



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**PATRONES DE CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN EL CANAL DE
YUCATÁN, BASADOS EN DATOS DE ADCP DE BARCO.**

T E S I S

Que para obtener el Título de:

O C E A N Ó L O G O

Presenta:

Gabriela E. Athié de Velasco

Ensenada, B.C., México

Febrero del 2002

**COORD. DEL SISTEMA DE INFORMACION
ACADEMICA U.A.B.C.**

RESUMEN

El Canal de Yucatán forma parte del Sistema Mar del Caribe - Golfo de México. A través de él fluye la Corriente de Yucatán, que a su vez constituye la parte Occidental del Giro Subtropical del Atlántico Norte. Este flujo cuenta con dos componentes, la primera generada por el rotacional del esfuerzo del viento sobre el Atlántico Norte y la segunda se debe al movimiento de aguas superficiales producto de la circulación termohalina global.

Entre diciembre de 1996 y Julio del 2000, se realizaron seis cruceros oceanográficos en la zona del Canal de Yucatán. Por medio de un ADCP montado en el casco del barco, se obtuvieron datos de velocidad de la corriente con promedios verticales a intervalos de 50 m (desde los 25 hasta los 625 m de profundidad). Se calculó la velocidad promedio en la columna de agua para cada crucero, así como la corriente promedio para los seis cruceros con sus elipses de variación correspondientes; adicionalmente se compararon las anomalías de la corriente con el patrón de vientos de la zona.

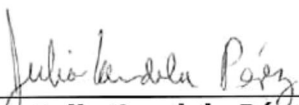
Se observó la velocidad máxima de la corriente en los extremos del canal, y el mínimo en el centro del mismo (85.5° W aproximadamente), este último se relaciona con la batimetría de la zona. En la zona Oriental del canal se detectó una contracorriente intermitente (0.18 m/s), esta se observó bien definida sólo durante el Verano e Invierno. En la velocidad de la Corriente de Yucatán se observó un patrón interanual con velocidades máximas durante Verano (0.53 m/s) e Invierno (0.67 m/s), y mínimas durante Otoño (0.42 m/s) y Primavera (0.43 m/s). La mayor variabilidad de la corriente promedio fue observada en los extremos del canal, mientras que la menor variabilidad se encontró en el centro del mismo. No se encontró relación cualitativa entre el patrón de vientos y las anomalías de la corriente en la zona; sin embargo se determinó que el patrón de vientos de la zona está dominado por los Vientos Alisios durante la mayor parte del año, y la influencia de frentes fríos se presenta principalmente en la época Invernal. Se calculó el transporte de volumen superficial (50-500 m) para los cinco cruceros que contaban con datos en toda la sección del Canal de Yucatán, y el transporte promedio fue de 20.57 ± 3.46 Sv.

**PATRONES DE CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN EL CANAL DE
YUCATÁN, BASADOS EN DATOS DE ADCP DE BARCO.**

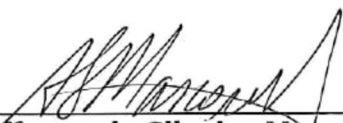
TESIS
Que para obtener el título de
OCEANÓLOGO
Presenta:

Gabriela Eugenia Athié de Velasco

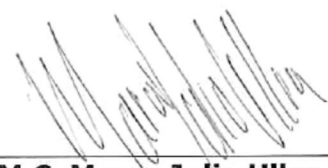
APROBADA POR:



Dr. Julio Candela Pérez
Director de Tesis



Dr. Affonso da Silveira Mascarenhas
Sinodal



M.C. Marco Julio Ulloa Torres
Sinodal

DEDICATORIA

A MI PADRE, Ing. Jorge Athié...Gracias por tu dedicación y cariño todos estos años.....
y por ser mi mejor amigo.

A MI MADRE Gabriela de Velasco^t, que donde quiera que estés, estás siempre conmigo.

A MI MAMÁ ROSARIO, que me enseñaste a siempre poder.

A EDUARDO, que siempre estás a mi lado, Gracias..... Te Amo.

A MI FAMILIA...

CON UN CARÍÑO MUY ESPECIAL.....A EUGENIO^t Te extraño.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Dr. Julio Candela, por su gran ayuda, enseñanza, consejos y paciencia durante la elaboración de este trabajo.

A los sinodales Dr. Affonso da Silveira y M.C. Marco Julio Ulloa, por sus consejos y comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.... y a hacerme muchas preguntas.

A CICESE, por el apoyo económico que me brindó a través de la beca del departamento de Oceanología.

Quiero agradecer al Capitán Leobardo Ríos y a la tripulación del B/O Justo Sierra, por todo el apoyo brindado durante las campañas oceanográficas del proyecto CANEK.

Al Oc. Ignacio González, por su gran ayuda en la elaboración de la portada del presente trabajo.

Esto es sólo representativo, porque no tengo forma de agradecerte papá, por enseñarme tantas cosas que me servirán durante toda mi vida, por aconsejarme cuando lo necesité (y cuando no también) y por apoyarme en todas mis locuras (y vaya que algunas sí eran locuras)... T.Q.

A mi mamá Rosario, precisamente por eso... ser mi mamá y mi amiga en todo momento y en especial cuando lo he necesitado.

Eduardo, por tu paciencia, comprensión y apoyo en cada una de mis decisiones y en todo momento..... Gracias..... ahora te toca a ti!

A mis abuelitas Lola y Chatis, por preocuparse por mí y escuchar todas mis aventuras, así como a mis abuelitos Pedro^t y Alejandro^t por todo el cariño que me dieron.

Por su cariño y complicidad a mi tía Yna, tíos Alejandro y Ely y Tío Pedro^t.

A la GRAN familia de Velasco (Pedro, Lola, Eduardos, Claudia, Loli, Jorges, Tere, Marytere, Marybel, Nacho, Ingrid, Pedrín^t, Iñigo, Enrique, Tía Güera, Pía, Enrique, Maria, Toño, Bea, Mary José, Ana Sofía, Fernando (padrinito), Charo, Charito (mi hija), Xavier's, Ale, Andrés, Fátimas, Álvaro, Juan Pablo, Mary Lupe, Eduardos, Mary Lupita y Rodrigo..... estén seguros de que siempre guardo un poquito de cada uno de ustedes.

De forma muy especial a la Familia Flores de Velasco..... Beatriz y Oso, por adoptarme como su hija y a mis hermanitos Arturo, Alejandro y Eugenio^t por todo su cariño.... y por supuesto a mi hermanita Bel y a mi futura cuñis Grace.

Por todos los momentos divertidos, a mis hermanos Rene, Guille y Diana..... y por las pequeñas travesuras a Jaime y Chari.....y a la niña mas especial y "loca", pero que a su vez es toda una ternura andando..... mi Luris.

A Rodrigo (el cuñis), Elizabeth, Arián y Sarah, en especial por todo su cariño..... y por su paciencia, consejos, compañía, apoyo..... Gracias.

A mis amigos de toda la vida Dago (Daguito del diablo), Ruth (Cerebro), Renee, Ana Bárbara y Mireya..... por todo lo que hemos compartido juntos.

A Carlos Pont, Lucero, Ana, Charly y Carment^t, por ser parte de mi familia.

A mi familia adoptiva.... los Geomaritos: Jose, Rafa, Gaby S., Lalo y Melissa..... y de manera especial a Jorge y Gaby, por confiar en mí en un principio, y poco después por todo su cariño y amistad (también por su contribución a este trabajo..... presión!) y al Geomarito más pequeño y especial de todos.... "Jorgito y Georgy", por todos los ratos divertidos!

Al Señor Cuauhtémoc y a la Señora Blanca, por todo el cariño que me han brindado y en especial a Raymundo, por considerarme dentro de tu familia..... Gracias.

A la Tía Columba y el Tío Alfonso, así como a la Abuelita Blanca..... y sobretodo a Foncho (primo) y a Luis, por su amistad y sus locuras que me hacen reír (la mayoría del tiempo).

A toda la generación de Orcas, en especial a Ruth, Miriam, Grisel, Goya, Marina, Geovanny, Alex, Gabo, Leonel, Stephen, Miguel Angel, Gaby R., Ana, Las Chokis..... Por todas las salidas de campo, y ratos divertidos durante 5 años.

A mis amigos de CICESE, Ana Laura, Rubén, Alejandro, Luis, Atilio, Adrián, Mark, Francisco, Ana María, David, Alejandro, Lucía, Gaby Ch., Fátima, Omar, Ana y Toño.

Gracias a los Investigadores del Proyecto CANEK Dr. Julio Candela, Dr. Antoine Badán, Dr. Julio Sheinbaum y al Dr. José Luis Ochoa, por brindarme su confianza y amistad al incluirme dentro del proyecto.

A las Canekas Lucía, Gaby Ch., Ana y Fátima, por su amistad..... ya terminó la Canekita!..... y a Nacho, Charlye, Armando, Miguel, Adrián, Mark, Lili, Orlando, Natalia y Ariadna, por su amistad y todos los ratos divertidos (es decir, todo el tiempo) durante Canek 6.

A los Salvavidas: Victor (tío Vic), Juan Gabriel (Gordito), Dago, Omar, Gaby Ch., Lalo, Plucky, Hiroshi, Renee, Ruth, Laurita, Julio, Maza, Giacomo, etc, etc.....

A los miembros de ICMME: Gisela, Yoli, Clarissa, Eric, Oscar, Lalo, Ligeia, Santos, Nemer, Ricardo, Karina (y los anexos): Fausto, Alejandra, Luis, Tonatiuh, Lydia, etc, etc....

PATRONES DE CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN EL CANAL DE YUCATÁN, BASADOS EN DATOS DE ADCP DE BARCO.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
I.1	<i>FACTORES DE FORZAMIENTO.....</i>	4
I.1.1.	Liberación de giros.....	4
I.1.2.	Mareas.....	6
I.1.3.	Morfología de la zona.....	7
I.1.4.	Vientos.....	7
I.2.	<i>OBJETIVO.....</i>	8
I.3.	<i>ANTECEDENTES.....</i>	8
I.4.	<i>AREA DE ESTUDIO.....</i>	14
II.	METODO.....	15
II.1.	<i>COLECTA DE DATOS.</i>	15
II.2.	<i>PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.</i>	18
III.	RESULTADOS.....	26
III.1.	<i>DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE EN EL CANAL DE YUCATÁN.</i>	26
III.2.	<i>VARIACIONES ESTACIONALES.....</i>	38
III.3.	<i>CORRIENTE PROMEDIO EN EL CANAL DE YUCATAN.....</i>	53
III.4.	<i>PATRONES DE VIENTO EN LA ZONA.....</i>	56
IV.	DISCUSIONES.....	68
V.	CONCLUSIONES.....	77
V.1.	<i>TRABAJO FUTURO.....</i>	79
VI.	REFERENCIAS.....	80
	APÉNDICE A.....	84

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización del Canal de Yucatán en el Sistema Mar del Caribe – Golfo de México. (A) Corriente del Caribe, (B) Corriente de Yucatán, (C) Corriente de Lazo, (D) Corriente de Florida, (E) Corriente del Golfo y (F) Giro liberado a partir de la Corriente de Lazo (Tomado de Mores y Maul, 1998. Resultados de corriente superficial a partir de modelación numérica).	2
Figura 2. División del Canal de Yucatán por zonas.	26
Figura 3. Corriente de Yucatán a 100 m de profundidad, durante el periodo del 7 al 18 de diciembre de 1996. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.	27
Figura 4. Corriente de Yucatán a 50 m de profundidad, durante el periodo del 24 de mayo al 12 de junio de 1997. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.	29
Figura 5. Corriente de Yucatán a 50 m de profundidad, durante el periodo del 29 de marzo y el 6 de abril de 1998. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.	31
Figura 6. Corriente de Yucatán a 50 m de profundidad, durante el periodo del 27 de enero y el 6 de febrero de 1999. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.	33
Figura 7. Corriente de Yucatán a los 50 m de profundidad, observada durante el periodo del 25 de agosto al 14 de septiembre de 1999. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.	35
Figura 8. Corriente de Yucatán a 50 m, durante el periodo del 16 de junio al 10 de julio del año 2000. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.	36
Figura 9. Corriente promedio de los 100 a los 300 m de profundidad para Canek 0, realizado durante Otoño de 1996.	39
Figura 10. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 2 realizado durante principios de Primavera de 1998.	40

Figura 11. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 1 realizado durante finales Primavera de 1997.	40
Figura 12. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 3 realizado durante Invierno de 1999.	41
Figura 13. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 4 (Verano).	42
Figura 14. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 5 (Verano).	42
Figura 15. Sección de velocidad en el Canal de Yucatán de los 85.8°W a los 86.3°W correspondientes a Canek 0. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y en la parte superior se indica el transporte en Sv.	46
Figura 16. Secciones de velocidad del Canal de Yucatán correspondientes a Canek 1. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.	47
Figura 17. Secciones de velocidad del Canal de Yucatán correspondientes a Canek 2. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.	48
Figura 18. Secciones de velocidad del Canal de Yucatán correspondientes a Canek 3. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.	48
Figura 19. Secciones de velocidad del Canal de Yucatán correspondientes a Canek 4. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.	49
Figura 20. Secciones de velocidad del Canal de Yucatán correspondientes a Canek 5. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.	50
Figura 21. Corriente promedio y elipses de variación para todos los cruceros (Canek 0-5), a 50 m de profundidad.	53

Figura 22. Variabilidad del modo 1 de las FEOs, que representa el 55% de la varianza del campo del esfuerzo del viento en la zona. (a) Estructura espacial. (b) Evolución en el tiempo.	57
Figura 23. Variabilidad del modo 2 de las FEOs, que representa el 27% de la varianza del campo del esfuerzo del viento en la zona. (a) Estructura espacial. (b) Evolución en el tiempo.	58
Figura 24. Variabilidad del modo 3 de las FEOs, que representa el 6% de la varianza del campo del esfuerzo del viento en la zona. (a) Estructura espacial. (b) Evolución en el tiempo.	59
Figura 24. Esfuerzo promedio del viento para las fechas que corresponden a los cruceros. (a) Canek 0, (b) Canek 1, (c) Canek 2, (d) Canek 3, (e) Canek 4 y (f) Canek 5.	60
Figura 26. Anomalías de la Corriente (rojo) de Yucatán para Canek 0 [u_a, v_a], esfuerzo del viento [τ] (azul) y vector resultante de las ecuaciones de Ekman [u_E, v_E] (negro).	63
Figura 27. Idem Figura 26 para Canek 1.	63
Figura 28. Idem Figura 26 para Canek 2.	64
Figura 29. Idem Figura 26 para Canek 3.	65
Figura 30. Idem Figura 26 para Canek 4.	66
Figura 31. Idem Figura 26 para Canek 5.	67

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla I. Fechas en las que se realizaron los cruceros oceanográficos del Proyecto CANEK.	15
Tabla II. Velocidad y orientación promedio de la corriente, con flujo hacia el interior del Golfo de México en el Canal de Yucatán.	43
Tabla III. Velocidad y orientación promedio de la corriente de Yucatán en la zona Oriental del canal.	44
Tabla IV. Transporte de volumen a través del Canal de Yucatán en Sv (1×10^6 m ³ /s) entre los 50 y 500 m de profundidad.	51

I. INTRODUCCIÓN.

El Canal de Yucatán constituye la zona de comunicación entre el Mar Caribe y el Golfo de México; en conjunto, estas cuencas forman un sistema semicerrado que tiene como frontera Oeste el Continente Americano y como frontera Este Las Antillas, una cadena de islas cercanas entre sí, que actúan como filtro del flujo de la corriente que proviene del Océano Atlántico. La circulación que fluye a través de este sistema, constituye la parte Occidental del Giro Subtropical del Atlántico Norte (Murphy y Hurlburt, 1999).

Las aguas superficiales que fluyen a través del Caribe y tienen como salida el Estrecho de Florida, están conformadas por aguas provenientes tanto del Atlántico Norte como del Atlántico Sur. Aproximadamente 13 Sv ($1 \text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) del flujo total de la Corriente de Florida, se deben principalmente al movimiento de aguas superficiales en el Atlántico Sur, las cuales forman parte de la circulación global termohalina y fluyen como compensación por la circulación del Agua Profunda del Atlántico Norte (APAN). La otra componente de este flujo, está constituida por aproximadamente 16 Sv de aguas provenientes del Giro Subtropical del Atlántico Norte, generado por el transporte de Sverdrup (entre el ecuador y latitudes medias), debido al rotacional del esfuerzo del viento sobre el Atlántico Norte. Este conjunto de flujos es considerado de gran importancia ya que determina la estructura de las Corrientes de Frontera en la zona Oeste del Atlántico (Schmitz y Richardson, 1990; Schmitz, 1995, en: Murphy y Hurlburt, 1999).

El conjunto de flujos que proviene tanto del Atlántico Norte como del Atlántico Sur, entra al Caribe a través de los canales de las Antillas Menores (comprendidas entre la Isla Grenada y la Isla de Guadalupe), fluye por la costa Este de Centroamérica con el nombre de Corriente del Caribe (Schmitz y Richardson, 1990), posteriormente se convierte en la Corriente de Yucatán al pasar hacia el Golfo de México a través del

canal con el mismo nombre; una vez dentro del golfo, el flujo es llamado La Corriente de Lazo, la cual gira de forma anticiclónica y finalmente atraviesa el Estrecho de Florida (Corriente de Florida) para dar lugar a la Corriente del Golfo (Figura 1); este conjunto de flujos, conforman el Sistema Mar del Caribe-Golfo de México (MC-GM) (Mooers y Maul, 1998).

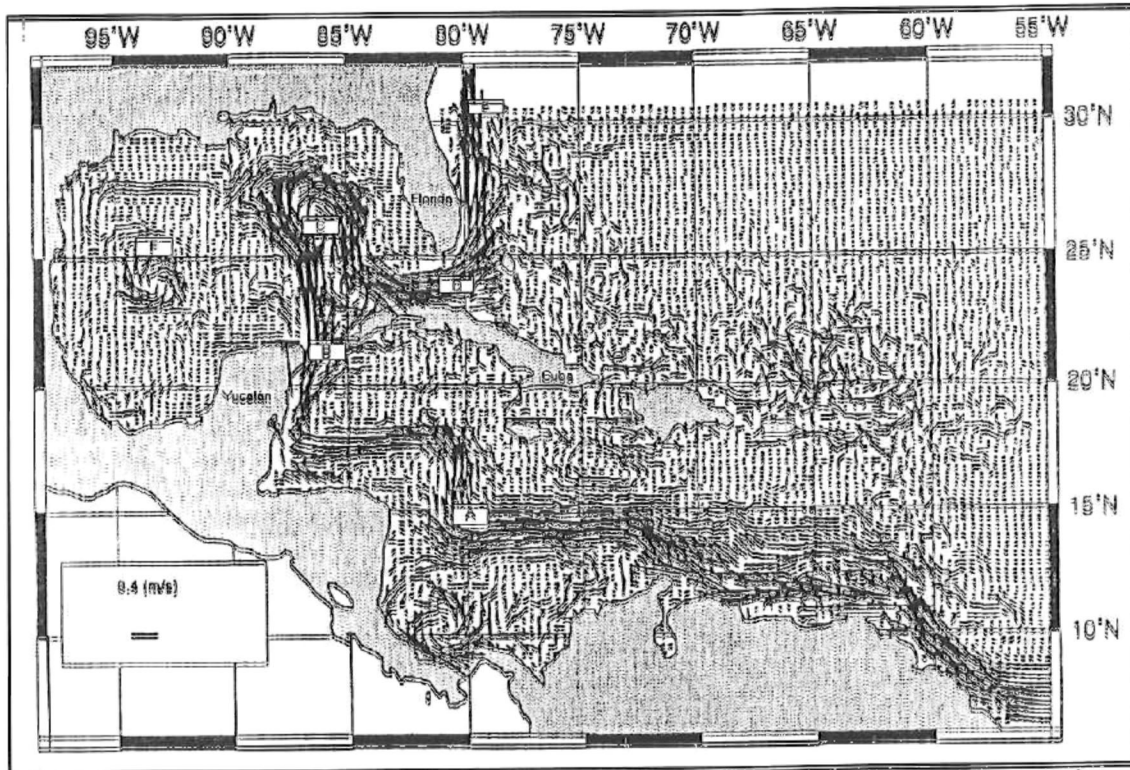


Figura 1. Localización del Canal de Yucatán en el Sistema Mar del Caribe = Golfo de México. (A) Corriente del Caribe, (B) Corriente de Yucatán, (C) Corriente de Lazo, (D) Corriente de Florida, (E) Corriente del Golfo y (F) Giro liberado a partir de la Corriente de Lazo (Tomado de Mooers y Maul, 1998. Resultados de corriente superficial a partir de modelación numérica).

