho días, y durante los meses de marzo y septiembre de 2005, donde realizan un giro anticiclónico con una duración de aproximadamente cinco días.



**Figura 11. Esquema de astillas correspondiente al anclaje MMS3, en la isóbata de los 2000 m.**

El esquema de astillas correspondientes al anclaje MMS4 está representado en la figura 12. Este es el que se encuentra más al norte de los tres anclajes ubicados en la isóbata de los 2000 m, formando con MMS1 y MMS5 una línea este-oeste. Durante septiembre del 2004 a enero del 2005 las astillas de las capas superficiales tuvieron una dirección del suroeste al sureste, registrándose la máxima velocidad ( $107 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a principios de octubre del 2004 y observándose en diciembre del mismo año un giro

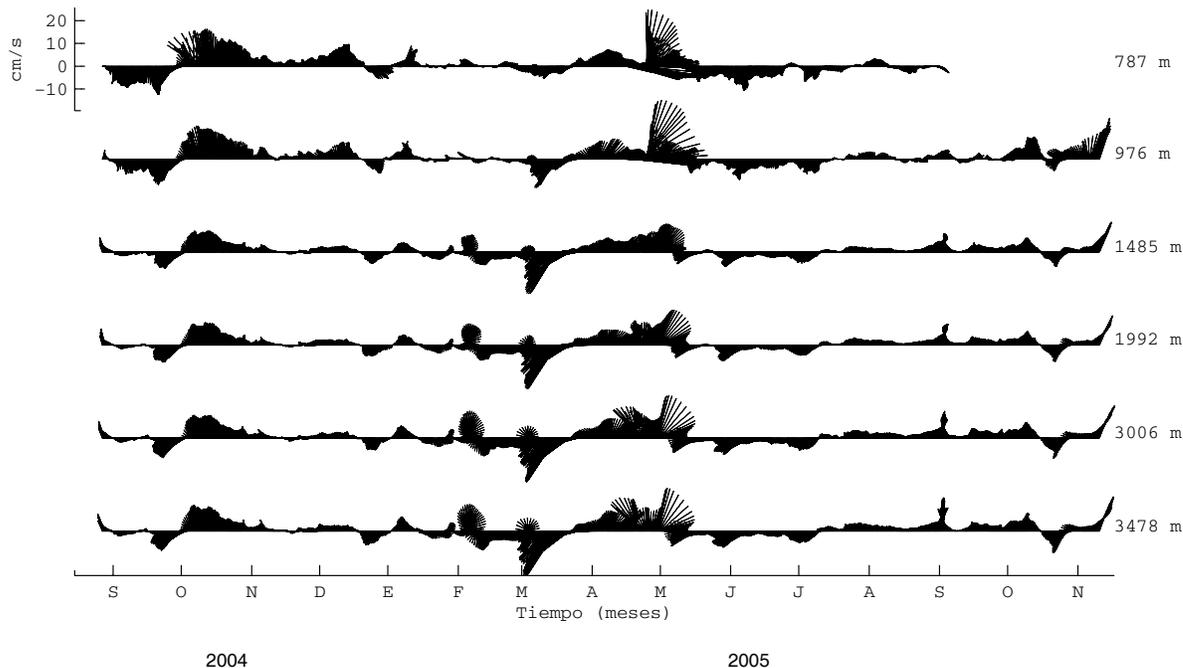
ciclónico. Otro mes en el que se registraron dos máximos de velocidad fue en abril de 2005, ambos siendo de  $107 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y con una dirección noreste. A finales del periodo de muestreo en los últimos días de octubre, se observó un giro ciclónico y posteriormente en los primeros días de noviembre de 2005 la corriente se incremento llegando a  $81 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y con dirección noroeste. En este anclaje se puede ver una alta coherencia hasta los 1200 m, perdiéndose solo esporádicamente. Para las capas profundas a partir de los 1900 m hasta los 1978 m se registró una corriente predominante hacia el sur, al igual que en el anclaje MMS2, pero con una mayor intensidad siendo su máxima velocidad ( $21 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a finales de septiembre de 2004.



**Figura 12.** Esquema de astillas para el anclaje MMS4, ubicado en la parte norte sobre la isóbata de los 2000 m.

Finalmente en el anclaje MMS5 (figura 13), que solo tiene datos a partir de los 787 m, debido a que se perdió el registro del instrumento superficial, se observa alta

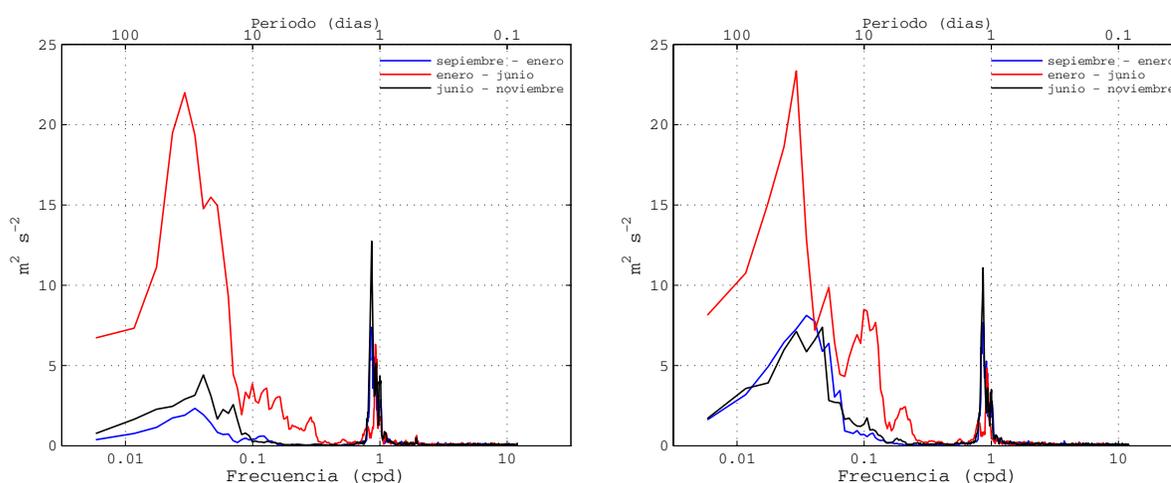
coherencia a lo largo de la columna de agua. Solo hay que resaltar que para el mes de febrero, en profundidades mayores de 1480 m, tenemos la presencia de un remolino ciclónico que dura aproximadamente 15 días. En el mes de marzo se registró una corriente hacia el sur cuya magnitud va aumentando conforme aumenta la profundidad; pasa de  $15 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a 945 m hasta alcanzar un valor de  $24 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  a los 3478 m, lo que provocó que los instrumentos en este anclaje tuvieran un desplazamiento en la vertical de 71 m.



**Figura 13. Esquema de astillas para el anclaje MMS5, localizado en la parte abisal del golfo a 3500 m.**

Para analizar a mayor detalle el aumento de la velocidad con la profundidad se realizó el espectro de energía (figura 14) para la serie de tiempo en la que se presentó la máxima velocidad, que corresponde a los 3490 m. Para ambas velocidades, zonal y meridional, se dividió en tres períodos comprendidos el primero de septiembre de 2004

hasta enero de 2005, el segundo de mediados de enero hasta junio de 2005 y el tercero de junio hasta final del muestreo en noviembre de 2005. Se sabe que en el segundo periodo se presentó la intensificación de la velocidad con la profundidad, y observando los espectros de energía existe un pico correspondiente a  $\sim 40$  días. Hamilton (1990) y Oey y Lee (2002) identificaron este tipo de intensificación como una onda topográfica de Rossby con periodos entre 38 a 300 días.



**Figura 14. Espectros de varianza correspondiente a MMS5 a 30 metros del fondo. El lado izquierdo es el correspondiente a la velocidad zonal y el lado derecho a la velocidad meridional.**

En los espectros de energía sobre el talud continental para las velocidades zonal y meridional (figura 15) no mostraron bajas frecuencias tan energéticas. La energía estaba concentrada principalmente en la marea o en los movimientos inerciales que para el caso de esta zona es de 1.18 días.

