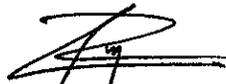


TESIS DEFENDIDA POR
Erika Sandoval Hernández
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dra. Paula Pérez Brunius
Director del Comité



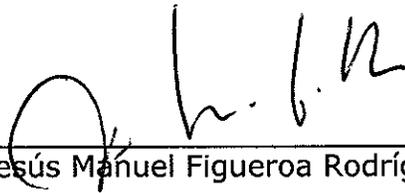
Dr. Luis Zavala Sansón
Miembro del Comité



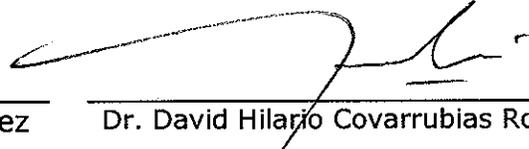
Dr. Julio Sheinbaum Pardo
Miembro del Comité



Dr. Pedro Gilberto López Mariscal
Miembro del Comité



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



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

15 de diciembre de 2011

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



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

**ESTUDIO DEL CICLÓN EN EL GOLFO DE CAMPECHE CON
DATOS LAGRANGEANOS Y EXPERIMENTOS DE
LABORATORIO**

TESIS

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

Presenta:

ERIKA SANDOVAL HERNÁNDEZ

Ensenada, Baja California, México, Diciembre del 2011.

RESUMEN de la tesis de **Erika Sandoval Hernández**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Oceanografía Física. Ensenada, Baja California. Diciembre, 2011.

Estudio del ciclón en el Golfo de Campeche con datos lagrangeanos y experimentos de laboratorio.

Resumen aprobado por:



Dra. Paula Pérez Brunius

Director de Tesis

En este trabajo se estudia la influencia de la topografía del fondo en la circulación del Golfo de Campeche (localizado en el área comprendida entre las latitudes de 18.5°N a 23°N y las longitudes de 92°O a 97°O) que se caracteriza por la presencia de un ciclón semipermanente. A partir de boyas de deriva superficiales se obtuvo el campo de velocidades del ciclón, para el periodo del diciembre 2009 a noviembre del 2010. Para ello se realizó un cambio de sistema coordenado cuyo origen está dado por el centro del ciclón, eliminando así su movimiento de traslación. El centro se determinó encontrando el mínimo del nivel del mar a partir de datos de altimetría de satelital. Los promedios anual y trimestral de los campos de velocidad y vorticidad se obtuvieron a partir de las trayectorias de las boyas de deriva en el nuevo sistema coordenado. Los resultados muestran que el ciclón permanece en la región profunda, y que su tamaño está determinado por la topografía del fondo marino. Su velocidad angular es del $O(10^{-5} \text{ rad s}^{-1})$, dando lugar a números de Rossby del orden de $O(10^{-1})$ y la magnitud de la fuerza centrífuga es del $O(10^{-6} \text{ m/s}^2)$. Esto último sugiere que el balance de momento no es del todo geostrófico, e invita a incluir el término de la fuerza centrífuga en el balance de momento.

Con la finalidad de estudiar cómo influye la topografía en la circulación, se realizaron experimentos de laboratorio analizando el ajuste del flujo en presencia de un modelo idealizado de la topografía Golfo de Campeche. Se representa a la región oriental como un escalón, y se estudia la evolución del flujo tras ser forzado inicialmente con una aceleración angular positiva o negativa. Los resultados experimentales muestran que se acumula vorticidad ciclónica en la zona profunda al costado "oeste" de la posición del escalón, independientemente de los forzamientos iniciales utilizados. Estos resultados sugieren que la presencia del ciclón en la región profunda del Golfo de Campeche es un estado natural del sistema dada la geometría del fondo marino.

Palabras Clave: Golfo de Campeche, corrientes superficiales, control topográfico, boyas de deriva.

ABSTRACT of the thesis presented by **Erika Sandoval Hernández** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Physics Oceanography. Ensenada, Baja California, México December, 2011.

Study of the cyclone in the Bay of Campeche using lagrangian data and laboratory experiments.

In this work we study the influence of bottom topography on the circulation of the Bay of Campeche (located in the area between latitudes 18.5° N to 23° N and longitudes 92° W to 97° W) characterized by the presence of a semi-permanent cyclone. Using data from surface drifters we obtained the velocity field of the cyclone, for the period December 2009 to November 2010. The velocity field was estimated in a coordinate system whose origin is given by the cyclone center, thereby eliminating its translational displacement. The center is determined by finding the minimum sea level from satellite altimetry data. The annual and quarterly averages of the velocity and vorticity fields were obtained from the trajectories of drifting buoys in the new coordinate system. The results show that the cyclone is located in the deep region, and its size is determined by the topography of the seafloor. The angular velocity is $O(10^{-5} \text{ rad s}^{-1})$, which corresponds to Rossby numbers of order $O(10^{-1})$ and the magnitude of the centrifugal force is $O(10^{-6} \text{ m/s})$. The latter suggests that the momentum balance is not entirely geostrophic, and invites to consider the centrifugal force term in the momentum balance.

In addition, to study how topography influences flows, we made laboratory experiments analyzing the adjustment of the flow in presence of an idealized model of the topography of the Bay of Campeche. The shallow eastern region is represented as a step, and the evolution of the flow forced initially with a positive or negative angular acceleration is analyzed. The experimental results show that cyclonic vorticity is accumulated in the deep region “west” of the position of the step, regardless of the initial forcing used. These results suggest that the presence of the cyclone in the deep region of the Gulf of Campeche is a natural state of the system given the geometry of the seafloor.

Keywords: Bay of Campeche, surface currents, topographic control, drifters.

Dedico este trabajo a mis padres J. Asunción Sandoval Hernández y María de Jesús Hernández García, a mis hermanos Fernando Sandoval Hernández y Ana Gabriela Sandoval Hernández que me han apoyado y han confiado en mí. En memoria a mi abuelita Crecencia Hernández.

Agradecimientos

A mis padres por creer en mí, dejarme seguir mis metas y sus palabras de aliento para no rendirme.

A mis hermanos (Fernando y Gabriela) que siempre tenían algo que contarme para sonreír y su cariño.

A Moisés Alberto Magaña por su ayuda en el diseño de imágenes, comentarios y sugerencias, además de su compañía y apoyo.

A los maestros, compañeros y amigos que conocí en CICESE por todas las cosas que aprendí de ustedes.

A Paula Pérez Brunius por su apoyo y la confianza que puso en mí al darme la oportunidad de trabajar con ella, gracias por el apoyo académico y personal que me diste.

A Luis Zavala Sansón por su asesoría y apoyo en la sección experimental y sus comentarios sobre todo el trabajo.

A Julio Sheinbaum Pardo y Pedro Gilberto López Mariscal por todos sus comentarios, sugerencias y críticas al trabajo realizado.

Agradezco a Oscar Uriel Velasco Fuentes por su apoyo en el préstamo de material y equipo de laboratorio, asesoría en el uso del mismo, sugerencias y comentarios para la realización del experimento de laboratorio.

A Paula García Carrillo por la información proporcionada de manera personal y el procesamiento de los datos de las boyas de deriva.

A CONACyT por su apoyo económico con la beca con número de registro 230238.

A CICESE como institución que me recibió para realizar mis estudios de maestría.

A la Dirección de Estudios de Posgrado por el apoyo económico brindado al final de este trabajo de investigación.

Al apoyo brindado en la adquisición de los datos de las boyas de deriva al programa Eddy Watch de Horizon Marine Inc. Estos datos fueron financiados por Pemex Exploración y Producción, contratos 428217896, 428218855 y 428229851.

A los datos del nivel del mar producidos por Ssalto/Duacs y distribuidos por Aviso con apoyo de CNES.

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	xii
Capítulo I. Introducción	1
I.I Justificación.....	2
I.II Antecedentes.....	3
I.II.I Procesos físicos que generan giros permanentes de meso y gran escala.....	3
I.II.II Estudios del giro ciclónico del Golfo de Campeche.....	8
I.III Objetivo.....	11
I.IV Hipótesis.....	11
Capítulo II. El ciclón del Golfo de Campeche a partir de datos de boyas de deriva	12
II.I Datos.....	13
II.I.I Datos de boyas de deriva	13
II.I.II Selección de trayectorias.....	14
II.I.III Datos del nivel del mar por altimetría.....	16
II.II Metodología para determinar tamaño y posición del ciclón del Golfo de Campeche con respecto a la topografía.....	17
II.II.I Selección del centro del ciclón.....	17
II.II.II Cambio de coordenadas al centro del ciclón.....	19
II.II.III Campo de velocidad y vorticidad en el nuevo sistema coordinado.....	20
II.II.IV Ajuste a remolino teórico.....	21
II.II.V Posición y tamaño del ciclón respecto a la topografía.....	23
II.II.VI Nivel del mar con velocidades de boyas de deriva.....	23
II.III Resultados y discusiones.....	24
II.III.I Campos en el sistema coordinado del ciclón.....	25
II.III.II Características del ciclón.....	28
II.III.III Posición y tamaño del ciclón relativo a la batimetría.....	33
II.III.IV Nivel del mar a partir de las boyas de deriva.....	38
II.IV Conclusiones.....	41
Capítulo III. Estudio experimental sobre la influencia de la topografía del fondo en el ciclón del Golfo de Campeche	42
III.I Materiales y métodos	42
III.II Resultados del estudio experimental.....	46

CONTENIDO (continuación)

	Página
II.II.I Forzamiento con aceleración angular positiva.....	46
II.II.II Forzamiento con aceleración angular negativa.....	48
III.III Discusión y Conclusiones.....	50
Capítulo IV. Conclusiones.....	52
Bibliografía.....	54

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Mapa del Golfo de Campeche e isobatas en m.	2
2	La columna de la derecha son las configuraciones utilizadas por Van de Konijnenberg y van Heijst (1996), donde la zona sombreada indica las regiones someras y las regiones en blanco las partes profundas. La columna derecha indica el sentido de la circulación después de varios periodos de rotación con el forzamiento inicial de spin-up.	6
3	Promedio de las velocidades superficiales en una malla de $1 \frac{1}{6}^{\circ}$ sobre el estrecho de Luzón donde se conectan el océano Pacífico y el Mar del sur de China. A) Incluye el Banco de Calayan y el Banco de la Isla de Calayan en la malla. B) Excluye estos puntos topográficos del modelo. Adaptado de Metzeger y Hulburt (1998) por Gille et al. (2004)	7
4	Velocidad superficial promedio, estimada en una malla de $1.5 \times 1.5^{\circ}$ con datos de boyas de deriva del periodo de 1989-1999 de DiMarco, et al (2005).	9
5	Trayectorias de boyas de deriva lanzadas en el Golfo de Campeche correspondientes al mes de Julio de 2009. Los colores indican la rapidez, determinada a partir de los datos horarios. El final de las trayectorias se indica con un punto morado, junto al cual se encuentra el número del instrumento.	10
6	Los puntos negros muestran las zonas donde son lanzadas las boyas de deriva y las líneas muestran las trayectorias de las boyas seleccionadas. En el fondo los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.	14
7	Histograma del número de trayectorias de longitud en días.	15

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
8	Histograma del total de datos horarios registrados por las boyas de deriva mensualmente.	16
9	Nivel del mar (contornos negros, en cm) y trayectorias de las boyas de deriva (línea gruesa) para el periodo del 10-20 de agosto del 2010 (superior) y del 10-20 de enero del 2010 (inferior). Se muestran las posiciones de los centros del ciclón obtenidos por los diferentes métodos. Al nivel del mar se le extrajo una media general tanto espacial como temporal. El círculo indica el tamaño del ciclón obtenido por mínimos cuadrados.	18
10	Se muestran las trayectorias seleccionadas en coordenadas geográficas (izquierda) y en coordenadas cartesianas referenciadas al sistema coordenado del centro del ciclón (derecha).	20
11	Perfil de velocidad y de vorticidad de un vórtice no aislado con velocidad angular de $\Omega = 1.1038 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ y radio típico de 65km.	22
12	Promedio anual del campo de velocidades obtenido con datos de boyas de deriva de dic 2009-nov 2010 y elipses de desviación estándar. Los vectores encerrados en un cuadro son no significativamente diferentes de cero.	25
13	Campo de velocidades obtenido con datos de boyas de deriva en coordenadas del centro del ciclón para las diferentes estaciones del año del periodo Dic. 2009-Nov 2010 y elipses de desviación estándar. Los vectores encerrados en un cuadro son no significativamente diferentes de cero.	26
14	Vorticidad relativa promedio del periodo de dic 2009-nov 2010 obtenida con los datos de las velocidades de las boyas de deriva.	27
15	Vorticidad relativa de los 4 periodos del año del giro del Golfo de Campeche en el sistema de coordenadas centrado en el ciclón.	28

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
16	Perfil radial de la velocidad azimutal del promedio anual del ciclón, la línea continua es el perfil de velocidad ajustado al vórtice de Lamb. Los puntos indican la velocidad azimutal del ciclón en función del radio.	29
17	Perfil radial de la velocidad azimutal para los trimestres, la línea continua es el perfil de velocidad ajustado al vórtice de Lamb. Los puntos indican la velocidad azimutal del ciclón en función del radio.	30
18	Perfil de vorticidad del remolino de Lamb para ω_0 y R obtenidos del ajuste al perfil de velocidad a los datos para el promedio anual. Adimensionalizado con respecto a la vorticidad máxima. Donde L_e es la escala del ciclón.	31
19	Perfiles de vorticidad del remolino teórico de Lamb para ω_0 y R obtenidos del ajuste de la velocidad a los datos, adimensionalizado con respecto a la vorticidad máxima. Donde L_e es la escala del ciclón.	32
20	Número de días que se encuentra del centro del ciclón en cada punto de la malla de los datos de altimetría. La barra de colores indica los días que permaneció el centro del ciclón en cada región. En el fondo los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.	34
21	Campo de velocidad del promedio anual del ciclón del Golfo de Campeche en coordenadas geográficas. El círculo indica el tamaño obtenido a partir del ajuste al remolino teórico de Lamb. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m. Los vectores con un cuadro no son significativamente diferentes de cero.	35

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
22	Campo de velocidades del ciclón del Golfo de Campeche en coordenadas geográficas y el círculo muestra el perímetro dado por el radio del remolino obtenido a partir del ajuste al remolino de Lamb. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m. Los vectores con un cuadro no son significativamente diferentes de cero.	36
23	Nivel del mar para los meses de enero, abril, julio y octubre den 2010, las líneas puntadas indica valores positivos y las líneas solidas valores negativos. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.	37
24	Campo de velocidad obtenido de promediar en una malla de $1/3^\circ$ a los datos diarios de las boyas de deriva comprendidos en la región del Golfo de Campeche durante el periodo de diciembre del 2009 a noviembre del 2010.	38
25	Nivel del mar considerando geostrofia con datos de boyas de deriva menos un promedio espacial y temporal. Los valores indican elevación del mar en cm. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.	39
26	Nivel del mar con datos de AVISO menos un promedio temporal y espacial, los valores se encuentran en cm. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.	40
27	Se muestra las imágenes para tiempos diferentes divididas en celdas, para calcular la correlación y determinar el desplazamiento promedio por celda utilizado para calcular la velocidad en un intervalo de tiempo conocido y obtener el campo promedio de velocidad.	45

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
28	Configuración del experimento de laboratorio. La imagen de la izquierda muestra una vista superior que indica el tanque montado sobre la mesa rotatoria, el punto negro indica el eje de rotación de la mesa y el tanque está centrado sobre él. El cuadro S indica la posición de la región somera. La imagen derecha muestra una vista lateral. H indica la altura del agua y h indica la altura del escalón. Una cámara de video montada en el sistema en rotación se coloca en posición ortogonal a la superficie libre del fluido.	46
29	Las flechas indican el campo de velocidades y la vorticidad en colores para una razón de $L=1/2$. Las imágenes muestran el forzamiento inicial anticiclónico y se muestra su evolución para 1/6, 1, 5 y 11 periodos de rotación del sistema. La línea punteada roja indica la posición del escalón. Los tiempos están adimensionalizados respecto al periodo de rotación del sistema.	48
30	Experimento con una razón de $2/3$ del escalón con respecto a la profundidad del agua. Las imágenes indican la evolución temporal para el forzamiento inicial anticiclónico. La escala de colores es la vorticidad, las flechas la velocidad y la línea roja es la posición del escalón.	49
31	La barra de colores indica la vorticidad y las flechas el campo de velocidad para $L=1/2$. Las imágenes muestran la evolución en tiempo para el forzamiento inicial ciclónico.	50
32	Experimento con $L= 2/3$ del escalón con respecto a la profundidad del agua. Las imágenes indican la evolución temporal para el forzamiento inicial anticiclónico. La escala de colores es la vorticidad, las flechas la velocidad y la línea roja es la posición del escalón.	51

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Velocidad y vorticidad relativa característica del ciclón.	27
II	Valores obtenidos del perfil radial de la velocidad azimutal para los datos del ciclón y número de Rossby. R - radio del ciclón, $v_{\theta\max}$ la velocidad tangencial máxima, ECMR el error cuadrático medio relativo, ω_0 la vorticidad máxima, f el parámetro de Coriolis, Ro el número de Rossby.	30

Capítulo I

Introducción

El Golfo de Campeche es una cuenca semi cerrada que se localiza en el área comprendida entre las latitudes de 18.5°N a 23°N y las longitudes de 92°O a 97°O (figura 1). Una característica singular de la cuenca es que a los 94.5°O se presenta un cambio en la profundidad del fondo marino. La región occidental muestra profundidades de 2000 m hasta 3500 m, mientras que la región oriental es más somera con un promedio de 1500 m de profundidad. En trabajos anteriores se ha encontrado que en el Golfo de Campeche existe una circulación ciclónica semipermanente que abarca toda la cuenca, cuya existencia ha sido atribuida al forzamiento de los vientos (Vázquez de la Cerda et al. 2005). Sin embargo, observaciones recientes sugieren que el giro es influenciado por la geometría del fondo marino (Pérez Brunius et al. 2011). El primer objetivo de esta tesis es caracterizar al campo de velocidades del ciclón a partir de datos de boyas de deriva superficiales en el Golfo de Campeche, y determinar si la posición y tamaño del giro están delimitados por la topografía particular de la cuenca, así como obtener el campo de velocidad y vorticidad superficial para determinar la intensidad del giro y su variación temporal. El segundo objetivo de este trabajo consiste en explorar, mediante experimentos de laboratorio en un sistema en rotación con una geometría idealizada del Golfo de Campeche, si el ajuste del flujo en presencia de la topografía del fondo forzado con una aceleración angular inicial es un mecanismo físico que puede dar lugar a dicha circulación.

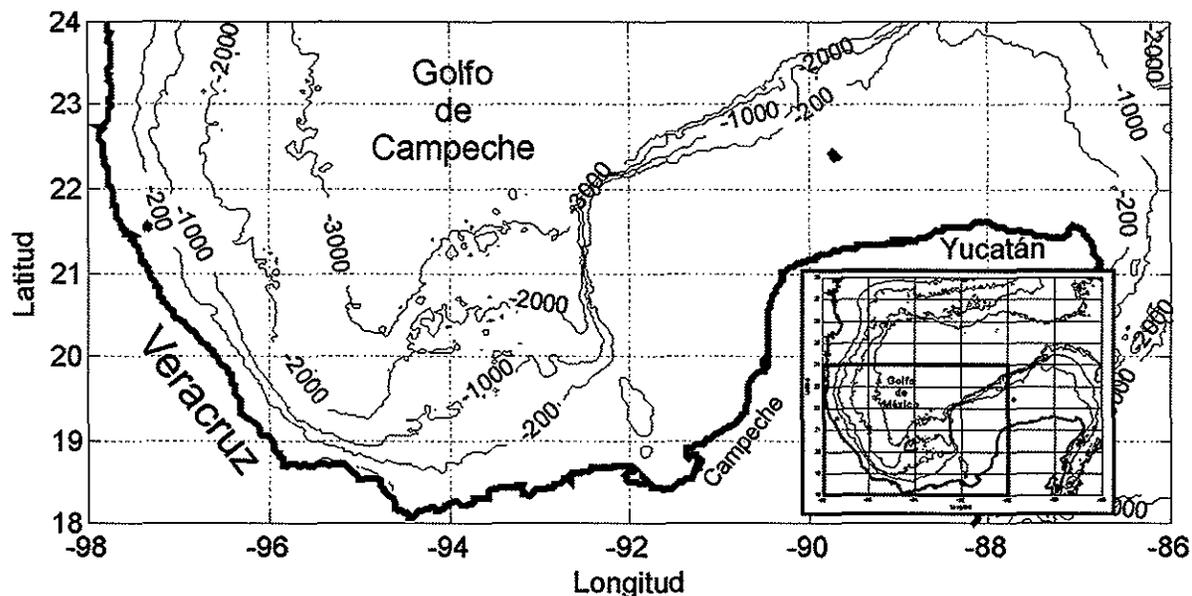


Figura 1. Mapa del Golfo de Campeche e isobatas en m.