Las características de las corrientes que conforman el flujo a lo largo del Noroeste del Atlántico, se encuentran relacionadas entre sí. Esto representa una razón importante para estudiar gran parte del intercambio de agua entre las cuencas del Sistema Mar del Caribe = Golfo de México y del Giro Subtropical del Atlántico Norte (Schmitz y Richardson, 1999). Las variaciones tanto en rapidez como en orientación que presenta la Corriente del Caribe y el flujo a través de las Antillas, afectan la variabilidad de la corriente a través de todo el sistema a un nivel de mesoescala

(Murphy *et al.*, 1999), por lo que se considera que la circulación desde las Antillas hasta el Estrecho de Florida se encuentra fuertemente interrelacionada.

En el Canal de Yucatán se han realizado estudios principalmente de transporte y variables físico-químicas; por otro lado, en numerosas ocasiones la velocidad de la corriente ha sido inferida tanto por métodos geostróficos como por balance de masa, al considerar el transporte que entra al sistema a través de las Antillas y el que sale por el Estrecho de Florida. Se considera que no se cuenta con antecedentes de mediciones directas de la velocidad, tanto del flujo medio como de la corriente en forma local.

El presente trabajo consiste en la descripción de la corriente superficial (50-500 m) mediante mediciones directas de la velocidad, en el Canal de Yucatán, y su comparación con los patrones generales de viento en la zona.

Se analizan patrones de circulación superficial a partir de datos obtenidos durante seis cruceros oceanográficos en la región del Canal de Yucatán, utilizando un Perfilador Acústico de Corrientes por Efecto Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) montado en el casco de un barco; estos cruceros fueron realizados dentro del periodo comprendido entre diciembre de 1996 y julio del año 2000. La combinación del ADCP con la navegación, es de gran utilidad, ya que provee un perfil de corriente casi continuo a lo largo del recorrido del barco (Candela *et al.*, 1992).

El analizar datos obtenidos a partir de mediciones directas en el Canal de Yucatán, contribuirá a un mejor conocimiento del comportamiento del flujo en la zona y a la implementación de modelos numéricos, que permitan realizar posibles predicciones en el comportamiento de dicha corriente.

Por otro lado, esta zona se caracteriza por sus ecosistemas ricos y su alta productividad, factores que se encuentran altamente influenciados por el transporte físico en la zona. En la forma como se conozca mejor la circulación del Sistema MC-GM,

se entenderán de manera más precisa las interacciones de los organismos con su medio y la distribución de los mismos, por efecto de las corrientes (Mooers y Maul, 1998).

I.1 Factores de forzamiento.

I.1.1. Liberación de giros.

La Corriente de Lazo libera giros anticiclónicos que viajan por el Golfo de México, los cuales son considerados un factor de forzamiento en la zona. Ohlmann *et al.* (2001) estableció que las regiones cercanas a la Corriente de Lazo y el límite de la plataforma continental del golfo, son zonas que presentan alta vorticidad oceánica, la cual es transmitida al flujo principal de la zona (Murphy *et al.*, 1999; Ohlmann *et al.*, 2001). La variabilidad en los patrones de dicha corriente es significativa año con año (Maul, 1977).

La vorticidad en el flujo, producto del forzamiento del viento, es muy parecida en magnitud a la vorticidad inducida por los giros en la región de la Corriente de Lazo, así como a lo largo de los límites de la plataforma continental en la parte Oeste del golfo. Lo anterior indica que en los estudios a escala temporal grande, los giros anticiclónicos liberados a partir de la Corriente de Lazo deben ser considerados como un factor de forzamiento al menos tan importante como el forzamiento superficial en la circulación del golfo (Ohlmann *et al.*, 2001).

Se sabe que existe un ciclo de crecimiento y disminución de la Corriente de Lazo, el cual culmina en la separación de los giros mencionados, sin embargo aún no se ha podido determinar de manera exacta la duración y periodicidad de este ciclo. Los giros liberados ejercen una influencia tanto en la circulación dentro del Golfo, como en la salinidad y temperatura superficial de la zona (Maul, 1977).

Los giros anticiclónicos que se separan de la Corriente de Lazo con una periodicidad desde 3 hasta 17 meses (Elliot, 1982; Maul y Vukovich, 1993) y con un promedio de entre 10 y 11 meses (Maul y Vukovich, 1993), viajan hacia el Oeste a través de la cuenca del Golfo de México (Figura 1). Estos giros de agua caliente tienen un diámetro máximo inicial entre 200 y 400 Km (Vukovich *et al.*, 1979; Elliott, 1982; Lewis *et al.*, 1989) y presentan velocidades de corriente entre 50 y 75 cm/s (Kirwan *et al.*, 1984).

Se ha considerado el hecho de que exista una relación entre la intrusión de la Corriente de Lazo y el comportamiento de la Corriente de Yucatán (y por consecuencia la liberación de giros en el Golfo de México). El comportamiento de la Corriente de Yucatán se refiere al transporte geostrófico a través del Canal de Yucatán (Molinari *et al.*, 1987 en: Maul y Vukovich, 1993), así como al ángulo de incidencia de la corriente hacia el interior del Golfo (Molinari y Morrison, 1988). Sin embargo, aún no se ha determinado con certeza la existencia de dicha relación.

Por otro lado, no sólo la Corriente de Lazo representa un aporte de vorticidad al flujo principal de la zona, existen también giros anticiclónicos que atraviesan la Cuenca Caribeña, asociados con la Corriente del Caribe (Murphy y Hurlburt, 1999). La formación de estos giros se debe en parte a la vorticidad potencial de la Corriente Costera del Norte de Brasil; dicha vorticidad no es constante y es transmitida hacia el flujo al pasar a través de las Antillas. Estos giros en ocasiones llegan hasta el Canal de Yucatán, pasan a través de él y se introducen al Golfo de México, lo que a su vez influye en el periodo de liberación de giros de la Corriente de Lazo.

Cabe mencionar que durante el tránsito de giros por el Caribe, éstos pueden llegar a intensificarse considerablemente, lo cual depende en gran parte de la fuerza que presenta la Corriente del Caribe; dicha intensificación se debe a la variación interanual en el forzamiento del viento (Murphy y Hurlburt, 1999).

I.1.2. Mareas

La marea juega un papel importante en la variabilidad de la velocidad de la Corriente de Florida; entre el 10 y el 25% del flujo de esta corriente, se considera como flujo de marea en el cual domina la componente diurna (Schmitz y Niiler, 1969; Kielmann y Düing, 1974). En particular entre Miami y El Banco Bahamas (en la zona profunda) la marea domina sobre un 20% de la variabilidad de la corriente, a excepción del extremo donde el 38% de la varianza total corresponde únicamente a la componente diurna, mientras que cerca de las Bahamas, la componente semidiurna es la que domina la varianza de la corriente (Brooks, 1979).

Brooks (1979) observó tres mecanismos que causan las fluctuaciones en el transporte de la Corriente de Florida, el primero son las fluctuaciones del flujo Norte-Sur detectadas en aguas profundas, con periodos de días a dos semanas, que afectan en gran medida el transporte; el segundo es el flujo Este-Oeste que causa grandes variaciones en el transporte local, sin afectar el transporte total; y finalmente la mareas que no afectan significativamente el transporte total, pero tienen efectos pequeños en el transporte estacional, a excepción el Banco de las Bahamas, donde las mareas afectan fuertemente la variabilidad en el transporte.

A través del Canal de Yucatán, existe un flujo profundo, que en ocasiones presenta dirección Sur, por debajo de la Corriente de Yucatán (más de 1,000 m de profundidad) con velocidades en el orden de 0.01 m/s. Este flujo se encuentra influenciado en su componente Norte por una fluctuación de la corriente diurna de la marea; sin embargo esta influencia en la parte más profunda es muy pequeña (Hansen y Molinari, 1979).

Específicamente en aguas superficiales de la Corriente de Yucatán, la marea no afecta significativamente tanto su velocidad como su variabilidad, ya que la magnitud de las componentes de la marea (0.01-0.10 m/s), es muy pequeña en relación con la

velocidad promedio del flujo en la Corriente de Yucatán (1 m/s); debido a lo anterior, la marea no es considerada un factor principal de conducción o de contribución en la variabilidad de las aguas superficiales que cruzan el Canal de Yucatán (Carrillo *et al.*, 2000).

I.1.3. Morfología de la zona.

La morfología del Canal de Yucatán representa otro factor que influye sobre la corriente; ésta se encuentra controlada por la morfología de la zona, ya que al pasar el flujo a través del canal, se reduce el área de incidencia en relación con la cuenca del Caribe. La Corriente de Yucatán, también es influenciada por la batimetría entre los 21° N y los 24.5° N, produciendo cambios en la orientación del flujo principal, entre estas latitudes (Molinari y Cochrane, 1972 en: Maul, 1977; Molinari y Morrison, 1988).

I.1.4. Vientos.

El forzamiento del viento sobre la superficie del mar, además de jugar un papel importante dentro de la circulación global de la zona donde se encuentra el Sistema MC-GM, como se mencionó con anterioridad, ha sido considerado un factor determinante en la circulación y variabilidad de la corriente de manera local.

Esta zona se encuentra influenciada de mayor forma por los Vientos Alisios provenientes del Este, los cuales están mejor establecidos en Verano. También se encuentra influenciada por frentes fríos que penetran hacia el Sur durante el Invierno, comúnmente llamados "Nortes", los cuales generan vientos en dirección Norte-Sur (Mooers y Maul, 1998).

1.2. OBJETIVO.

El presente trabajo tiene como objetivo la descripción de la circulación superficial (50-500 m) a través del Canal de Yucatán, con el fin de determinar el flujo medio de la corriente durante un periodo de cinco años, así como sus variaciones estacionales.

Se pretende también establecer, si existe relación entre la variabilidad de la corriente superficial y el patrón de vientos dominante en la zona, para de esta forma determinar la influencia que ejerce el forzamiento del viento sobre el flujo anómalo de las aguas superficiales de la Corriente de Yucatán.

1.3. ANTECEDENTES.

El Canal de Yucatán es una zona poco estudiada, de la cual aún no se determinan completamente su comportamiento y sus variaciones estacionales; sin embargo, se han realizado numerosos estudios sobre la Corriente del Caribe, la variabilidad de la Corriente de Lazo y el transporte a través del Estrecho de Florida; estas corrientes al igual que la Corriente de Yucatán, pertenecen al Sistema MC-GM, por lo que el estudio de estas zonas, contribuye sustancialmente al conocimiento de todo el sistema.

Mooers y Maul (1998), resumieron la circulación del Sistema MC-GM; en dicho documento se describen aspectos tanto atmosféricos, como influencias oceánicas, tales como las mareas, la circulación global, la variabilidad de mesoescala y aspectos biológicos que contribuyen y/o son consecuencia de la circulación general de toda el área, en la que existe una interconexión entre los transportes físicos de todo el sistema. Por otro lado, también mencionan que aspectos sociales importantes asociados con los ecosistemas marinos costeros, las pesquerías y la contaminación, pueden y deben ser planteados desde un punto de vista global.

Molinari y Cochrane (1972, en: Molinari y Morrison, 1988), realizaron tres cruceros durante Mayo de 1962, 1965 y 1966, en los cuales determinaron que la Corriente de Yucatán se encuentra influenciada por los cambios de orientación en la batimetría de la zona, ya que en los 23.5° N y 87° W, dicha corriente cambia su dirección de Norte a Noroeste.

Más tarde Maul (1977), en agosto de 1972 realizó mediciones directas con CTD, en nueve lances de 18 Km de distancia entre sí a través del Canal de Yucatán; a partir de los transectos hidrográficos realizados durante dos días y utilizando geostrofia, determinó la velocidad de la corriente superficial en el canal. Las velocidades encontradas de Yucatán a Cuba fueron: 130, 145, 80, 119, 73, 88, 62 y 35 cm/s; al comparar dichas velocidades con datos de satélite, atribuyó los dos máximos (145 y 130 cm/s) a la vorticidad generada por giros ciclónicos debidos a la turbulencia producida por la Isla Cozumel; dicha vorticidad inducida por la topografía, es transmitida al flujo promedio de la Corriente de Yucatán.

Por otro lado, Hansen (1979) estudió las corrientes profundas en el Canal de Yucatán, por medio de mediciones directas a 15 metros por encima del fondo marino, con datos hidrográficos y de corrientímetros durante un mes del Otoño de 1970. La corriente promedio observada durante este mes fue de 3.9 cm/s con orientación Sursuroeste, dichas mediciones fueron caracterizadas por las componentes diurnas de la marea y oscilaciones con periodos de 4 a 5 días, lo que lo llevó a concluir que dicho flujo era representativo de un flujo barotrópico de marea, sin embargo Weatherly (1972) y Wimbush y Munk (1970) sugieren que los efectos de la corriente de marea a 15 m por encima del fondo, deberían ser pequeños.

A partir de los datos hidrográficos, Hansen (op. cit.) obtuvo que el flujo geostrófico por debajo de los 1,000 metros, presenta una dirección hacia el Sur, con velocidades muy pequeñas entre 0.003 y 0.05 m/s, y con un transporte entre 1.7 y 2.8

Sv, aumentando a finales de octubre. Por otro lado, estimó un transporte total para el Canal de entre 27.1 y 25.8 Sv, considerando sólo uno de los cruces a través del canal, mientras que durante otro cruce tres semanas después, se detectó un incremento del 5% en el transporte, sin embargo éste no se consideró significativo debido a las aproximaciones geostróficas.

Murphy y Hurlburt (1999) realizaron un conjunto de simulaciones numéricas para investigar la relación en la variabilidad a nivel de mesoescala, entre el Océano Atlántico, el Caribe y el Golfo de México, incluyendo en su modelo el forzamiento del viento y la circulación termohalina. Estos autores obtuvieron un transporte promedio a través del Canal de Yucatán de 21.4 y 21.5 Sv, el cual fue comparado con los 29 Sv estimados por Schmitz y Richardson en la misma zona a partir del transporte promedio en la Corriente de Florida. El transporte de Murphy y Hurlburt (1999) también fue comparado con el transporte en el Estrecho de Florida medido por Larsen (1992) a los 27° N el cual fue de 32.3 Sv.

Una de las corrientes mejor estudiadas dentro del Sistema MC-GM es la Corriente de Florida. Uno de los valores más conocidos en relación a dicha corriente, es la media de su transporte total (30 ± 4 Sv), éste ha sido determinado por medio de muestreos directos en la zona (Molinari *et al.*, 1985; Schmitz y Richardson, 1990 y 1991; Hogg y Johns, 1995; Mooers y Maul, 1998). Sin embargo, es importante mencionar que dentro de la Corriente de Florida se considera un pequeño flujo (de aproximadamente 5 Sv) externo al Sistema MC-GM que fluye entre las Antillas y las Bahamas, para unirse a las aguas provenientes del Golfo de México (Hogg y Johns, 1995; Lee *et al.*, 1990, en: Wilson y Johns, 1997; Leaman *et al.*, 1995). Con base en lo anterior y en las mediciones en los pasajes de las Antillas, se ha inferido el transporte a través del Sistema MC-GM, sin embargo no existen suficientes estudios que determinen con precisión dicho transporte.

Las variaciones estacionales en la Corriente de Florida han sido muy estudiadas, sin embargo no se ha podido determinar un patrón constante de comportamiento a lo largo del año. Larsen (1992) encontró una variación de 4.6 Sv entre el máximo transporte en julio-agosto y el mínimo en noviembre. Maul y Vukovich (1993) encontraron que la posición más al Norte de la Corriente de Lazo, fue durante Invierno en ciertos años y durante Verano en otros; ellos a su vez determinaron que el transporte mínimo en la Corriente de Florida ocurrió durante el Otoño y el máximo durante Verano. Niiler y Richardson (1973) encontraron valores máximos de transporte durante el Verano y valores mínimos a principios de Invierno. Lo anterior muestra la amplia gama de conjeturas con respecto al patrón estacional en la zona.

Del transporte promedio reportado en la Corriente de Florida (el cual es de 30 Sv), a partir de mediciones directas entre la Península de Florida y Las Bahamas, Niiler y Richardson (1973 en: Anderson y Corry, 1985) concluyeron que el ciclo anual presenta una variación promedio de ± 4 Sv. También determinaron que de la variabilidad total de todo el transporte, el 45% se debe a variabilidad estacional; a su vez calcularon el valor máximo de transporte, que fue de 33.6 Sv durante el Verano, mientras que el mínimo fue de 25.4 Sv a principios de Invierno.

Anderson y Corry (1985) desarrollaron un modelo numérico aplicado sobre el Atlántico Norte, para el cual usaron datos de forzamientos de viento, e incorporaron la geometría de las 5 islas caribeñas de mayor tamaño, sin tomar en cuenta la topografía de la zona. Ellos determinaron que el transporte a través del Estrecho de Florida es máximo en Invierno y mínimo en Otoño y en algunos casos el máximo es detectado en el Verano, aunque en menor magnitud.

Por medio de un estudio del transporte de la Corriente de Florida a lo largo de 20 años, utilizando un cable submarino colocado entre Júpiter Inlet (Florida) y Settlement Point (Bahamas), Larsen (1992, en: Hogg y Johns, 1995) encontró que la alta variabilidad de la Corriente de Florida se presentan en periodos cortos (meses), ya

que los cambios en el transporte durante estas dos décadas fue menor a ± 0.5 Sv, por lo que a una mayor escala, no se presenta variabilidad significativa en la corriente. El transporte a través del Estrecho de Florida, medido durante dicho estudio, fue comparado con la posición de la Corriente de Lazo, dicha correlación fue esencialmente cero (Maul y Vukovich, 1993).

Maul y Vukovich (1993) realizaron un estudio a partir de datos de satélite obtenidos cada mes durante 20 años y fueron comparados con datos *in situ*, para estimar el volumen de la Corriente de Florida y compararla con el grado de intrusión de la Corriente del Lazo. Ellos encontraron que durante este periodo de tiempo, la mayor penetración de la corriente ocurre en Invierno, cuando el transporte en Florida es mínimo, sin embargo no se encontró una relación estadísticamente significativa entre ambos factores.

Leaman *et al.* (1995 en: Wilson y Johns, 1996) estimaron el transporte a través del Canal de las Bahamas e indicaron que más del 90% del transporte de la Corriente de Florida, entra a través de los pasajes en Las Antillas (entre Cuba y la parte Norte de Sudamérica), lo cual por el patrón general de la corriente, tiene como punto medio el Canal de Yucatán.

Por otro lado, con respecto a la Corriente de Lazo se ha estudiado el ciclo anual de crecimiento y separación de giros, así como la disminución de la incidencia de ésta hacia el golfo. Se ha determinado que estos factores juegan un papel importante dentro del Sistema MC-GM; algunos estudios han argumentado que este ciclo se encuentra en fase con el ciclo de transporte anual del sistema de la Corriente en el Golfo. Maul (1977) determinó que durante el periodo en el que la corriente de Lazo se encuentra en crecimiento, aguas residentes del Golfo de México son desplazadas, esto requiere de un exceso de 4 Sv en el flujo superficial (500 m superiores) del Canal de Yucatán, los cuales salen del sistema a través del Estrecho de Florida.

La hipótesis propuesta por Maul (1977) de que intrusiones de la Corriente de Lazo al interior del golfo se reflejan en flujos profundos hacia el Caribe en el Canal de Yucatán, ha sido verificada recientemente (Bunge, 2001) con base en observaciones directas de corriente en el canal e imágenes de temperatura superficial en el Golfo.