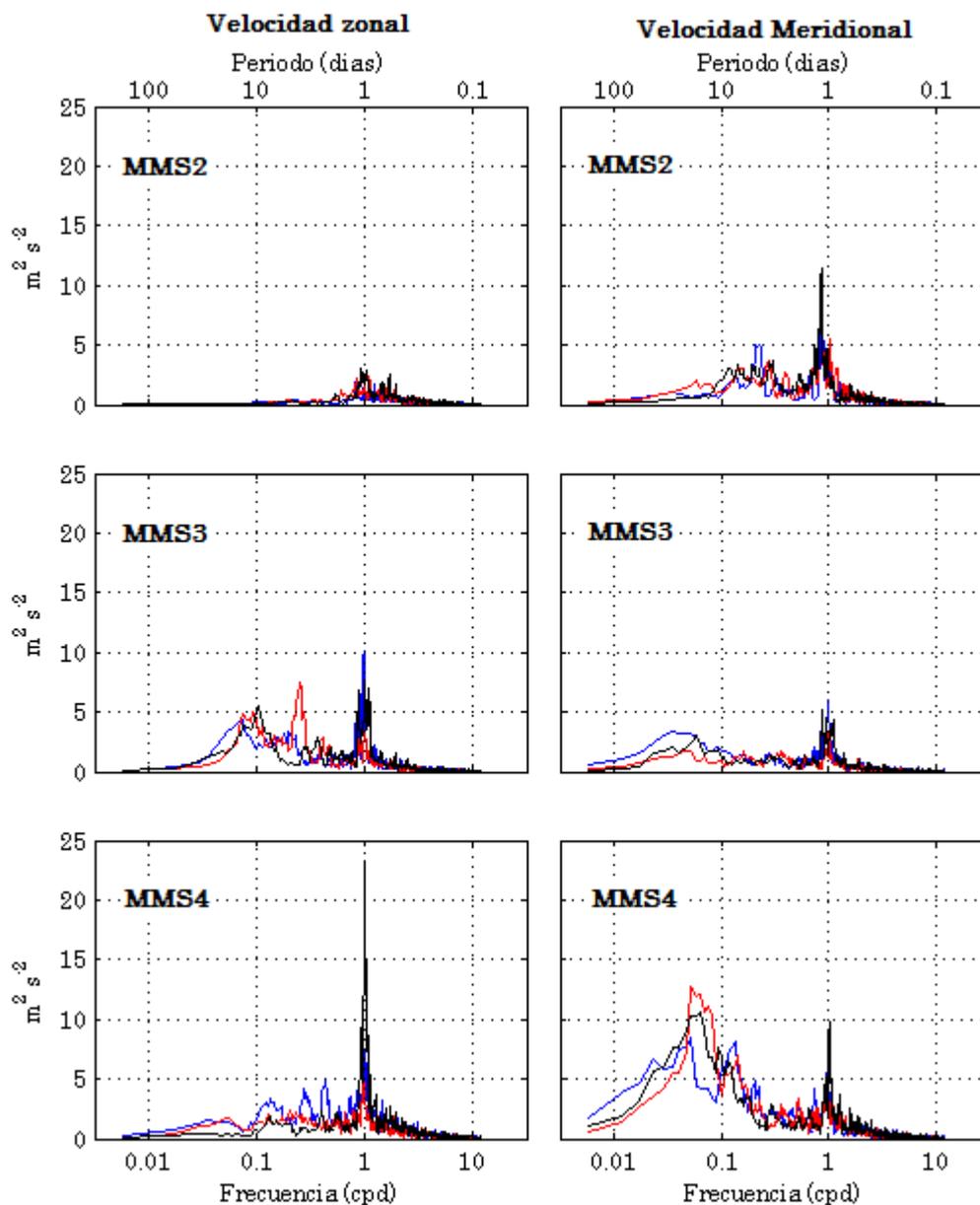


Figura 15. Espectros de Varianza correspondientes a los anclajes sobre el talud continental, a 30 metros del fondo en tres épocas diferentes del año. (---) período de septiembre – enero, (---) período de enero a junio y (---) período de junio a noviembre.

Una vez observado el comportamiento de la corriente en los diversos anclajes se pueden separar a los anclajes de tres categorías. La primera queda formada por el

anclaje MMS1, con flujos principalmente hacia el norte o sur; la segunda categoría por los anclajes MMS2, MMS3, y MMS4, donde las aguas someras son influenciadas por las perturbaciones en la superficie, y el fondo donde existe la presencia de una capa límite con un flujo predominante hacia el sur; y finalmente la tercera por el anclaje MMS5.

## *V.2 Altimetría*

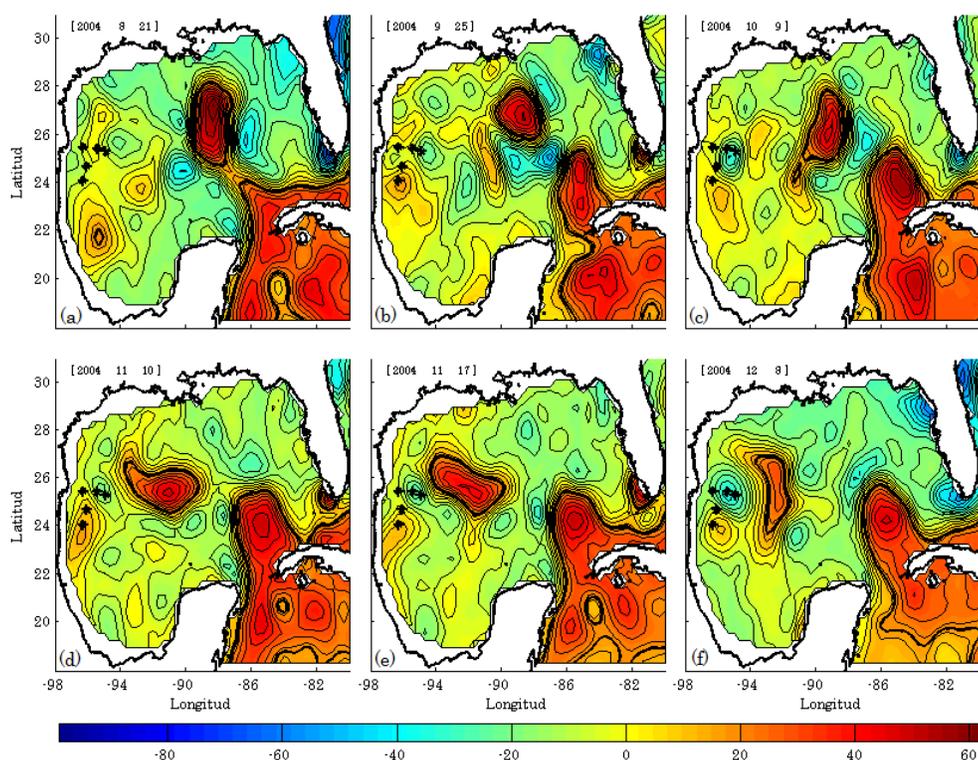
La evolución de los remolinos anticiclónicos desprendidos de la Corriente de Lazo durante el periodo de muestreo se presenta a detalle en los mapas construidos a partir de los datos de altimetría (figura 16 al 18), manifestándose un remolino como una estructura circular coherente. Tres remolinos principales afectaron al área de estudio. El primero, liberado el 31 de diciembre de 2003, fue nombrado “Titanic”; posteriormente el 15 de septiembre de 2004 se separó “Ulysses” y finalmente el 17 de septiembre de 2005 se desprendió “Vortex”. El nombre de los remolinos que se separaron de la Corriente de Lazo se tomó de los adjudicados por la empresa Horizon Marine, Inc<sup>3</sup>, en su programa EddyWatch™. Este programa sigue la convención de ponerles el nombre a los remolino por orden alfabético en secuencia cronológica de separación de la Corriente de Lazo.

Al momento de separarse el remolino Titanic, viajó hacia el sur-oeste del golfo; el 28 de agosto de 2004 se ubicó a los 95.64° W y 21.53° N. Al alcanzar la isóbata de los 2000 m, comenzó a viajar hacia el norte hasta llegar a los 96° W y 24° N el 15 de

---

<sup>3</sup> <http://horizonmarine.com/namedlces.html>

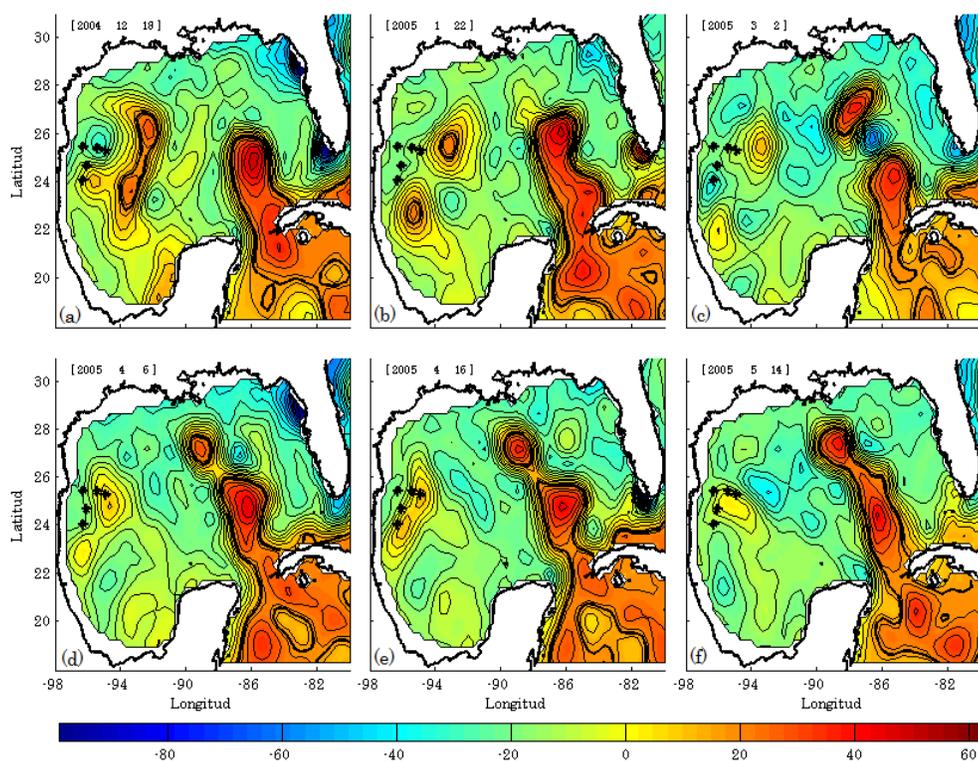
septiembre de 2004, desapareciendo el 18 de diciembre de 2004 (figura 16). El 7 de agosto se observó una estructura ciclónica (C1) a  $94.25^{\circ} \text{W} - 25.25^{\circ} \text{N}$  y para el 15 de septiembre de 2004 comenzó a moverse hacia el oeste, para mantenerse hasta el 25 de diciembre de 2004 sobre el talud continental (figura 16c).



**Figura 16.** Altimetría del Golfo de México (cm) de agosto hasta diciembre de 2004, donde se observa a Ulysses ( $27^{\circ}\text{N} - 88^{\circ}\text{W}$ ) y Titanic ( $22^{\circ}\text{N} - 95^{\circ}\text{W}$ ) en figura (a).