1.1 Justificación

La importancia de conocer los procesos físicos que influyen tanto en la formación como en las características de la circulación ciclónica radica en obtener un modelo conceptual que explique el patrón de corrientes superficiales observado en el Golfo de Campeche. Este conocimiento ayudará a mejorar los modelos numéricos de circulación en la región, así como a diseñar estudios y experimentos que permitan ver qué procesos producen las variaciones en la intensidad y posición del giro ciclónico. Algunas razones prácticas por las cuales es importante desarrollar modelos físicos adecuados para representar las corrientes observadas en la región, es que éstos se pueden aplicar en diferentes áreas, por ejemplo:

- El diseño de estructuras de producción petrolera.
- El acoplamiento con modelos químico-biológicos que permitan entender el transporte de larvas de las especies de interés ecológico y/o comercial, el

intercambio de nutrientes entre la plataforma continental y la región de aguas profundas, así como su redistribución en el Golfo de Campeche.

- La predicción de la dispersión de contaminantes en aguas profundas (derrames petroleros como el ocurrido en abril del 2010 dentro del Golfo de México, considerando que México tiene planes de obtener petróleo en dicha región y en aguas profundas (Sotres Lozano, 2009).

I.II Antecedentes

I.II.I PROCESOS FÍSICOS QUE GENERAN GIROS PERMANENTES DE MESO Y GRAN ESCALA.

GIROS OCEÁNICOS DEBIDOS AL VIENTO

Los giros superficiales de gran escala espacial (orden de $\geq 10^3 \text{ km}$) en las cuencas oceánicas se forman debido al rotacional del esfuerzo del viento. Cuando existe un rotacional ciclónico (anticiclónico) se genera una divergencia (convergencia) en la capa de Ekman hasta llegar a un estado estacionario, donde debido a los gradientes de presión asociados con el hundimiento (elevación) de la superficie se generan corrientes geostróficas en el interior de la columna de agua causando la formación de remolinos ciclónicos (anticiclónicos). Dependiendo de la escala espacial de la cuenca y del campo de viento, el giro puede verse afectado por las variaciones latitudinales de la vorticidad planetaria, en cuyo caso el campo de velocidades se intensifica en la zona oeste, resultando en un giro asimétrico. Pero cuando un giro es formado por el viento pero su escala espacial no es lo suficientemente grande para ser afectado por la variación de la vorticidad planetaria (orden de $\leq 10^2 \text{ km}$), entonces será simétrico (Cushman-Roisin y Beckers, 2007).

EFFECTOS TOPOGRAFICOS EN LA DISTRIBUCION DE LA VORTICIDAD EN FLUJOS GEOFÍSICOS BIDIMENSIONALES

El teorema de Taylor-Proudman nos indica que, si un fluido homogéneo en rotación tiene un movimiento relativo con velocidad angular constante y pequeña comparada con la tasa de rotación del sistema, y despreciando a la fricción, entonces la velocidad no puede variar en la vertical (la dirección vertical es paralela al eje de rotación). Es decir, el fluido se mueve en forma de columnas y solo tiene movimiento horizontal (el plano horizontal es perpendicular al eje de rotación). Las columnas tienden a moverse en regiones con la misma profundidad, ya que el balance geostrófico predomina e inhibe su movimiento a zonas de diferente profundidad. Si por algún motivo las columnas se ven forzadas a subir o bajar escalones, entonces su vorticidad relativa disminuirá o aumentará, respectivamente, debido a la conservación de vorticidad potencial (Cushman-Roisin y Beckers, 2007). Es decir, si un flujo se encuentra sobre un fondo de profundidad variable, las columnas de agua que suben (bajan) una montaña submarina (un valle) experimentaran un(a) estiramiento (compresión) induciendo vorticidad anticiclónica (cyclónica) por conservación de vorticidad potencial, lo cual puede generar la formación de remolinos.

La presencia de remolinos en el océano se puede asociar a la turbulencia geostrófica y a procesos de inestabilidad de las corrientes, así como por la interacción de corrientes con las costas o con otros flujos intensos. Cuando existe una gran cantidad de remolinos que se encuentran separados por pequeñas distancias, se da una interacción entre ellos. Los remolinos tienden a evolucionar en el tiempo para fundirse y crear nuevos remolinos de mayor escala, formando al mismo tiempo filamentos y remolinos de menor tamaño los cuales tienden a destruirse por efectos de la viscosidad (Cushman-Roisin y Beckers, 2007).

Por lo tanto, debido al efecto de la interacción de la turbulencia geostrófica con la topografía del fondo y el hecho de que en el océano los movimientos se consideran casi bidimensionales debido a la rigidez que introduce la rotación de la tierra y la relación entre la escala vertical y horizontal, se ha observado que los vórtices ciclónicos de escalas grandes tienden a ajustarse a las zonas profundas y los vórtices anticiclónicos se localizan sobre regiones someras (Zavala Sansón et al. 2010).

PROCESOS DE AJUSTE A LA ROTACIÓN EN PRESENCIA DE ESCALONES

Para entender el fenómeno físico del ajuste de un flujo con topografía del fondo variable, diversos estudios han utilizado experimentos de laboratorio y numéricos. Van de Konijnenberg y van Heijst (1996) realizaron experimentos de *spin-up* con fluidos homogéneos en rotación bajo la presencia de un fondo variable con geometrías simétricas. El *spin-up* consiste en tener un fluido en rotación de cuerpo sólido y aumentar la velocidad angular del sistema, lo que induce una vorticidad anticiclónica uniforme en todo el fluido. Los resultados numéricos y de laboratorio muestran que la vorticidad se ajusta de acuerdo a la topografía, colocándose la vorticidad ciclónica en las zonas profundas y la anticiclónica en las partes someras (ver figura 2). Estos experimentos sugieren que la presencia de remolinos permanentes en una cuenca puede deberse al ajuste del flujo en presencia de un fondo variable.

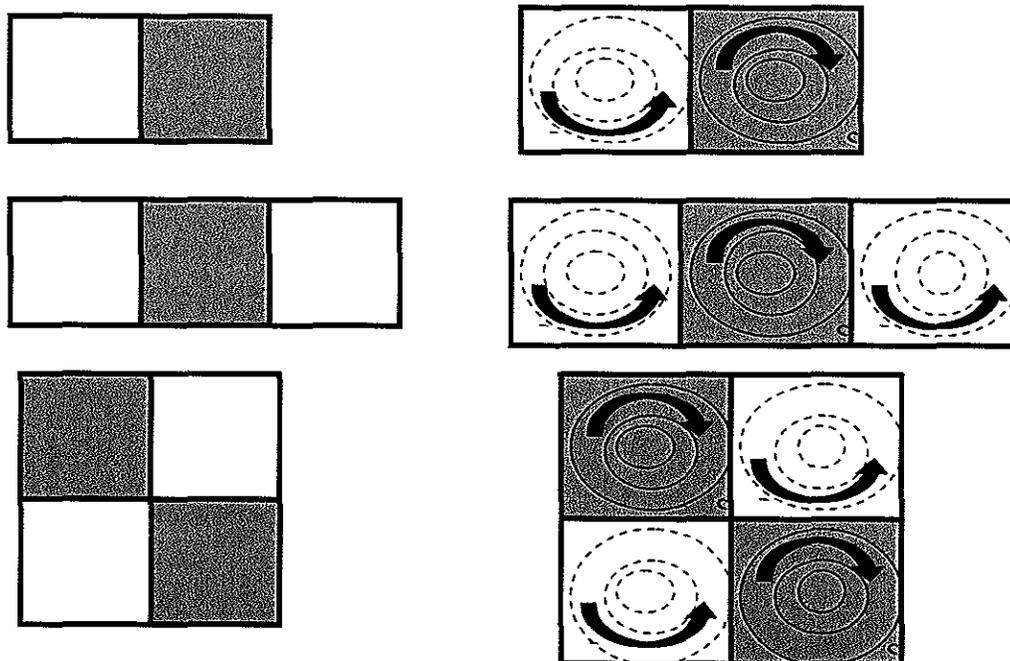


Figura 2. La columna de la derecha son las configuraciones utilizadas por Van de Konijnenberg y van Heijst (1996), donde la zona sombreada indica las regiones someras y las regiones en blanco las partes profundas. La columna derecha indica el sentido de la circulación después de varios periodos de rotación con el forzamiento inicial de spin-up.

En cambio, para el caso de experimentos de laboratorio y numéricos usando flujos turbulentos cuasi-bidimensionales en un sistema en rotación y una topografía que consiste de dos regiones, una profunda y otra somera, la evolución del flujo no muestra vorticidad preferencial debida al escalón (Tenreiro et al. 2010). El flujo evoluciona casi de manera independiente en las regiones somera y profunda, formando un número menor de remolinos pero de mayor tamaño. Sin embargo, no se encuentra una configuración preferencial de la vorticidad. El porcentaje de los vórtices localizado en ambas regiones indica ligeramente una mayor probabilidad para encontrar los ciclones (anticiclones) en la región profunda (somera). Además, observaron una corriente persistente a lo largo de la topografía con la región somera a la derecha. La corriente choca con la pared del tanque lo cuál genera un dipolo que sí tiene una preferencia con

respecto a la topografía, con el anticiclón en la parte somera y el ciclón en la región profunda.

EVIDENCIA DE EFECTOS DE LA TOPOGRAFÍA EN LAS CORRIENTES OCEÁNICAS

Utilizando un modelo oceánico de capas, Hulburt y Metzger (1998) mostraron que las corrientes en la capa profunda tienen influencia sobre la capa superficial oceánica. Ellos observaron que la corriente en la capa profunda influye en la dirección de la Extensión de la corriente de Kuroshio. El modelo, desarrollado en una malla de $1/16^\circ$ en el Océano Pacífico, mostró que la intrusión de la corriente hacia el oeste es dependiente de la geometría costera del estrecho de Luzón. Cuando se consideran dos bancos en la batimetría, el ancho del estrecho de Luzón es reducido, bloqueando y desviando el paso de la corriente, resultando en una menor intrusión hacia el oeste. Utilizando una geometría más precisa de la costa los resultados del modelo tienen una mejor aproximación a los datos observacionales (figura 3).

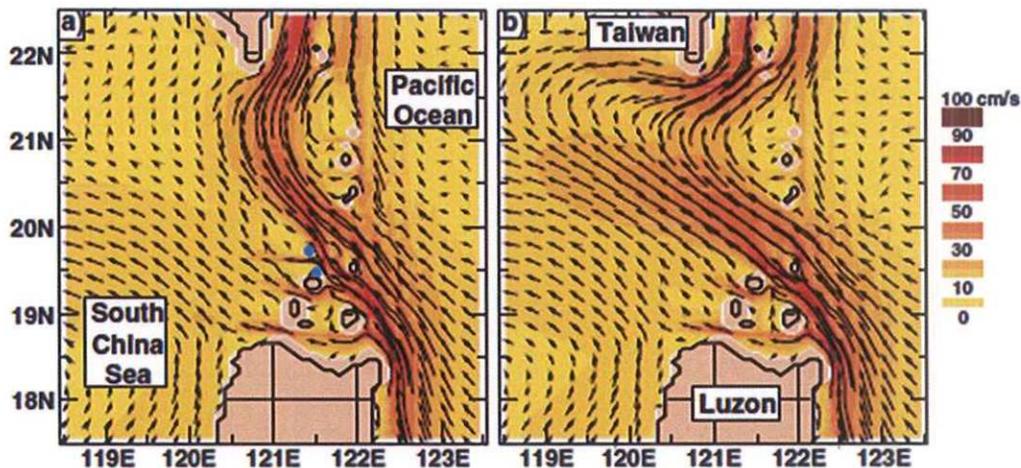


Figura 3. Promedio de las velocidades superficiales en una malla de $1/16^\circ$ sobre el estrecho de Luzón donde se conectan el océano Pacífico y el Mar del sur de China. A) Incluye el Banco de Calayan y el Banco de la Isla de Calayan en la malla. B) Excluye estos puntos topográficos del modelo. Adaptado de Metzger y Hulburt (1998) por Gille et al. (2004)

Krupitsky et al. (1996) aplicaron un modelo equivalente barotrópico lineal para describir el perfil vertical de la velocidad promedio de la Corriente Antártica Circumpolar, ajustando el perfil de velocidad a una exponencial donde la velocidad disminuye con una escala de referencia H_0 . El modelo resuelve a primer orden las isolíneas de la vorticidad potencial correspondiente a un flujo equivalente barotrópico:

$$q = \frac{f}{F} \quad (1)$$

donde f es el parámetro de Coriolis, $F(H) = H_0(1 - e^{-H/H_0})$ y H es la profundidad del fondo marino. Lo anterior implica que el flujo es coherente y unidireccional en la vertical y que, en ausencia de fricción o forzamientos externos, sigue contornos de q constante.

El modelo equivalente barotrópico es una forma simple de considerar los efectos de baroclinicidad y la topografía en flujos unidireccionales en la vertical. Utilizando una selección apropiada del perfil vertical de la corriente, se puede modelar variaciones de las estructuras baroclínicas en forma puramente barotrópica. Este modelo genera una reproducción razonable del transporte y la posición de la Corriente Antártica Circumpolar.

I.II.II ESTUDIOS DE LA CIRCULACIÓN CICLÓNICA DEL GOLFO DE CAMPECHE

Estudios observacionales del Golfo de Campeche han establecido que la circulación superficial está dada por un giro ciclónico que abarca toda la cuenca (Vázquez de la Cerda et al. 2005). La evidencia observacional presentada se basa en datos de altimetría satelital, escasos datos hidrográficos y datos de boyas de deriva superficiales. Los datos hidrográficos fueron referenciados a 425 dbar y analizados por funciones empíricas ortogonales, donde el primer modo representó

el 93.3% de la varianza. El promedio de las alturas dinámicas para este primer modo describe a un giro ciclónico centrado en los 20°N, 94.5°O ocupando toda la región del Golfo de Campeche. Un promedio de 10 años de datos de boyas de deriva también muestra la presencia de una circulación ciclónica al sur de los 22.5°N tanto para el promedio de los semestres de primavera-verano y otoño-invierno, con una intensificación de las corrientes promedio en la frontera oeste (ver figura 4). Los patrones espaciales dominantes de los datos de altimetría satelital para un promedio de 8.5 años, también sugieren la presencia de un giro ciclónico permanente de gran escala. La permanencia de esta circulación ciclónica, la intensificación de la circulación en la frontera oeste y la presencia de un rotacional positivo del viento durante todo el año ha llevado a sugerir que la circulación observada es debida a los vientos (Vázquez de la Cerda et al. 2005).

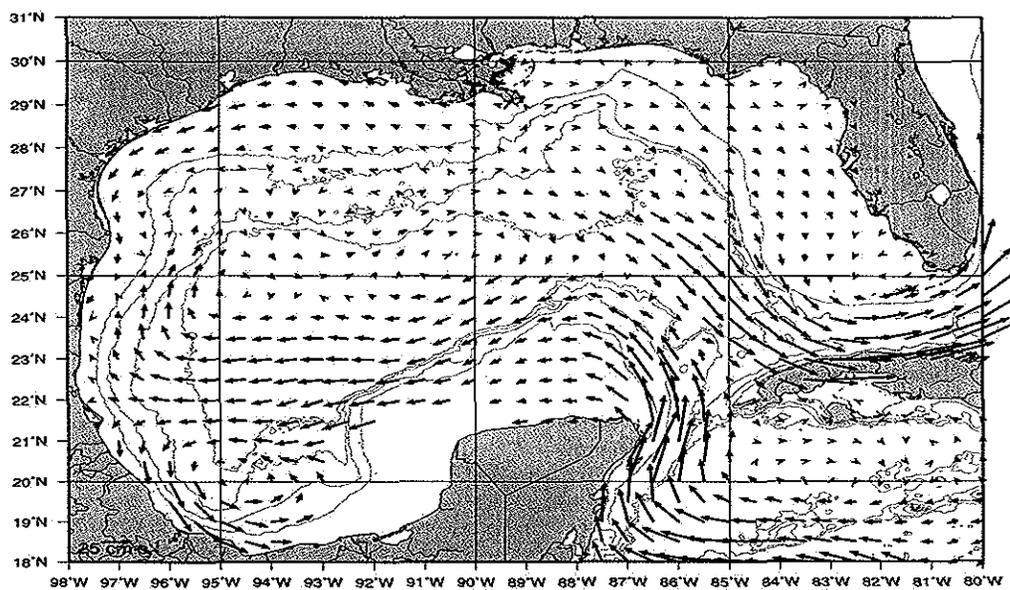


Figura 4. Velocidad superficial promedio, estimada en una malla de 1.5x1.5° con datos de boyas de deriva del periodo de 1989-1999 de DiMarco, et al (2005).

Sin embargo, análisis preliminares de nuevos datos de boyas de deriva superficiales colocadas en la zona sur del Golfo de México (figura 5) muestran que el ciclón aparece confinado al área profunda. Estos nuevos datos no muestran una

intensificación del ciclón en la frontera oeste. Además, datos de corrientes obtenidos por anclajes localizados en la parte profunda del Golfo de Campeche muestran que el campo de velocidad es coherente y unidireccional hasta el fondo, mientras que en la región somera, el flujo sólo está correlacionado con las corrientes superficiales hasta los 350 m. Esto sugiere que el ciclón es un flujo equivalente barotrópico, y que la topografía del Golfo de Campeche determina la localización y tamaño del giro debido a la conservación de vorticidad potencial (Pérez Brunius et al. 2011).

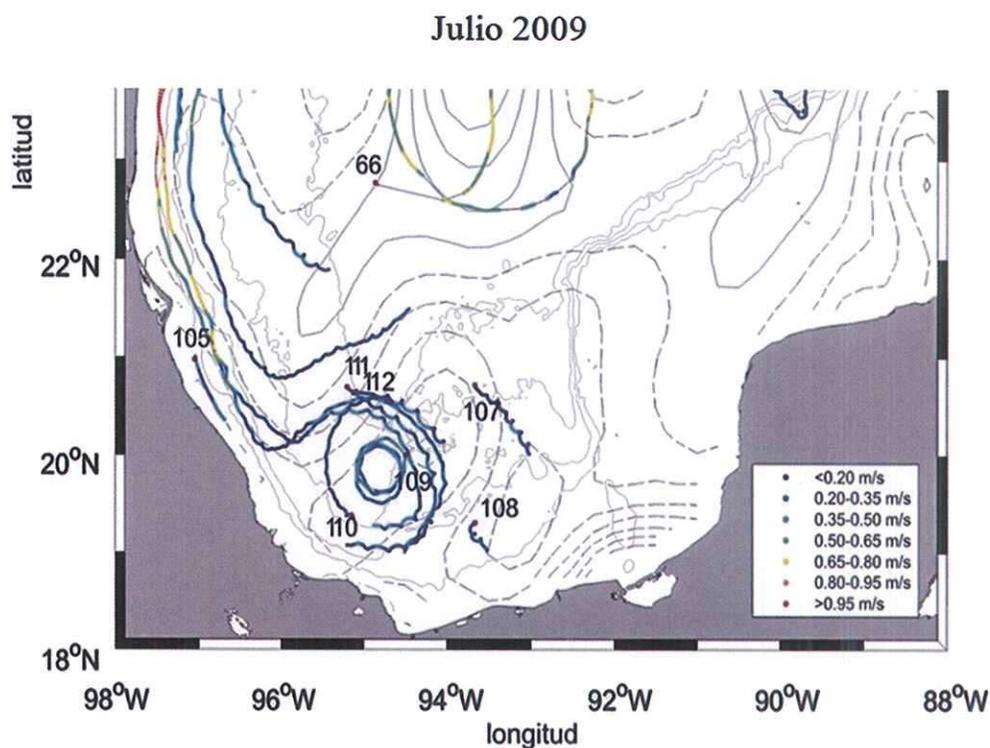


Figura 5. Trayectorias de boyas de deriva lanzadas en el Golfo de Campeche correspondientes al mes de Julio de 2009. Los colores indican la rapidez, determinada a partir de los datos horarios. El final de las trayectorias se indica con un punto morado, junto al cual se encuentra el número del instrumento.