Maul y Vukovich, (1993) y Murphy *et al.* (1999) encontraron que la Corriente de Yucatán a su vez, se encuentra en fase con la Corriente de Florida y ambos presentan la misma magnitud, esto se determinó en base a un estudio realizado durante 15 días por Murphy *et al.* (1999), en el cual se encontró una correlación de 0.7 entre el transporte a través del Canal de Yucatán y a través del Estrecho de Florida. Ellos no encontraron correlación significativa entre la liberación de giros en el Golfo de México y las variaciones en el transporte del Estrecho de Florida.

Finalmente, Hurlburt y Thompson (1980, en: Murphy y Hurlburt, 1999) demostraron por medio de simulaciones numéricas, que con un flujo interior constante dentro del golfo, es posible observar un periodo de separación de los giros relativamente constante, lo que apoya la teoría de que las variaciones a través del Canal de Yucatán, y contribuyen al amplio intervalo de la periodicidad en la liberación de giros.

Ohlmann *et al.* (2001) comparó la contribución de los giros del golfo y del forzamiento del viento sobre los cambios en la circulación principal, resultando que la generación de vorticidad hacia los flujos a partir de los giros, es mayor que la contribución del forzamiento de los vientos sobre la superficie del mar; esto ocurre especialmente en la región de la Corriente de Lazo y a lo largo del límite de la plataforma continental en la parte Oeste del Golfo. También encontró que las variaciones en la Corriente de Lazo, se encuentran fuertemente relacionadas con la variabilidad tanto en la Corriente de Florida como en la Corriente de Yucatán.

1.4. AREA DE ESTUDIO.

El Canal de Yucatán cuenta con un ancho de aproximadamente 196 kilómetros desde Cabo San Antonio (Cuba), hasta Isla Mujeres (México) (Hansen, 1979), su área de cobertura abarca aproximadamente de los 20° a los 23° Latitud Norte y de los 84.5° a los 88° Longitud Oeste (Figura 1).

La Corriente de Yucatán fluye hacia el interior del Golfo de México a través del canal con el mismo nombre, con velocidad y orientación variables; ésta se encuentra regida parcialmente por la topografía de la zona, que está conformada por la Península de Yucatán, la cual es más ancha que el extremo Noroeste de la Isla de Cuba, por otro lado, su plataforma continental presenta una pendiente extendida en comparación con la plataforma cubana, cuya pendiente es abrupta. Entre éstas dos plataformas se encuentra el umbral del Canal de Yucatán de hasta 2,000 m de profundidad (Apéndice A), el cual conecta a la Cuenca Caribeña con la Cuenca del Golfo de México. La Isla de Cozumel, al Sur de la Península de Yucatán, es considerada también parte de la morfología del canal, y ejerce influencia sobre dicha corriente.

La Corriente de Yucatán forma parte de un Sistema semicerrado que abarca el flujo desde la Cuenca del Caribe hasta el Estrecho de Florida. El Golfo de México es considerado por algunos autores una cuenca de evaporación, ya que se ha determinado que excede a la precipitación aproximadamente entre 35 cm/año (Jacobs, 1951 en: Maul, 1977) y 100 cm/año (Tomczak y Godfrey, 1994). Sin embargo, a partir de un balance de calor a largo plazo, Sánchez-Montante (2000) determinó que el flujo neto de calor en la zona indica un calentamiento asociado a características particulares de la circulación local.

Por otro lado, uno de los regímenes de forzamiento atmosféricos dominantes en el Sistema MC-GM es el paso de tormentas tropicales, generalmente cada año, cuatro tormentas tropicales alcanzan la intensidad de huracanes en esta zona. Adicionalmente se ha determinado que la presencia o ausencia de la capa de mezcla depende de las

condiciones de tormenta tanto en Verano como en Invierno (Price *et al.*, 1978 en: Mooers y Maul, 1998).

II. METODO.

II.1. COLECTA DE DATOS.

Se realizaron seis cruceros oceanográficos a bordo del B/O Justo Sierra como parte del proyecto CANEK, el cual surge con el objetivo de estudiar tanto el comportamiento de las corrientes, como la hidrología de la zona comprendida por el Canal de Yucatán, así como el intercambio entre las cuencas del Caribe y del Golfo de México. Dichos cruceros fueron nombrados desde Canek 0 en diciembre de 1996, hasta Canek 5 en julio del año 2000 (Tabla 1), los cuales tuvieron una duración de entre 8 y 23 días en diferentes épocas del año.

Tabla I. Fechas en las que se realizaron los cruceros oceanográficos del Proyecto CANEK.

AÑO	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1996				Canek 0 7 Dic – 18 Dic
1997		Canek 1 24 May - 12 Jun		
1998		Canek 2 29 Mar – 6 Abr		
1999	Canek 3 27 Ene – 6 Feb		Canek 4 25 Ago – 14 Sep	
2000			Canek 5 16 Jun – 10 Jul	

Se realizaron mediciones continuas durante el recorrido de cada crucero, utilizando un ADCP instalado en el casco del barco, dicho aparato cuenta con una frecuencia de emisión de 75 kHz.

Los datos analizados en el presente trabajo se obtuvieron con una resolución vertical de 16 metros e intervalos de tiempo de 5 minutos. Este intervalo representa un promedio de aproximadamente 100 pulsos de sonido que realiza el ADCP, durante el periodo de tiempo mencionado.

De manera simultánea con las mediciones del ADCP, se obtuvo constantemente la posición del barco por medio de un Sistema Geoposicionador (GPS, por sus siglas en inglés), con esta secuencia de posiciones es posible calcular la velocidad del barco. Debido a que el ADCP se encuentra en movimiento junto con el barco, fue necesario obtener la diferencia entre la velocidad del barco y los valores medidos por el aparato, para de esta forma obtener la velocidad real de la corriente.

El ADCP emite pulsos de sonido y recibe la energía del sonido reflejada por partículas en suspensión en el agua, midiendo la diferencia entre la frecuencia del sonido emitido y el recibido determina la velocidad del reflector (efecto Doppler). Escuchando el sonido reflejado en forma discreta puede detectar la velocidad del agua a diferentes distancias del aparato. La penetración de las observaciones depende de las condiciones oceanográficas y los parámetros utilizados en la programación del ADCP. En general, durante los cruceros Canek se cuenta con mediciones hasta los 600 m de profundidad.

Los datos medidos por el ADCP, fueron procesados por medio del programa CODAS (Common Oceanography Data Analysis System) de la Universidad de Hawaii (http://ilikai.soest.hawaii.edu/sadcp/ref_inst_meth.html), y por medio de interpolación lineal se obtuvieron promedios verticales cada 50 m (abarcando de los 25 a los 625 m), así como promedios cada 30 min. El promediar los datos obtenidos tiene como fin reducir el tamaño del paquete de datos y el error en las componentes de velocidad horizontal a menos de 0.005 m/s. Este procesamiento, ayuda a excluir las frecuencias altas que se encuentren en la zona, tales como las ondas internas de pequeño periodo. De esta forma se obtuvieron los datos para su análisis y la realización del presente trabajo.

García-Górriz *et al.* (1997), establecieron un protocolo que analiza los errores a considerar en los datos medidos por el ADCP de barco, entre ellos consideran errores dados por la calibración del aparato, según la rutina de calibración de Joyce (1989), la cual considera el ángulo de inclinación del aparato con respecto a la horizontal (α) y la escala del factor de sensibilidad (β). De esta forma, la velocidad Doppler detectada debe ser rotada por α , llevada a escala por $1 + \beta$ y sumada a la velocidad del barco, para obtener la velocidad verdadera del agua.

Consideran también el error del aparato debido a la medición de los datos, el cual presenta un intervalo del orden de algunos cm/s (RDI, 1990 en: García-Górriz *et al.*, 1997). Este error se debe principalmente al movimiento vertical (oleaje) y horizontal del barco, y es reducido con los promedios que realiza internamente el mismo aparato. Para instrumentos que presentan un ángulo de 30° de inclinación en sus transductores, como es el caso, dicho error está dado por:

$$\sigma(\text{m/s}) = 1.6 \times 10^5 / (F D N^{1/2}) \quad (2.1)$$

donde F es la frecuencia de emisión del ADCP en Hz (75,000 Hz), D es el espesor vertical de la celda de agua en metros (16 m) y N es el número de pulsos de sonido promediados (100). Con base en las características de las mediciones, el error de medición para los datos con los que se trabajó es del orden de 0.013 m/s. Se considera que éste es uno de los errores más importantes, ya que considera movimientos del barco que ocurren continuamente y de la misma forma, afectan a las mediciones.

Este protocolo también considera errores dados por las diferencias en la velocidad y curso del barco, el error de posición del GPS, el error dado por el girocompás y por la homogeneidad de la celda de agua.

II.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

Se graficaron los vectores de velocidad para cada crucero a profundidades de 50, 150, 250, 350 y 450 m, con el fin de observar los cambios de la corriente en la columna de agua. A pesar de que se cuenta con datos hasta los 600 m, se observó que a profundidades por debajo de los 400 m, el número de datos era muy pequeño para la descripción de la corriente y el cálculo de promedios.

Considerando que en la mayoría de las gráficas correspondientes a un mismo crucero no se observó diferencia en la orientación de la corriente, se eligió la profundidad más representativa en la columna de agua (con base en el número de datos) para llevar a cabo la descripción de la corriente. En todos los cruceros la profundidad más representativa fue a 50 m, a excepción de Canek 0, para el cual se eligió la gráfica a 100 m, ya que a esta profundidad se observa un número mayor de datos que los detectados a 50 m. Los ángulos de orientación de la corriente reportados en el presente trabajo son trigonométricos, es decir, medidos a la izquierda (contra las manecillas del reloj) con respecto al Este.

Por otro lado, para intervalos verticales comprendidos entre los 50 y los 300 m de profundidad, se realizaron promedios para todos los puntos horizontales que contenían datos de corriente a cada una de las profundidades. De este modo los puntos que no contenían datos de corriente a lo largo de todo el intervalo entre 50 y 300 m de profundidad fueron eliminados, para evitar vectores con magnitudes erróneas y algún sesgo en los promedios. A pesar de que se cuenta con datos hasta los 600 m de profundidad, para este análisis se usaron datos de 50 a 300 m, ya que hasta esta profundidad la cantidad de datos horizontales fue adecuada para realizar la comparación de los patrones horizontales de corriente entre los distintos cruceros. A partir de las gráficas obtenidas, se realizaron comparaciones estacionales del patrón de corrientes.

Con el fin de reafirmar las observaciones, se utilizaron también secciones verticales extraídas de las fechas en las que el barco cruzó el Canal de Yucatán de extremo a extremo. Dichas secciones se graficaron desde los 50 hasta los 500 metros de profundidad, y desde los 84.8° W hasta los 86.4° W. Para obtener un perfil completo en toda la sección muestreada a lo largo de la columna de agua, en las zonas donde no se contaba con valores se llevó a cabo una interpolación lineal. En el caso específico de Canek 0, el barco no cruzó por completo el Canal de Yucatán por lo que se consideró la mitad de la sección, de los 85.8° W a los 86.3° W. Se calculó el transporte volumen en Sv ($1\text{Sv}=1\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), en la sección superficial (50-500 m) a través del Canal de Yucatán (165.2 Km) estableciendo un área (A) constante, a partir de la integral de la componente Norte-Sur de velocidad (v) con respecto al área de la sección:

$$\int_A v dA \quad (2.2)$$

Para obtener la corriente promedio de todos los cruceros y su variabilidad, se consideró una malla con celdas de 0.25° por 0.25° de longitud / latitud en la zona del Canal de Yucatán, se promediaron los datos de todos los cruceros ubicados en cada una de las celdas y se eliminaron las celdas que contaban únicamente con un solo valor. Posteriormente se realizó estadística descriptiva utilizando elipses de variación; estas elipses determinan la desviación estándar de los datos promediados, tomando en cuenta tanto la magnitud como la orientación de los vectores.

Para obtener las elipses de variación, una vez calculados los promedios dentro de la malla establecida, se obtuvieron las anomalías (u_a, v_a) de la siguiente manera: se calculó la diferencia entre cada uno de los vectores (u, v) y el promedio de todos los vectores ($\overline{u, v}$), para cada celda.

$$\begin{aligned} u_a &= u - \overline{u} \\ v_a &= v - \overline{v} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Y la matriz de anomalías (A) definida como:

$$A = [u_a, v_a] \quad (2.4)$$

Al multiplicar la transpuesta de la matriz de anomalías (A^T) por la matriz (A) y dividirla entre el número total de datos (N), se obtiene la matriz de covarianza (C).

$$C = \frac{A^T A}{N} \quad (2.5)$$

Posteriormente se obtienen sus eigenvalores (λ), donde λ_i es el eigenvalor que describe la cantidad de varianza asociada al eigenvector (V_i). La matriz de eigenvectores está compuesta por $[V_1, V_2]$, de esta forma se obtiene el semi-eje mayor (V_1) y el semi-eje menor (V_2) de la elipse de variación; estos ejes están rotados con respecto a los ejes originales, de tal forma que las componentes a lo largo de estas nuevas direcciones sean independientes.

$$CV_i = \lambda_i V_i$$

$$\text{Donde, } \begin{cases} V_1 = \sqrt{\lambda_1} X_1 \\ V_2 = \sqrt{\lambda_2} X_2 \end{cases} \quad \text{y} \quad X_1 = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix}; X_2 = \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$\text{De modo que, } V_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \sqrt{\lambda_1}; V_2 = \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \sqrt{\lambda_2} \quad (2.7)$$

La magnitud de las elipses de variación se puede obtener a partir de las componentes del semi-eje mayor (u_1 y v_1), de la siguiente manera: $\sqrt{u_1^2 + v_1^2}$ y la orientación por medio de $\left(\tan^{-1} \left(\frac{v_1}{u_1} \right) \right)$. Este análisis se llevó a cabo para las profundidades de 50, 100, 150, 200, 250 y 300 m.

Se calcularon también elipses de variación para cada crucero a diferentes profundidades, según el criterio establecido con base en el análisis de las gráficas de promedios de 50 a 300 m, con el fin de analizar las zonas de mayor y menor variabilidad de la corriente en cada crucero.

Una vez realizada la estadística y descripción de los patrones superficiales de la Corriente de Yucatán, se obtuvieron patrones de viento en la zona para las fechas en

las que se realizaron los cruceros. Los patrones de viento fueron obtenidos a partir de los datos atmosféricos globales que se encuentran en el Internet (wesley.wvb.noaa.gov/reanalysis.html), publicados por el proyecto de Reanálisis, desarrollado por la NCEP (National Center of Environmental Prediction) y la NCAR (National Center of Atmospheric Research), que constituyen dos centros de investigación meteorológica de los Estados Unidos de América. Estos centros cuentan con una base de datos de más de 40 años, que contiene información de las variables atmosféricas globales, abarcando del periodo de 1956 a la fecha (Sánchez-Montante, 2000).

El esfuerzo del viento sobre la superficie del mar puede tener influencia sobre el patrón de corrientes de una zona, y por inercia este efecto puede perdurar incluso hasta días después de ocurrido el fenómeno que afectó a la corriente. Debido a lo anterior, se eligieron los datos de viento del Reanálisis, ya que al contar con series de tiempo que abarcan el periodo en el que se realizaron los seis cruceros, es posible obtener el esfuerzo del viento días antes del inicio de cada uno de ellos. Por otro lado, al contar con la velocidad del viento a una escala global es posible observar el patrón de vientos dominante en la zona.

Cabe mencionar que durante los cruceros, el barco contaba con una estación meteorológica, sin embargo no se obtuvieron los datos de velocidad del viento para las fechas en las que se realizaron dichas campañas oceanográficas, por lo que no fue posible complementar el análisis de vientos globales con las comparaciones de datos de viento local medidos por los aparatos del barco.

De la base de datos del Reanálisis se obtuvieron series de tiempo de 1706 días a partir del 1 de enero de 1996. Se cuenta con series de tiempo para 25 puntos que abarcan la zona del Canal de Yucatán, con viento a una altura de 10 m sobre la superficie del mar. Estos datos abarcan un área de los 82.5° a los 90° de longitud Oeste y de los 18.950° a los 25.714° de latitud Norte, en una malla con celdas de 1.8750° X 1.9047° longitud/latitud.

A partir de la velocidad del viento a una altura de 10 m (U_{10}), se calculó el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ utilizando las fórmulas de Large y Pond (1981) para calcular el coeficiente de arrastre (CD) en función de la magnitud del vector.

$$10^3 CD = \begin{cases} 1.2, & 4 \leq U_{10} < 11 \text{ m/s} \\ 0.49 + 0.065 U_{10}, & 11 \leq U_{10} \leq 25 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.8)$$

Una vez que se cuenta con el CD, utilizando la densidad del aire ρ_a , la velocidad el viento U_{10} y su magnitud, se obtiene el esfuerzo del viento τ .

$$\tau = (\rho_a)(CD)(U_{10})|U_{10}| \quad (2.9)$$

Posteriormente se obtuvo la Descomposición Empírica Ortogonal (FEOs) del esfuerzo del viento, por medio de la cual se descompone la varianza total en modos ortogonales. Los FEOs son un conjunto de vectores base (ortogonales y normalizados) que explican la varianza de un conjunto de datos, en este caso se utilizaron para expresar la matriz de datos del esfuerzo del viento como función del espacio y del tiempo, representando diferentes porciones decrecientes de la varianza de este campo: Los modos. Cada uno de éstos, representa un porcentaje de la variabilidad total.

Para obtener los FEOS se realizó la descomposición en valores singulares (utilizando la rutina de MATLAB: *svd*) de la matriz W conformada por las componentes del esfuerzo del viento (τ_x, τ_y) para cada uno de los 25 puntos observados, y se obtuvieron tres matrices. Las matrices ortogonales T y E representan respectivamente, la evolución en el tiempo y la estructura espacial de los modos empíricos, mientras que la matriz diagonal S contiene los valores singulares que dan la información sobre el contenido de la varianza total explicada por cada modo.

$$W = [\tau_x, \tau_y] \quad (2.10)$$

$$[T, S, E] = \text{svd}(W) \quad (2.11)$$

$$\text{De modo que,} \quad W = TSE^T \quad (2.12)$$

Para este caso, la estructura de los tres primeros modos, muestra el 88% de la variabilidad total. Finalmente se graficó la componente espacial resultante de la descomposición en FEOs, así como su evolución en el tiempo, para los tres primeros modos obtenidos.

Se extrajeron datos del esfuerzo del viento para las fechas en las que se realizaron los cruceros, tomando en cuenta cinco ciclos inerciales anteriores a la fecha inicial de cada crucero, de esta forma se calculó y graficó un promedio de la serie de tiempo para cada punto de la malla ($1.8750^\circ \times 1.9047^\circ$ longitud/latitud) en la zona del Canal de Yucatán. Un ciclo inercial se define como:

$$P = \frac{2\pi}{f} \quad (2.13)$$

Donde P es el periodo inercial y el parámetro de Coriolis está dado por:

$$f = 2\Omega \sin(lat) \text{ y } \Omega = 7.04 \times 10^{-5} s^{-1} \quad (2.14)$$

Si se toma como latitud promedio 21° N, un ciclo inercial es de 34.6 horas, por lo que se tomaron en cuenta los datos medidos siete días antes del inicio de cada crucero.

Finalmente se calcularon las anomalías en la corriente para cada crucero, de la forma $(\overline{X}_c - \overline{X}_T)$. Donde $\overline{X}_c$ es la velocidad promedio de la corriente (para cada celda de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ de latitud y longitud) de un crucero en particular y $\overline{X}_T$ es la velocidad de la corriente promedio en la zona (para los seis cruceros), en la misma ubicación geográfica; para este cálculo se consideró que el promedio de los seis cruceros era representativo de la corriente promedio en la zona.

Con el fin de que los datos de viento y velocidad de la corriente fueran comparables, en cada crucero se realizó una interpolación "ponderada por la distancia" del esfuerzo del viento, para cubrir una malla con celdas de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ de

longitud/latitud, y se graficaron las anomalías de la corriente junto con el esfuerzo del viento para los mismos puntos en el Canal de Yucatán.