El remolino Ulysses, después de su separación de la corriente de Lazo, empezó a viajar hacia el oeste del golfo acompañado de un pequeño ciclón (C2) al sur de él (figura 16e). El 20 de noviembre Ulysses choca con la estructura ciclónica presente sobre el talud continental (C1). El remolino C2 se unió con C1, “impidiendo” la entrada

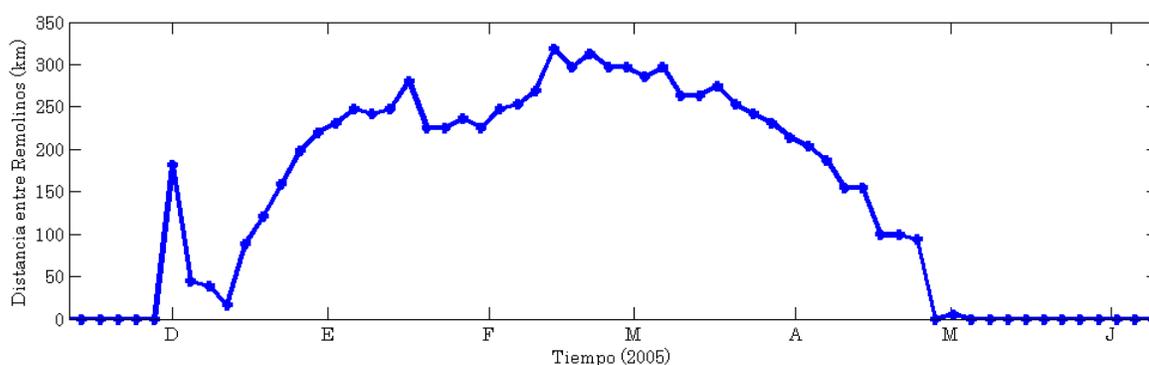
de Ulysses al talud continental ( $95.5^{\circ}$  W –  $25.25^{\circ}$  N) (figura 16f). Cuando estas estructuras ciclónicas quedaron completamente unidas (1 de diciembre de 2004) Ulysses se dividió en dos, manteniéndose una mitad a la latitud de  $25.25^{\circ}$  N (Ulysses N) y la otra desplazándose hacia el suroeste (Ulysses S) del golfo (figura 17a).



**Figura 17.** Altimetría del Golfo de México (cm), se observa la separación de Ulysses ( a ) y su unión ( e ) durante el periodo comprendido de diciembre del 2004 hasta mayo de 2005.

Ulysses S viaja hasta los  $96^{\circ}$  W y  $22^{\circ}$  N donde permanece de febrero hasta abril de 2005, y se puede observar al norte de él la formación de una estructura ciclónica (C5) que dura del 19 de febrero de 2005 hasta el 2 de abril de 2005 (figura 17c). El 19 de marzo del 2005 el remolino Ulysses S empieza a viajar hacia el norte. El 16 de

marzo de 2005 el remolino en el norte (Ulysses N) comenzó a moverse hacia el talud y el 27 de abril de 2005 se encuentran nuevamente unidos los dos remolinos (el del norte y el de sur, Ulysses F) (figura 17e y 17f). El tiempo que el remolino Ulysses permaneció dividido fue de cuatro meses, de finales de noviembre 2004 hasta finales de abril del 2005. Durante este periodo la distancia máxima a la que se separaron fue de 321 km en el mes de febrero (figura 18).

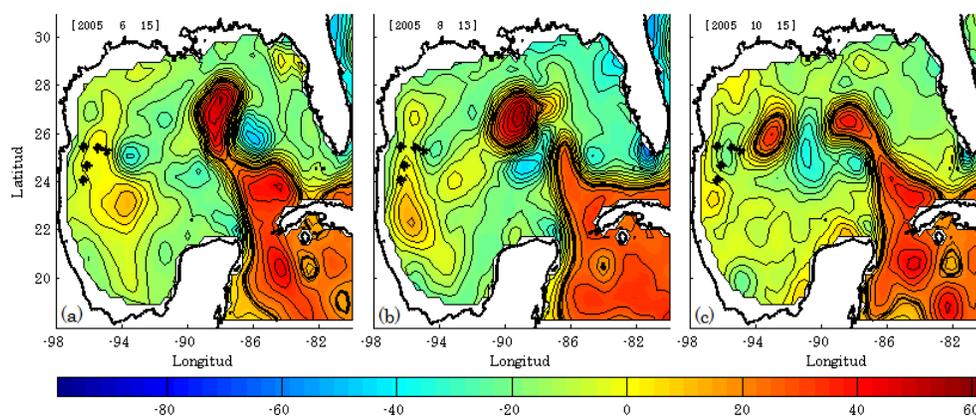


**Figura 18.** Distancia entre los remolino Ulysses N y Ulysses S, separados durante cuatro meses antes de unirse y volver a formar un solo Ulysses.

Cuando el remolino Ulysses N inició su desplazamiento hacia el talud la estructura ciclónica fusionada (C1-C2) es empujada hacia el norte, donde desaparece el 12 de marzo de 2005. Para el 25 de mayo de 2005, Ulysses F comienza a moverse hacia el sur, realizando un giro anticiclónico hasta los 22° N y regresando hasta 24° N para desaparecer el 10 de septiembre de 2005 (figura 19a).

Otras estructuras ciclónicas se observaron durante el período de muestreo. El ciclón C4 apareció el 2 de febrero de 2005, el cual viajó hacia el oeste a la derecha de Ulysses N y entró el 21 de septiembre de 2005 a la zona de los anclajes donde

permanece hasta el final del muestreo. El ciclón C3 se formó al sureste de Ulysses el 3 de noviembre de 2004 viajando hacia el suroeste hasta posicionarse al sur de Ulysses S después de su separación y desapareciendo el 8 de junio de 2005. Vortex, se desprendió de la Corriente de Lazo el 17 de septiembre de 2005, viajó hacia el oeste y llegó a la zona de los anclajes el 2 de noviembre de 2005 proviniendo del sur (figura 19).



**Figura 19.** Altimetría del Golfo de México (cm) donde se observa el desvanecimiento de Ulysses y el paso de Vortex, durante el periodo de agosto hasta diciembre de 2004.

Al centro del círculo menor observado en un anticiclón se le consideró como el “centro” del remolino. Para cada uno de los anticiclones se siguió su “centro” obteniendo así su trayectoria (figura 20). Cada remolino tomo una dirección diferente, primero Titanic, que duró un total de once meses, se fue hacia el sur-oeste del golfo y al llegar al talud toma dirección hacia el norte. Ulysses, con un año de vida, cruzó el golfo por el centro y por último Vortex, que duró seis meses, se fue siguiendo el talud norte. Coincidentemente, estas tres trayectorias son representativas de las obtenidas por Vukovich y Crissman (1986) con 11 años de datos y Vukovich (2006) con 23 años de datos.

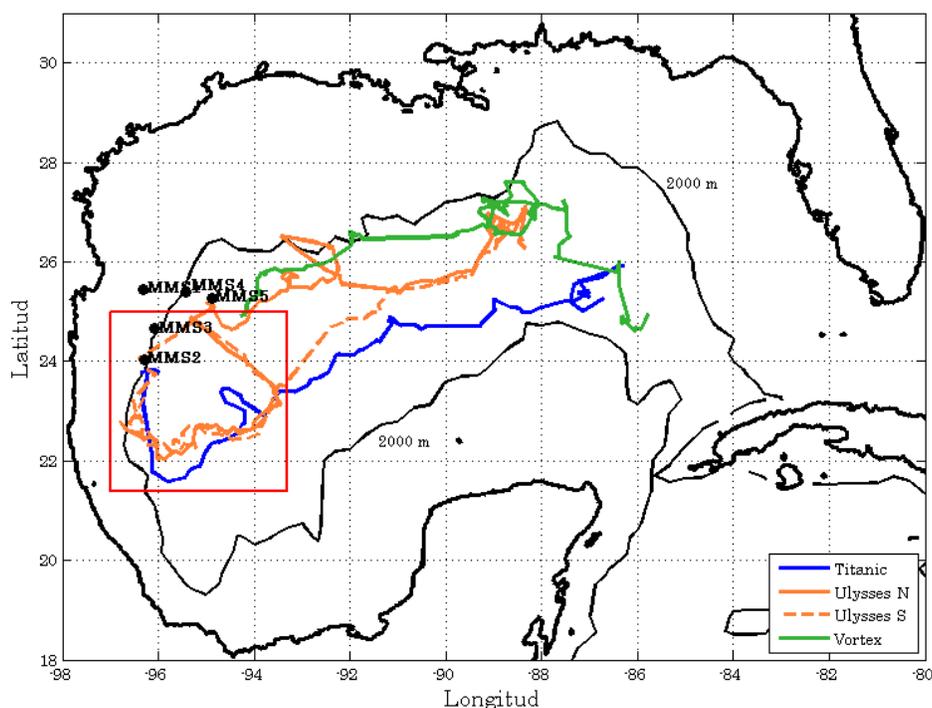


Figura 20. Trayectoria de los cuatro remolinos anticiclónicos desprendidos de la Corriente de Lazo durante los periodos de diciembre de 2003 hasta noviembre de 2005. El recuadro rojo indica la zona donde se dispararon los remolinos.

A partir de las trayectorias de los remolinos se pudo obtener cual fue la distancia mínima entre la costa y el centro de cada remolino (Tabla II). El remolino que más se acercó a la costa de Tamaulipas fue Titanic, llegando a una distancia de 166 km y el que menos se acercó fue Ulysses N que se quedó a 400 km fuera de la costa.

Tabla II. Radio de los remolinos anticiclónicos al momento de llegar a 98° W y distancia de máximo acercamiento a la costa.