I.III Objetivo

Objetivo general

- Estudiar la influencia de la topografía del fondo sobre la posición y tamaño del giro ciclónico del Golfo del Campeche con datos de boyas de deriva superficiales y con experimentos de laboratorio.

Objetivos particulares

- La componente observacional de este trabajo pretende:
 - Obtener el campo de velocidad y de vorticidad en un sistema coordinado centrado en el ciclón, a partir de datos de boyas de deriva superficiales.
 - Cuantificar la variación temporal del campo de velocidad y vorticidad del giro ciclónico.
 - Determinar la posición y tamaño del ciclón y su relación con la topografía del Golfo de Campeche.
- La componente experimental de este trabajo pretende estudiar el ajuste del flujo a un escalón en experimentos forzados por una aceleración angular inicial (*spin-up* o *spin-down*), usando una configuración simplificada de la topografía del Golfo de Campeche.

I.IV Hipótesis

- La posición y tamaño del giro ciclónico en el Golfo de Campeche están determinados por la topografía del fondo marino.
 - En los experimentos de laboratorio la circulación es anticiclónica en la parte somera, y ciclónica en la parte profunda a los costados del escalón, tanto para el forzamiento de aceleración angular positiva (*spin-up*) como negativa (*spin-down*).
-

Capítulo II

EL ciclón del Golfo de Campeche a partir de datos de boyas de deriva.

En este capítulo se describe el estudio del ciclón del Golfo de Campeche con los datos de boyas de deriva del periodo de diciembre 2009 a noviembre del 2010. Como se mencionó en el capítulo anterior, trabajos previos indican que el ciclón del Golfo de Campeche abarca toda la cuenca; sin embargo nuevas boyas a la deriva lanzadas en la zona de estudio sugieren una influencia de la topografía sobre el ciclón. Con el interés de conocer de forma más detallada la circulación en el Golfo de Campeche, la parte observacional de este estudio pretende determinar si la topografía juega un papel importante en el tamaño y posición del ciclón. Para ello, se determina el campo de velocidad y vorticidad en un nuevo sistema coordinado centrado en el ciclón, con la finalidad de eliminar el movimiento de traslación del ciclón. Para calcular las características del ciclón (como su tamaño e intensidad), se realiza un ajuste al perfil teórico de velocidad del remolino no aislado circular de Lamb. Por último, se determina si la posición y tamaño están delimitados por la topografía del Golfo de Campeche.

II.I Datos

II.I.I DATOS DE BOYAS DE DERIVA

Se utilizaron datos de boyas de deriva superficiales Far Horizon Drifter, las cuales se han lanzado desde 2007 en la zona sur del Golfo de México (entre 18°N y 22°N, 93°O y 98°O). Las trayectorias de las boyas cubren un área importante de la zona de estudio como se muestra en la figura 6. Las boyas de deriva son instrumentos que flotan en la superficie del mar. Cuentan con un sistema de arrastre a 50m de profundidad para asegurar que su movimiento sea causado por las corrientes marinas y no sean arrastradas por el viento. Estas boyas cuentan con un transmisor GPS que emite a un receptor satelital su posición que es registrada cada hora.

Se lanzan 8 boyas bimestrales; actualmente se cuenta con información de más de 200 boyas lanzadas. El tiempo que duran transmitiendo datos es en promedio 3 meses, y algunas alcanzan un periodo de hasta 5 meses. Esta nueva base de datos tiene una buena cobertura espacial y temporal para caracterizar el remolino del Golfo de Campeche. Para este trabajo se utilizaron los datos del periodo de diciembre del 2009 a noviembre del 2010. Se tomaron únicamente los datos de las boyas de deriva que se encontraban en la región del Golfo de Campeche.

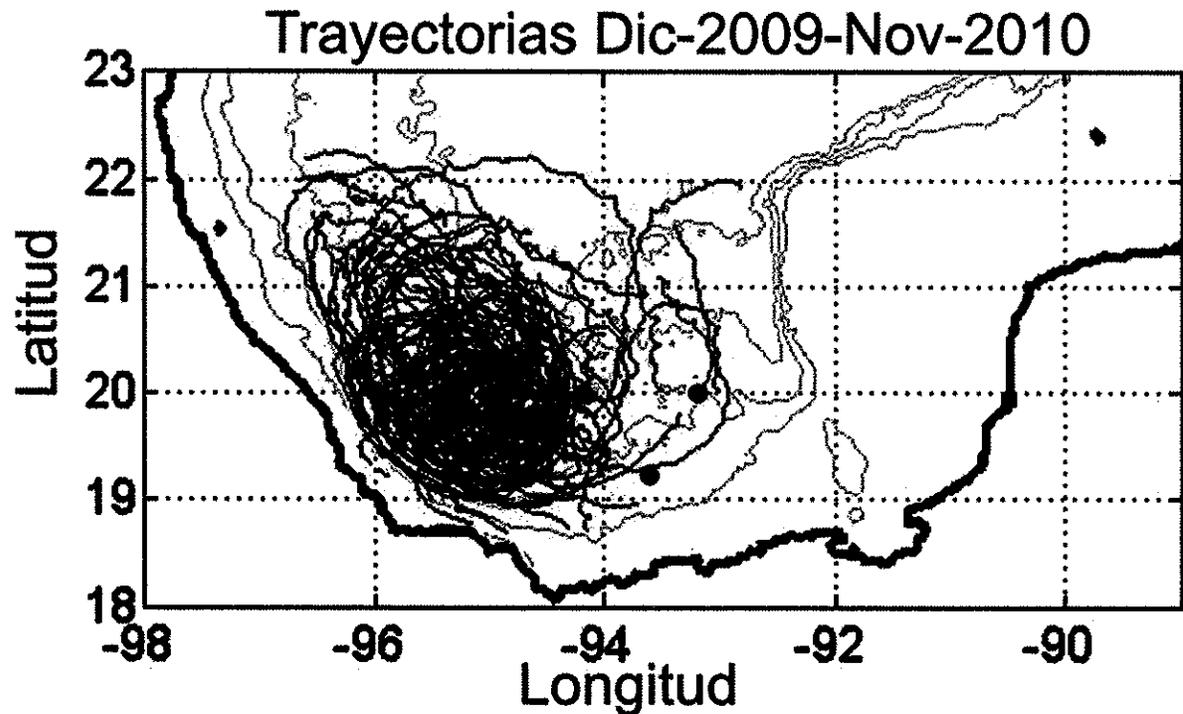


Figura 6. Los puntos negros muestran las zonas donde son lanzadas las boyas de deriva y las líneas muestran las trayectorias de las boyas seleccionadas. En el fondo los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.

II.I.II SELECCIÓN DE TRAYECTORIAS

Las trayectorias descritas por las boyas fueron analizadas para elegir las secciones que se encuentran en el giro ciclónico del Golfo de Campeche. Con esta información se busca determinar la posición del centro del ciclón utilizando un método de ajuste. Los criterios para la selección fueron:

- Trayectorias que se encuentran en la región comprendida entre las latitudes de 18.5°N a 23°N y las longitudes de 92°O a 97°O .
- Secciones que formarán una trayectoria semicircular o circular con sentido ciclónico.

A partir de estos criterios se seleccionaron 57 trayectorias obtenidas de 34 boyas de deriva. La trayectoria con un máximo de registros horarios es de un periodo de 30 días, la de un mínimo de datos es de 4 días, y en promedio las trayectorias son de periodos de 15 días. El siguiente histograma muestra el número de trayectorias en función de su longitud en días.

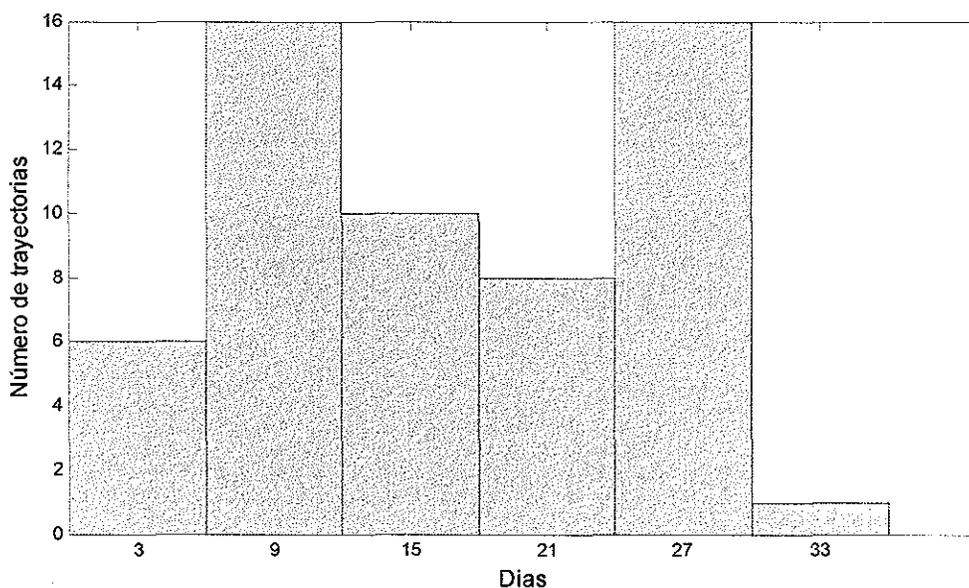


Figura 7. Histograma del número de trayectorias de longitud en días.

Para el periodo de estudio se utilizaron un total de 22820 datos horarios. El mes que cuenta con un mínimo de datos es diciembre, con aproximadamente 400 datos, y el mes con un máximo de datos es mayo, con más de 8000 registros (figura 8). Los datos no presentan una homogeneidad mensual, pero en general se tiene más de 2000 registros para todos los meses, excepto diciembre de 2009.

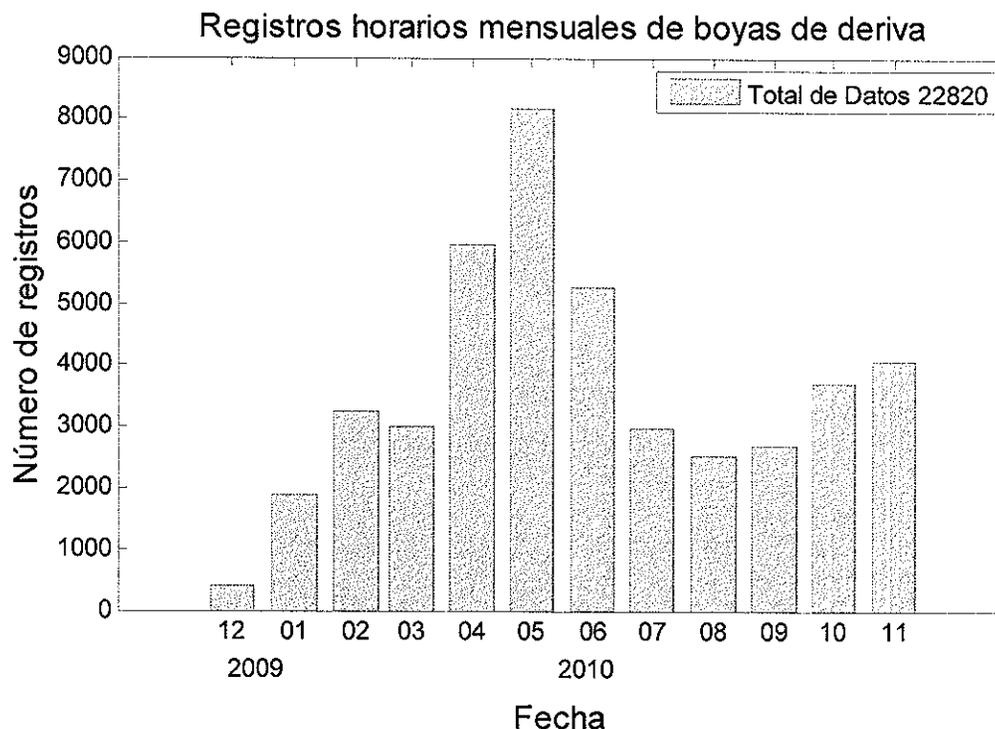


Figura 8. Histograma del total de datos horarios registrados por las boyas de deriva mensualmente.

II.I.III DATOS DEL NIVEL DEL MAR POR ALTIMETRÍA

Para obtener el centro del ciclón del Golfo de Campeche se utilizaron datos del nivel del mar de AVISO NRT obtenidos por altimetría del periodo de diciembre del 2009 a noviembre del 2010, con una resolución temporal de 7 días, aunque se usó el producto interpolado a 1 día. Cada punto corresponde a las 00:00 en horario GMT y se encuentra en una malla de resolución espacial de 1/3 de grado. Estos datos tienen como referencia una topografía dinámica media global (MDT CNES-CLS09) la cual considera un geode en base a 4,5 años de mediciones gravimétricas del proyecto GRACE, datos de boyas de deriva de 1993 a 2008, usando un modelo de Ekman que extrae la componente geostrofica de las velocidades de boyas, y por último utiliza también observaciones de CTD de 1993 a 2008 (para más detalles ver la página web de AVISO <http://www.aviso.oceanobs.com/>),

II.II Metodología para determinar tamaño y posición del ciclón del Golfo de Campeche con respecto a la topografía.

II.II.I SELECCIÓN DEL CENTRO DEL CICLÓN

Con la finalidad de hacer un cambio de coordenadas al centro del ciclón y de esa manera quitar el movimiento de traslación del mismo, se obtuvo el centro del ciclón por los métodos de centro de masa, mediana, ajuste a un círculo por mínimos cuadrados y por altimetría. El centro de masa es el punto en el cual se puede considerar concentrada toda la masa de un objeto o de un sistema. La mediana de un conjunto finito de valores es aquel valor que divide al conjunto en dos partes iguales. EL ajuste a un círculo por mínimos cuadrados es la optimización matemática, en la que, dado un conjunto datos, se intenta encontrar la función (círculo) que mejor se aproxime a los datos utilizando el criterio de mínimo error cuadrático.

Inicialmente se hicieron los cálculos por medio del centro de masa, mediana y ajuste al círculo con secciones de trayectorias de las boyas de deriva para periodos de 10 días, con el fin de tener datos suficientes en cada periodo, y que el intervalo de tiempo fuera lo más corto posible para que el ciclón no tuviera una variación significativa en su forma o su posición.

Además, a partir de los datos de altimetría se obtuvo la posición del centro seleccionando el punto donde el nivel del mar es mínimo en la región donde se encuentra el ciclón del Golfo de Campeche, es decir, el área que se encuentra entre las latitudes de 18°N a 21°N y longitudes de 94°O a 97°O.

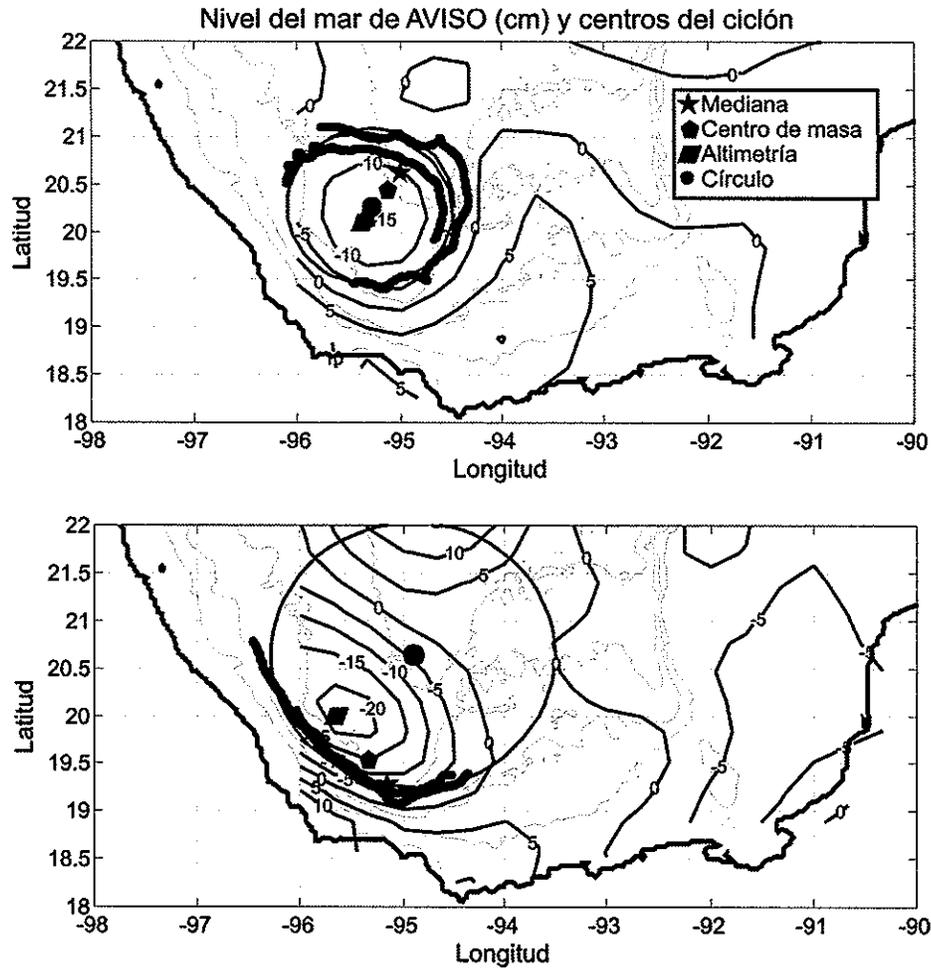


Figura 9. Nivel del mar (contornos negros, en cm) y trayectorias de las boyas de deriva (línea gruesa) para el periodo del 10-20 de agosto del 2010 (superior) y del 10-20 de enero del 2010 (inferior). Se muestran las posiciones de los centros del ciclón obtenidos por los diferentes métodos. Al nivel del mar se le extrajo una media general tanto espacial como temporal. El círculo indica el tamaño del ciclón obtenido por mínimos cuadrados.

La figura 9 muestra las posiciones obtenidas por los diferentes métodos para dos periodos diferentes, donde se puede observar que los ajustes del círculo y por altimetría aproximan mejor el centro del ciclón con respecto a los contornos de altimetría para el periodo del 10-20 de agosto del 2010. Sin embargo, en los periodos de pocos datos o en los que las trayectorias no tienen una forma semicircular, el ajuste a un círculo sobreestima el tamaño del ciclón como se observa para el periodo del 10-20 de enero del 2010. Por ello se optó por usar el

centro obtenido por altimetría ya que, aunque tiene una menor resolución espacial, en los periodos en que se tengan pocos datos de trayectorias se puede obtener una posición adecuada del centro, además tiene una mayor resolución temporal que la de los otros métodos.