La Teoría de Ekman determina que cuando una parcela de viento fluye sobre la superficie del mar, por fricción provoca un forzamiento que hace que la capa superior de agua se mueva, aparentemente en la dirección del viento, sin embargo la fuerza de Coriolis actúa sobre este movimiento, desviando la dirección de la corriente 45° (en teoría) a la derecha de la dirección del viento (en el Hemisferio Norte). Esta capa superior de agua genera fricción sobre la capa inferior a ella, y ésta a su vez influye sobre las capas inferiores; de esta forma se observa como el movimiento se transmite hacia las capas profundas (esfuerzo de corte), con una velocidad que decrece exponencialmente conforme aumenta la profundidad y una dirección en el movimiento que cambia en base a la dirección de las manecillas del reloj (en el Hemisferio Norte). Si lo anterior se observa de forma tridimensional, representando a cada capa con un vector, se puede observar una espiral de movimiento llamada: *La Espiral de Ekman* (Pond y Pickard, 1998; Pond y Emery, 1996).

Las componentes del vector de Ekman, están dadas por:

$$u_E = V_o \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{D_E} z\right) \exp\left(\frac{\pi}{D_E} z\right) \quad (2.15)$$

$$v_E = V_o \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{D_E} z\right) \exp\left(\frac{\pi}{D_E} z\right) \quad (2.16)$$

Donde, z es la coordenada vertical (negativa a partir de la superficie del mar, hacia el fondo), V_o y D_E (profundidad de la capa de Ekman) están definidos como:

$$V_o = \frac{\pi \tau \sqrt{2}}{D_E \rho |f|}; D_E = \pi \sqrt{\frac{2A_z}{|f|}} \quad (2.17 \text{ y } 2.18)$$

El esfuerzo del viento está dado por τ , ρ es la densidad del agua (1023 kg/m^3 para este caso), f es el parámetro de Coriolis para el cual se utilizó una latitud de 21.5° N y $A_z = 0.0345 \text{ m}^2/\text{s}$ es la viscosidad del agua (Pond y Pickard, 1998).

A partir de los datos del esfuerzo del viento, se calculó la profundidad de la Capa de Ekman (Ecuación 2.18). Se calcularon también, las componentes u_E y v_E (Ecuaciones 2.15 y 2.16) de los vectores de movimiento producidos por el esfuerzo del viento (vectores de Ekman), cada 5 m desde los 25 hasta los 75 m, ya que fue el mismo intervalo utilizado para los datos de corriente a 50 m. El promedio de los vectores de Ekman representa el vector de movimiento a 50 m de profundidad, generado por el forzamiento local del viento en la zona, lo anterior con base en la teoría de Ekman. Finalmente, el vector de Ekman promedio fue comparado con las anomalías de la velocidad de la corriente.

Existen observaciones que indican que la Teoría de Ekman es básicamente correcta y ha sido esencialmente aceptada (Pickard y Emery, 1996); sin embargo, no se ha observado la circulación de la Espiral de Ekman en forma estricta en el océano. Para que la espiral ocurra como fue descrita con anterioridad, debe suponerse un océano homogéneo, sin fronteras, infinitamente profundo, con viscosidad y parámetro de Coriolis constante, así como un viento estable soplando por un periodo de tiempo largo. La variación de los factores mencionados (lo cual evidentemente ocurre en el océano) afecta a la magnitud y orientación de las capas que forman la espiral, así como la profundidad del flujo de Ekman.

III. RESULTADOS.

III.1. DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE EN EL CANAL DE YUCATÁN.

Con el fin de facilitar la descripción de la Corriente de Yucatán, la zona del canal se dividió en siete zonas de interés (Figura 2).

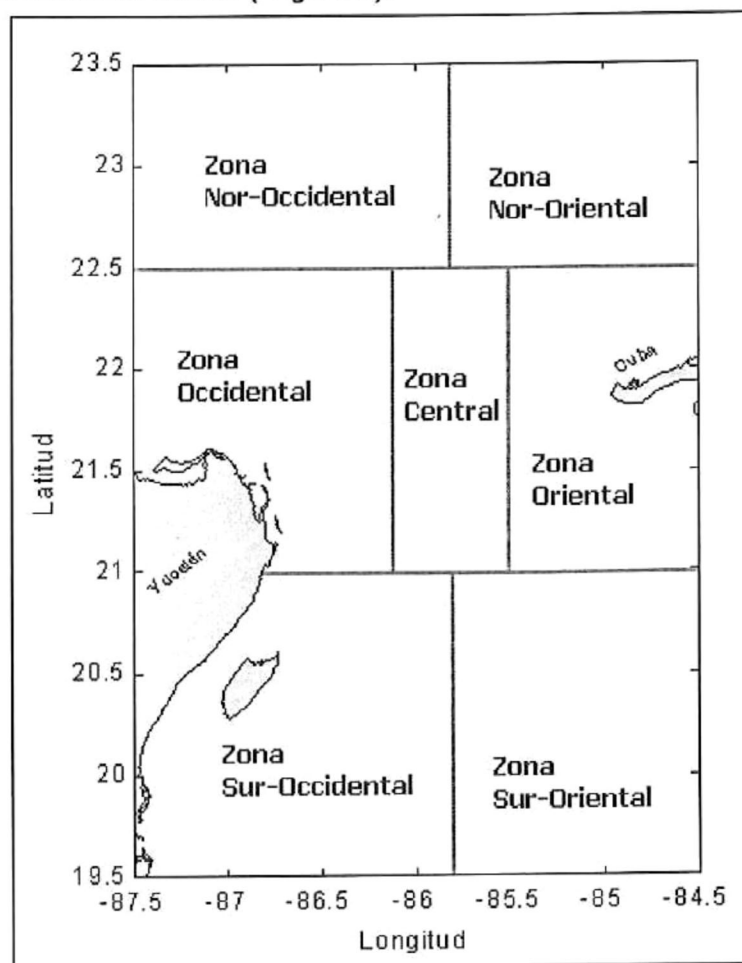


Figura 2. División del Canal de Yucatán por zonas.

En la Figura 3, se observa la velocidad y dirección de la Corriente de Yucatán a una profundidad de 100 m, para Canek 0, el cual se realizó durante el mes de diciembre de 1996. En el Canal de Yucatán se observa una corriente con velocidad y orientación promedio de 0.55 m/s y 83° respectivamente (los ángulos reportados son trigonométricos, tomando el Este como 0°).

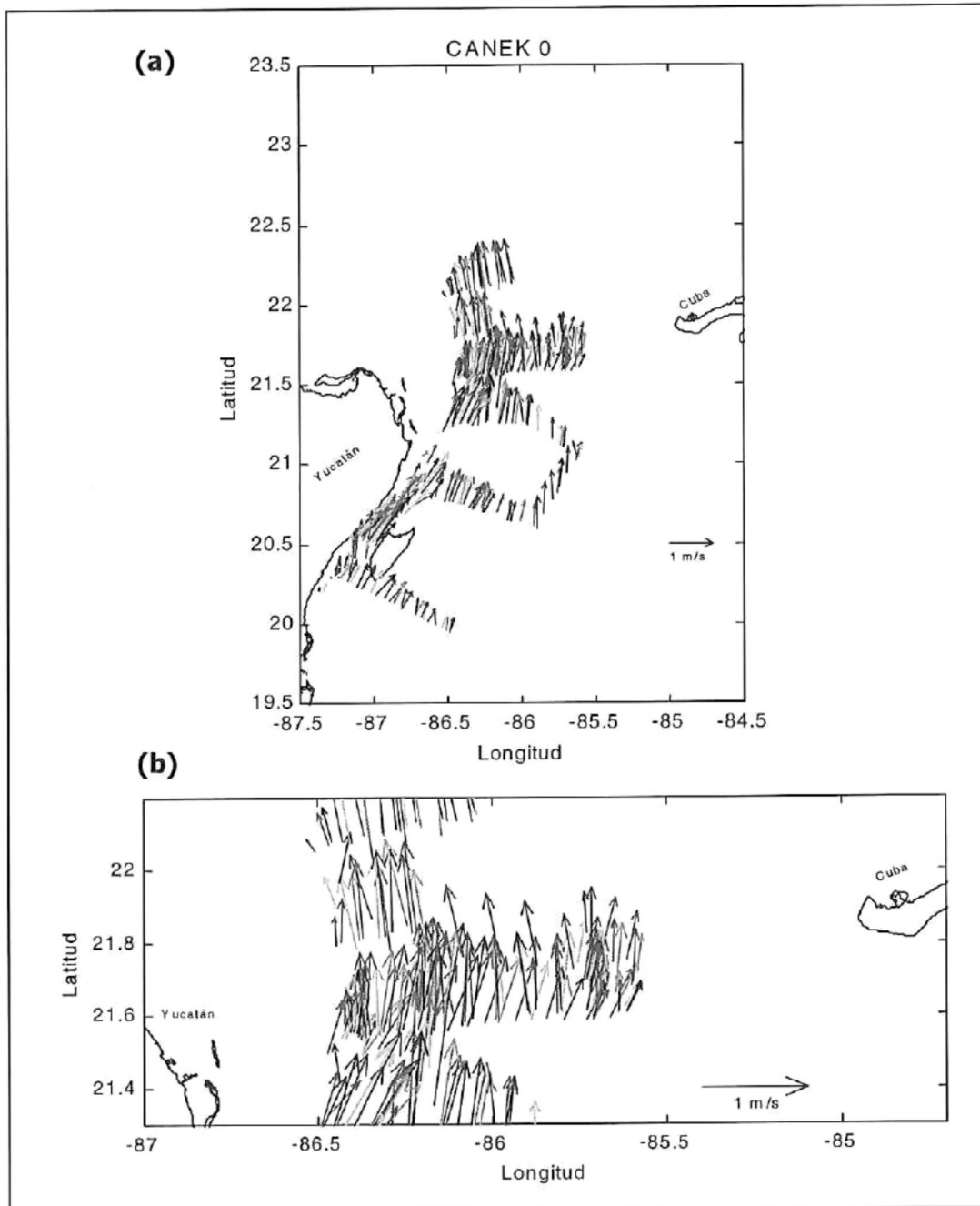


Figura 3. Corriente de Yucatán a 100 m de profundidad, durante el periodo del 7 al 18 de diciembre de 1996. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.

De manera particular, se presenta la corriente con dirección Noroeste y Noreste en puntos muy cercanos, en especial en el Canal de Yucatán y en el Canal de Cozumel, lo que indica una alta variabilidad en la dirección de la corriente, ya que estas mediciones corresponden a secciones efectuadas con sólo horas ó días de diferencia; en la zona Sur-Oriental se presenta la corriente con una dirección Norte, a diferencia de la zona Sur-Occidental, donde se encuentra la Isla Cozumel, y la dirección predominante es hacia el Noreste, con poca variabilidad.

En general, el patrón de orientación de la corriente es el mismo a diferentes profundidades (50-300 m); entre los 100 y 300 m la corriente presenta una dirección Noroeste y Noreste en la zona del canal, lo que es señal de variabilidad; sin embargo ésta disminuye conforme se incrementa la profundidad. La disminución en la rapidez de las corrientes por debajo de los 50 m es notoria, en especial a partir de los 150 m; por otra parte, la corriente en la zona Occidental del canal (86.2° W) presenta los valores máximos de velocidad (1.05 m/s), los cuales disminuyen hacia el centro del canal; esto se observa en toda la columna de agua superficial, sin embargo la velocidad de la corriente disminuye en proporción a la profundidad.

El promedio de la velocidad de la corriente para todos los datos de Canek 0 a 50 metros de profundidad es de 0.75 m/s, con dirección Noreste (ángulo promedio de 75°). La corriente al Sur del Canal de Yucatán (por debajo de los 21.78° N) a esta misma profundidad, presenta una dirección Noreste, mientras que al Norte de dicho canal la orientación de la corriente tiende a ser Nor-Noroeste. Se observa también solamente a 50 m de profundidad, una pequeña corriente con dirección Sureste, representada por tres vectores de aproximadamente 1.16 m/s, muy cercanos a la costa de Yucatán.

Canek 1 fue realizado abarcando los meses de mayo y junio, es decir a finales de Primavera de 1997 (Figura 4). Durante este periodo predomina el flujo hacia el Noroeste, presentándose en ocasiones entre los 86.5° W y los 85.78° W un flujo hacia el Norte y Noreste en la zona Occidental, lo que indica variabilidad de la corriente, con una velocidad promedio de 0.64 m/s y una dirección promedio de 120.20° .

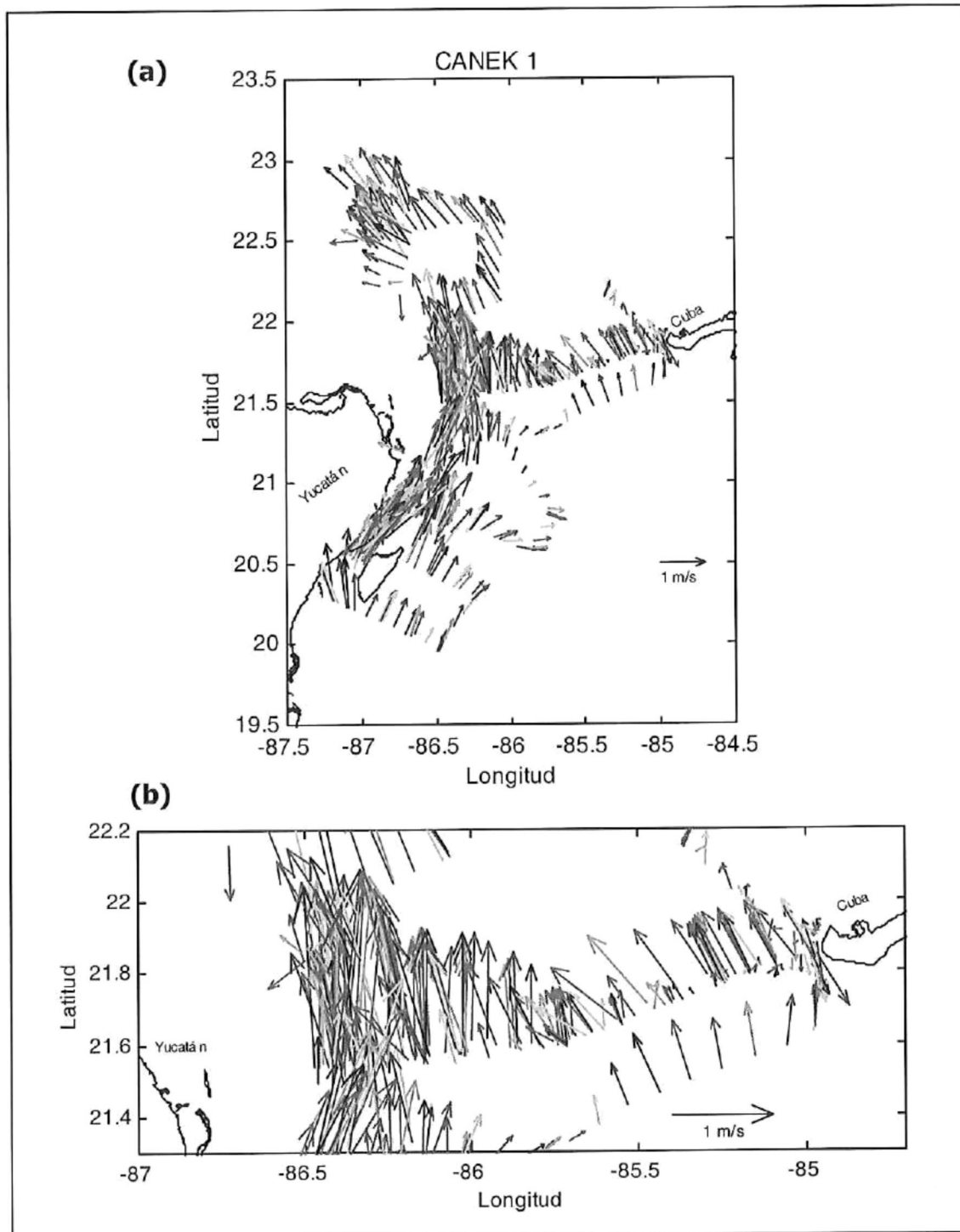


Figura 4. Corriente de Yucatán a 50 m de profundidad, durante el periodo del 24 de mayo al 12 de junio de 1997. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.

Nuevamente, al igual que en Canek 0 la corriente de máxima velocidad se observa en la zona Occidental y llega hasta 1.82 m/s, posteriormente disminuye en el centro del canal, y aumenta nuevamente en la zona Oriental, donde su dirección es aún más inclinada hacia el Noroeste.

En una zona muy cercana a las costas de Cuba (a los 85° W) se observa una pequeña y angosta contracorriente, con velocidad promedio de aproximadamente 0.26 m/s; en la misma zona donde se observa dicha contracorriente, es posible observar también una corriente hacia el Noroeste, la cual se debe a mediciones realizadas en diferentes fechas, sin embargo éstas serían con días de diferencia.

En la zona Sur-Occidental del Canal de Yucatán la corriente presenta dirección Noreste con intensidad similar a la del canal, pero con dirección constante, a excepción del Canal de Cozumel en el que persiste la orientación, pero se observa variabilidad en la orientación; en la zona Sur-Oriental, se observa una corriente de 0.36 m/s con dirección hacia el Este, la cual permanece desde los 50 m hasta los 450 m. Mientras tanto en la zona Nor-Occidental, la velocidad promedio de la corriente disminuye un poco (de 0.92 a 0.77 m/s) y la orientación es totalmente hacia el Noroeste.

En general se observa el mismo patrón en la orientación de la corriente en las diferentes profundidades, sin embargo la intensidad disminuye de forma paulatina conforme aumenta la profundidad; dicha disminución es más abrupta de los 150 a los 250 m. La contracorriente detectada disminuye de igual forma su intensidad, sin embargo a los 350 y 450 m, ésta prácticamente desaparece.

Durante el periodo comprendido entre el 29 de marzo y el 6 de abril de 1998, a principios de Primavera, se realizó Canek 2 (Figura 5). En este crucero se puede observar nuevamente el patrón mencionado para Canek 0 y 1, el cual consiste en la velocidad máxima de la corriente hacia las costas de Yucatán y Cuba, con una mayor intensidad del lado de Yucatán, y una menor rapidez de la corriente hacia el centro del canal. La corriente en promedio en todo el canal es de 0.64 m/s, con un máximo de 1.74 m/s y un mínimo de 0.03 m/s.