Anticiclón	Radio zonal (km)	Radio meridional (km)	Distancia de la costa (km)	Velocidad Tangencial ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Titanic	106	133	166	40
Ulysses	295	167	555	103
Ulysses N	194	166	400	71
Ulysses S	111	111	177	57
Ulysses fusionado	139	164	311	56
Vortex	67	111	200	93

En la tabla III se muestran las dimensiones de los remolinos ciclónicos que se generaron a los alrededores de los remolinos anticiclónicos; siendo siempre de menor tamaño a éstos. Sin embargo C1 fue el más grande de todos los ciclones, que chocó con Ulysses y provocó que se dividiera en dos.

**Tabla III. Radio de los remolinos ciclónicos que se generaron en las cercanías de los remolinos cálidos.**

Ciclón	Radio zonal (km)	Radio meridional (km)	
C1	122	83	Divide a Ulysses
C2	67	55	Viaja al suroeste de Ulysses
C3	88	88	Al noreste de Ulysses S
C4	67	67	Choca Titanic
C5	77	78	Al norte de Ulysses S

La relación entre el tamaño y tiempo de vida de los anticiclones parece ser de manera directa. Es decir Ulysses que fue el que presentó el radio mayor duró un año, en cambio Vortex que fue el más pequeño solo vivió seis meses.

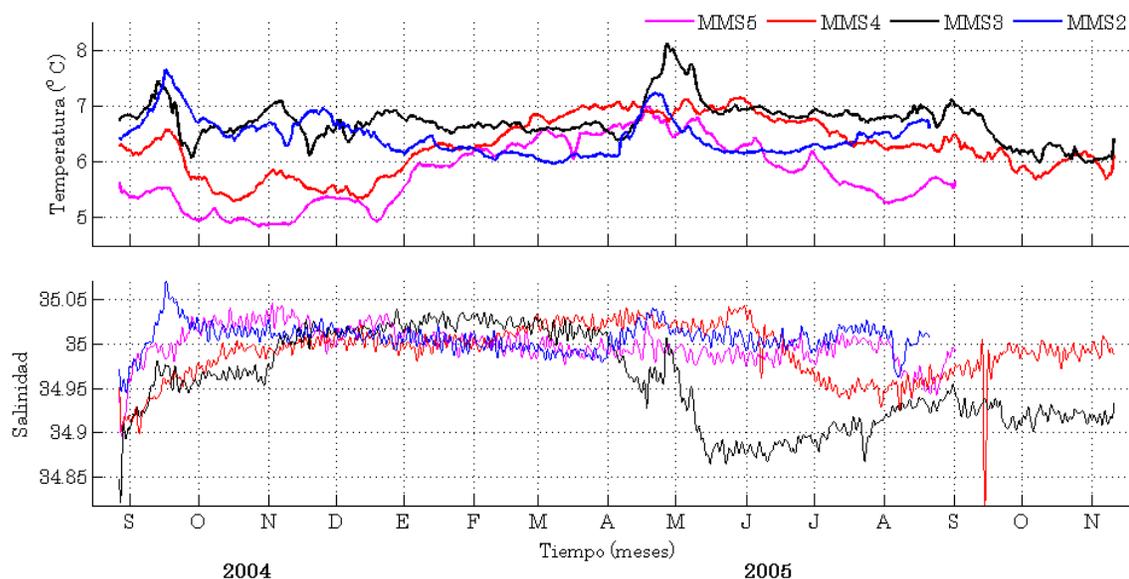
A pesar de que estuvieron relativamente cerca de la costa, y cada uno siguió una trayectoria diferente, se tiene claramente que el centro de los remolinos no sobrepasó la isóbata de los 2000 m. En los últimos meses de su desvanecimiento, cinco para Titanic y nueve en Ulysses, se mantuvieron dentro de los 21.5 – 25° N y 93.5– 97° W, frente a las costas de Tamaulipas, México.

### ***V.3 Series de Tiempo y datos de altimetría***

Se ha dicho anteriormente que los remolinos anticiclónicos son un proceso importante en la dinámica del golfo, porque estos provocan alteraciones en las propiedades

oceanográficas dentro del golfo. Los diferentes eventos observados en los diagramas de astillas para los anclajes son una consecuencia del paso o acercamiento de los remolinos descritos anteriormente. Además en los datos de temperatura y salinidad se registró la presencia de los remolinos, debido a que estas son propiedades conservativas que nos permiten identificar el agua de donde fueron formados, distorsionan las isohalinas e isothermas por donde pasan permitiendo así detecta su área de influencia.

En la figura 21, se presenta la temperatura y salinidad para los anclajes del MMS2 al MMS5, los incrementos se relacionan al paso de los anticiclones y los decrementos debido a los ciclones. En el caso de Titanic provocó un aumento en la temperatura al inicio del registro (del 18 de septiembre 2004 hasta octubre de 2004) en los anclajes MMS2 y MMS3, alcanzándose a ver la señal hasta los 1200 m.



**Figura 21.** En la figura superior se muestra la temperatura registrada a ~ 700m para cuatro anclajes y la figura inferior representa la salinidad tomada a ~ 695 m.

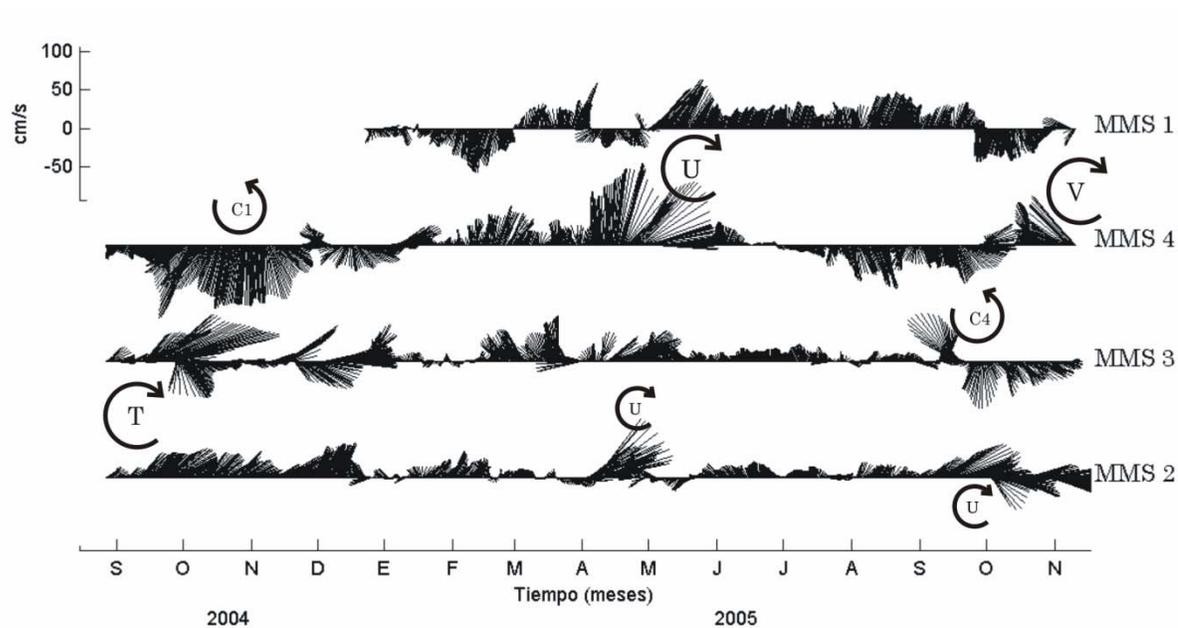
El segundo anticiclón que llegó a la zona fue Ulysses, provocando otro aumento de temperatura. A finales de abril de 2005 Ulysses afectó a los anclajes MMS2 y MMS3, pudiéndose observar la señal hasta los 1400 m. Esta señal también provocó máximos de salinidad que corresponden para el anclaje MMS2 de 35.04 y en anclaje MMS3 de 35.01. En el anclaje MMS5, comenzando en el mes de marzo se vio un aumento de temperatura que se atribuye a la entrada de Ulysses N y se mantiene hasta mayo de 2005, observándose desde los 787 m hasta los 1500 m pero con un gradiente menor. El mismo remolino se puede apreciar en el anclaje MMS4 el cual registró en este periodo, con el ADCP superficial, una temperatura máxima de 7°C a 509 m de profundidad.

Durante septiembre de 2004 a enero de 2005 la presencia de un ciclón (C1), observado en los mapas de altimetría provocó las temperaturas mas bajas registradas por los anclaje MMS4 y MMS5 de 5.3° C y 4.9° C respectivamente, en aproximadamente 700 m. Finalmente, en octubre de 2005 hasta el final del registro en noviembre de 2005 en el anclaje MMS3 se puede ver claramente la disminución de la temperatura a causa de la presencia del ciclón C4, observado en los datos de altimetría.

Las velocidades horizontales registradas en los anclajes reflejan, en la mayoría de sus variaciones, cambios debido al posicionamiento de los remolinos. Cada evento sobresaliente tiene asociado la presencia y cambio de un remolino, ya sea ciclónico o anticiclónico.

El primer remolinos que ingresó al área de estudio fue Titanic. Debido a que entra por la parte sur y se disipa sin avanzar muy al norte solo afecta a los anclajes MMS2 y MMS3, lo que provocó la intensificación de las corrientes correspondientes

(figura 22 y 23). A finales de septiembre de 2004, Titanic chocó con un ciclón (C1) ubicado al norte y generó una zona de convergencia sobre el anclaje MMS3, modificando la dirección de la corriente hacia el sureste y disipándose a finales de noviembre de 2004. De igual forma el ciclón C1 afectó a los anclajes MMS4 y MM5 ya que permaneció de septiembre a diciembre de 2004 sobre los dos anclajes (figura 23).