II.II.II CAMBIO DE COORDENADAS AL CENTRO DEL CICLÓN

Se realizó el cambio de coordenadas de las trayectorias de las boyas de deriva con el centro obtenido por altimetría:

$$X'(t_h) = x(t_h) - X_c(t_i), \quad (2)$$

donde t_h es el tiempo en intervalos de horas en horario GMT, t_i es el tiempo en intervalos diarios a las 00:00 horas en horario GMT, $x(t_h)$ es la posición horaria de las boyas en coordenadas geográficas, $X_c(t_i)$ la posición del centro diario del giro ciclónico del Golfo de Campeche obtenido por altimetría y $X'(t_h)$ es la posición horaria en el sistema coordenado del ciclón,. Se toman secciones de trayectorias en intervalos diarios de las 00:00 horas a las 23:00 horas de las trayectorias y se le quita la posición del centro obtenido por altimetría (un valor por día).

A partir de los datos en el nuevo sistema coordenado se realizó un cambio de coordenadas geográficas a coordenadas cartesianas usando como origen el centro del ciclón (figura 10). Se calcula la distancia del centro del ciclón a cada dato tomando en cuenta las variaciones debido a la esfericidad de la Tierra, utilizando la función `sw_dist` de la librería `SeaWater` de Matlab version 3.3 (Phillip P. Morgan and Lindsay Pender, CSIRO http://www.cmar.csiro.au/datacentre/ext_docs/seawater.htm).

Trayectorias Dic-2009-Nov-2010

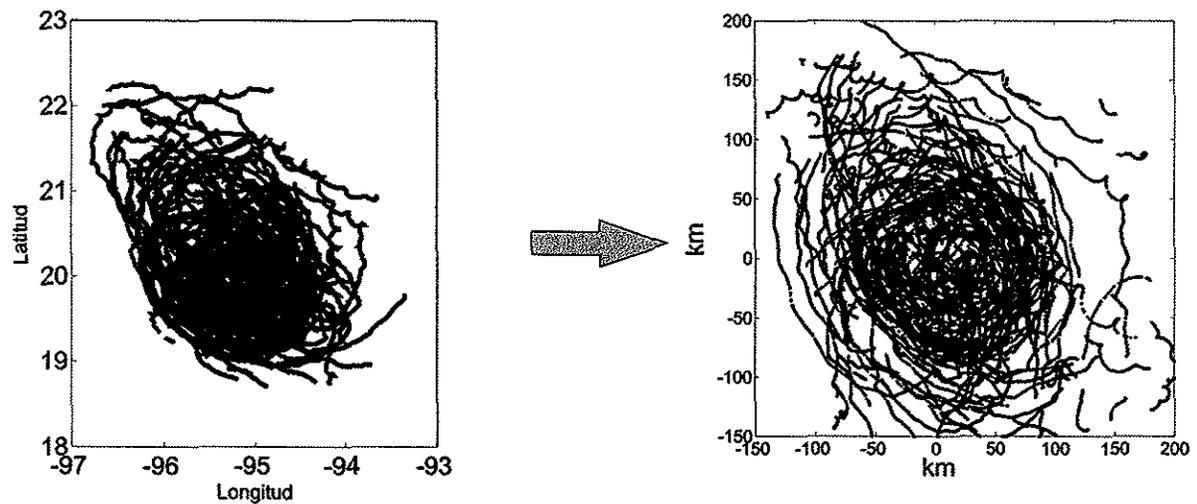


Figura 10. Se muestran las trayectorias seleccionadas en coordenadas geográficas (izquierda) y en coordenadas cartesianas referenciadas al sistema coordenado del centro del ciclón (derecha).

II.II.III CAMPO DE VELOCIDAD Y VORTICIDAD EN EL NUEVO SISTEMA COORDENADO

En el nuevo sistema coordenado se calculó la velocidad horaria de cada trayectoria por derivadas centradas de la posición. Luego se promedió el campo de velocidad en una malla regular con resolución de 25km, usando promedios centrados en un cuadro de 50km de lado. Estos promedios se realizaron para periodos trimestrales (dic-feb, mar-may, jun-ago y sep-nov) y anual para el periodo de diciembre 2009 a noviembre del 2010. A partir de los campos de velocidad promedio se calculó la vorticidad relativa por medio de diferencias centradas para cada periodo trimestral y para el promedio anual. Se calcularon las elipses de varianza y se graficaron superpuestas al campo de velocidades. Después se calcularon los intervalos de confianza al 95% utilizando una prueba t-Student, para determinar los valores promedio que son significativamente diferentes de cero. Los grados de libertad se determinaron asumiendo un tiempo integral de 8 días (DiMarco et al. 2005; Emery y Thomson, 1997). Los resultados se muestran en la sección II.III.I.

II.II.IV AJUSTE A REMOLINO TEÓRICO

Con el interés de determinar el tamaño aproximado y la vorticidad máxima del ciclón del Golfo de Campeche, se realizó una aproximación a un remolino teórico circular. Existen diferentes tipos de vórtices teóricos como el de Rankine o el remolino potencial, pero estos son discontinuos (Kundu y Cohen, 2004). Otros tipos de remolinos son el aislado y no aislado, los cuales tienen perfiles de velocidad y vorticidad continuos (van Heijst, 2008). Sin embargo el vórtice aislado se considera inestable y después de un tiempo tiende a formar tripolos (van Heijst, 2008). Por lo tanto, se consideró que el más apropiado para modelar al ciclón del Golfo de Campeche es el remolino no aislado (figura 11). Utilizamos el vórtice de Lamb, el cual se define por:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= \frac{\omega_0 R^2}{2r} \left(1 - e^{-\left(\frac{r^2}{R^2}\right)} \right) \\ \omega &= \omega_0 e^{-\left(\frac{r^2}{R^2}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

donde : v_{θ} es la componente azimutal de la velocidad, ω es la componente vertical de la vorticidad relativa, r es la distancia radial desde el centro del vórtice, R es una escala radial del remolino, ω_0 es la vorticidad máxima.

El perfil de velocidad del vórtice alcanza un máximo, después decae como el inverso de la distancia radial. Por otro lado, el campo de vorticidad es siempre del mismo signo y decae exponencialmente a partir del centro del vórtice. Debido a estas características, este tipo de vórtice se llama no aislado.

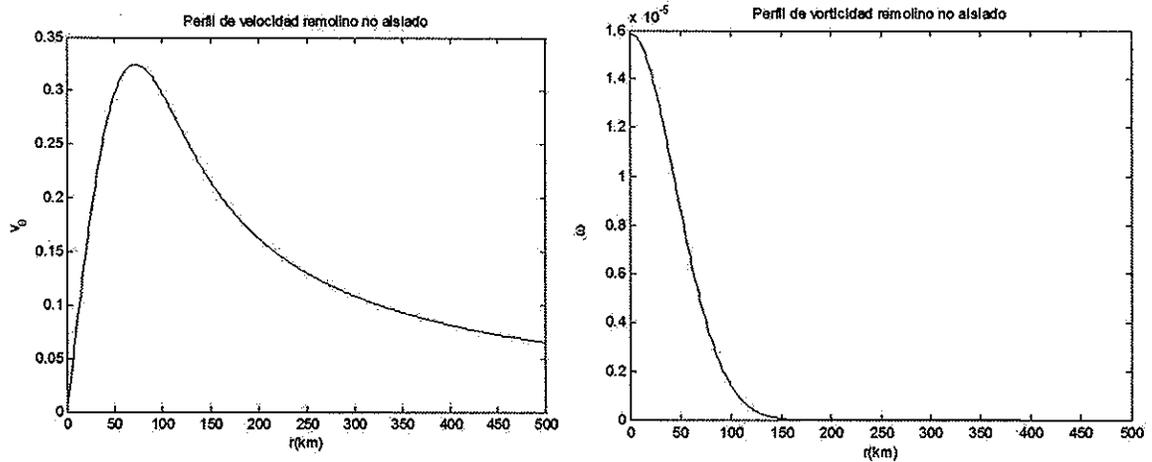


Figura 11. Perfil de velocidad y de vorticidad de un vórtice no aislado con velocidad angular de $\Omega = 1.1038 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ y radio típico de 65km.

Para realizar el ajuste a la ecuación de la velocidad azimutal (3) se siguió el siguiente procedimiento. Los datos horarios de velocidad, sin promediar en la malla, se cambiaron a coordenadas polares para obtener la componente azimutal de la velocidad en función del radio, y a estos se les ajustó el perfil teórico. En la ecuación 3 quedan como parámetros libres la vorticidad máxima ω_0 y la escala radial R . Para dejar un solo parámetro libre en la ecuación, fijamos el valor de R para la región donde la velocidad tiene los valores máximos, tomando un rango de 50 a 120km. Esto debido a que la velocidad máxima para el remolino de Lamb se encuentra a una distancia de $1.12R$. Se ajustó el perfil teórico a la velocidad azimutal horaria por mínimos cuadrados, con ω_0 como parámetro libre y variando el radio R en intervalos de 1km. El mejor ajuste fue considerado el del valor de R que correspondiera al error cuadrático medio menor. Se realizó este proceso para cada trimestre y para el promedio anual, para comparar los datos reales al perfil y así obtener la vorticidad máxima del ciclón del Golfo de Campeche. Además se calculó el número de Rossby $\left(Ro = \frac{\omega_0}{f} \right)$ para cada periodo, donde ω_0 es la vorticidad máxima del giro y f el parámetro de Coriolis.

A partir de los parámetros encontrados se calculó el perfil de vorticidad con la finalidad de determinar el tamaño aproximado del ciclón. El tamaño aproximado del remolino de Lamb se estima como a la distancia a la cual el perfil de vorticidad tiende a cero; en este caso se determina cuando $\frac{\omega}{\omega_0} \rightarrow O(10^{-3})$. Los resultados se muestran en la sección II.III.I.

II.II.V POSICIÓN Y TAMAÑO DEL CICLÓN RESPECTO A LA TOPOGRAFÍA

Para determinar los lugares más probables de encontrar el centro del remolino y su posición con respecto a la topografía, se calculó el número de días en los que se localiza el centro del ciclón obtenido por el mínimo del nivel del mar, en una malla de $1/3^\circ$ en la región comprendida entre las latitudes de 19°N a 21°N y longitudes de 93°O a 96°O .

Para relacionar el tamaño del ciclón con la topografía, se hizo un cambio de coordenadas del campo de velocidades en un sistema centrado en el ciclón a un sistema de coordenadas geográficas, centrándolo en la posición promedio para cada periodo, y se agregó un círculo con el tamaño obtenido por el ajuste al perfil teórico. Los resultados se muestran en la sección II.III.II.

II.II.VI NIVEL DEL MAR CON VELOCIDADES DE BOYAS DE DERIVA

Se determinó el nivel del mar a partir del campo de velocidades obtenido de las boyas de deriva para compararlo con el nivel del mar de los datos de altimetría de AVISO.

Asumiendo que el giro se encuentra en balance geostrófico, el nivel del mar se puede determinar a partir de la velocidad del giro, usando las ecuaciones:

$$\begin{aligned}fv &= g \frac{\partial \eta}{\partial x} \\fu &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y}\end{aligned}\tag{4}$$

donde η es la elevación del mar, f es el parámetro de coriolis, (u, v) es la velocidad y g la aceleración de la gravedad terrestre.

Se seleccionaron las trayectorias con datos diarios de las boyas de deriva que se encontraron en la región comprendida entre la longitud 90°O a 98°O y latitud entre los 18°N a 22°N , para el periodo de diciembre del 2009 a noviembre del 2010. Se utilizaron 11685 datos diarios de 38 boyas diferentes.

Se calculó la velocidad por medio de diferencias centradas para cada trayectoria y después se promedió en una malla de $1/3$ de grado, debido a que el nivel del mar por altimetría está en una malla de $1/3$ de grado. La ecuación (4) se integró por el método de la regla de Simpson para obtener el nivel del mar. Los resultados se muestran en la sección II.III.III.

II.III Resultados y discusiones.

En esta sección se describen los resultados obtenidos para las características del ciclón del Golfo de Campeche a partir de los datos de boyas de deriva. Utilizando los campos de velocidad obtenidos en un sistema coordenado centrado en el ciclón, se estimó su tamaño y vorticidad relativa máxima mediante el ajuste de los datos a los campos de velocidad y vorticidad de un remolino teórico.

Además se muestra el análisis para la evolución de las trayectorias de boyas de deriva y altimetría con las que se determinaron las variaciones de su tamaño y forma para cada trimestre y su relación con la presencia de anticiclones colindantes con el ciclón. También, se relacionó la posición y tamaño del ciclón con la topografía del fondo.

II.III.I CAMPOS EN EL SISTEMA COORDENADO DEL CICLÓN.

La siguiente figura muestra el campo de velocidad del promedio anual para el periodo de diciembre 2009 a noviembre del 2010 en una malla cuadrada de 25km. El ciclón tiene una forma circular. Podemos observar que tanto en el promedio anual como en los trimestrales (figura 13) se observa que la circulación ciclónica persiste.

En la figura 13 se indican los campos de velocidad promediados por trimestres para el periodo seleccionado. Las regiones donde no se cubre toda la malla es debido a que para el periodo no hay datos, son nulos o el número de datos para la celda equivale a menos de 5 grados de libertad.

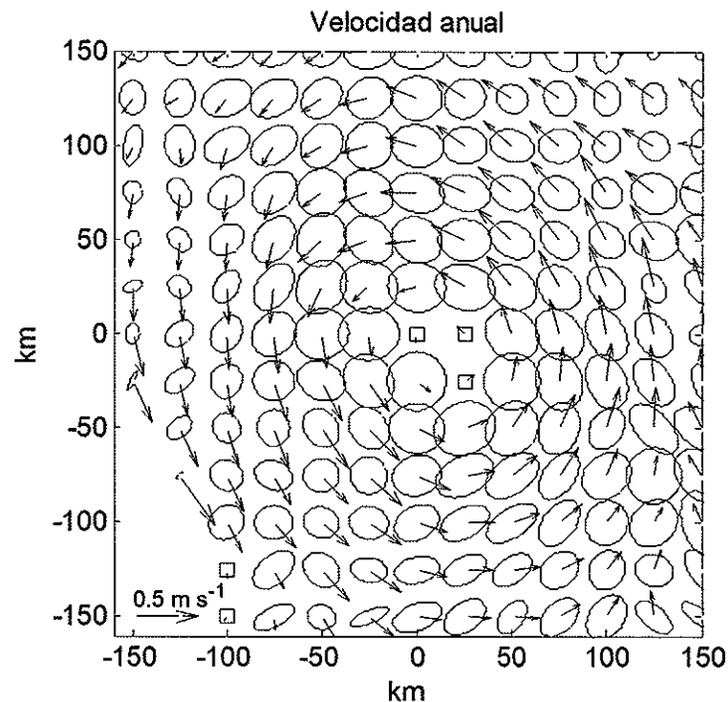


Figura 12. Promedio anual del campo de velocidades obtenido con datos de boyas de deriva de dic 2009-nov 2010 y elipses de desviación estándar. Los vectores encerrados en un cuadro son no significativamente diferentes de cero.

Los campos de velocidades muestran que el ciclón tiene variaciones en su magnitud, y dirección a lo largo del año. Para el periodo de diciembre-febrero, el ciclón tiene una forma más elíptica. En marzo-mayo el giro tiene una forma elíptica

como en el trimestre anterior, sin embargo en tamaño es más similar al trimestre de junio-agosto. Este periodo es menos intenso que el periodo diciembre-febrero (Tabla I).

El periodo de junio-agosto tiene una forma circular como el periodo de septiembre-noviembre, pero su tamaño es mayor como el de marzo-mayo. El campo de velocidad correspondiente al periodo de septiembre-noviembre presenta un menor tamaño y forma circular.

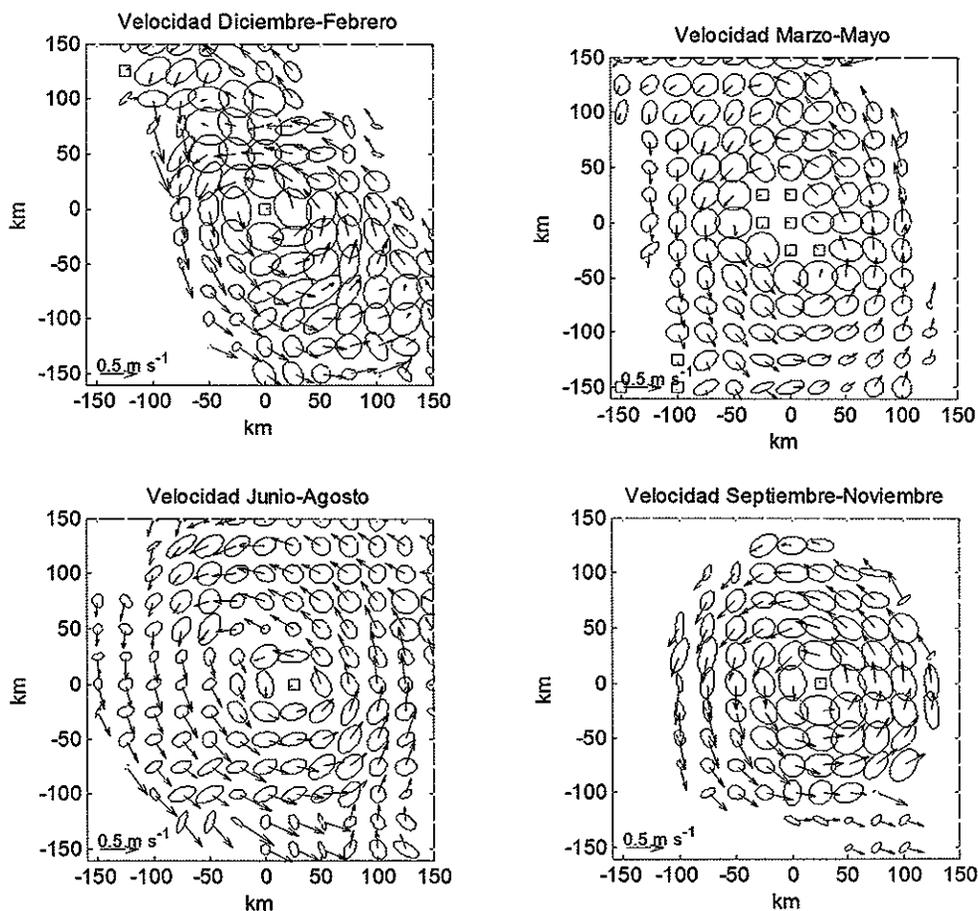


Figura 13. Campo de velocidades obtenido con datos de boyas de deriva en coordenadas del centro del ciclón para las diferentes estaciones del año del periodo Dic. 2009-Nov 2010 y elipses de desviación estándar. Los vectores encerrados en un cuadro son no significativamente diferentes de cero.

La siguiente tabla muestra los valores máximos y mínimos de la velocidad y la componente vertical máxima de la vorticidad relativa para cada periodo.

Tabla I. Velocidad y vorticidad relativa característica del ciclón.

Periodo	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Vorticidad relativa máxima ($\times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$)
Anual	0.08	0.36	1.11
Dic-Feb	0.05	0.56	1.90
Mar-May	0.03	0.44	1.09
Jun-Ago	0.07	0.47	1.73
Sep-Nov	0.02	0.55	1.75

El campo de vorticidad se obtuvo a partir de los campos de velocidad anteriores tanto para el promedio anual como para los periodos trimestrales. La figura 14 muestra la componente vertical de la vorticidad relativa del promedio anual.