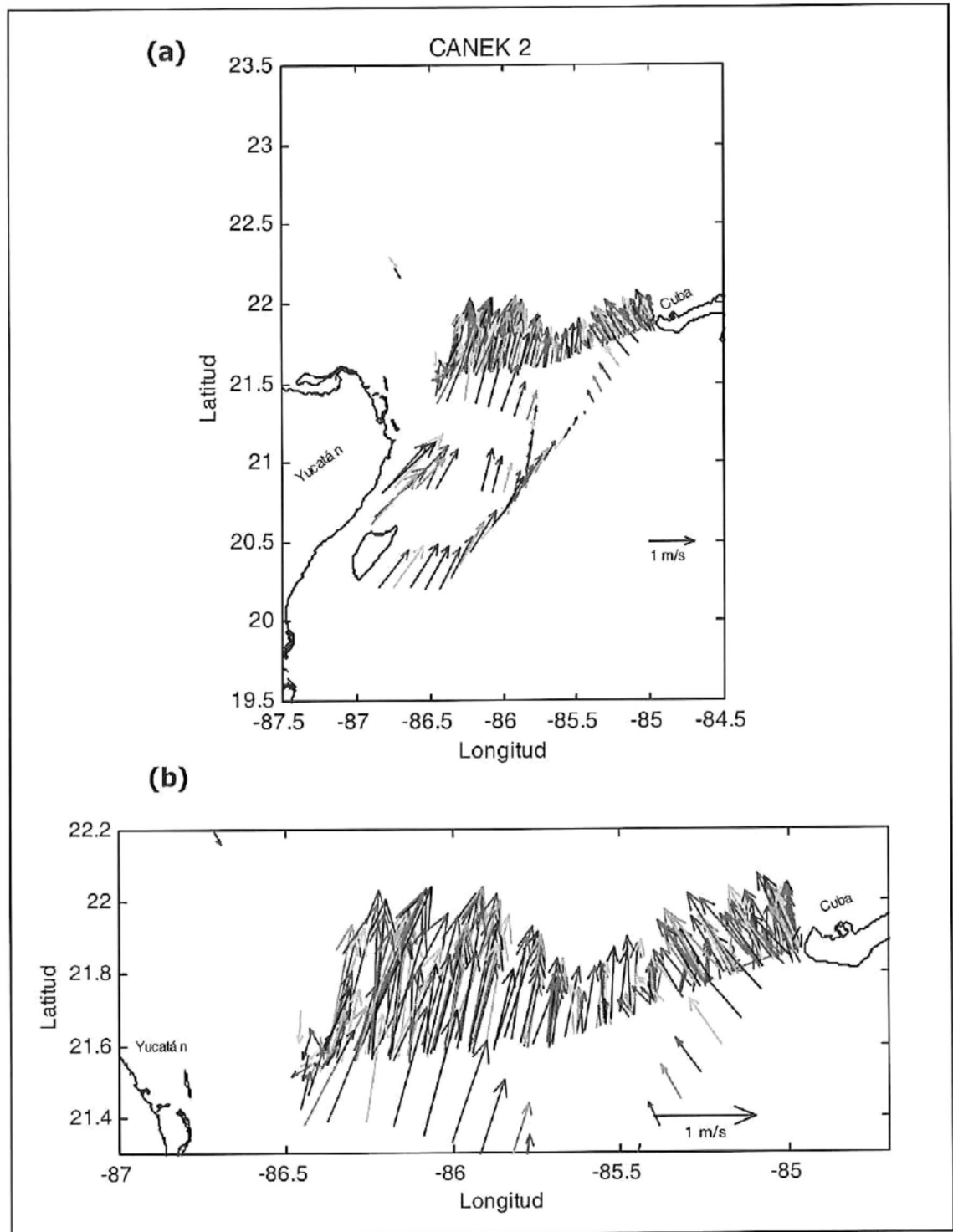


Figura 5. Corriente de Yucatán a 50 m de profundidad, durante el periodo del 29 de marzo y el 6 de abril de 1998. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.

La dirección predominante es hacia el Noreste, abarcando la parte Occidental y central del canal, mientras que en la zona Oriental entre la costa de Cuba y los 85.5° W la corriente presenta orientación Noroeste y una velocidad promedio de 0.45 m/s. La variabilidad en la zona del canal es casi nula y se presenta con respecto a la magnitud de la corriente en las zonas cercanas a las costas tanto de Yucatán como de Cuba. Por otro lado, al Sur del canal se puede observar el patrón mencionado en la orientación de la corriente.

Se observan direcciones muy similares entre una profundidad y otra, mientras que la magnitud disminuye paulatinamente conforme aumenta la profundidad. En la sección vertical de los 50 a los 250 m no se presenta contracorriente en el lado cubano; sin embargo a los 350 m, muy cercana a la costa de Cuba se presenta una contracorriente de pequeña magnitud (0.37 m/s máxima), la cual presenta variaciones en su dirección, y la intensidad de la misma es de 0.32 m/s a los 450 m de profundidad. Cabe destacar la gran variación en la dirección de los vectores en esta zona.

Canek 3 comprende el periodo de Invierno de 1999 (Figura 6). La corriente durante este crucero presentó una orientación predominante hacia el Norte con un ángulo promedio de 86° en la parte Occidental del canal. Se observa una mayor intensidad en la corriente en el lado Oeste del canal, la cual disminuye hacia el centro del mismo hasta los 85.5° W (donde es mínima) y probablemente se presente un giro ya que a esta longitud varía su dirección con un ángulo hacia el Este. Posteriormente en la parte cercana a las costas de Cuba, entre los 85.32° W y los 84.93° W, se observa una contracorriente más ancha e intensa en comparación con el resto de los cruceros, con velocidad promedio de 0.31 m/s y un máximo de 0.59 m/s y con dirección Sureste.

Al Sur de la Península de Yucatán la corriente presenta orientación Noreste, así como un poco de variabilidad al Norte del Canal de Cozumel y en la zona cercana a las costas de Yucatán. Tanto la corriente de Yucatán, como la contracorriente cubana no presentan variaciones sustanciales en la orientación a lo largo de la columna de agua, sin embargo su velocidad disminuye en relación directa con la profundidad.

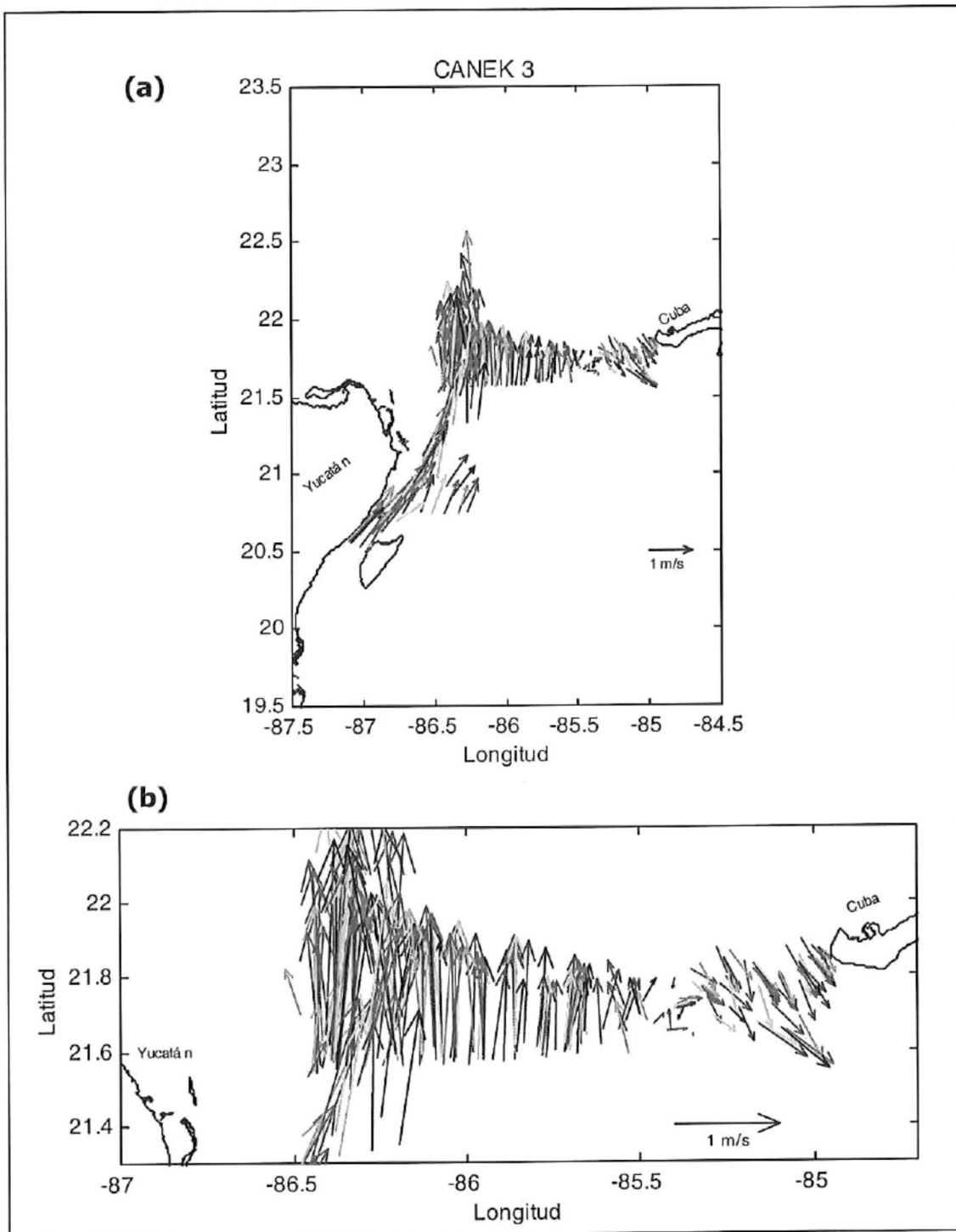


Figura 6. Corriente de Yucatán a 50 m de profundidad, durante el periodo del 27 de enero y el 6 de febrero de 1999. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.

Los datos que corresponden a Canek 4 fueron medidos en Verano de 1999 y se presentan en la Figura 7; en ella se observa la corriente con una dirección predominante hacia el Nor-Noreste tanto en la zona Sur-Occidental, como en la parte Central y Occidental del canal. En la zona Nor-Occidental la corriente cambia su dirección hacia el Noroeste. Se observa la corriente más intensa en el lado Oeste del canal, dicha rapidez disminuye hacia el centro del mismo hasta los 85.3° W. La mayor variabilidad (vectores con diferentes direcciones en un periodo de tiempo de días) con respecto a la rapidez se observa en la zona Occidental y en la parte Sur del canal en relación con la orientación, así como al Norte y Sur del Canal de Cozumel.

Alrededor de los 85.3° W se observa un posible giro anticiclónico, ya que la corriente gira hacia el Este, con velocidades entre los 0.15 y 0.52 m/s, para posteriormente formar una contracorriente en las costas de Cuba, la cual es mas angosta que la observada en Canek 3, pero con una magnitud promedio de 0.42 m/s y máxima de 1.00 m/s. En el caso particular de este crucero, se tomaron datos al Norte de Cuba, en estas mediciones la contracorriente viene desde el Norte de Cuba a los 83.9° W, viaja junto a las costas cubanas y se intensifica con magnitud de hasta 1.24 m/s entre los 84° W y 85° W; en esta última longitud disminuye fuertemente en magnitud y gira hacia el Sur para pasar a través del Canal de Yucatán con dirección Sureste.

A lo largo de la columna de agua, la orientación de la corriente es similar a todas las profundidades y la rapidez disminuye de forma proporcional con la profundidad. La contracorriente observada en las costas cubanas presenta el mismo ancho y dirección en toda la columna de agua analizada.

Durante Canek 5, realizado en Verano del año 2000 (Figura 8), la corriente muestra una dirección predominante hacia el Noreste tanto en el canal como al Sur de éste y presenta una mayor velocidad del lado de Yucatán; al Norte del canal la dirección varía hacia el Noroeste, y entre los 22.4° N y los 22.8° N en la zona Nor-Occidental (87.12° W), se muestra parte de un posible giro ciclónico que se une al resto de la corriente hacia el Noroeste.

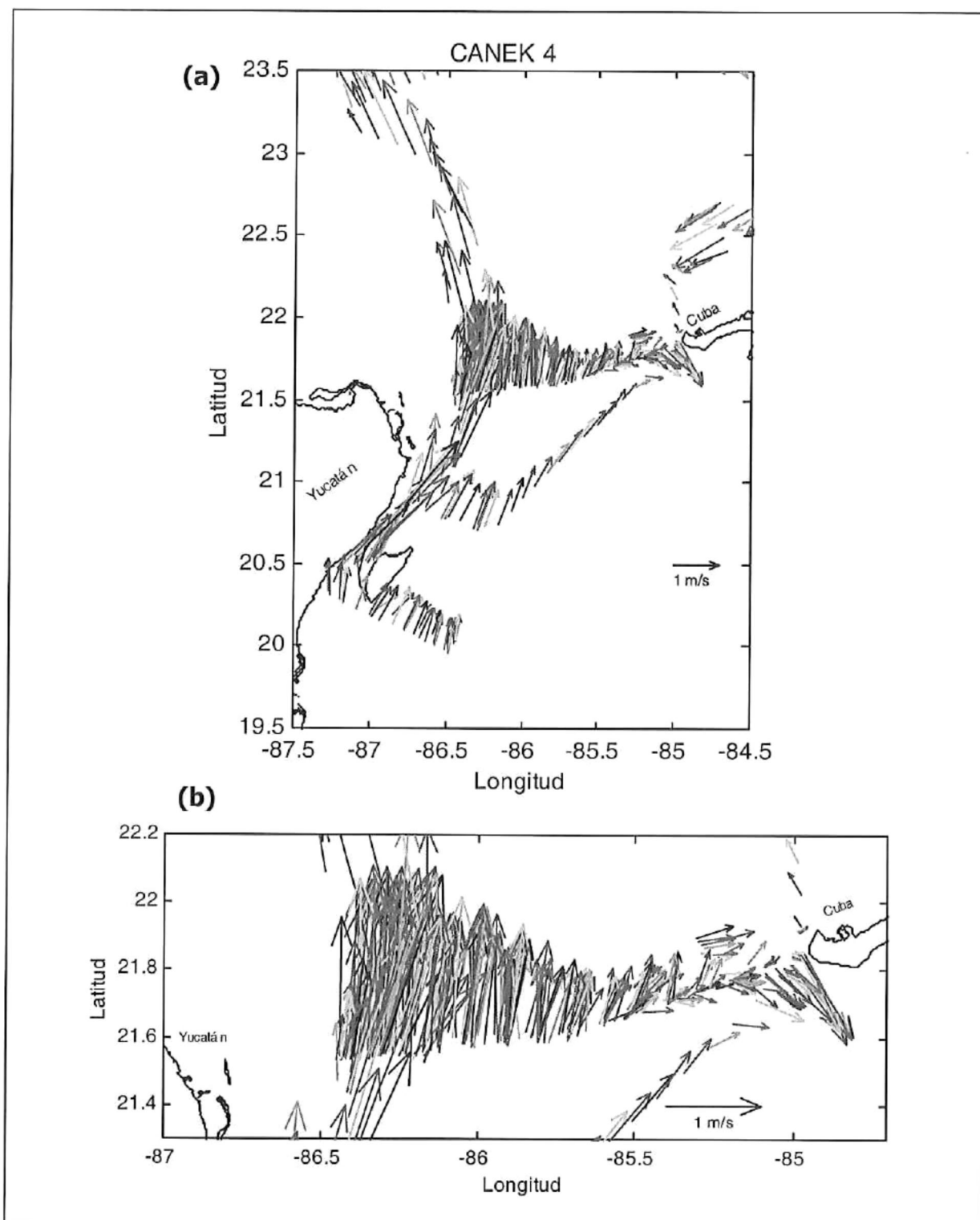


Figura 7. Corriente de Yucatán a los 50 m de profundidad, observada durante el periodo del 25 de agosto al 14 de septiembre de 1999. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán

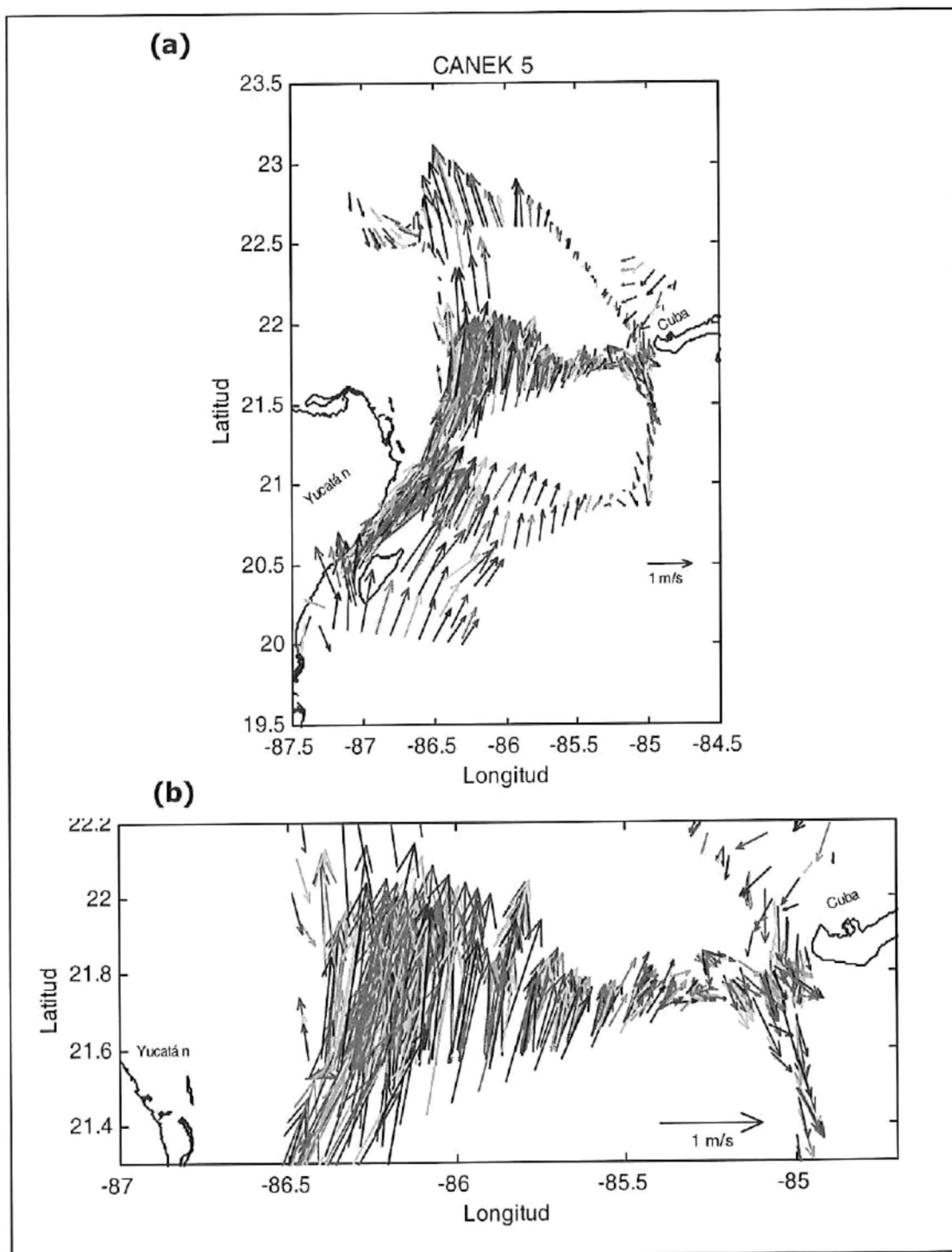


Figura 8. Corriente de Yucatan a 50 m, durante el periodo del 16 de junio al 10 de julio del año 2000. (a) Zona del Canal de Yucatán, (b) Acercamiento del Canal de Yucatán.

En la parte Occidental de canal se observan altas velocidades de la corriente (de hasta 1.89 m/s), con un promedio de 1.06 m/s, al igual que diferentes orientaciones en la misma zona con solo días de diferencia, al igual que en la parte Sur-Occidental y en el Canal de Cozumel. Por otro lado, al Norte del canal se observa una orientación persistente, pero con alta variabilidad con respecto a la intensidad de la corriente. En la vertical, la dirección de los vectores en el Canal de Yucatán cambia un poco, ya que hacia los 150 m el ángulo de orientación de la corriente aumenta, es decir se observa una dirección más hacia el Norte; mientras tanto a los 250 m se encuentra predominantemente en dirección Norte y continua en esta dirección hasta los 350 y 450 m. En general, en el resto de la zonas, la corriente mantiene su curso a lo largo de la columna de agua.

Del lado cubano, se observa nuevamente la contracorriente con dirección Suroeste al Norte de Cuba, baja por el extremo Oeste de la isla y continua hacia el Sur, presentando variabilidad y predominando la dirección Sur-Sureste con velocidades desde 0.06 hasta 0.60 m/s. La presencia de dicha contracorriente se mantiene en toda la columna de agua, sin embargo, su velocidad disminuye conforme aumenta la profundidad el flujo.

III.2. VARIACIONES ESTACIONALES.

Con base en la época de año en la que se realizaron los cruceros, se tiene que Canek 0 se realizó durante el Otoño, en Invierno se efectuó Canek 3, mientras que en Primavera se llevaron a cabo Canek 1 y Canek 2 y finalmente Canek 4 y 5 se realizaron durante el Verano.

Con respecto a la dirección de la corriente, se puede observar que para Canek 0 (tomando en cuenta que se tienen pocos datos promediados), la corriente en la zona Occidental del Canal de Yucatán presenta una orientación Nor-noreste y Noreste en el centro del canal (Figura 9). Esto coincide con lo observado durante Canek 2, sin embargo en la zona Oriental (a partir de los 85.6° W), una gran parte de la corriente cambia su dirección hacia el Noroeste, aunque en uno de los cruces (con tan solo horas de diferencia) se detectó una dirección Norte (Figura 10); no se puede saber si este cambio en la dirección se presenta también en Canek 0, ya que en esta parte del canal, no se cuenta con datos para este crucero.