**Figura 22. Esquema horizontal de astillas correspondientes a los ~ 60 m de profundidad para los anclajes MMS1 al MMS4 donde se identifica Titanic (T), Ulysses (U), Vortex (V) y los ciclones C1, C4 y C5.**

Ulysses fue el segundo anticiclón que afectó al área de estudio, éste se dividió en dos (Ulysses N y Ulysses S) y fue el remolino más energético que llegó a afectar a los cinco anclajes. Los anclajes MMS2 y MM3 son afectados por Ulysses S y los anclajes MMS4 y MMS5 por Ulysses N. En la figura 22 observamos que en el anclaje MMS2 la corriente se intensificó en abril a consecuencia de la entrada de Ulysses S. En la parte

norte, a finales de marzo e inicios de abril, Ulysses N comenzó a afectar al anclaje MMS4 y al mismo tiempo el anclaje MMS1 presentó una contracorriente con dirección sur. Al momento en que los dos remolinos (Ulysses N y Ulysses S) se fusionaron y formaron un remolino más energético a finales de abril de 2004, el sentido del flujo en el anclaje MMS1 cambió hacia el norte alcanzando una magnitud de  $83 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y en el anclaje MMS4 se intensificó hasta los  $106 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

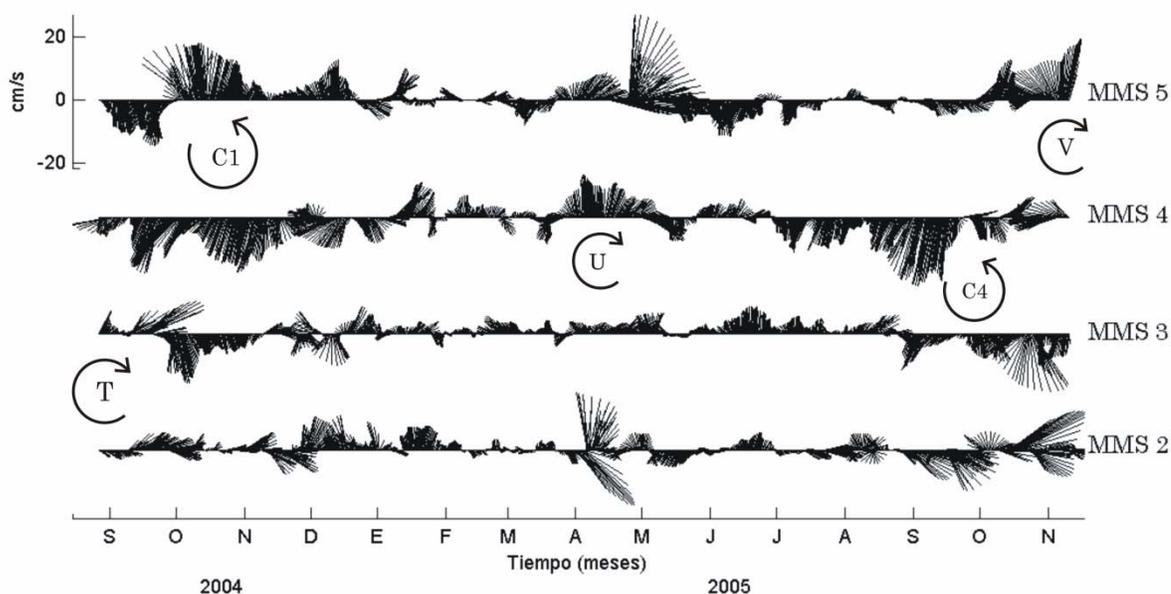


Figura 23. Esquema de astillas a  $\sim 700 \text{ m}$  de profundidad para los anclajes MMS2 al MMS5, donde se identifican Titanic (T), Ulysses (U), Vortex (V) y los ciclones C1 y C4.

De acuerdo a la figura 23, la cual se refiere a las velocidades a aproximadamente  $700 \text{ m}$ , también se ve la influencia de Ulysses sobre los anclaje MMS4 y MMS5 y con menor intensidad en el anclaje MMS3. A finales de octubre, Ulysses regresa al área de estudio después de haber dado una vuelta en la parte oeste

del golfo. El anclaje MMS2 todavía llegó a sentir su influencia a pesar de que se encontraba al final de su vida y menos energético (figura 22).

Finalmente, en los últimos meses de septiembre a noviembre de 2005, se tuvo la presencia de un ciclón C4 (figura 22 y 23), el cual permaneció sobre los anclajes MMS3 y MMS4 hasta que con su desplazamiento y la llegada de Vortex las corrientes se intensificaron sobre los anclajes MMS4 y MMS5.

## VI DISCUSIONES

Gran parte de la circulación en el oeste del Golfo de México está influenciada por los remolinos anticiclónicos provenientes de la corriente de Lazo. Los remolinos son un motor importante en la dinámica del agua superficial en el área de estudio, como se observó en los datos obtenidos de las capas superficiales de los anclajes.

Se ha descrito que debido a la variación estacional de los vientos y a la descargas de agua dulce (Morey *et al.*, 2005), se tiene una corriente sobre la plataforma continental, hacia el norte en el verano y otoño, y hacia el sur en el invierno, lo cual concuerda con lo observado, mediante registro en boyas entre los años de 1989 y 1999, por DiMarco *et. al.* (2005). Estos comportamientos están relacionados con los registros del anclaje más somero (MMS1), pero además se ve claro que, cuando existe la presencia de un remolino externo, contiguo a la plataforma y este es lo suficientemente energético afecta la corriente sobre la plataforma. La corriente es al sur o al norte dependiendo si es ciclón o anticiclón, el cual toma una forma elíptica alargada en la dirección de la plataforma al momento que se mueve hacia el talud, y afecta aguas someras.

Una vez que los tres remolinos anticiclónicos, Titanic, Ulysses y Vortex, se desprendieron y fueron totalmente independientes de la Corriente de Lazo, se desplazaron hacia el oeste del golfo hasta llegar al talud continental; como ha sido reportado por Ichiye (1962), Elliott (1982), Vukovich y Crissman (1986), Lewis, *et al.*

(1989), Hamilton (1990) y Vukovich (2006) utilizando datos de derivadores, cruceros y altimetría; al igual que se han derivado fórmulas que fundamentan este movimiento zonal hacia el oeste por Cushman-Roisin y Tang (1990), Zavala *et al.* (1998) y Nof (1999). El comportamiento observado de los remolinos no fue sustancialmente diferente de lo descrito por los autores mencionados anteriormente. Los remolinos siguieron diferentes trayectorias, las cuales fueron por el talud norte (Vortex), a través del centro del golfo (Ulysses) y hacia el sur-oeste del golfo (Titanic), manteniendo siempre su centro en aguas profundas, mayores a los 2000 m. Estas trayectorias coinciden con las típicas reportadas, en base a datos de varias décadas, por Vukovich y Crissman (1986) y Vukovich (2006), obteniendo que el 24% de los remolinos se van por el talud norte, el 62% atraviesa el golfo por el centro y un 14% toma dirección sur-oeste. También se dio que los dos remolinos, Titanic y Ulysses, al momento de chocar con el talud continental al oeste del golfo, tienen un traslado hacia el norte, de acuerdo con los resultados de modelos numéricos como el de Zavala *et al.*, (1998) y Nof (1999), los cuales argumentan que este movimiento está íntimamente relacionado a la expulsión de masa al sur del remolino, y que para que exista esta expulsión no es requisito que exista una pared vertical, si no la presencia de una pendiente suave como la que presenta el Golfo de México es suficiente (Itoh y Sugimoto, 2001).

Para el caso de los remolinos en este estudio, se tiene que una vez llegando al oeste del golfo se mantuvieron dentro de un área entre los 21.5 – 25° N y 93.5– 97° W hasta disiparse totalmente. Esta región es frente a las costas de Tamaulipas, México. Lo cual difiere de lo dicho anteriormente por Vukovich y Crissman (1986) de que la zona donde los remolinos se disipan es al noroeste del golfo en las costas de Estados Unidos entre los 25-28° N y 93-96° W.

La disipación de los remolinos es inevitable al igual que en cierta forma favorable, si no existiera, los remolinos se encontrarían en un estado en el que se les inyectaría energía constantemente y sin ellos transferirla estarían continuamente acelerándose. Estos remolinos de mesoescala contienen una parte importante de la energía en el océano. Son elementales para la transferencia y distribución de ésta, y predominan en escalas temporales y espaciales de semanas a meses y de cientos de metros hasta ciento de kilómetros. El remolino extrae su energía en el instante que se generan de un flujo medio intenso con tendencias naturales a ser turbulento y caótico. En algunos casos los remolinos vuelven a inyectar su energía al flujo del cual se generaron.

Para evaluar cuales procesos energéticos predominan durante la disipación de los remolinos y utilizando las velocidades de cada anclaje, se integró la densidad de energía cinética en toda la columna de agua para obtener la energía cinética por unidad de área, esto es:

$$EC = \frac{1}{2} \int_{-H}^h (u^2 + v^2) dz, \quad (2)$$

donde  $u$  y  $v$  son las componentes de velocidad, zonal y meridional obtenidas a partir de los registros de cada uno de los anclajes. Los máximos de EC coinciden con la presencia de los remolinos ciclónicos (línea azul, figura 24) y anticiclónicos (línea roja, figura 24) en la zona. En el anclaje MMS3, se alcanzó un máximo de EC en el periodo del 15 de septiembre de 2004 al 29 de septiembre del mismo año, debido a la presencia de Titanic. Después de que disminuyó la energía en el anclaje MMS3, en el anclaje MMS4 se vio un aumento de la misma atribuido al ciclón (C1). El remolino Ulysses afectó a los cuatro anclajes más profundos donde generó un aumento de energía

durante abril. El anclaje MMS1, el cual fue el más cercano a la costa, ubicado a 500 m de profundidad, también recibió parte de la señal en mayo, tiempo después que los otros anclajes.