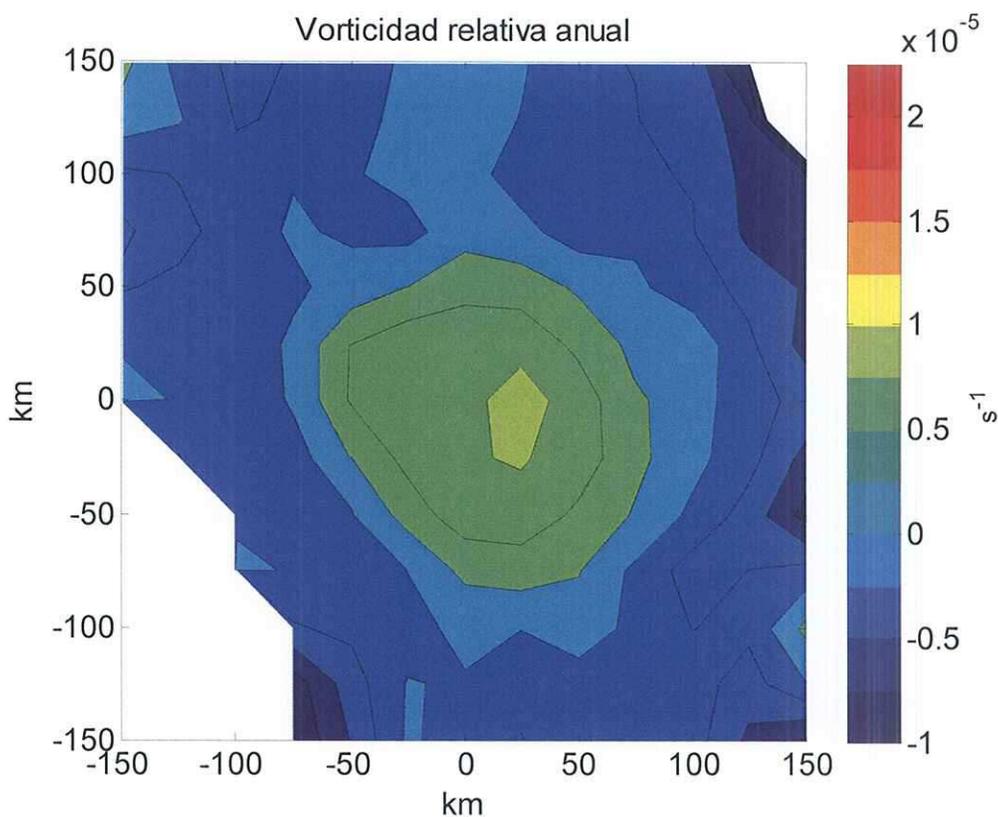


Figura 14. Vorticidad relativa promedio del periodo de dic 2009-nov 2010 obtenida con los datos de las velocidades de las boyas de deriva.

La vorticidad para los periodos trimestrales seleccionados tiene variaciones en la magnitud de su intensidad. La figura 15 muestra la vorticidad relativa para cada trimestre, donde se observa que el ciclón es más intenso para los periodos de otoño e invierno del año seleccionado, y el menos intenso corresponde al periodo de primavera.

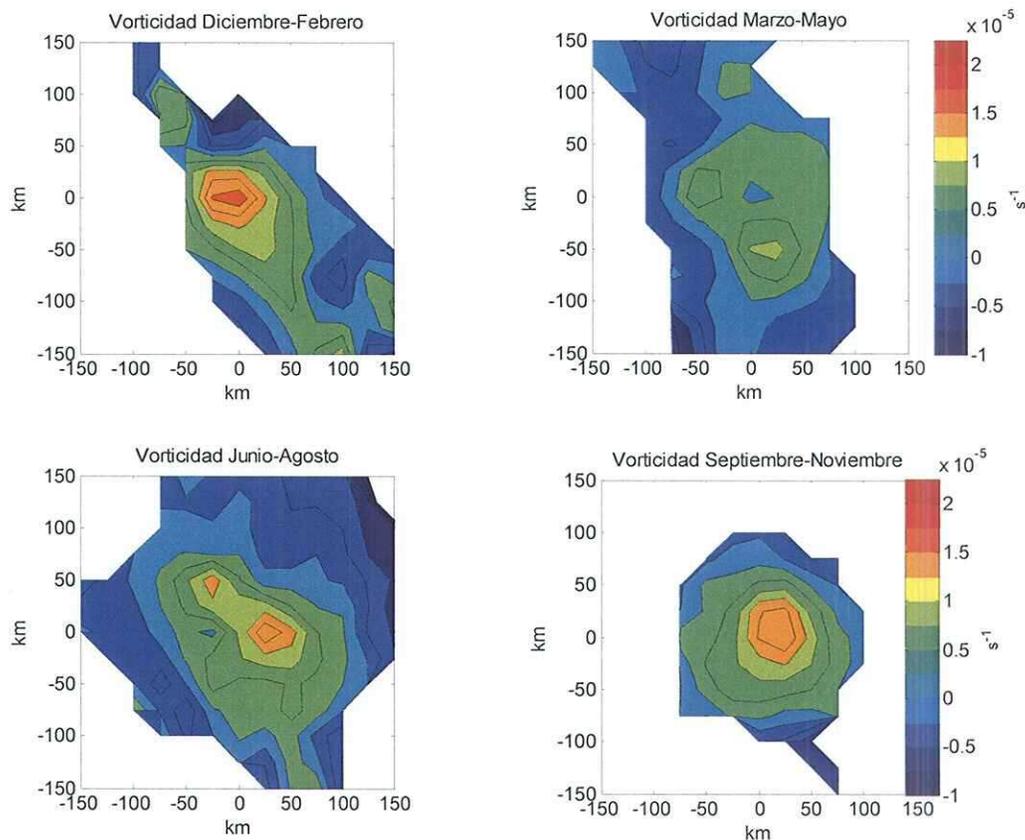


Figura 15. Vorticidad relativa de los 4 periodos del año del giro del Golfo de Campeche en el sistema de coordenadas centrado en el ciclón.

II.III.II CARACTERISTICAS DEL CICLÓN.

Para obtener de manera más cuantitativa el tamaño del giro y el máximo de la velocidad angular, los datos se ajustaron a un remolino teórico circular no aislado (vórtice de Lamb) para el promedio anual y cada trimestre. La figura 16 muestra el perfil radial de la velocidad azimutal, donde se observa una dispersión en los datos para la componente azimutal de la velocidad para el promedio anual y el de todos

los periodos (figura 17), debido principalmente a que el giro no es circular y a la falta de simetría del campo de velocidades obtenido.

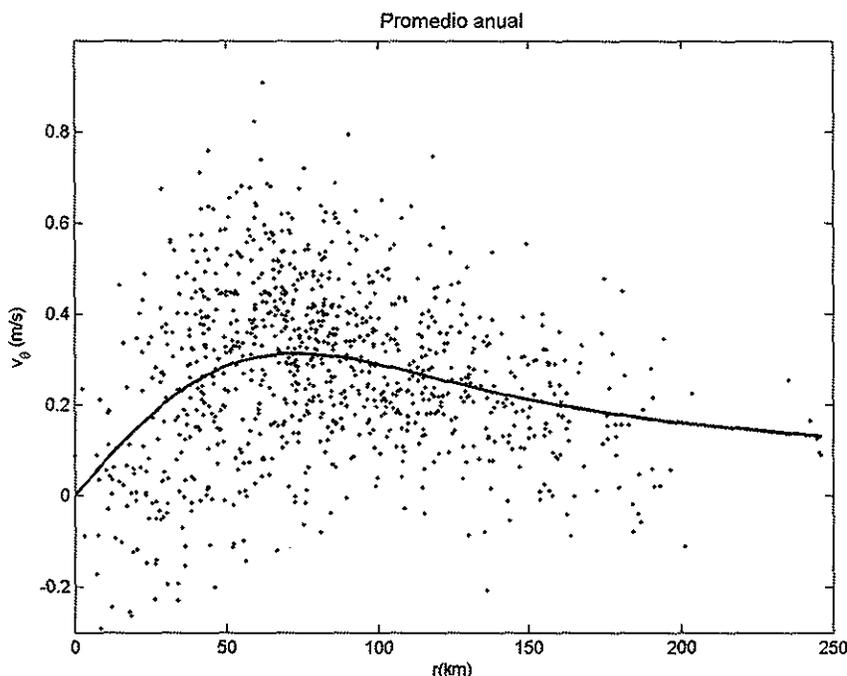


Figura 16 Perfil radial de la velocidad azimutal del promedio anual del ciclón, la línea continua es el perfil de velocidad ajustado al vórtice de Lamb. Los puntos indican la velocidad azimutal del ciclón en función del radio.

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos del ajuste de los datos del ciclón al perfil radial de la velocidad azimutal para cada periodo, los valores contenidos a partir de la segunda columna son: el valor de la escala radial del remolino, la

velocidad azimutal máxima, error cuadrático medio relativo ($ECMR = \frac{ECM}{v_{\theta \max}}$, donde

$\overline{v_{\theta \max}}$ es el promedio de las velocidades tangenciales máximas del ciclón) con respecto al promedio de velocidades máximas de los datos (0.6m/s), la vorticidad máxima, el parámetro de coriolis correspondiente a la posición del centro del ciclón promedio de cada periodo y el número de Rossby calculado con $Ro = \frac{\omega_0}{f}$.

Tabla II. Valores obtenidos del perfil radial de la velocidad azimutal para los datos del ciclón y número de Rossby. R - radio del ciclón, $v_{\theta\max}$ la velocidad tangencial máxima, ECMR el error cuadrático medio relativo, ω_0 la vorticidad máxima, f el parámetro de Coriolis, Ro el número de Rossby.

Periodo	R (km)	$v_{\theta\max}$ (m/s)	ECMR	ω_0 ($\times 10^{-5}$ rad s $^{-1}$)	f ($\times 10^{-5}$ rad s $^{-1}$)	Ro
Anual	65	0.31	0.28	1.51	5.01	0.3
Dic-Feb	52	0.37	0.24	2.26	5.07	0.45
Mar-May	70	0.21	0.20	0.95	5.07	0.19
Jun-Ago	75	0.35	0.28	1.44	5.01	0.28
Sep-Nov	63	0.38	0.27	1.92	4.96	0.39

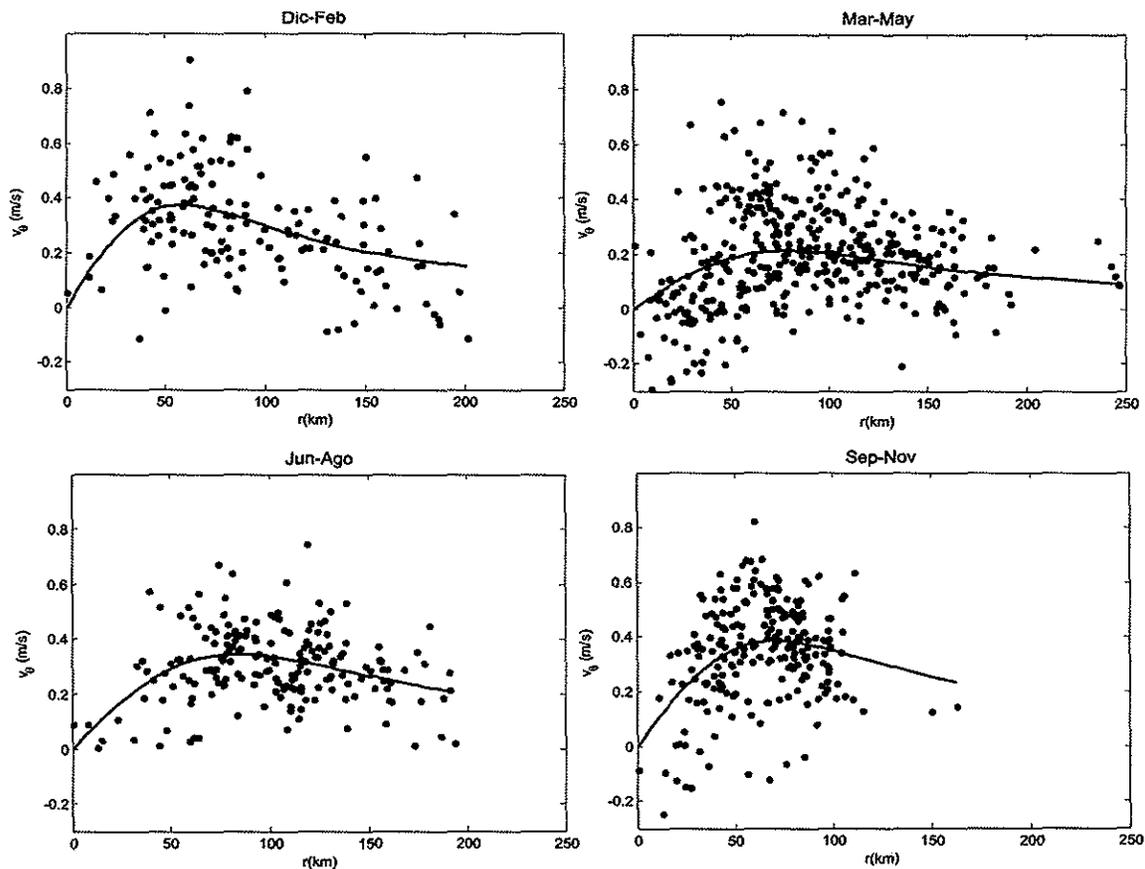


Figura 17 Perfil radial de la velocidad azimutal para los trimestres, la línea continua es el perfil de velocidad ajustado al vórtice de Lamb. Los puntos indican la velocidad azimutal del ciclón en función del radio.

Los perfiles de velocidad para otoño e invierno tienen los valores máximos de vorticidad y el mínimo corresponde al periodo de marzo a mayo.

Para determinar el tamaño del remolino, calculamos el perfil teórico de la vorticidad a partir de los parámetros obtenidos en el ajuste al campo de velocidad. El tamaño del remolino de Lamb se determina como la distancia radial a partir de la cual la vorticidad tiende a cero. El tamaño que resulta para el promedio anual corresponde a un radio de 150km (figura 18). La escala del ciclón del periodo de invierno es un radio de 120km, 160km para primavera, 170km para verano y 150km para otoño (figura 19). Un resultado que resalta es que, para los periodos en que el tamaño del ciclón es mayor, su intensidad es menor, como es el caso de primavera y verano. Lo contrario ocurre para los trimestres de otoño e invierno.

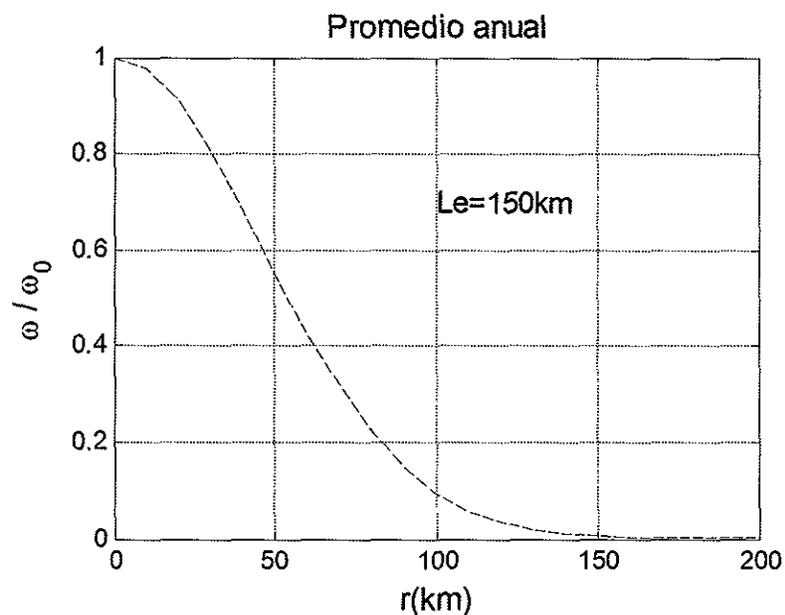


Figura 18 Perfil de vorticidad del remolino de Lamb para ω_0 y R obtenidos del ajuste al perfil de velocidad a los datos para el promedio anual. Adimensionalizado con respecto a la vorticidad máxima. Donde Le es la escala del ciclón.

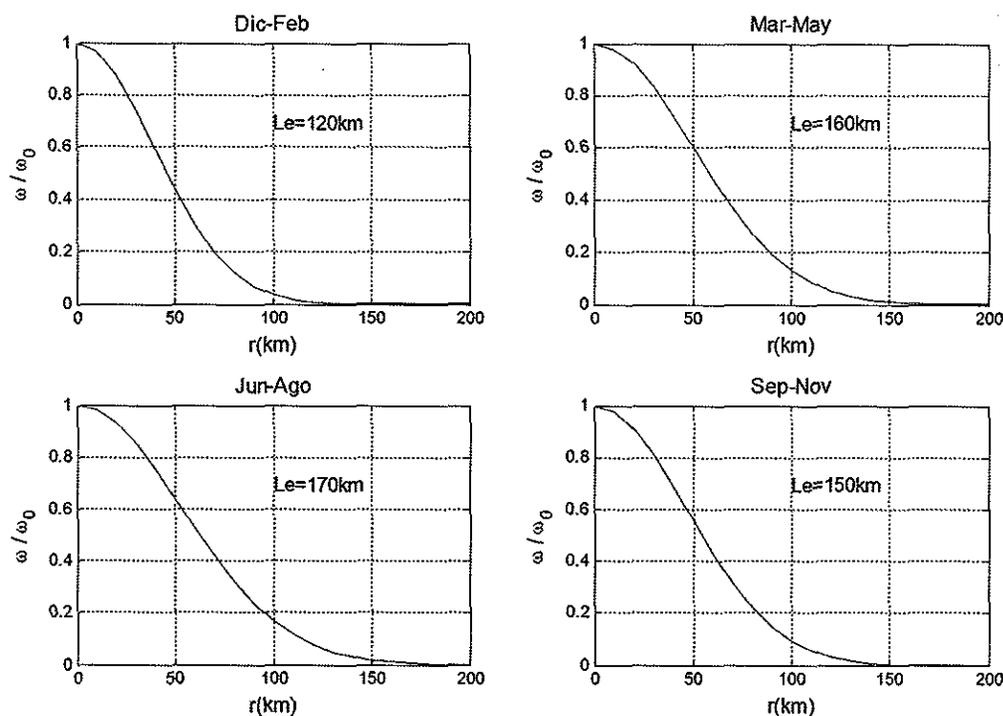


Figura 19. Perfiles de vorticidad del remolino teórico de Lamb para ω_0 y R obtenidos del ajuste de la velocidad a los datos, adimensionalizado con respecto a la vorticidad máxima. Donde Le es la escala del ciclón.

La dispersión en los datos de velocidad que se observan en la figura 16 y figura 17, indica las diferencias entre el campo de velocidades del remolino teórico y los datos. El campo de velocidad del remolino de Lamb es circular mientras que el ciclón observado no tiene una forma circular en algunos periodos, como el trimestre de diciembre-febrero, el cual tiene el ECMR mayor. En otoño, aunque tiene una forma más circular que en el resto de las estaciones, no tiene el menor ECMR debido a que en este periodo se tiene una mayor intensidad de la velocidad en la región suroeste. El periodo de primavera tiene el menor ECMR aunque no tiene una forma completamente circular, sin embargo las componentes radiales para este periodo son menores. Otro factor que distorsiona la forma del ciclón se puede deber a que otras estructuras cercanas al ciclón afectan su campo de velocidad. Además que el centro seleccionado por altimetría para algún intervalo

esté desfasado de la posición del centro del ciclón debido a la resolución espacial de la malla de altimetría.

Los números de Rossby obtenidos para el ciclón son del orden de 10^{-1} , lo cual nos indica que el sistema no se encuentra en un balance geostrofico completamente. Entonces consideramos que el ciclón se encuentra en balance de viento gradiente. La ecuación del balance viento gradiente es:

$$-\frac{v^2}{r} - fv + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

donde el primer término es la fuerza centrífuga, el siguiente es la fuerza de Coriolis y el último es el gradiente de presión (Cushman-Roisin y Beckers, 2007).

Debido a que el término de la fuerza de Coriolis es del $O(10^{-5} m/s^2)$ y la fuerza centrífuga es del $O(10^{-6} m/s^2)$, consideramos que no es despreciable y que posiblemente juegue un papel importante en el balance de momento del ciclón.

II.III.III POSICIÓN Y TAMAÑO DEL CICLÓN RELATIVO A LA BATIMETRIA.

Para cuantificar qué tanto varía la posición del ciclón a lo largo del año analizado, calculamos cuantos días se mantuvo su centro, es decir, el mínimo del nivel del mar, en cada región de la malla de la altimetría. La figura 20 muestra que la posición del centro permanece principalmente en la región profunda, entre las latitudes $19.8^\circ N$ y $20.4^\circ N$ y longitudes de $-94.8^\circ O$ y $95.8^\circ O$ más de 65% del año.