La fecha en la que se realizó Canek 1 es un mes después que Canek 2 pero ambos se encuentran en la misma época del año; durante Canek 1 predominó la dirección Noroeste (Figura 11), principalmente en la parte aledaña a las costas de Yucatán y a la zona oriental del canal, así como al Sur y al Norte del mismo, con una orientación promedio entre los 105° y 111° ; sin embargo, la corriente en la zona Occidental del canal presenta dirección Norte, mientras que también se observan vectores de pequeña magnitud (alrededor de 0.2 m/s) con dirección Noreste que van de la parte Occidental al centro del canal. Este patrón difiere con lo observado para Canek 2 (Figura 10) y representa una gran variabilidad en la corriente durante estas fechas, incluso mayor a la observada en Canek 0 y 2. En la parte Oriental del canal en Canek 1 y 2, la corriente con dirección Noroeste coincide con un ángulo promedio aproximado entre 116° y 121° para ambos cruceros; mientras tanto en Canek 1 se puede observar la contracorriente cubana muy angosta detectada solamente en uno de

los cruces y con magnitud promedio de 0.28 m/s, a diferencia de Canek 2, en el cual no se observa.

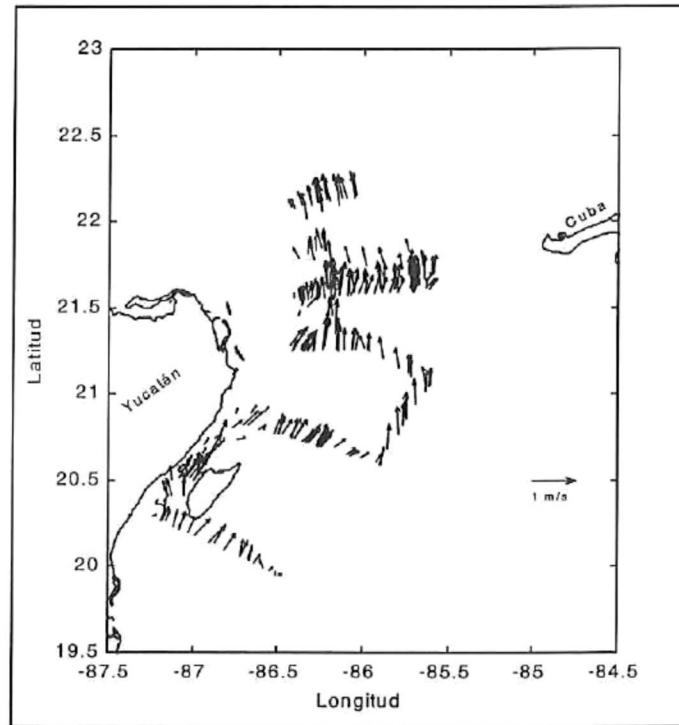


Figura 9. Corriente promedio de los 100 a los 300 m de profundidad para Canek 0, realizado durante Otoño de 1996.

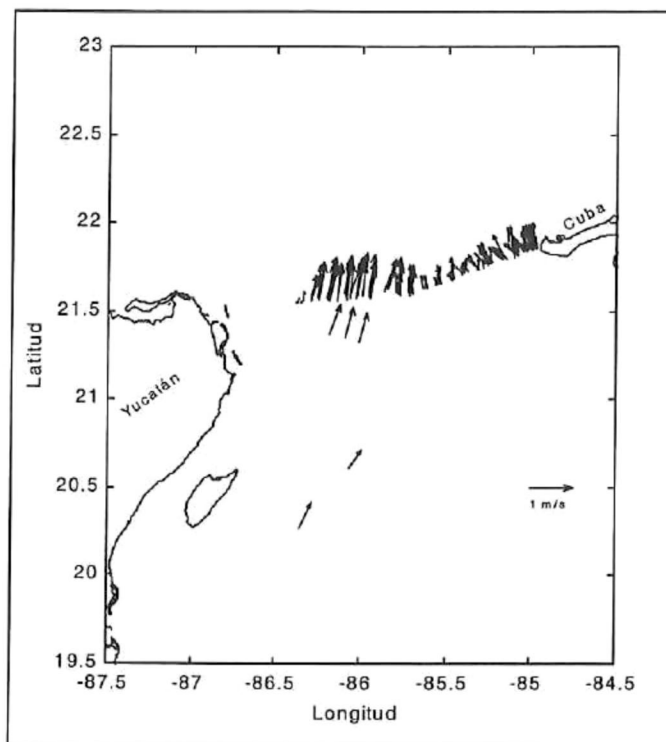


Figura 10. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 2 realizado durante principios de Primavera de 1998.

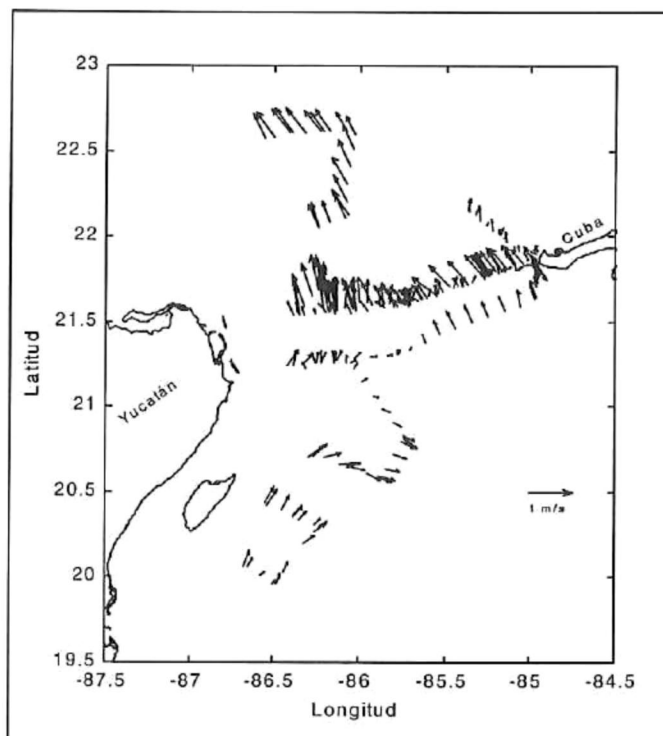


Figura 11. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 1 realizado durante finales Primavera de 1997.

Canek 3 fue realizado durante Invierno, periodo intermedio entre Otoño y Primavera, cuando se realizaron Canek 0 y Canek 2 respectivamente; no obstante la corriente no muestra la dirección Noreste observada en los otros dos cruceros mencionados; en Canek 3 la corriente presenta una dirección Norte en la zona Occidental del canal y la dirección promedio de la corriente en esta zona es de 87° con una velocidad promedio de 0.71 m/s (Figura 12).

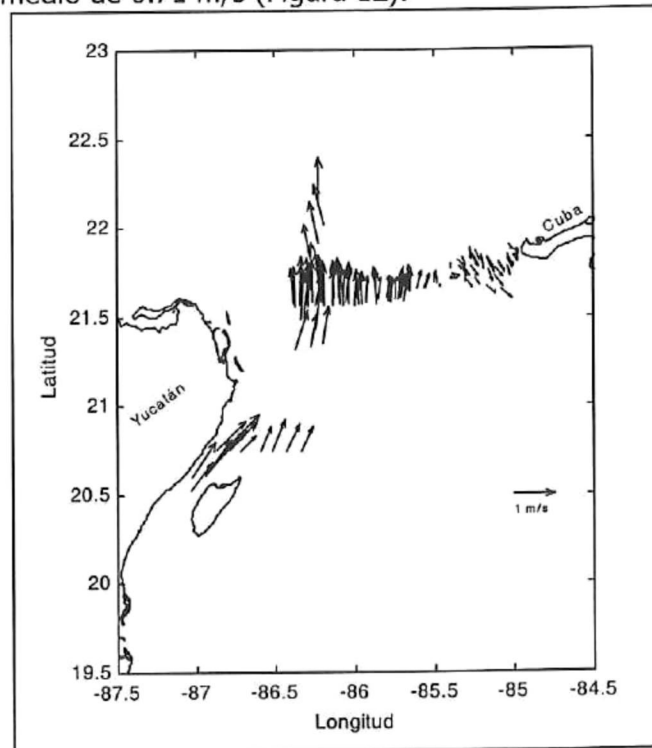


Figura 12. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 3 realizado durante Invierno de 1999.

Canek 4 y 5 se realizaron durante el Verano, en ambos cruceros la dirección predominante fue hacia el Nor-Noreste. Se observa que para Canek 4 la orientación es principalmente hacia el Norte y para Canek 5 el ángulo varía un poco hacia el Noreste; la corriente muestra variabilidad en la parte Occidental del canal, principalmente en la velocidad de la corriente, donde en general es más intensa; la mayoría de los vectores en ambos cruceros presentan dirección de Nor-noreste a Norte, con máximos de hasta 0.92 m/s para Canek 4 y 1.11 m/s para Canek 5, así como una velocidad promedio de 0.54 y 0.65 m/s respectivamente (Figuras 13 y 14).

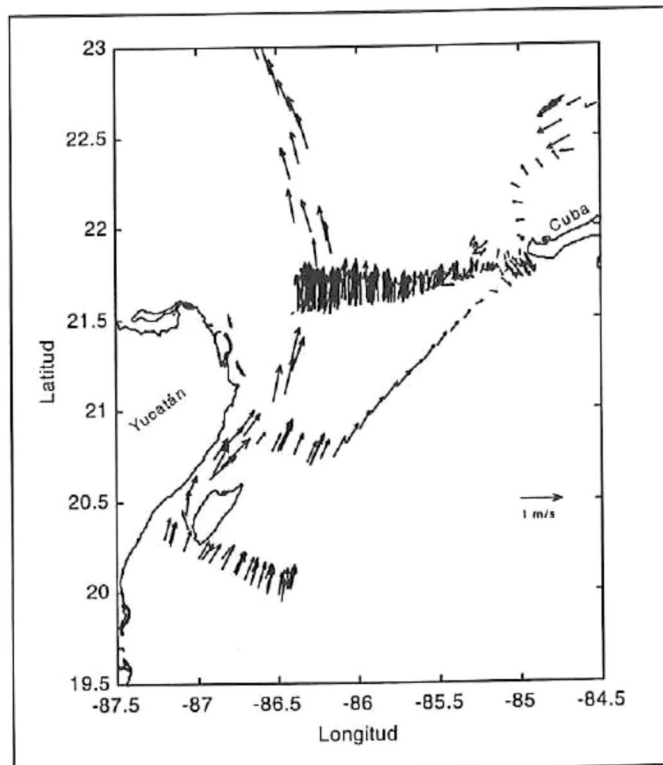


Figura 13. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 4 (Verano).

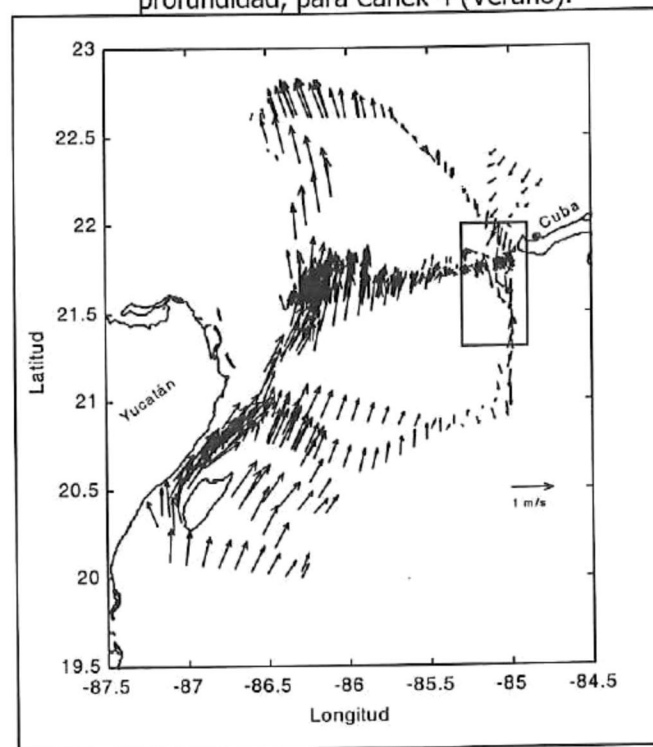


Figura 14. Corriente promedio de los 50 a los 300 m de profundidad, para Canek 5 (Verano). La contracorriente se encuentra indicada por el recuadro.

Del lado Oriental del canal, para Canek 4 y 5 se puede observar la contracorriente cubana; por otra parte en Canek 4 se presenta de forma definida y poco variable, sin embargo se pueden detectar algunos vectores de pequeña magnitud hacia el Noroeste. La dirección promedio en esta zona es de 213° , y la contracorriente se observa con una dirección Sureste, mientras que durante Canek 5 presentó una alta variabilidad con direcciones Sureste y Suroeste en puntos muy cercanos, y un ángulo promedio de 271.18° . La velocidad promedio exclusivamente de la contracorriente en ambos cruceros es de 0.18 m/s. Por otro lado, cabe mencionar que en la zona Oriental (a los 85.7° W) se observa una transición entre la corriente y la contracorriente donde la velocidad disminuye y presenta alta variabilidad, ya que se observan direcciones tanto hacia el Norte, como hacia el Este y Sureste en puntos muy cercanos.

Con base en los promedios de toda la columna de agua (de 50 a 300 m), en el lado Occidental del Canal de Yucatán, para los cruceros que presentan la contracorriente, y para todo el canal en los cruceros que no la presentan, se obtuvieron los siguientes valores de velocidad promedio y orientación de la corriente, en la zona exclusiva del Canal de Yucatán, entre los 21° N y 22° N y entre los 85° W y 87° W (Tabla II).

Tabla II. Velocidad y orientación promedio de la corriente, con flujo hacia el interior del Golfo de México en el Canal de Yucatán.

Época del año	Crucero	Velocidad Promedio m/s	Dirección promedio
Invierno	Canek 3	0.67 ± 0.23	$85.5^\circ \pm 7.9^\circ$
Primavera	Canek 2	0.47 ± 0.22	$100.5^\circ \pm 29.9^\circ$
	Canek 1	0.40 ± 0.22	$106.7^\circ \pm 40.5^\circ$
Verano	Canek 5	0.57 ± 0.30	$79.9^\circ \pm 19.9^\circ$
	Canek 4	0.49 ± 0.24	$82.5^\circ \pm 25.6^\circ$
Otoño	Canek 0	0.42 ± 0.14	$83.1^\circ \pm 16.2^\circ$

Para los cruceros que presentan la contracorriente (la cual se encuentra en el extremo Oriental del canal) se obtuvieron los siguientes datos desde los 21° N hasta los 22° N (Tabla III). El área en la que se promedió la corriente con respecto a la longitud, se eligió utilizando como criterio desde los 85° W hasta la zona de variabilidad en la que gira la corriente hacia el Norte.

Tabla III. Velocidad y orientación promedio de la corriente de Yucatán en la zona Oriental del canal.

Época del año	Crucero	Velocidad Promedio m/s	Dirección promedio
Invierno	CANEK 3	0.20 ± 0.09	$296.6^\circ \pm 21.9^\circ$
Primavera	CANEK 2	----	----
	CANEK 1	----	----
Verano	CANEK 5	0.18 ± 0.09	$261.5^\circ \pm 52.5^\circ$
	CANEK 4	0.16 ± 0.11	$185.1^\circ \pm 62.9^\circ$
Otoño	CANEK 0	----	----

Como se puede observar en las tablas anteriores, en Invierno (Canek 3) la corriente presenta una velocidad promedio mayor a la observada en las otras épocas del año, cuya orientación promedio es prácticamente hacia el Norte; por otro lado, en este mismo crucero, la contracorriente cubana se presenta bien definida, con una velocidad promedio ligeramente mayor (0.01-0.04 m/s) a la observada en Canek 4 y 5. Durante estos últimos cruceros (ambos en Verano), también se presentó la corriente con velocidades altas, aunque menores a las observadas para Canek 3, y como ya se mencionó, se observó la contracorriente cubana, con valores muy similares (aunque menores a Canek 3) y con una orientación diferente, ya que durante el Invierno, la orientación fue hacia el Sureste, mientras que para Canek 5 (a principios de Verano) la orientación predominante fue prácticamente hacia el Sur. Finalmente en Canek 4 (a finales de Verano), además de presentar menor velocidad en dicha contracorriente, en la misma zona se detectó corriente de muy baja intensidad hacia el Noroeste,

posiblemente correspondiente a uno de los cruces, por lo que el promedio indica un ángulo de 185.1° ; sin embargo en la gráfica (Figura 13) se observa que la dirección predominante de la contracorriente fue hacia el Sureste.

Es importante resaltar la alta variabilidad con respecto a la orientación en la contracorriente, observada a partir de las desviaciones estándar que van de $\pm 21.9^{\circ}$ para Canek 3, hasta los 62.9° para Canek 4.

Se puede observar que las menores velocidades registradas en el Canal de Yucatán fueron para Canek 0, 1 y 2, el primero realizado en Otoño y los dos últimos en Primavera; no obstante, a pesar de que las velocidades promedio son muy similares durante estas dos épocas del año, la corriente difiere en su orientación promedio general, ya que durante Primavera se observa una dirección Noroeste para Canek 1 y tanto al Noreste como al Noroeste para Canek 2. Mientras tanto para Canek 0 (Otoño) y Canek 4 y 5 (Verano) la orientación es hacia el Noreste. Por otro lado en Canek 2 no se observa la contracorriente cubana para los promedios de 50 a 300 metros, mientras que en Canek 1 se observa dicha contracorriente, aunque sólo en uno de los cruces, con una dirección Sureste y velocidad promedio de 0.41 m/s. Cabe mencionar que en Canek 1 se observa la mayor variabilidad de la corriente con respecto a la orientación ($\pm 40.5^{\circ}$), lo cual también se observa a simple vista en la Figura 11, dadas las diferentes orientaciones en puntos muy cercanos y con días de diferencia.

Con el fin de respaldar la información observada en las gráficas anteriores, las cuales muestran la velocidad de la corriente en las diferentes secciones del canal, se graficaron secciones verticales a partir de los cruces del barco a través del Canal de Yucatán, por lo que el número de secciones está en función del número de cruces realizados. Para Canek 0 no se cuenta con datos a lo ancho de todo el canal, por lo que sus secciones no son representativas de la totalidad del mismo; sin embargo para el resto de los cruceros se cuenta con una descripción de todo el canal.

En general, en las secciones para todos los cruceros es posible observar la intensidad de la Corriente de Yucatán en el extremo Oeste del canal, siendo menor para Canek 0, 1 y 2, realizados durante Otoño y Primavera. En ellos, la velocidad de la corriente disminuye presentando velocidades máximas de entre 0.6 y 0.9 m/s (Figuras 15-17), mientras que para Canek 3, 4 y 5, realizados durante el Verano e Invierno, se presentan velocidades mayores de hasta 1.4 m/s para algunos cruces (Figuras 18-20).