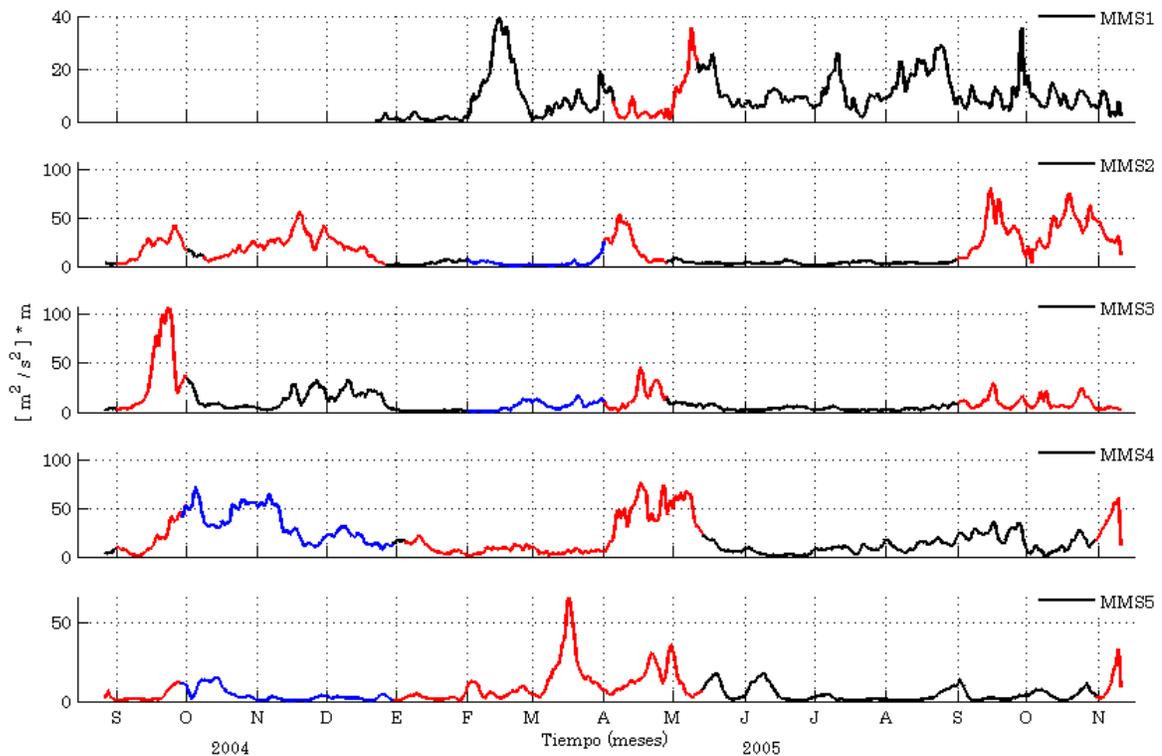


Figura 24. Densidad de energía cinética integrada en la columna de agua para cada uno de los anclajes (ver eq. 2). La línea roja representa el tiempo que estuvo presente un remolino anticiclónico y la línea azul uno ciclónico.

Se obtuvo la densidad de energía a partir de las velocidades geostróficas obtenidas de los datos de altimetría e interpoladas en cada anclaje.

$$EC_g = \frac{H_g}{2} (u_g^2 + v_g^2), \quad (3)$$

donde  $H_g$  es la profundidad total correspondiente al lugar donde se encuentran los anclajes.

Comparando ambas series de tiempo, se observó que la energía cinética de las velocidades geostróficas y la registrada por los anclajes son similares para los anclajes MMS2, MMS3 y MMS4 (figura 25). No se utilizó el anclaje MMS1 debido a que su serie de densidad de energía no fue congruente con la serie obtenida de geostrofia; y la el anclaje MMS5 porque no se contó con las velocidades superficiales, por encima de los 700 m.

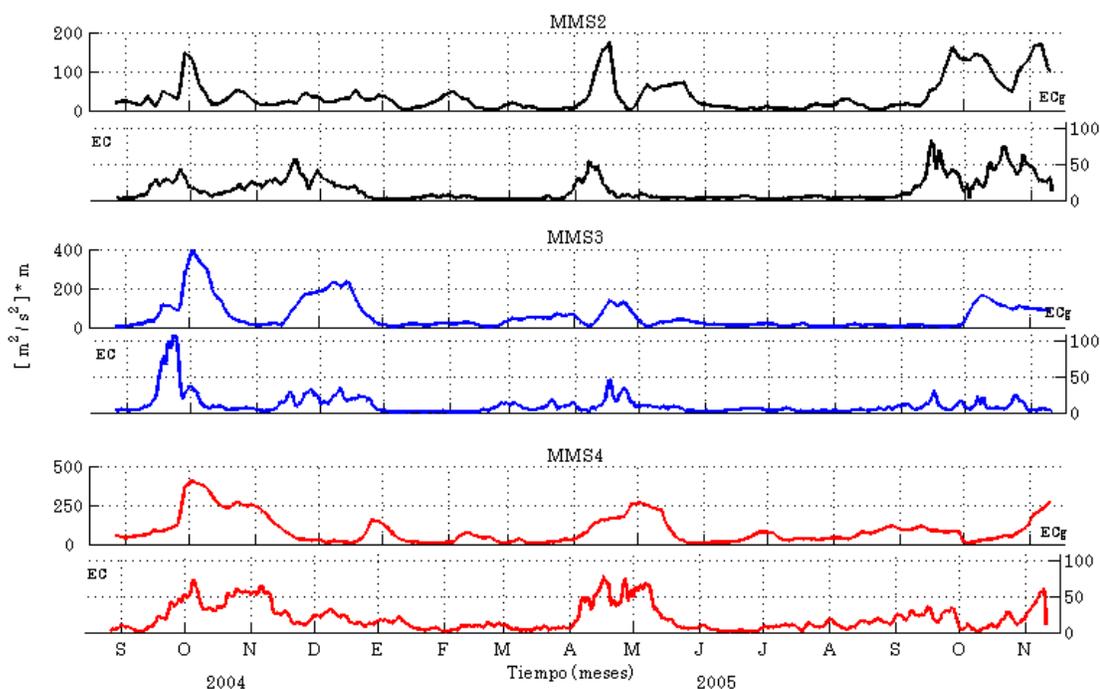


Figura 25. Densidad de energía cinética integrada en la columna de agua (EC) calculada en base a la altimetría ( $EC_g$ ) para los anclajes MMS2, MMS3 y MMS4 ubicados sobre la isóbata de los 2000 m.

Un factor proporcional ( $\alpha$ ) entre la energía obtenida con las velocidades geostróficas (eq 3) y la registrada por los anclajes (eq 2) fue encontrado por medio de la relación:

$$EC = \alpha EC_g + \varepsilon, \quad (4)$$

obteniendo valores similares para los distintos anclajes (tabla IV), y dando un valor de  $\alpha$  promedio de 0.20.

Tabla IV. Factor proporcional ( $\alpha$ ) para los distintos anclajes, con su respectiva incertidumbre ( $\varepsilon$ ), la cual está definida como ( $\varepsilon = EC - \alpha EC_g$ ).

Anclaje	$\alpha$	$\varepsilon^2/EC^2$	$100* \sqrt{(\varepsilon^2/EC^2)}$
MMS2	0.29	0.48	69
MMS3	0.13	0.59	76
MMS4	0.20	0.19	43

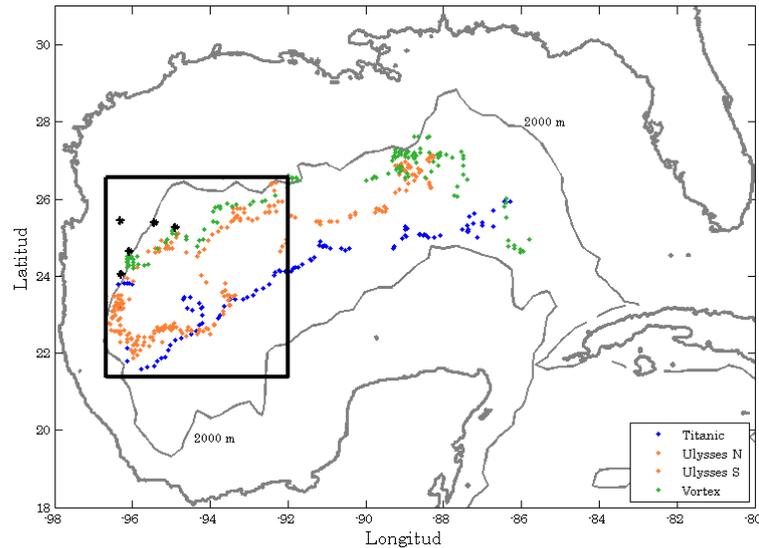
Las posibles causas del decaimiento y disipación de un remolino anticiclónicos se pueden derivar de diferentes fenómenos como son los atmosféricos (intercambio de calor, viento), la fricción, procesos adiabáticos como emisión de ondas, o debido a la topografía (impacto con una costa o el fondo).

En el caso de nuestro estudio se realizó un ejercicio para así observar el decaimiento de la energía en los tres remolinos, por medio del cálculo de un índice de energía cinética (IEC) a partir de la altimetría en un área definida, el cual se expresa como:

$$IEC = \iint H \frac{u_g^2 + v_g^2}{2} dA, \quad (5)$$

donde  $u_g$  y  $v_g$  son las velocidades geostróficas de los datos de altimetría y  $H$  es la topografía en el zona integrada. El área de la malla con datos de altimetría de donde

se obtuvo el índice, esta comprendida entre los 21.4° - 26.6° N y 92° - 96.7° W (figura 26, recuadro negro), en la cual se observó que los remolinos se disipan.