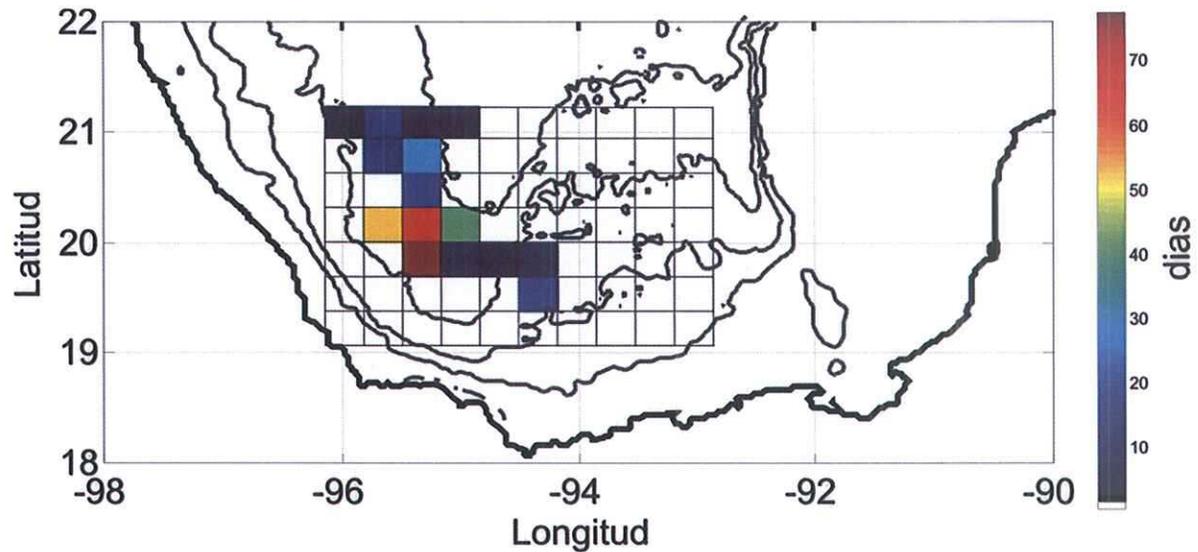


Figura 20. Número de días que se encuentra del centro del ciclón en cada punto de la malla de los datos de altimetría. La barra de colores indica los días que permaneció el centro del ciclón en cada región. En el fondo los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.

Los campos de velocidades obtenidos en la sección II.III.I (figura 13 y figura 14) fueron cambiados a coordenadas geográficas con el fin de ver la relación entre el tamaño y posición del giro con respecto a la batimetría. El origen del campo de velocidades se posicionó en el centro promedio del ciclón para cada periodo, obtenido a partir de promediar los centros diarios determinados por altimetría.

El campo de velocidad del promedio anual muestra una forma bastante circular, donde el tamaño obtenido por el ajuste encierra todo el campo de velocidades del ciclón (figura 21). El ciclón se encuentra en la región profunda del Golfo de Campeche. Podemos ver también que cerca de los 94°O las velocidades dejan de ser coherentes con el ciclón.

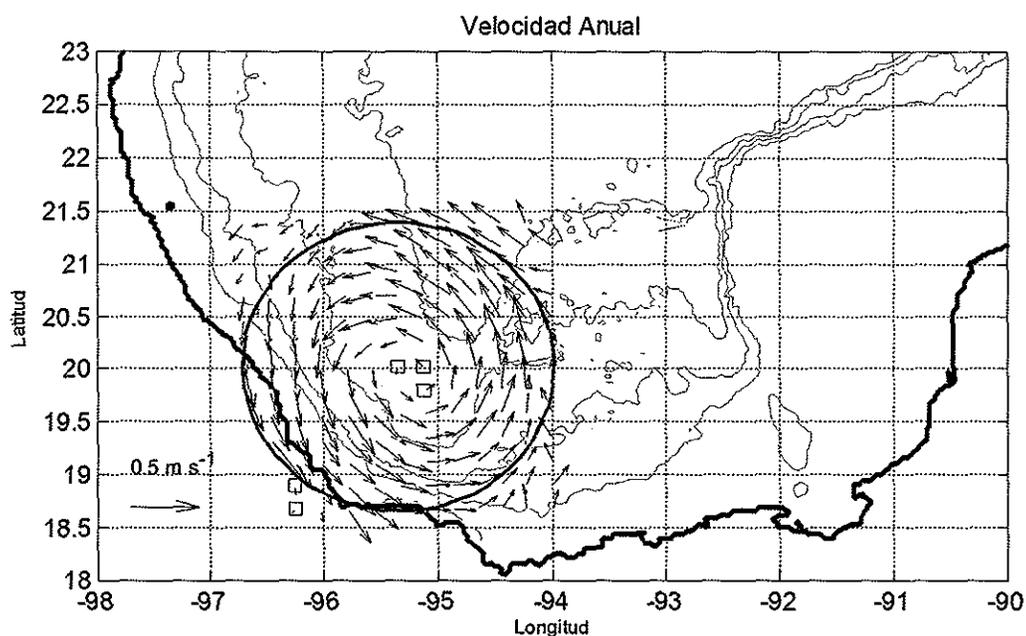


Figura 21. Campo de velocidad del promedio anual del ciclón del Golfo de Campeche en coordenadas geográficas. El círculo indica el tamaño obtenido a partir del ajuste al remolino teórico de Lamb. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m. Los vectores con un cuadro no son significativamente diferentes de cero.

La figura 22 muestra el campo de velocidades de cada periodo junto con el perímetro del remolino obtenido a partir del ajuste al remolino teórico. El ciclón permanece en la región profunda y occidental del Golfo de Campeche en el año seleccionado para todos los periodos. Esto se diferencia del trabajo de Vázquez de la Cerda et al. (2005) donde indican que la circulación ciclónica ocupa toda la región del Golfo de Campeche.

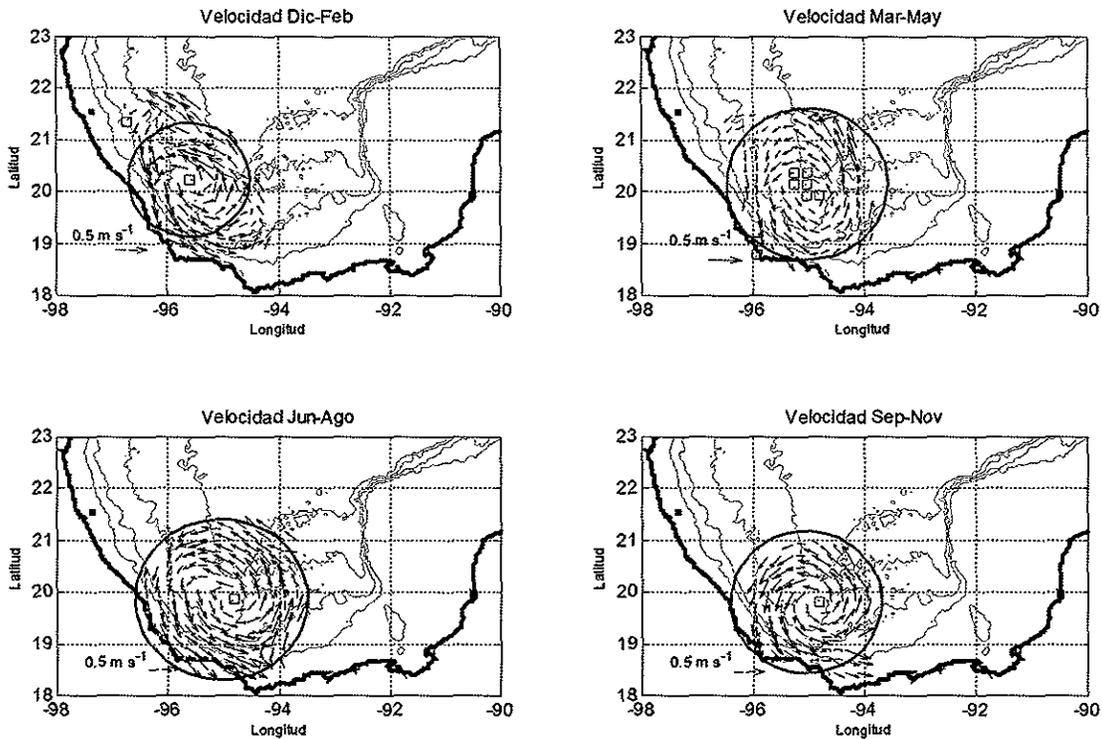


Figura 22. Campo de velocidades del ciclón del Golfo de Campeche en coordenadas geográficas y el círculo muestra el perímetro dado por el radio del remolino obtenido a partir del ajuste al remolino de Lamb. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m. Los vectores con un cuadro no son significativamente diferentes de cero.

Además el campo de velocidad para cada trimestre no muestra una intensificación en la zona oeste como ellos indican. Vázquez de la Cerda et al. (2005) indican que la circulación ciclónica en el Golfo de Campeche y sus variaciones en intensidad y forma a lo largo del año están asociadas al rotacional del viento. Sin embargo, en observaciones de altimetría y siguiendo el ciclón con las boyas de deriva se ha observado que las variaciones en el tamaño e intensidad del ciclón en el año de diciembre del 2009 a noviembre del 2010 están asociadas a estructuras colindantes al giro, como se discute a continuación.

En enero de 2010 se formó (longitud -94.5°O , latitud 22.5°N) un anticiclón en el Golfo de Campeche que se trasladó hacia el noroeste (figura 23), el cual deformó, intensificó y desplazó al oeste al ciclón, causando su forma elíptica durante el invierno. En abril, el anticiclón formado en el periodo anterior se desplazó al norte, localizándose en longitud -96°O y latitud 24°N , lo que permitió

al ciclón regresar a su posición estacionaria en la región oeste. Por otro lado, se formó otro anticiclón en la región Este del Golfo de Campeche (centrado en longitud -93.5°O y latitud 21°N) que deformó y desplazó al ciclón hacia el oeste.

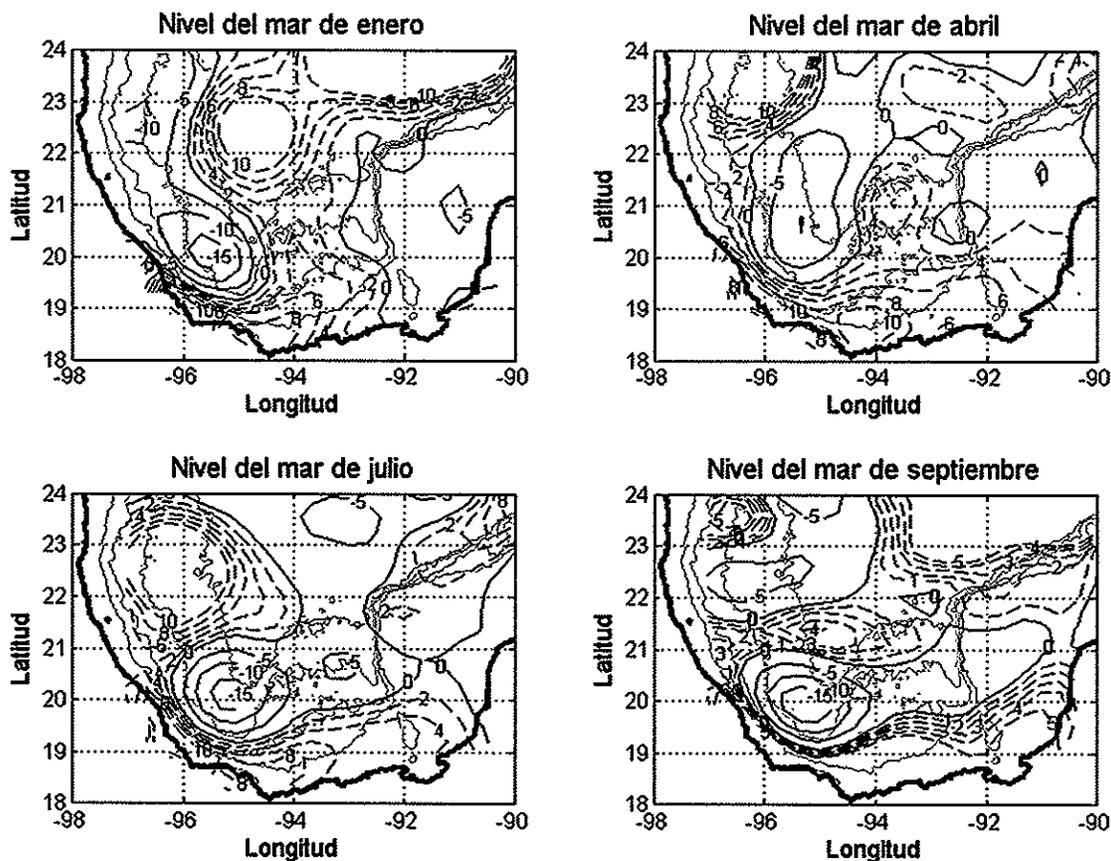


Figura 23. Nivel del mar para los meses de enero, abril, julio y octubre den 2010, las líneas puntadas indica valores positivos y las líneas solidas valores negativos. Los contornos grises indican las isóbatas de -200 , -500 , -1000 , -2000 y -3000 m.

En julio, el anticiclón formado en el periodo anterior se trasladó hacia el norte (longitud -96°N y latitud -22.5°N), lo que permitió que el ciclón permaneciera en su posición sin ser intensificado.

En septiembre, el anticiclón regresó al Golfo de Campeche (localizado en longitud -95°N y latitud 21.5°) desplazó hacia el sur al ciclón y lo comprimió, por conservación de vorticidad potencial se intensificó debido a que disminuyeron el tamaño y vorticidad planetaria del ciclón. El anticiclón permaneció en la zona durante todo el otoño.

II.III.IV NIVEL DEL MAR A PARTIR DE BOYAS DE DERIVA

La figura 24 muestra el campo de velocidad promedio del año de diciembre del 2009 a noviembre del 2010, obtenido de los datos de todas las boyas de deriva que se encontraban en el Golfo de Campeche. Las velocidades en este caso se calcularon sin cambiar a coordenadas centradas en el ciclón, debido a que la Tierra es un sistema de referencia no inercial y al cambiar al sistema de referencia centrado en el ciclón sería necesario incluir en la ecuación (4) la velocidad de desplazamiento del sistema con respecto a las coordenadas geográficas y la velocidad debido a la rotación de la Tierra con respecto al sistema coordinado centrado en el ciclón. El campo de velocidades muestra que el ciclón predomina en la región oeste del Golfo de Campeche centrado en los 20°N y en la zona Este no existe una circulación predominante a lo largo del año analizado.

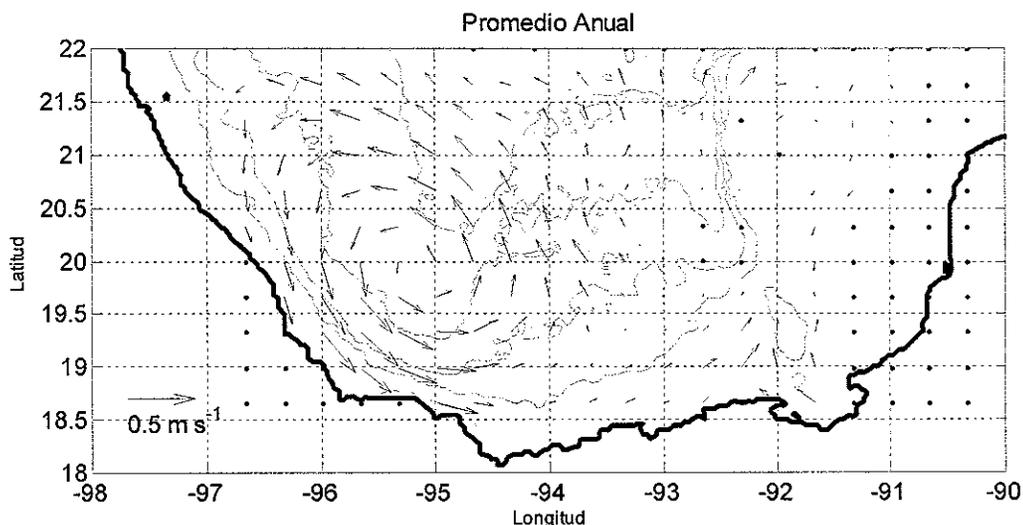


Figura 24. Campo de velocidad obtenido de promediar en una malla de $1/3^\circ$ a los datos diarios de las boyas de deriva comprendidos en la región del Golfo de Campeche durante el periodo de diciembre del 2009 a noviembre del 2010.

La figura 25 muestra el nivel del mar obtenido integrando la ecuación de balance geostrofico (4), usando el campo promedio de velocidad obtenido a partir de los datos de las boyas de deriva (figura 24).

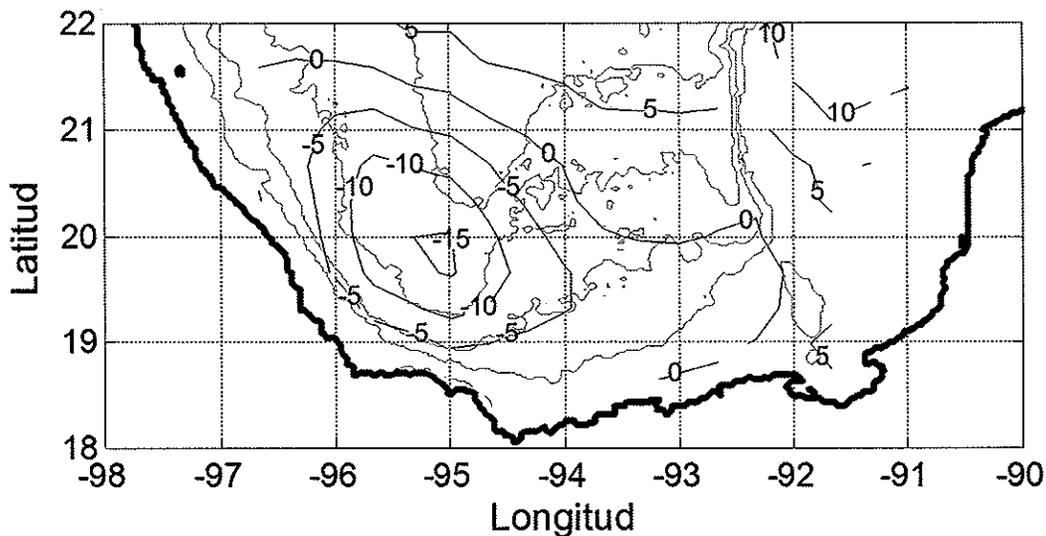


Figura 25. Nivel del mar considerando geostrofia con datos de boyas de deriva menos un promedio espacial y temporal. Los valores indican elevación del mar en cm. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.

La figura 26 muestra el nivel del mar obtenido a partir de los datos de altimetría de AVISO. Para el caso del nivel del mar derivado a partir de los datos de las boyas de deriva, el ciclón se observa más definido que el obtenido por altimetría, aunque ambos casos muestran que el ciclón se encuentra en la región oeste del Golfo de Campeche y que en la región Este no existe una circulación predominante a lo largo del año analizado.

El nivel del mar de los datos de Aviso tiene un cambio menor en su altura que el de las boyas de deriva, lo cual nos indica que la altimetría parece subestimar los gradientes del nivel del mar en esta región, y por tanto, subestima las velocidades del ciclón.

Además, el nivel del mar calculado usando la velocidad de las boyas de deriva se obtuvo bajo la suposición de que el campo de velocidad de la figura 24 se encuentra en balance geostrofico. Como se vio en la sección II.III.I, el número de Rossby obtenido para el ciclón es $O(10^{-1})$, y el término debido a la fuerza centrífuga en el balance de momento no es despreciable, siendo que la relación de la fuerza centrífuga con respecto a la fuerza de Coriolis para el ciclón es del orden de 10^{-1} .