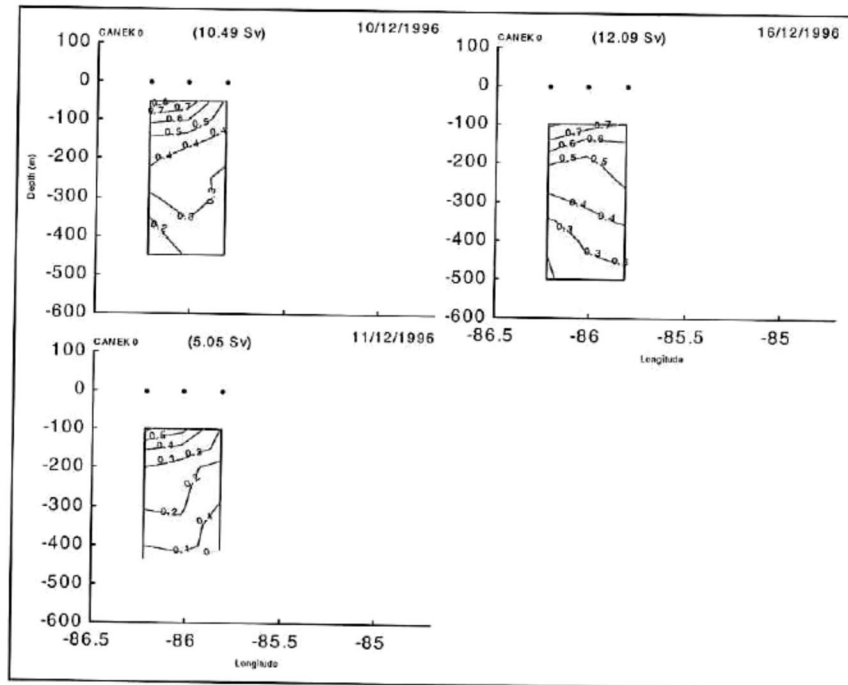


Figura 15. Sección de velocidad en el Canal de Yucatán de los 85.8°W a los 86.3°W correspondientes a Canek 0. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y en la parte superior se indica el transporte en Sv.

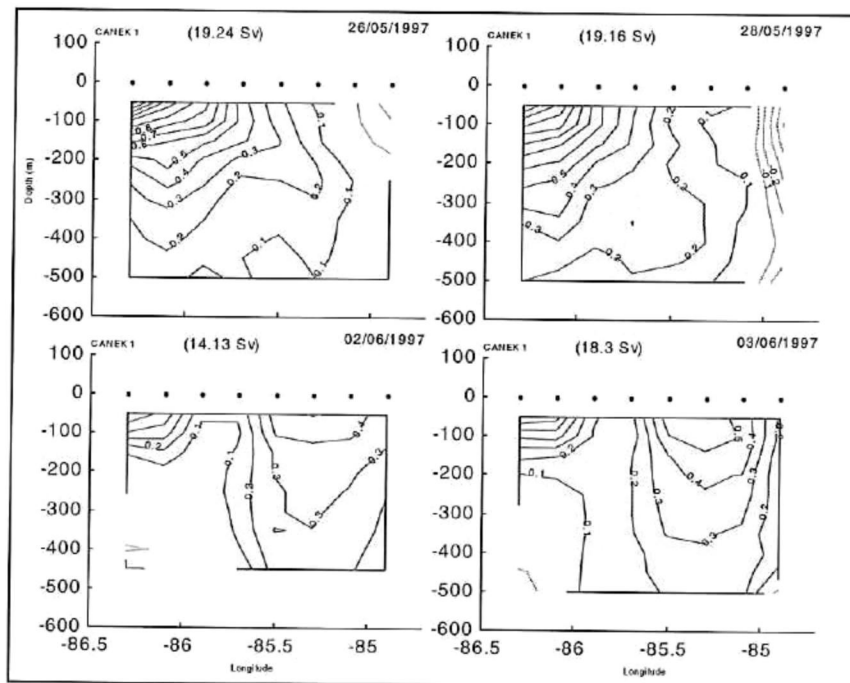


Figura 16. Secciones de velocidad en el Canal de Yucatán correspondientes a Canek 1. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.

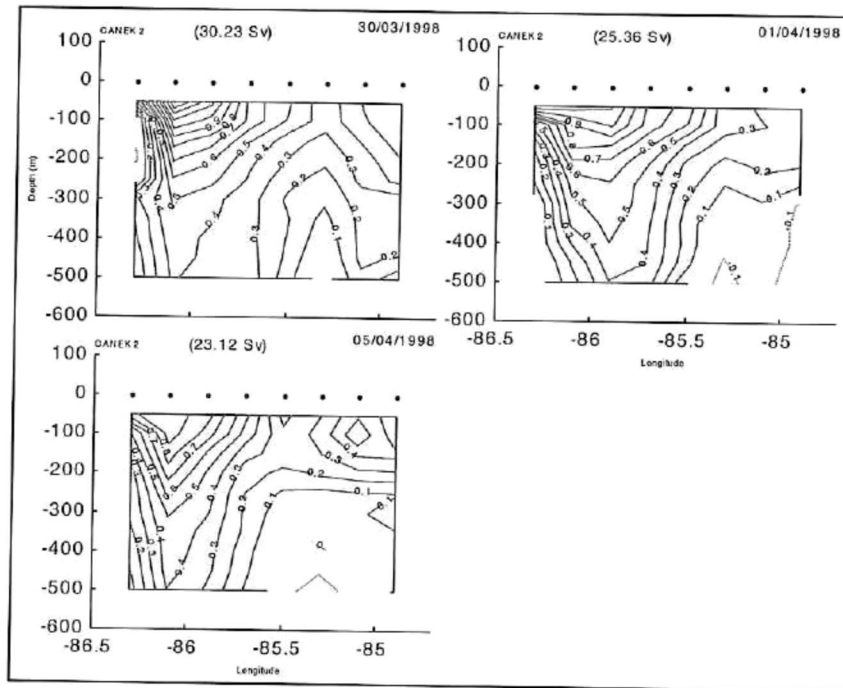


Figura 17. Secciones de velocidad en el Canal de Yucatán correspondientes a Canek 2. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.

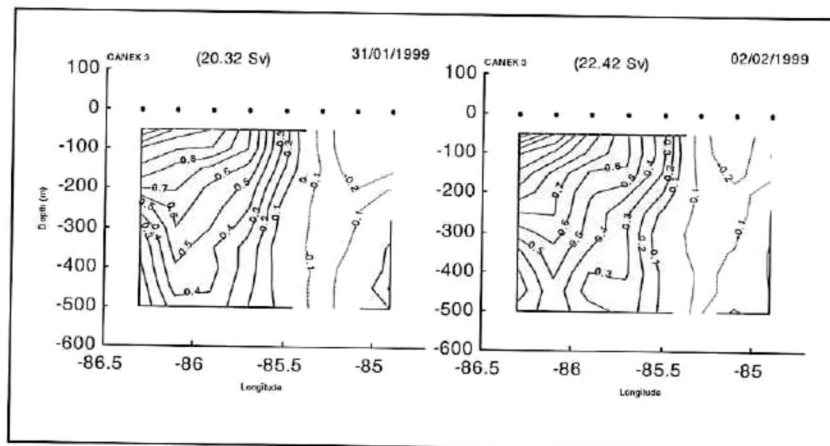


Figura 18. Secciones de velocidad en el Canal de Yucatán correspondientes a Canek 3. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.

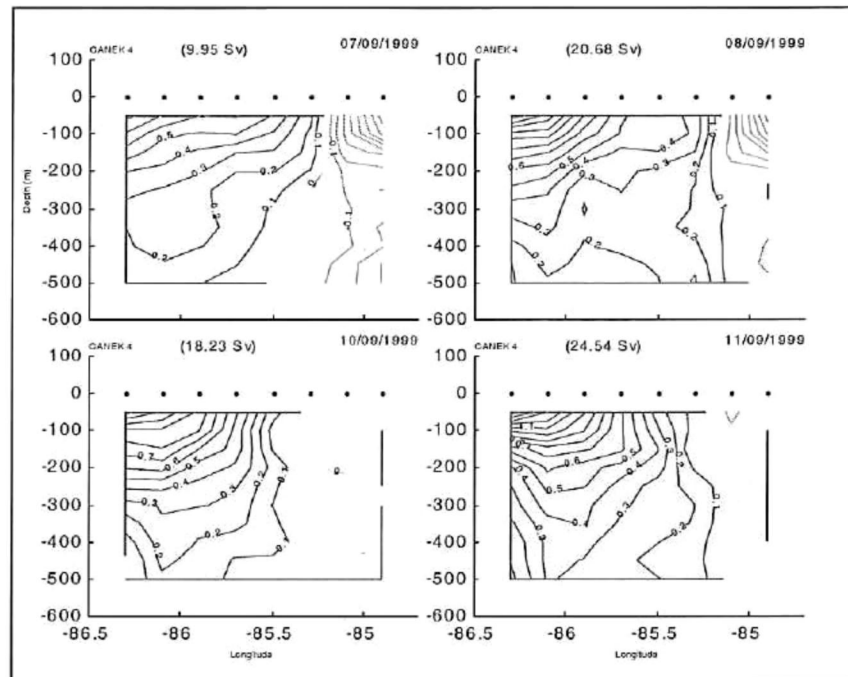


Figura 19. Secciones de velocidad en el Canal de Yucatán correspondientes a Canek 4. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.

Alrededor de los 85.5° W, se puede observar la velocidad mínima de la Corriente de Yucatán (0.1 m/s), sin embargo la longitud a la que se presenta este mínimo varía de un crucero a otro. Cuando no se detecta la contracorriente, el mínimo se encuentra en la zona central del canal, mientras que cuando se observa dicha contracorriente, generalmente el mínimo se encuentra en la zona Oriental. Para Canek 3 (Figura 18) y algunas secciones de Canek 5 (Figura 20), en los cuales se presenta de forma persistente la Contracorriente Cubana, el mínimo se observa prácticamente a los 85.5° W, mientras que en el resto de las secciones donde se detecta la contracorriente, el mínimo se encuentra al Este de esta longitud, es decir, dentro de la zona Oriental.

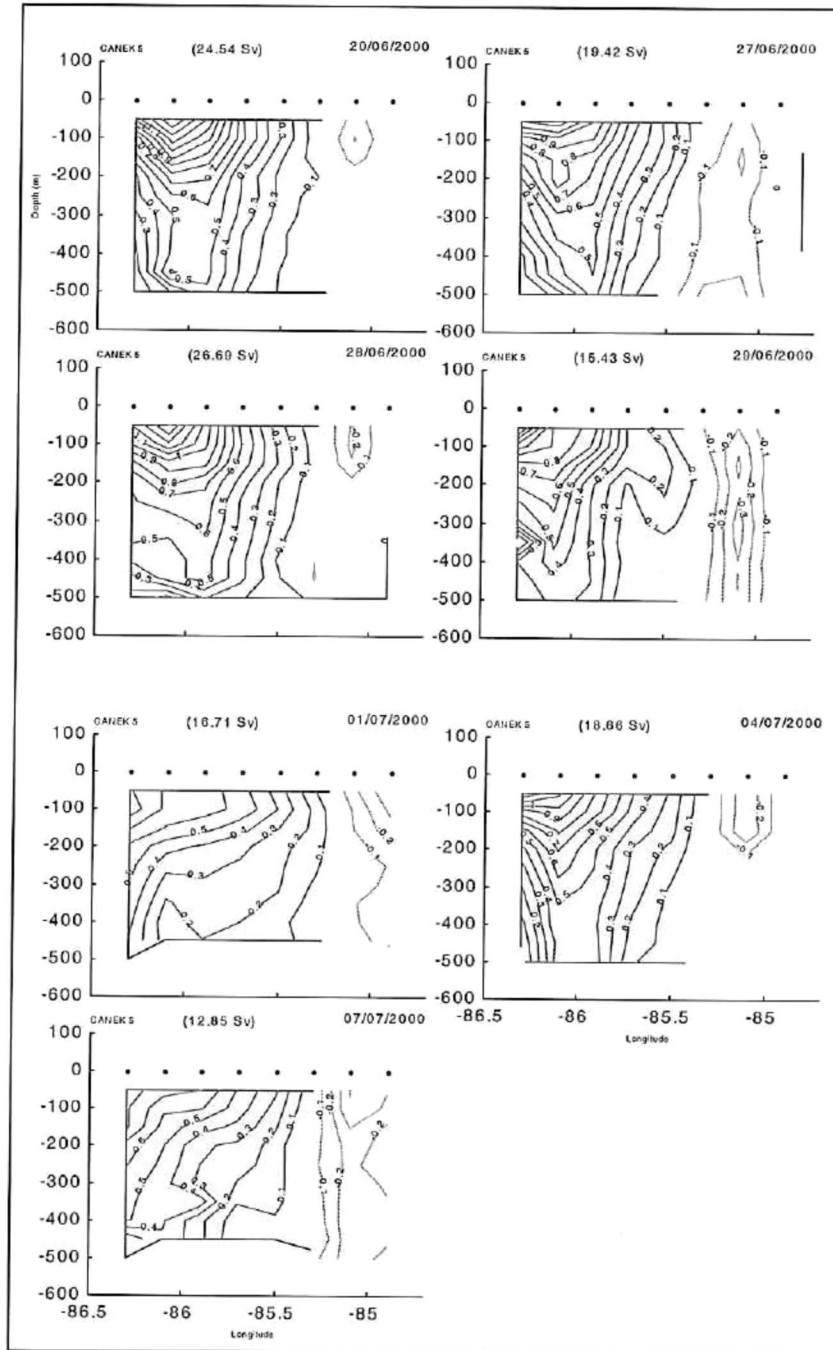


Figura 20. Secciones de velocidad en el Canal de Yucatán correspondientes a Canek 5. La zona sombreada indica la corriente hacia el interior del Golfo en m/s y la zona blanca la contracorriente. En la parte superior se indica el transporte en Sv.

En general, el mínimo en la velocidad de la corriente se observa entre los 85.2° W y los 85.6° W; lo anterior se relaciona con la batimetría del canal, dado que dentro de este intervalo se observa una elevación sobre el umbral del Canal de Yucatán (Apéndice A).

La contracorriente cubana se observa en la superficie de todas las secciones en Canek 3, 4 y 5; mientras tanto, para Canek 2 (Figura 17) se observa el 1º y el 5 de abril de 1998 entre los 400 y 600 metros de profundidad, y en Canek 1 (Figura 16) en toda la columna estudiada el 28 de mayo de 1997 y superficial (0-200 m) dos días antes. De los tres cruceros en los que se observa la contracorriente cubana, Canek 4 presenta mayor velocidad en la parte superficial, llegando hasta los 0.8 m/s y sólo en las secciones obtenidas al principio del crucero (días 7 y 8 de septiembre de 1999). Mientras tanto en Canek 3 la contracorriente se observa en toda la columna de agua estudiada, con una velocidad de 0.1 m/s en general, y en superficie 0.2 m/s. Finalmente, en algunas secciones de Canek 5 no se observa un máximo superficial de velocidad, ya que se presentan velocidades de 0.1 y 0.2 m/s desde superficie hasta 600 m de profundidad. La tabla IV muestra los valores calculados del volumen que pasa a través del Canal de Yucatán.

Tabla IV. Transporte de volumen a través del Canal de Yucatán en Sv ($1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) entre los 50 y 500 m de profundidad.

Época del año	Crucero	Transporte Promedio m^3/s
Invierno	Canek 3	21.37 ± 1.48
Primavera	Canek 2	26.24 ± 3.64
	Canek 1	17.71 ± 2.93
Verano	Canek 5	19.19 ± 3.73
	Canek 4	18.35 ± 5.62
Otoño	Canek 0	9.21 ± 3.69

Se encontró un intervalo muy amplio en el transporte calculado en la parte superficial (50-500 m) entre un cruce y otro del mismo crucero, ya que se calcularon transportes desde 9.95 Sv (mínimo) en Canek 4, hasta 30.23 Sv (máximo) en Canek 2. En la tabla IV el transporte promedio máximo se observa en Canek 2 (26.24 Sv), y seguido por Canek 3 (21.37 Sv), mientras que Canek 1 (17.71 Sv) presenta el transporte promedio mínimo (sin tomar en cuenta a Canek 0 ya que no se presenta la sección completa). La mayor variabilidad en el transporte se presenta en Canek 4, ya que aumenta de 9.95 Sv a 20.68 Sv en un día y la desviación estándar es de ± 5.62 Sv.

El transporte promedio máximo se observa en Canek 2, a diferencia de los valores de velocidad de la corriente, que son máximos durante Invierno (Canek 3). El resto de los cruceros coincide con el orden de máxima a mínima velocidad observado en la velocidad de la corriente, y el mínimo se observa en Canek 0, sin embargo durante este crucero no se tomaron mediciones a lo largo de todo el canal.

III.3. CORRIENTE PROMEDIO EN EL CANAL DE YUCATAN.

A partir de los promedios realizados para todos los cruceros en una malla con celdas de $25^{\circ} \times 25^{\circ}$ longitud/latitud, así como el cálculo de su variación estándar, se obtuvo la Figura 21 la cual muestra la corriente promediada durante los seis años en los que se realizaron mediciones durante periodos de entre 8 y 21 días, en diferentes épocas del año.

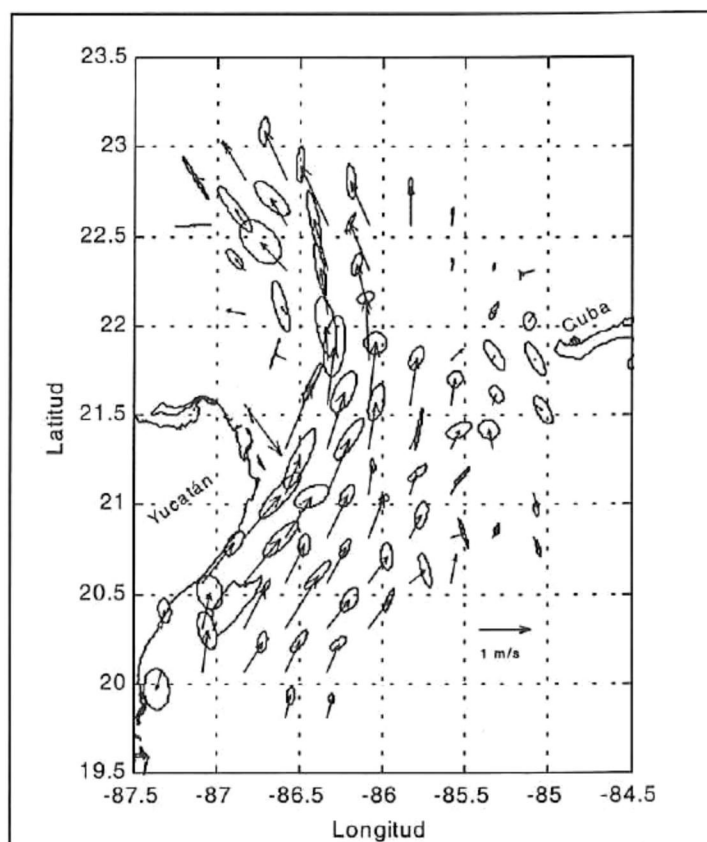


Figura 21. Corriente promedio y elipses de variación para todos los cruceros (Canek 0-5), a 50 m de profundidad.

La orientación de la corriente promedio en la zona Occidental del Canal de Yucatán (a una latitud de 21.5° N) es Nor-noreste, en el centro del canal la corriente presenta una dirección predominante hacia el Norte. En el extremo Oriental del canal, la velocidad disminuye sustancialmente en relación con la parte Oeste y la dirección de

la corriente es hacia el Noreste en gran parte de las celdas. Sin embargo en la zona Sur-Oriental se observa una celda que presenta la corriente promedio con orientación Sureste. Al Sur del Canal de Yucatán la orientación general y predominante es hacia el Noreste, mientras que al Norte del canal la corriente se dirige en la mayoría de los casos hacia el Noroeste; es decir, en general la corriente rodea la costa de Yucatán y se dirige hacia el interior del Golfo de México.

A lo largo del canal a una latitud de 21.5° N, se observa una mayor variabilidad de la corriente en el lado Oeste del canal, donde la orientación es Noreste con elipses de variación que presentan un pequeño ángulo de alrededor de 15° hacia el Este en relación con la corriente promedio; dicha variabilidad disminuye hacia el centro del canal presentando entre 30° y 45° de inclinación con respecto a la dirección de la corriente promedio.

En la zona Sur-Occidental del canal, se presenta una mayor variabilidad tanto en la velocidad como en la dirección de la corriente, sin embargo dicha variabilidad disminuye paulatinamente hacia el centro del canal, donde el ángulo de inclinación entre la corriente promedio y las elipses aumenta a aproximadamente a 30° (de manera similar a la zona Centro del canal), lo que indica una mayor variabilidad en la orientación de la corriente en esa zona. En particular, en la zona Nor-Occidental del Canal de Yucatán se observa cómo aumenta la variabilidad de la corriente en la zona cercana a la costa, mientras que un poco más hacia el Este (86.5° W) se observa cómo disminuye la variabilidad en la orientación, presentando las elipses un ángulo igual al de la corriente; casi en los 86° W, las elipses de variación disminuyen su tamaño, sin embargo en algunas elipses de esta zona se presenta un ángulo de diferencia de hasta 45° en relación con la corriente promedio; es decir, la variabilidad en la velocidad disminuye, pero aumenta con respecto a la orientación de la corriente.