**Figura 26.** Área, recuadro negro, utilizada para calcular IEC y observar el tiempo de disipación de los remolinos anticiclónicos.

El propósito de calcular la serie de tiempo de un índice de energía de esta naturaleza es para manifestar las escalas de decaimiento de los remolinos. El índice en sí es por definición una sobreestimación de la energía cinética en el área, pues sabemos que las velocidades superficiales decaen con la profundidad y las muy profundas son inclusive incoherentes con las próximas a la superficie. Por otro lado, las observaciones indican que una vez que los remolinos ingresan en esta área decaen hasta desvanecerse totalmente sin salir de ella.

Para corregir la sobrestimación al momento de encontrar el índice de energía cinética se utilizó factor proporcional ( $\alpha$ ) de 0.02, por lo que la ecuación (5) se reescribe:

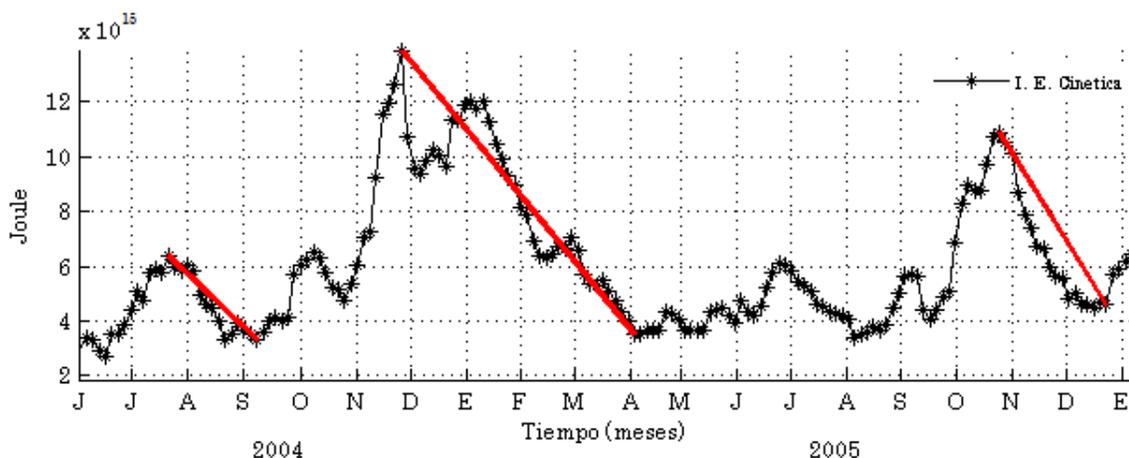
$$ECT_{\alpha} = \alpha * \frac{1}{2} \iint H(u_g^2 + v_g^2) dA \quad (6)$$

Estimando la energía cinética (eq 6) dentro de nuestro volumen de referencia con la fórmula:

$$ECT_{\alpha} = \sum_x \sum_y \alpha * EC_g(x, y) \Delta x \Delta y \quad (7)$$

donde  $\Delta x$  y  $\Delta y$  son los espacios entre los puntos de la malla. Se reconoce una incertidumbre del 62 % de acuerdo a lo obtenido en la tabla IV.

En la figura 27, se presenta el  $ECT_{\alpha}$  del área definida en la figura 26. Se observa que los máximos del índice de energía corresponden a la presencia de los remolinos anticiclónicos en la zona. El primer máximo, de julio a septiembre de 2004 corresponde a Titanic, el segundo se debe a Ulysses y es el que mayor índice energético presenta; y finalmente el máximo observado en noviembre de 2005 es debido a Vortex.



**Figura 27.** Índice de energía cinética correspondiente al área comprendida entre los  $21.4^{\circ} - 26.6^{\circ} \text{ N}$  y  $92^{\circ} - 96.7^{\circ} \text{ W}$  durante el periodo de muestreo a partir de los datos de altimetría. La ECT se multiplicó por  $\rho_0$  ( $1022.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) para obtener unidades de Joule.

A partir de estos datos se obtuvo el tiempo de decaimiento para cada uno de los anticiclones. Se llega a que el remolino Titanic tardó 49 días (durante abril 2004) en decaer, lo que resulta en una tasa de disipación de  $0.72 \times 10^9$  watts ( $0.10 \times 10^{-5}$

watts·m<sup>-3</sup>), en cambio para Ulysses que tuvo un tiempo de vida de un año, su energía decayó en 129 días a 0.93 x 10<sup>9</sup> watts (0.12 x 10<sup>-5</sup> watts·m<sup>-3</sup>) y finalmente Vortex en 59 días tuvo una tasa de disipación de 1.22 x 10<sup>9</sup> watts (0.16 x 10<sup>-5</sup> watts·m<sup>-3</sup>) (Tabla V). Presenta así que la pendiente de decaimiento para los tres casos es muy similar (figura 26).

**Tabla V. Tasa de disipación para cada remolino anticiclónico que afectó el área de estudio.**

Remolino	Días	$\Delta$ de energía (x10 <sup>16</sup> Joules)	Decaimiento (x 10 <sup>9</sup> Watts)	Watts m <sup>-3</sup> x 10 <sup>-5</sup>
Titanic	49	0.31	0.72	0.10
Ulysses	129	1.04	0.93	0.12
Vortex	59	0.63	1.22	0.16

Continuando con un esquema indicativo del balance de energía se evaluó en base a la altimetría los flujos “barotrópicos” de energía en las fronteras verticales que limitan el área mencionada. El flujo de energía barotrópico se calculó como:

$$Fx_{\alpha} = \alpha * g \sum_{k=1}^n (H_k v_{gk} \cdot \eta_k) dx , \quad (8)$$

$$Fy_{\alpha} = \alpha * g \sum_{k=1}^n (H_k u_{gk} \cdot \eta_k) dy , \quad (9)$$

donde  $Fx_{\alpha}$  corresponde a la frontera norte y sur; y  $Fy_{\alpha}$  corresponde a la frontera este y oeste;  $g$  es la gravedad;  $\eta$  es el nivel del mar;  $H$  es la profundidad; y  $dx$ ,  $dy$  son las distancia entre los punto de la malla.

Estos flujos son solo indicadores comparativos entre ellos mismos. La convención fue flujos positivos cuando hay una entrada de energía por la frontera y negativos cuando hay salida (figura 28). La frontera que registró mayor flujo de energía entrante fue el lado oriental con un total de 2.63 x 10<sup>12</sup> watts, lo cual era de esperarse ya que por esta frontera es por donde ingresan los remolinos. En cambio la frontera sur registró el mínimo de energía entrante la cual fue de 0.34 x 10<sup>12</sup> watts,

esta frontera se ubicó a los  $26.6^{\circ}$  N donde no cuenta con profundidades mayores a 2000 metros, los remolinos anticiclónicos no salen o entran por esa área.

Con referente a la salida de energía en esta región se dio principalmente por la parte oeste ( $2.31 \times 10^{12}$  watts) y norte ( $1.10 \times 10^{12}$  watts). La frontera oeste, se ubica del lado de la costa, sobre la plataforma continental, y se obtuvo que es un área por la cual existe una fuga importante de energía; solo entrarón  $1.08 \times 10^{12}$  watts, pero salieron a través de ella  $2.31 \times 10^{12}$  watts. Los dos mínimos que presenta la frontera oeste a finales de noviembre de 2004 y octubre de 2005 coinciden al momento en que se dejan de ver los remolinos Titanic y Ulysses respectivamente. Esto sugiere que el proceso de desvanecimiento provoca corrientes costeras con flujos de masa y energía a través de la frontera oeste, generando un intercambio riguroso entre un régimen costero y el profundo.

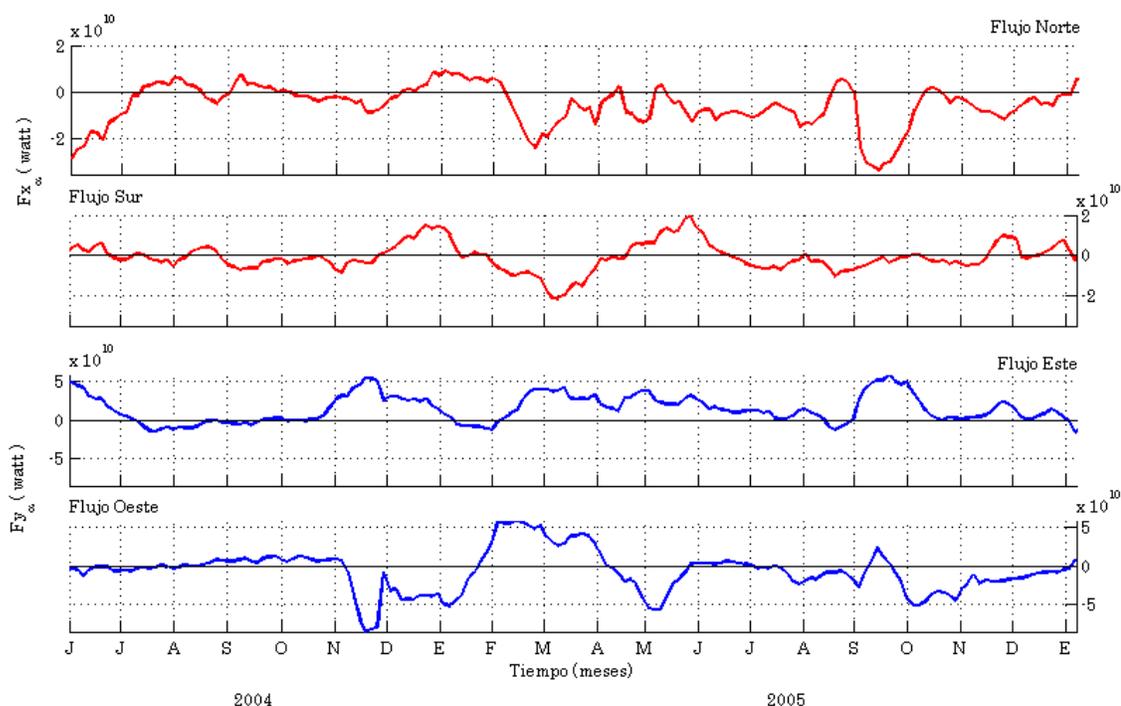
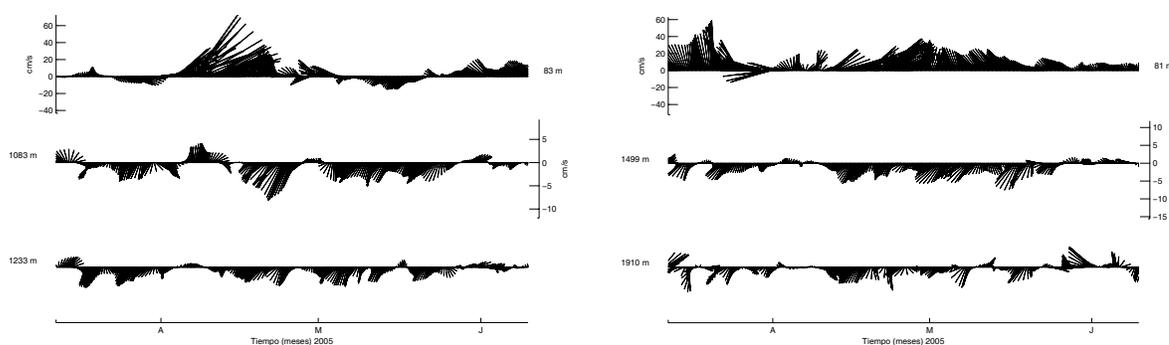