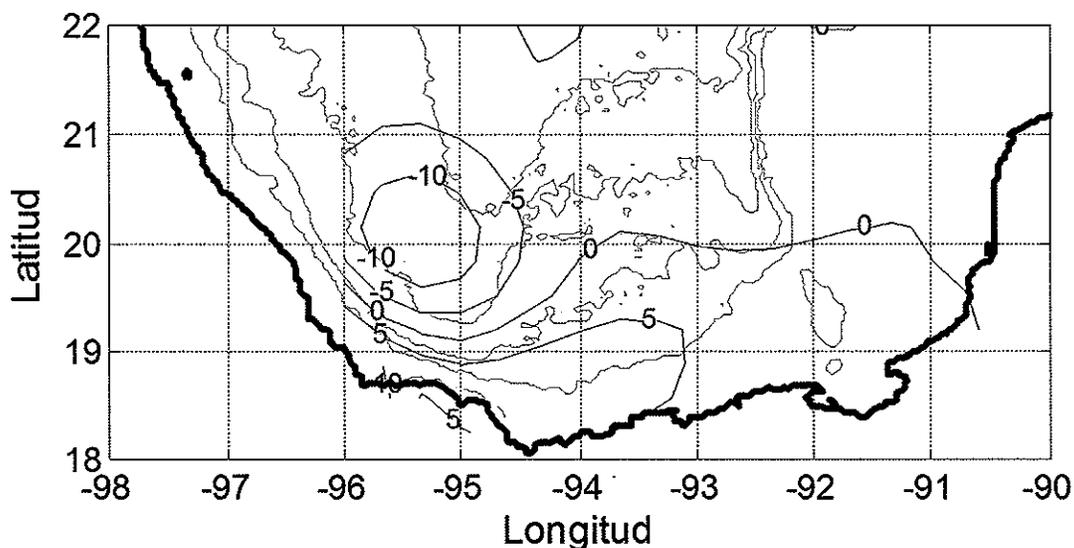


Figura 26. Nivel del mar con datos de AVISO menos un promedio temporal y espacial, los valores se encuentran en cm. y los contornos de la topografía del fondo. Los contornos grises indican las isóbatas de -200,-500,-1000,-2000 y -3000 m.

Para el caso de un ciclón, la componente de la fuerza centrífuga en el balance viento gradiente tiene la misma dirección que la fuerza de Coriolis. Es decir, si se agrega la componente de la fuerza centrífuga para el cálculo del gradiente de presión, el gradiente de presión total es mayor que la contribución debida únicamente al balance con la fuerza de Coriolis. Esto indica que el gradiente del nivel del mar en la figura 25, es una subestimación (O (10%)) del gradiente real al incluirse la contribución de la fuerza centrífuga, lo cual implica que la subestimación del gradiente del nivel del mar por altimetría es mayor a la obtenida en el presente trabajo. Esto puede deberse a errores en la topografía dinámica media absoluta que se usa para obtener los campos de nivel del mar de AVISO. Este campo se determina a partir de datos con menor resolución espacial que $1/3^\circ$ (las mediciones gravimétricas tienen una resolución de 1°). Además los pocos datos hidrográficos en la zona del Golfo de Campeche quizá también contribuyan en los errores en la topografía dinámica media. Por último, la interpolación de los datos de altimetría a la malla utilizada puede crear un suavizado en la topografía dinámica absoluta, lo cual resultaría en gradientes menos intensos del nivel del mar.

II.IV Conclusiones.

Con base en las observaciones de diciembre 2009 a noviembre 2010 y refiriéndonos solo a ese periodo se concluye que:

- 1) El ciclón se encuentra en la región profunda del Golfo de Campeche a lo largo del año, lo que indica que es influenciado por la topografía.
- 2) El tamaño del ciclón tiene un radio que varía entre 120km y 170km, ocupando la región profunda del Golfo de Campeche.
 - a) El ciclón es más intenso y tiene un menor tamaño en otoño e invierno, es menos intenso y de mayor tamaño en primavera y verano. Las variaciones en la forma e intensidad del giro se pueden asociar a las estructuras de mesoescala colindantes al ciclón como anticiclones formados en el Golfo de Campeche o remolinos desprendidos de la Corriente de Lazo que se desplazan por la parte norte del Golfo de Campeche. Estas variaciones ocurren en intervalos menores de tiempo que los periodos trimestrales utilizados, lo cual puede afectar los promedios, es decir que los ajustes analíticos podrían ser mejores si se tuvieran más datos para intervalos de tiempo menores.
 - b) El número de Rossby sugiere que el balance de momento no es enteramente geostrófico. El término de la aceleración centrífuga es del orden del 10% de la aceleración por Coriolis.
 - c) La altimetría parece subestimar el gradiente del nivel del mar para el ciclón en comparación con el obtenido por las boyas de deriva. Además, si se considera a la fuerza centrífuga, el gradiente del nivel del mar sería mayor al obtenido considerando balance geostrófico. Por lo anterior consideramos que se debe incluir este término si se quieren utilizar mediciones directas de la velocidad para corregir la topografía dinámica media utilizada por AVISO en esta región. Este cálculo se deja para trabajos futuros.

Capítulo III

Estudio experimental sobre la influencia de la topografía del fondo en el ciclón del Golfo de Campeche

En el capítulo anterior se mostró que el ciclón del Golfo de Campeche se encuentra confinado a la región profunda de la cuenca y que permanece a lo largo del año. Además, estudios anteriores (Vázquez de la Cerda et al. 2005) indican que la formación del ciclón está asociada al rotacional positivo del viento presente en la región a lo largo del año. Ahora, con el interés de estudiar experimentalmente como afecta a un flujo en rotación la topografía del fondo, se llevan a cabo experimentos de laboratorio usando un modelo idealizado de la topografía del Golfo de Campeche utilizando dos forzamientos diferentes.

III.1 Materiales y métodos

Se utilizó un tanque de base cuadrada de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, el cual fue llenado con agua dulce hasta una profundidad de $H = 10, 15\text{ cm}$. El tanque se montó sobre una mesa rotatoria, centrado con el eje de rotación de la misma. Dentro del tanque se colocó un escalón de $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$, con altura de $h = 5, 10\text{ cm}$, como se muestra en la figura 28. El escalón simula, a primera aproximación, el bajo que se presenta en la región oriental del Golfo de Campeche. Con el fin de ubicar este modelo con el Golfo de Campeche, se indica la dirección del norte geográfico en la figura 28, aunque para el experimento esta dirección es irrelevante.

Para estudiar cómo influye la topografía del fondo en la evolución del flujo, se utilizaron dos configuraciones diferentes para la razón entre la altura del escalón y la profundidad del agua $L = \frac{h}{H}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$ (figura 28).

En los experimentos de laboratorio utilizamos dos forzamientos distintos: el primero induciendo una pequeña aceleración angular inicial positiva sobre el fluido, y el segundo induciendo una pequeña aceleración negativa. Estos forzamientos consisten esencialmente en tener un fluido en rotación de cuerpo sólido y aumentar (disminuir) la velocidad angular, de tal manera que inicialmente se produzca una vorticidad anticiclónica (ciclónica) uniforme dentro del tanque durante los primeros segundos. La vorticidad del flujo evolucionará en el tiempo y, por conservación de vorticidad potencial, se verá afectada por la forma del fondo del tanque (Zavala Sansón, 2003).

El campo de velocidad en la superficie se obtuvo utilizando la técnica de Velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en esparcir un número grande (≈ 600) de partículas sobre la superficie del fluido que se quiere analizar, usando una hoja de luz para iluminar la región de interés, con una cámara en posición ortogonal a la región iluminada, se adquieren imágenes consecutivas en pequeños intervalos de tiempo, para así poder reconstruir el campo de velocidad. Las imágenes son seccionadas en pequeñas subregiones. Considerando dos imágenes consecutivas, en cada subregión se calcula la posición de las partículas en la primera imagen y su desplazamiento promedio en la segunda imagen (figura 27). Dado que se conoce el tiempo entre cada toma, se puede calcular el campo de velocidad en dicha subregión (Bardera, 2005).

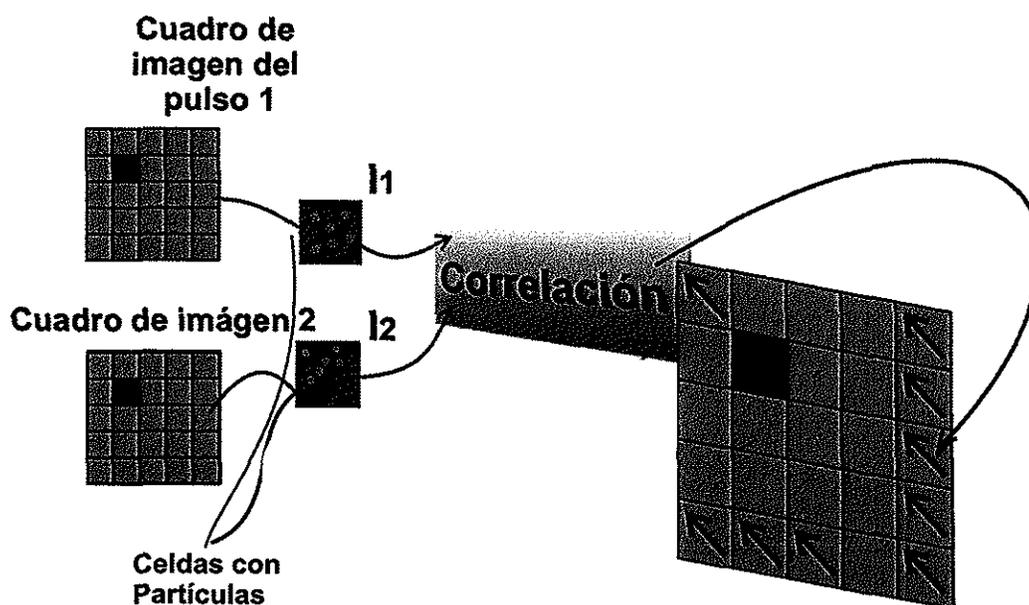


Figura 27. Se muestra las imágenes para tiempos diferentes divididas en celdas, para calcular la correlación y determinar el desplazamiento promedio por celda utilizado para calcular la velocidad en un intervalo de tiempo conocido y obtener el campo promedio de velocidad.

La cámara se centró en la región del escalón debido a que el lente no logró captar toda el área del tanque; por ello solo se grabó el área de la región sur ($1\text{ m} \times 0.7\text{ m}$). Las partículas utilizadas fueron trozos circulares de papel de 4 mm de diámetro, debido a que estos flotan el tiempo suficiente para ver el movimiento del fluido en la superficie. El fluido, siendo homogéneo, se mueve en forma de columnas, por lo que basta conocer el campo de velocidades en la superficie. Se colocó un fondo negro debajo del tanque, para evitar el reflejo de la luz en el fondo.

Los experimentos se realizaron de la siguiente manera. Inicialmente, la mesa se puso a girar con una velocidad angular de $\Omega = 0.5\text{ rad s}^{-1}$, lo cual corresponde a un periodo de rotación de $T \approx 12\text{ s}$ y a un parámetro de Coriolis de 1 rad s^{-1} . El tanque se dejó rotando durante 30 minutos (150 rotaciones) hasta que el fluido se encontró en rotación de cuerpo sólido. Después se cambió la velocidad

angular para producir el forzamiento inicial: para los experimentos con circulación inicial anticiclónica, se aumentó a $\Omega = 0.55 \text{ rad s}^{-1}$; para el caso de la circulación inicial ciclónica, se redujo a $\Omega = 0.45 \text{ rad s}^{-1}$. La circulación inicial inducida por el cambio en la velocidad angular se genera en un tiempo aproximado a $\Omega^{-1} \approx 2 \text{ s}$.

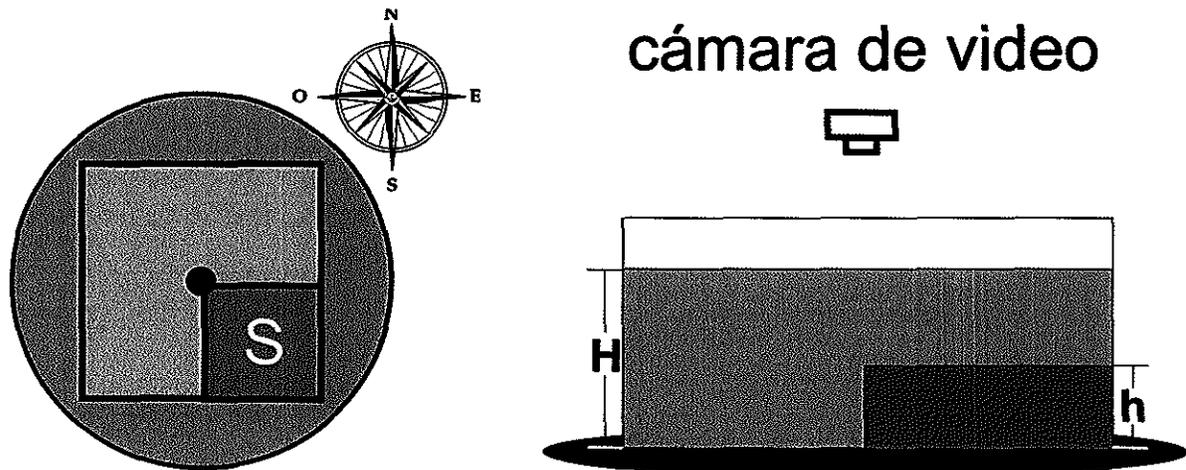


Figura 28. Configuración del experimento de laboratorio. La imagen de la izquierda muestra una vista superior que indica el tanque montado sobre la mesa rotatoria, el punto negro indica el eje de rotación de la mesa y el tanque está centrado sobre él. El cuadro *S* indica la posición de la región somera. La imagen derecha muestra una vista lateral. *H* indica la altura del agua y *h* indica la altura del escalón. Una cámara de video montada en el sistema en rotación se coloca en posición ortogonal a la superficie libre del fluido.

Las partículas se agregaron antes de hacer el cambio de la velocidad angular, y se grabó su movimiento con la cámara de video. El tiempo de grabación del experimento fue de $\tau = 140 \text{ s}$, donde $\tau = \frac{H}{\sqrt{\nu\Omega}}$ es el tiempo de decaimiento asociado a la capa de Ekman en el fondo, y $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{ s}$ es la viscosidad cinemática del agua a 20°C .

El campo de velocidades se obtuvo en subregiones de 16 píxeles que corresponde a cuadrados de 4 cm de lado, utilizando el software FlowManager v4.60. El programa aplica la técnica PIV utilizando la correlación cruzada de cada par de imágenes. El intervalo de tiempo utilizado entre imágenes para el cálculo del campo de velocidad fue de $1/3 \text{ s}$. Los datos fueron procesados en Matlab, para

obtener el campo de velocidades en cm/s. A partir de los datos de velocidad se calculó el campo de vorticidad utilizando diferencias centradas.

III.II Resultados del estudio experimental

A continuación se describen los resultados para las dos configuraciones de la topografía que se utilizaron: un escalón bajo $\left(L = \frac{1}{2}\right)$ y un escalón alto $\left(L = \frac{2}{3}\right)$.

Para cada configuración se realizaron dos experimentos, cada uno con un forzamiento inicial diferente: una aceleración angular positiva (vorticidad inicial anticiclónica) y negativa (vorticidad inicial ciclónica).

III.II.I FORZAMIENTO CON ACELERACIÓN ANGULAR POSITIVA

La figura 29 muestra el campo de velocidad y vorticidad obtenidos para el experimento con el escalón bajo ($L=1/2$) y el forzamiento de aceleración angular positiva. El incremento de la rapidez angular es de $\Omega = 0.05 \text{ rad s}^{-1}$, el incremento de la velocidad angular debe ser pequeño para que la velocidad vertical que se produce por el bombeo de Ekman se considere despreciable y la curvatura de la superficie libre no genere variaciones importantes en la profundidad que puedan influenciar la vorticidad del flujo. La vorticidad inicial inducida ω_0 es del orden de $10^{-2} \text{ rad s}^{-1}$, lo cual corresponde a un número de Rossby $\frac{\omega_0}{f} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, e implica que el flujo se verá afectado por la rotación del sistema.

La figura muestra los resultados para la región de interés, es decir la mitad sur del tanque. Las imágenes indican la evolución temporal del flujo para diferentes instantes adimensionalizados con el periodo de rotación del sistema. Inicialmente, el fluido tiene una circulación anticiclónica. Después de un periodo de rotación ($T=1/6$), el flujo se ve influenciado por el escalón debido al principio de conservación de vorticidad potencial. Las columnas de fluido que se encuentran

sobre el escalón evitan cambiar de profundidad, formando una corriente a lo largo de la pared oeste del escalón. Esto induce la formación de vorticidad ciclónica al costado oeste del escalón. Mientras tanto, el flujo en la región profunda del norte es desviado por el escalón, formando una corriente hacia el oeste a lo largo de la pared norte del escalón ($T=5$). Al encontrarse con la esquina del escalón, la corriente intenta seguir el contorno del mismo, pero su inercia y su encuentro con la corriente hacia el norte resulta en un incremento en la vorticidad ciclónica al costado oeste del escalón. Debido a estos dos procesos se genera un ciclón junto a la esquina del escalón, el cual se mantiene hasta que el flujo se disipa por la fricción en el fondo.

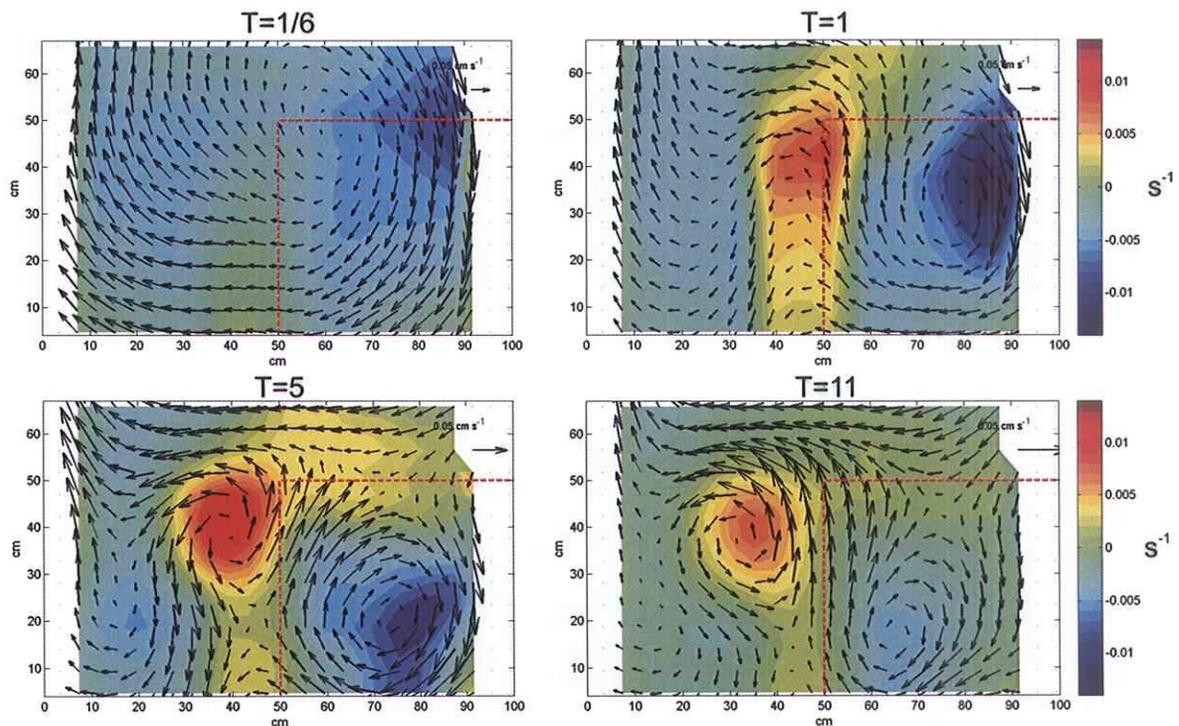


Figura 29. Las flechas indican el campo de velocidades y la vorticidad en colores para una razón de $L=1/2$. Las imágenes muestran el forzamiento inicial anticiclónico y se muestra su evolución para $1/6$, 1 , 5 y 11 periodos de rotación del sistema. La línea punteada roja indica la posición del escalón. Los tiempos están adimensionalizados respecto al periodo de rotación del sistema.