Figura 28. Flujos de energía a través de las fronteras del área integrada. Las series se multiplicaron por  $\rho_0$  ( $1022.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) para obtener unidades de watt.

El mínimo registrado en mayo de 2005, puede ser una evidencia de la expulsión de masa hacia el sur que producen los remolinos al momento de trasladarse hacia el norte descrito en diversos trabajos numérico (Zavala *et al.*, 1998; Nof, 1999; Itoh y Sugimoto, 2001). Durante este tiempo, Ulysses se está trasladando al norte, y en los datos de los anclajes MMS2 y MMS3 se observó un flujo hacia el sur el cual nos confirmaría el sentido de la corriente (figura 29).



**Figura 29.** Esquema de astillas para los anclajes MMS2 (lado izquierdo) y MMS3 (lado derecho) a diferentes profundidades. Se observa el flujo hacia el sur al momento que Ulysses pasa sobre los anclajes.

En el área considerada (figura 26), frente a las costa de Tamaulipas, la energía de los remolinos se disipan con una tasa promedio de  $0.13 \times 10^{-5} \text{ watts}\cdot\text{m}^{-3}$ , lo cual, independientemente del tamaño y energía que presenten, resulta comparable con regiones con alta tasa de disipación como el Golfo de California donde se tiene que es de  $2.36 \times 10^{-5} \text{ watts}\cdot\text{m}^{-3}$  (Filloux, 1973) y la cual se debe a la fricción producida por la entrada y salida de la marea. Pero como se había hecho notar el índice de energía cinética es, en dado caso, una estimación incierta de la energía cinética real.

Existen varias explicaciones por lo que puede que la tasa obtenida sea del mismo orden de la reportada en zonas de alta disipación; como se puede observar que

a través de las fronteras existe un flujo saliente considerable de energía como es el caso de la frontera Oeste, sobre la plataforma continental. Por lo tanto, el decaimiento es en parte por la exportación de energía y no por la disipación. Además las escalas que resuelve la ecuación de balance de energía son del orden de 67 km permanece sin resolverse para escala menores en las que continua habiendo una transferencia de energía al momento que se forman remolinos menores hasta llegar eventualmente a disiparse ultimadamente en forma de calor a causa la viscosidad molecular.

## VII CONCLUSIONES

- En la isóbata de los 2000 m, se tienen tres comportamientos: cerca del fondo, sobre los últimos 50 metros, una corriente predominante hacia el sur. En los primeros 500 metros sobre la superficie la circulación principalmente está influenciada por las perturbaciones (remolinos) en la superficie y las intermedias son un reflejo de lo que sucede en la superficie.
- El anclaje MMS5 presenta una intensificación de la corriente con la profundidad en el mes de marzo que se cree pueda ser una onda de Rossby topográfica.
- El centro de los tres anticiclones que afectaron el área de estudio se mantuvo en aguas profundas que la isóbata de los 2000 m. Estos remolinos se disiparon entre los 21.5 – 25° N y 93.5– 97° W, frente a las costas de Tamaulipas, México, durando Titanic cinco meses, Ulysses nueve meses y Vortex dos meses y medio dentro de esta área.
- Los máximos de densidad de energía cinética en las observaciones están asociados al paso de los remolinos anticiclónicos o ciclónicos. De igual forma se observa al momento de integrar un índice de energía cinética una pendiente similar de decaimiento para el caso de los tres anticiclones observados en este trabajo. En términos del índice de energía la tasa de decaimiento es del orden de  $0.13 \times 10^{-5} \text{ watts}\cdot\text{m}^{-3}$ .

- La frontera por la cual se sugiere una salida importante de energía es la occidental. Esta frontera se ubica del lado de la costa, sobre la plataforma continental, por lo que es consistente con un intercambio vigoroso de masa y energía entre la plataforma y las aguas más profundas, como lo ejemplifica los momentos en los que Titanic y Ulises desaparecen por completo.

## VIII BIBLIOGRAFÍA

- Csanady, G.T. (1979) The birth y death of a warm core ring. *Journal of Geophysical Research*. 84: 777 – 780.
- Cushman-Roisin, B., E.P. Chassignet y B. Tang (1990) Westward motion of mesoscale eddies. *Journal of Physical Oceanography*. 20: 758 – 768.
- DeHaand, C. J. y W. Strugers (2005) Deep cyclonic circulation in the Gulf of Mexico. *Jouranal of Physical Oceanography*. 35: 1801 – 1812.
- DiMarco, S.F., W. D. Nowlin Jr. y R.O. Reid (2005) A statistical description of the velocity fields from upper ocean drifters in the Gulf of Mexico. Wilton Sturges and Alexis Lugo-Fernandez, Editors. Geophysical Monograph GM 161. AGU. Pag 101 – 110.
- Elliott, B.A. (1982) Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 12: 1292 – 1309.
- Filloux, J.H. (1973) Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Letters to nature*. 243: 217 – 221.
- Gill, A.E. J.S.A. Green y A.J. Simmons (1974) Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies. *Deep – Sea Research*. 21(7): 499 – 528.
- Hamilton, P. (1990) Deep currents in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 20: 1087 - 1103.
- Hamilton, P. (1992) Lower continental slope cyclonic eddies in the central Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 97(C2): 2185 - 2200.
- Ichiye, T. (1962) Circulation and water mass distribution in the Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. 2: 47 – 64.
- Itoh S. y T. Sugimoto (2001) Numerical experiments in the movement of a warm – core ring with the bottom slope of a western boundary. *Journal of Geophysical Research*.. 106: 26,851 – 26,862.

- Leben, R.R. (2005) Altimeter – Derived Loop Current metrics. Circulation in the Gulf of Mexico: observations and Models. Wilton Sturges and Alexis Lugo-Fernandez, Editors. Geophysical Monograph GM 161. AGU. Pag 181 – 201.
- Lewis, J.K., A.D. Kirwan Jr. y G.Z. Forristall (1989) Evolution of a warm – core ring in the Gulf of Mexico: lagrangian observations. *Journal of Geophysical Research..* 94(C6): 8163 – 8177.
- Morey, S.L., J. Zavala-Hidalgo y J. O'Brien (2005) The seasonal variability of continental shelf circulation in the northern and western Gulf of Mexico from high-resolution model. *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and Models*. Wilton Sturges and Alexis Lugo-Fernandez, Editors. Geophysical Monograph GM 161. AGU. Pag 203 – 218.
- Nof, D. (1999) Strange encounters of eddies with walls. *Journal of Marine Research.* 57: 739-761.
- Oey, L. Y. y H. C. Lee (2002 ) Deep eddy energy and topographic Rossby waves in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography.* 32: 3499 – 3527.
- Sheinbaum J., J. Candela, A. Badan y J. Ochoa (2002) Flow structure and transports in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters.* 29(3): 10.1029/2001GL013990.
- Sturges, W. (1993) The annual cycle the western boundary current in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research.* 98 (C10): 18,053 – 18,068.
- Sturges, W. y R. Leben (2000) Frequency of ring separation from the Loop Current in the Gulf of Mexico: A Revised Estimate. *Journal of Physical Oceanography.* 30: 1814 – 1819.
- Vukovich, F.M. y B.W. Crissman (1986) Aspect of warm rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research..* 91: 2645 – 2660.
- Vukovich, F.M. y E. Waddell (1991) Interaction of a warm ring with the western slope in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography.* 21: 1062 – 1074.
- Vukovich, F.M (2006) Climatology of ocean features in the Gulf of Mexico using satellite remote sensing data. *Journal of Physical Oceanography.* 37: 689 – 707.
- Welsh, S.E. y M. Inoue (2000) Loop currents ring and deep circulation in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research.* 105 (C7): 16,951 – 16,959.
- Zavala-Sansón, L., F. Gref y E. G. Pavía (1998) Collision of anticyclonic, lens-like eddies with a meridional western boundary. *Journal of Geophysical Research.* 103: 24,221-24,890.