Para el caso del escalón alto ($L=2/3$) se observa el mismo proceso que para el caso anterior, pero el tiempo de respuesta del flujo a la topografía es menor, y el ciclón que se genera por la presencia del escalón tiene una escala espacial mayor

(figura 30). Además, a diferencia del caso anterior, el ciclón se separa de la pared del escalón y abarca gran parte de la región profunda al oeste del mismo.

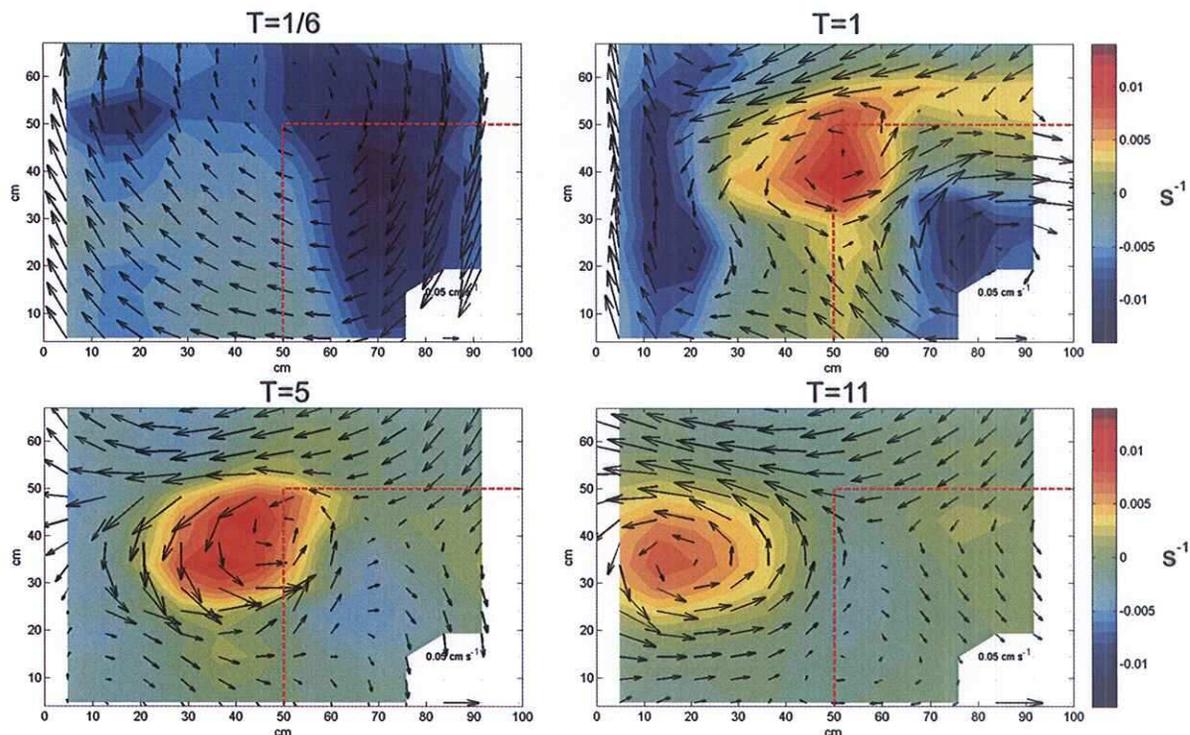


Figura 30. Experimento con una razón de $2/3$ del escalón con respecto a la profundidad del agua. Las imágenes indican la evolución temporal para el forzamiento inicial anticiclónico. La escala de colores es la vorticidad, las flechas la velocidad y la línea roja es la posición del escalón.

II.II.II FORZAMIENTO CON ACELERACIÓN ANGULAR NEGATIVA

En este caso, se realizaron experimentos análogos a la sección anterior, pero con un forzamiento inicial ciclónico. En este caso, se disminuyó la velocidad angular en -0.05 rad s^{-1} , lo cual implica un número de Rossby del orden de 10^{-2} , igual que los experimentos con forzamiento inicial anticiclónico.

Para el caso del escalón bajo ($L=1/2$), el flujo inicial es afectado por la topografía a partir del primer periodo de rotación. Desde entonces se observa que el fluido en la zona profunda evita cambiar de profundidad y forma una corriente a lo largo del costado oeste del escalón que se desplaza de sur a norte (figura 31).

Después, este flujo se desvía a la derecha para continuar a lo largo de la pared norte del escalón, generando vorticidad anticiclónica encima del escalón. Mientras tanto, el fluido que se encuentra inicialmente sobre el escalón evita bajar y conserva su vorticidad ciclónica.

Se debe subrayar que, a pesar de que el forzamiento inicial es opuesto, en este caso también se mantiene vorticidad ciclónica en la región al costado oeste del escalón durante todo el proceso, hasta ser frenado el flujo por la fricción en el fondo.

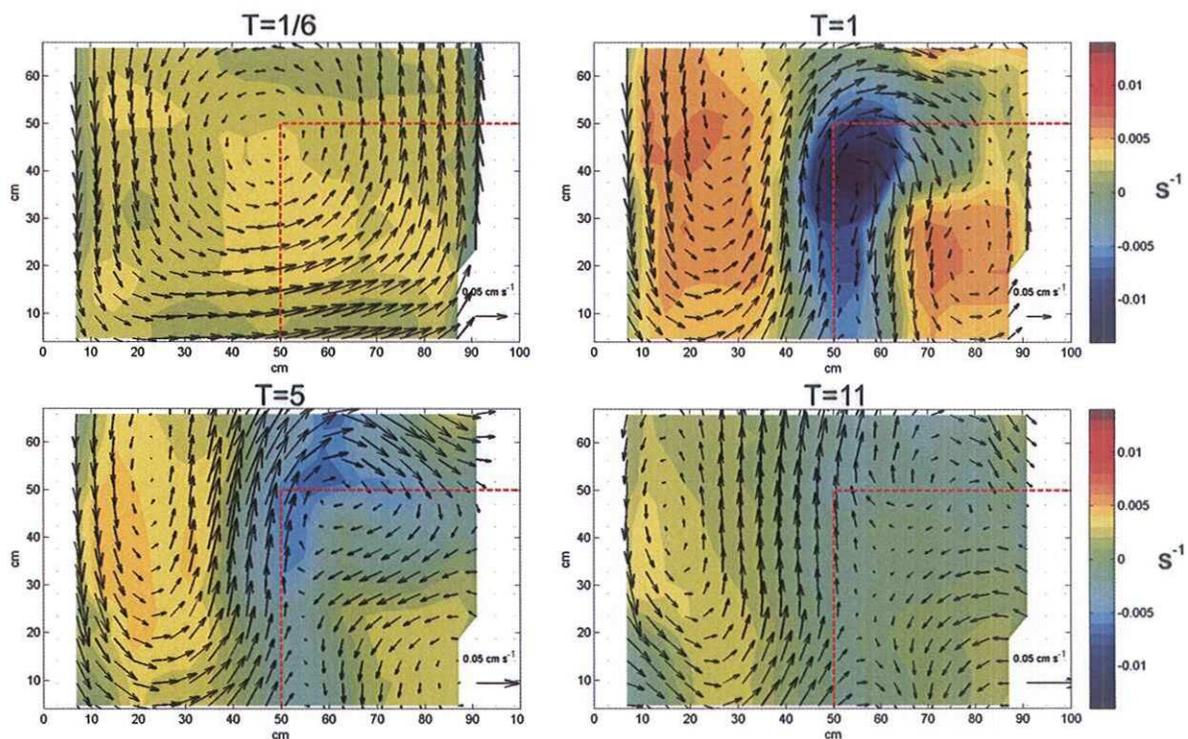


Figura 31. La barra de colores indica la vorticidad y las flechas el campo de velocidad para $L=1/2$. Las imágenes muestra la evolución en tiempo para el forzamiento inicial ciclónico.

Para el caso de $L=2/3$ (figura 32) se observa el mismo proceso que para el caso anterior, con la diferencia de que el efecto del escalón sobre el flujo es más marcado. En este caso, la vorticidad anticiclónica generada al costado oeste del escalón abarca toda la región somera del mismo. Además, la región con vorticidad

ciclónica en la región profunda al costado oeste del escalón queda más definida que el caso de $L=1/2$.

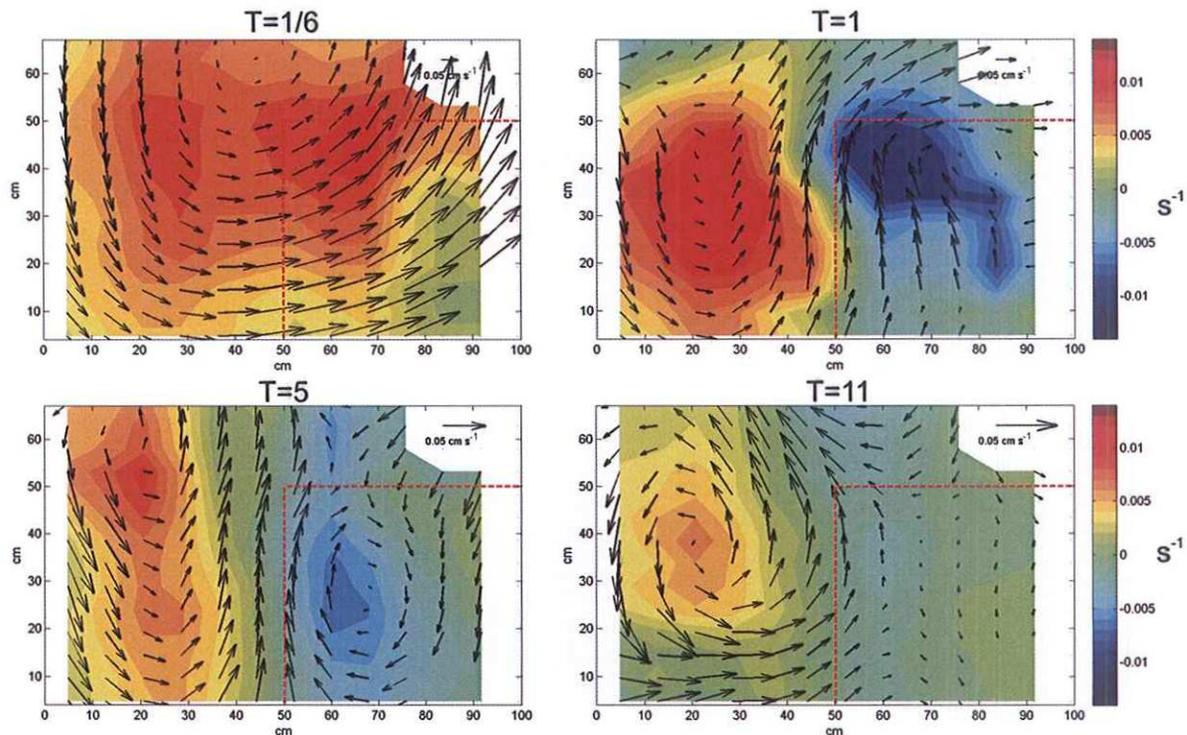


Figura 32. Experimento con $L= 2/3$ del escalón con respecto a la profundidad del agua. Las imágenes indican la evolución temporal para el forzamiento inicial anticiclónico. La escala de colores es la vorticidad, las flechas la velocidad y la línea roja es la posición del escalón.

III.III Discusión y Conclusiones

Para ambos forzamientos iniciales del sistema se obtuvo acumulación de vorticidad ciclónica al costado oeste del escalón. Recordando que el ciclón del Golfo de Campeche es asociado a un rotacional positivo del viento, este resultado nos sugiere que el ciclón podría no solo deberse a un rotacional positivo del viento, sino que la topografía juega un papel importante en la formación del ciclón. Con la finalidad de explorar el comportamiento del ajuste del flujo a la topografía en presencia de un forzamiento constante (como se considera que es el rotacional del viento en el Golfo de Campeche) se podrían realizar experimentos ejerciendo un esfuerzo permanente en la superficie con un rotacional positivo y compararlos con experimentos realizados con un rotacional negativo. De esta manera, se

podría determinar si también se forma el ciclón independientemente de forzamientos positivos o negativos del rotacional del esfuerzo en superficie, lo que sugeriría la importancia de la influencia de la topografía del fondo.

Otros experimentos que podrían realizarse para analizar si el ajuste del flujo es independiente del forzamiento inicial y depende solo de la topografía del fondo, consisten en generar como condición inicial pequeños vórtices ciclónicos y anticiclónicos de forma aleatoria. Al observar su evolución se podría investigar si existe una tendencia a formar el ciclón al costado oeste del escalón.

Tenreiro (2010) estudió la evolución del flujo para un forzamiento inicial de vórtices de diferente signo distribuidos aleatoriamente y con una configuración rectangular dividida en dos regiones cuadradas: una profunda y la otra somera. Sus resultados muestran la formación de una corriente que fluye a lo largo de la pared del escalón con el lado somero a la derecha. En este trabajo también se observa la formación de dicha corriente, aún cuando la topografía no es simétrica y los forzamientos son distintos a los utilizados por Tenreiro (2010). Una diferencia entre este trabajo y el de Tenreiro (2010) es que dicho autor no observó una preferencia de ajuste de la vorticidad a la topografía, mientras que en el presente trabajo para ambos forzamientos se acumula vorticidad ciclónica en la parte profunda al costado "oeste" del escalón.

CONCLUSIONES

- ▶ La evolución del flujo para ambos forzamientos utilizados resulta en la formación de circulación ciclónica al costado "oeste" del escalón.
 - ▶ Entre mayor es la altura del escalón, la circulación ciclónica queda mejor definida, y el tiempo de ajuste del flujo es más rápido.
-

Capítulo IV

Conclusiones

En el capítulo II se realizó un análisis de los datos de boyas de deriva para el periodo de diciembre 2009 a noviembre 2010. Refiriéndonos solo a ese periodo se concluye que:

- El tamaño y posición del ciclón del Golfo de Campeche está influenciado por la topografía del fondo marino.
 - Los campos de velocidad obtenidos a partir de las boyas de deriva y su ajuste al campo de velocidad del remolino teórico de Lamb indican que el ciclón es más intenso y tiene un menor tamaño en otoño e invierno, y que es menos intenso y de mayor tamaño en primavera y verano. El tamaño del ciclón tiene un radio que varía entre 120km y 170km.
 - La vorticidad máxima obtenida del ajuste al perfil teórico indica que el número de Rossby es cercano a uno, lo que sugiere que el balance de momento no es enteramente geostrófico. El término de la aceleración centrífuga es del orden del 10% de la aceleración por Coriolis.
 - El análisis de las variaciones mensuales del campo de nivel del mar por altimetría y las trayectorias de las boyas deriva correspondientes al mes en cuestión muestran que las variaciones en la forma e intensidad del giro se pueden asociar a las estructuras de mesoescala colindantes al ciclón, como son las anticiclones formados en la región Este del Golfo de Campeche o remolinos desprendidos de la Corriente de Lazo que se desplazan por la parte norte del Golfo de Campeche.
-

- La comparación de la topografía dinámica absoluta obtenida por altimetría satelital y la calculada con las velocidades de las boyas de deriva sugieren que la altimetría subestima el gradiente del nivel del mar para el ciclón. Además, si se considera la fuerza centrífuga, el gradiente del nivel del mar sería mayor al obtenido considerando balance geostrófico. Por lo anterior, consideramos que se debe incluir este término si se quieren utilizar mediciones directas de la velocidad para corregir la topografía dinámica media utilizada por AVISO en esta región. Este cálculo se deja para trabajos futuros.

En el capítulo III se describe el análisis del ajuste del flujo dado un forzamiento inicial en experimentos de laboratorio en presencia de una topografía variable. Se utilizaron dos forzamientos iniciales diferentes: una aceleración angular positiva (*spin-up*) y una aceleración angular negativa (*spin-down*). En ambos forzamientos el flujo tiene preferencia a acumular vorticidad ciclónica al costado “oeste” del escalón, lo que sugiere que la topografía influye en la distribución de vorticidad en el Golfo de Campeche, acumulando vorticidad ciclónica en la parte profunda. Esto también sugiere que la formación del ciclón no depende exclusivamente del rotacional del viento en la zona.

Con la finalidad de explorar el ajuste del flujo a la topografía para diferentes forzamientos sugerimos para trabajos futuros realizar experimentos ejerciendo un esfuerzo permanente en la superficie con un rotacional positivo y negativo, para comprobar que la formación del ciclón es independiente del forzamiento. También podrían realizarse experimentos en la que la condición inicial sean pequeños vórtices ciclónicos y anticiclónicos distribuidos de forma aleatoria, lo cual ayudaría a determinar si la formación del ciclón al costado “oeste” del escalón es un estado natural del sistema que sólo depende de la topografía del fondo marino, y no de los forzamientos ni de las condiciones iniciales.

Bibliografía

- Bardera, M. R. 2005. Aplicación de PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica. Tesis de doctorado. Universidad Complutense de Madrid.
 - Cushman-Roisin, B., y Beckers, J. M. 2007. Introduction to geophysical fluid dynamics. Academic Press. USA. 700p.
 - DiMarco, S. F., Nowlin Jr., W. D., y Reid, R. O. 2005. A statistical description of the near-surface velocity field from drifters in the Gulf of Mexico. Geophysical Monograph Series , 161, 101-110.
 - Gille, S. T., Metzger, E. J., y Tokmakian, R. 2004. Seafloor Topography and Ocean Circulation. Oceanography , 17 (1), 47-54.
 - Hulbert, H. E., y Metzger, E. J. 1998. Bifurcation of the Kuroshio Extension at the Shatsky Rise. Geophysical Reserch , 95, 7549-7566.
 - Krupitsky, A., Kamenkovich, V., Naik, N., y Cane, M. A. 1996. A linear equivalent barotropic model of the Antarctic Circumpolar Current with realistic coastlines and bottom topography. Journal of Physical Oceanography , 26, 1803-1824.
 - Kundu, P. K., y Cohen, I. M. 2004. Fluid Mechanics (3 ed.). Elsevier, A. Press, Ed. San Diego, California. 759p.
 - Pérez Brunius, P., García Carrillo, P., Dubrana, J., y Candela Pérez, J. 2011. Topographic influences on the upper layer circulation in the southern. Deep-Sea Research. II . En proceso.
 - Sotres Lozano, F. 2009. Explorará PEMEX las aguas profundas del Golfo de México. Boletín de prensa. Pemex.
 - <http://www.pemex.com/index.cfm?action=news§ionID=8&catID=40&contentID=20006>. Consultado en agosto 2010.
 - Tenreiro, M., Zavala Sansón, L., van Heijst, G. F., y Trieling, R. R. 2010. Experiments and simulations on self-organization of confined quasi-two-dimensional turbulent flows with discontinuous topography. Physics of Fluids , 22, 025101.
-

- van de Konijnenberg, J. A., y van Heijst, G. J. 1996. Spin-up in a rectangular tank with a discontinuous topography. *Physics Fluids* , 8, 2943-2952.
 - van Heijst, G. J. 1996. *Geophysical Fluid Dynamics*. Eindhoven, 44-48.
 - Vázquez de la Cerda, A. M., Reid, R. O., DiMarco, S. F., y Jochens, A. E. 2005. Bay of Campeche circulation: an update. *Geophysical Monograph Series* , 161, 279-293.
 - Zavala Sansón, L. 2003. The two-dimensional character of spin-up in a rectangular container. *Physics of Fluids* , 15, 1811-1814.
 - Zavala Sansón, L., González-Villanueva, A., y Flores Mateos, L. M. 2010. Evolution and decay of a rotating flow over random topography. *Journal Fluid Mechanics* , 642, 159-180.
-