Una zona importante es el extremo cubano (zona Oriental) del Canal de Yucatán, lugar donde se presenta la Contracorriente Cubana; sin embargo ésta no se considera persistente a lo largo del año, ya que sólo fue detectada durante tres de los seis cruceros realizados (uno en Invierno y dos en Verano). Las elipses de variación corroboran lo anterior, ya que en esta zona se observan vectores de magnitud muy pequeña con elipses de mayor tamaño; esto se debe a que, considerando las cuatro épocas del año, al contar con una corriente hacia el exterior e interior del Golfo de México, la velocidad promedio es pequeña y durante el periodo de mediciones se detecta una alta variabilidad en la velocidad y orientación.

Con respecto a la profundidad, en general se observa que a lo largo de la columna de agua superficial (50-300 m), la velocidad de la corriente disminuye en menor proporción que las elipses, lo que significa que no sólo disminuye la velocidad de la corriente conforme aumenta la profundidad, si no que también la variabilidad disminuye aunque en menor grado. De manera particular, se observa que en la parte central al Sur del canal, las elipses aumentan su ángulo en relación con la corriente promedio conforme aumenta la profundidad; en algunos casos dicho ángulo llega hasta los 90°, lo que indica que exclusivamente en esta zona, la variabilidad con respecto a la orientación aumenta conforme la profundidad se incrementa.

La velocidad promedio tiende a mantener la misma orientación a través de la columna de agua, aunque conforme aumenta la profundidad en el lado Occidental del canal, la velocidad disminuye en toda la zona en la misma proporción que la variabilidad. Sin embargo, el ángulo de diferencia entre dicha corriente y las elipses disminuye un poco para esta misma zona del canal.

III.4. PATRONES DE VIENTO EN LA ZONA.

Por medio de la descomposición en FEOs, se graficaron los tres primeros modos representativos del esfuerzo del viento en la zona sobre la superficie del mar, para la zona del Canal de Yucatán. Con el primer modo se observa el 55% de la variabilidad, donde el esfuerzo del viento presenta una orientación Suroeste en toda la zona aledaña al canal de Yucatán, con magnitud promedio de alrededor de 0.06 Pascales.

El primer modo de variabilidad del esfuerzo del viento representa el 55% de la varianza total en la zona. En la Figura 22-b se observa que la mayoría de la varianza es positiva, lo que indica que el sentido del viento permaneció de Este a Oeste en casi la totalidad del tiempo estudiado, lo que corresponde al régimen de los Alisios (Figura 22-a). Por otro lado, se observa una varianza alta en el día 815, el cual se presenta 5 días antes del inicio de Canek 2, por lo que se considera que puede presentar influencia sobre las corrientes medidas en este periodo. Otro periodo de mediciones que se encuentra cercano a una alta variabilidad en el viento es Canek 3, dicha varianza es menor a la detectada en el día 815 y se presenta aproximadamente al inicio de este crucero, por lo que también se considera que podría tener influencia sobre la variabilidad superficial de la corriente. El resto de los cruceros no coinciden con un periodo de alta o baja varianza dentro de la serie de tiempo para el modo 1.

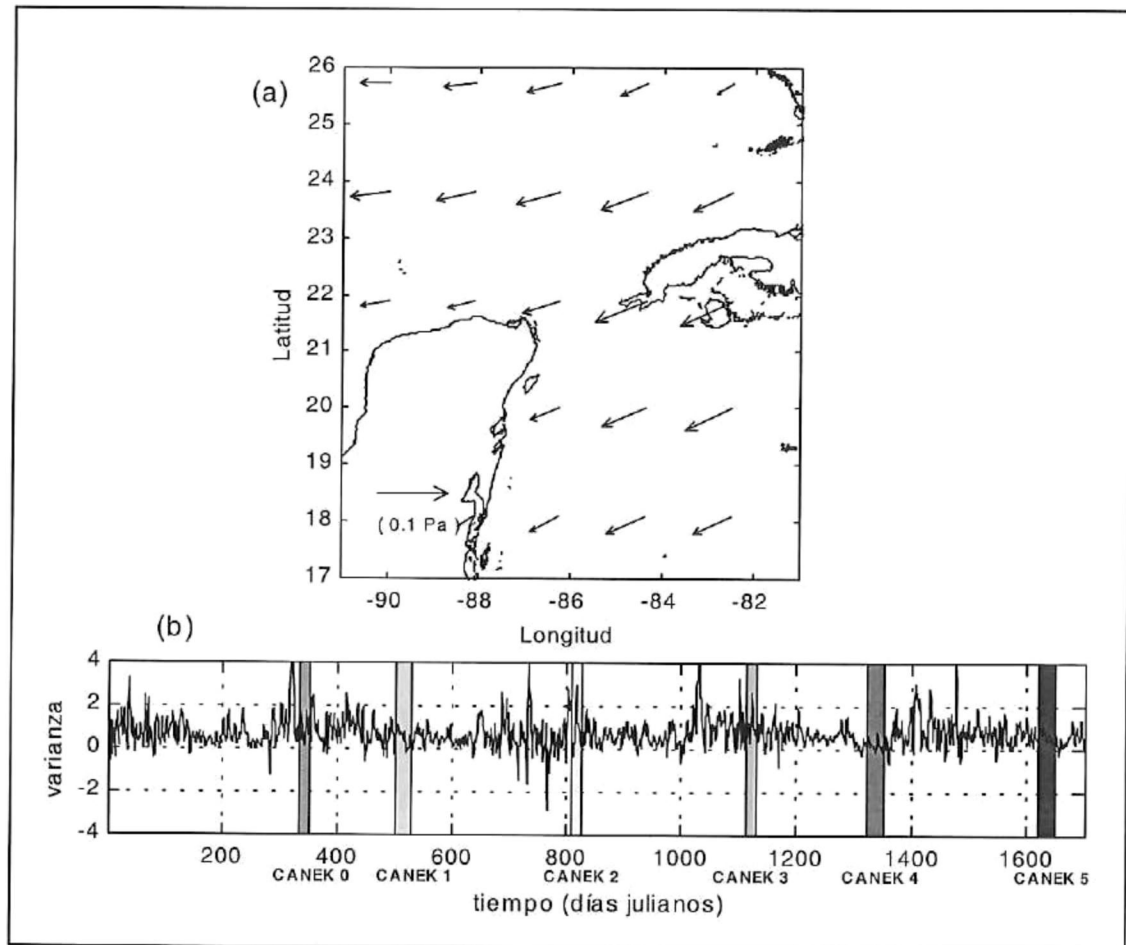


Figura 22. Variabilidad del modo 1 de las FEOs, que representa el 55% de la varianza del campo del esfuerzo del viento en la zona. (a) Estructura espacial. (b) Evolución en el tiempo.

El modo 2 representa el 27% de la variabilidad total y los vectores muestran una dirección constante hacia el Sur-sureste, en este caso se presentan esfuerzos entre los 0.04 y 0.05 Pa en las zonas cercanas al Canal de Yucatán (Figura 23-a). La evolución en el tiempo muestra periodos de fuertes cambios en la varianza con aumentos significativos en los Inviernos de cada año; las fluctuaciones de varianza tanto positiva como negativa en estos periodos, indican que el esfuerzo del viento puede presentarse de Norte a Sur o invertido (Figura 23-b). Este comportamiento en la dirección del viento está relacionado con el paso de frentes fríos (Nortes) en la época de Invierno, los cuales son característicos en la región. Los cruceros Canek 0, 2 y 3

coinciden con valores altos de variabilidad, mientras que Canek 1, 4 y 5 se presentan en periodos de pocos cambios en la variabilidad.

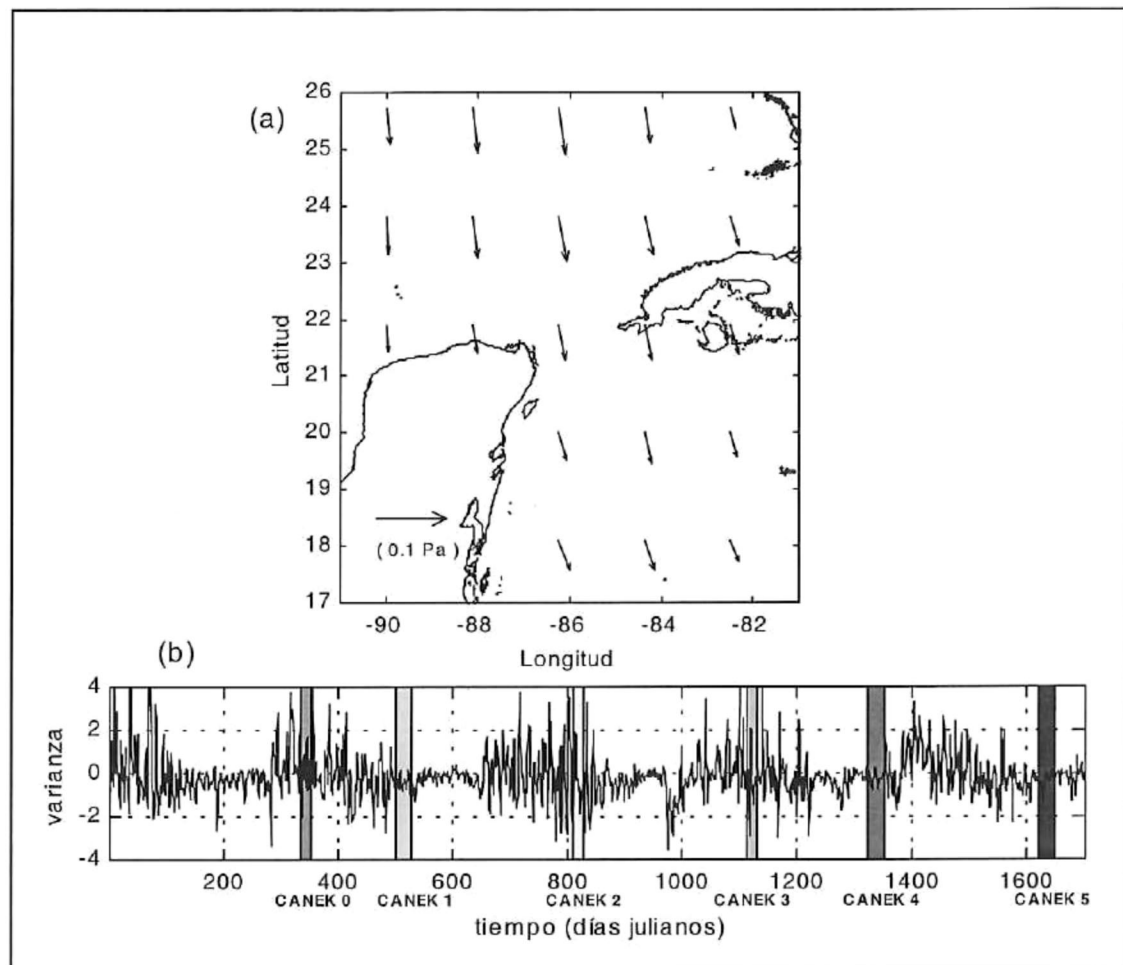


Figura 23. Variabilidad del modo 2 de las FEOs, que representa el 27% de la varianza del campo del esfuerzo del viento en la zona. (a) Estructura espacial. (b) Evolución en el tiempo.

El modo 3 representa un porcentaje muy pequeño de la variabilidad total (6%), sin embargo en este modo se observa un giro de muy baja magnitud (0.01-0.03 Pa) alrededor del Canal de Yucatán (Figura 24-a). Los cambios fuertes en valores negativos de la varianza indican que se invierte el sentido de rotación de dicho giro (Figura 24-b). Cabe mencionar que únicamente Canek 1 coincide con un aumento en la varianza positiva de la evolución en el tiempo para este modo, mientras que Canek 0 y 3 coinciden con un valor negativo de varianza; sin embargo, en los datos de corriente a

50 m (Figuras 3, 4 y 6), no se observa evidencia alguna de la influencia de este giro observado en el modo 3, sobre el patrón de corriente.

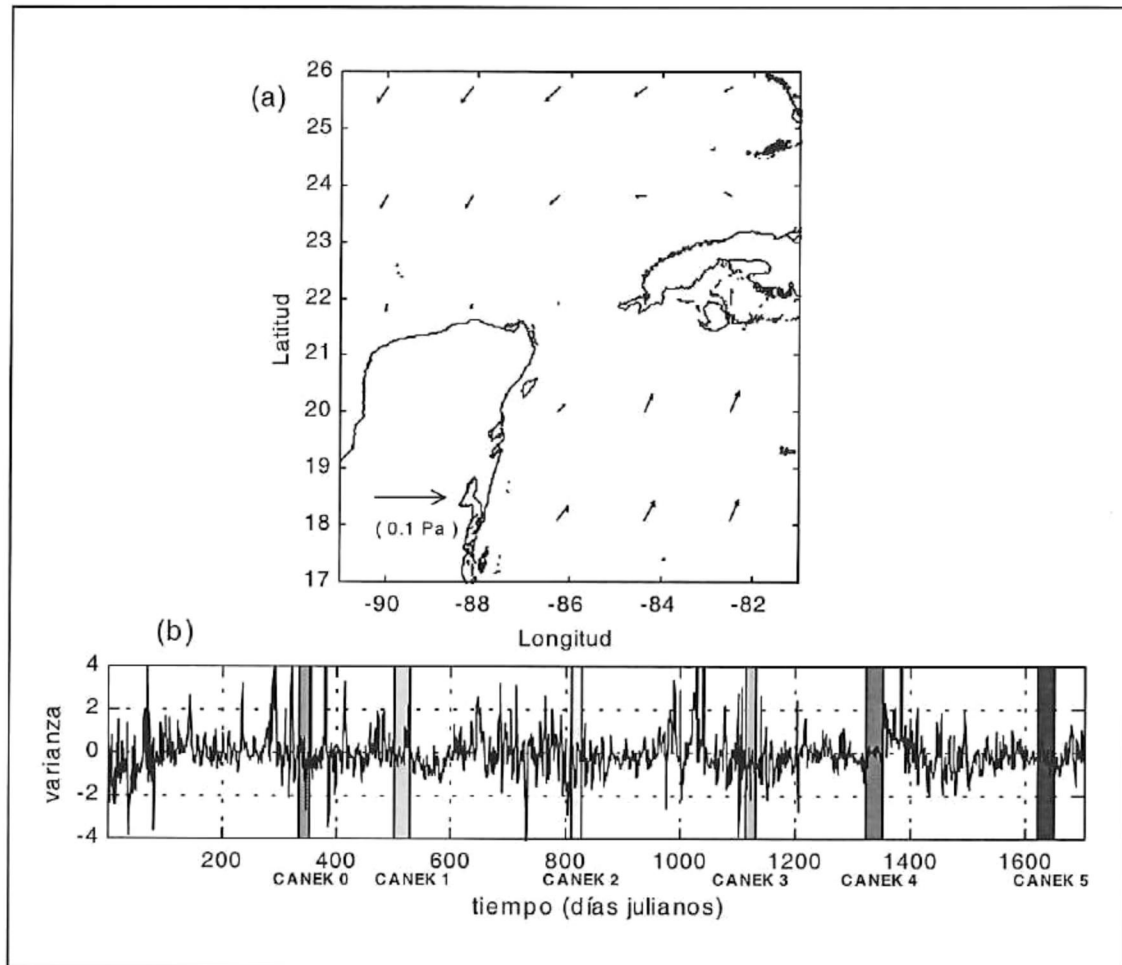


Figura 24. Variabilidad del modo 3 de las FEOs, que representa el 6% de la varianza del campo del esfuerzo del viento en la zona. (a) Estructura espacial. (b) Evolución en el tiempo.

La evolución en el tiempo de los vientos correspondiente a las fechas en las que se realizaron cada uno de los cruceros, muestran patrones diferentes de viento (Figura 25), con una orientación en general que varía del Suroeste al Noreste entre los periodos de tiempo en los que se realizaron los cruceros.

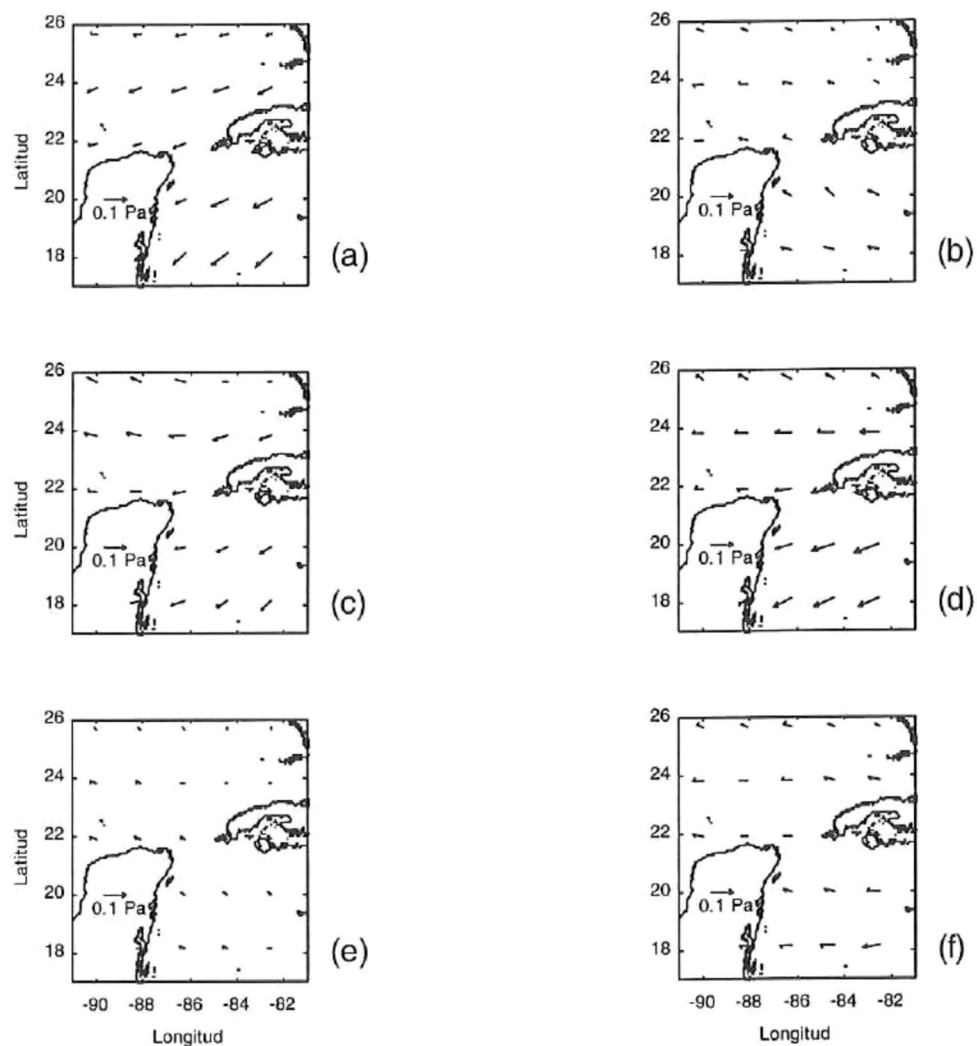


Figura 24. Esfuerzo promedio del viento para las fechas que corresponden a los cruceros. (a) Canek 0, (b) Canek 1, (c) Canek 2, (d) Canek 3, (e) Canek 4 y (f) Canek 5.

El esfuerzo del viento durante el periodo correspondiente a Canek 0 (Figura 25-a), presenta una orientación Suroeste en toda el área alrededor del Canal de Yucatán, con magnitud de aproximadamente 0.07 Pascales al Sureste del canal y disminuyendo a 0.05 alrededor de la costa de Yucatán. Canek 0 fue realizado durante Otoño de 1996, estacionalmente le sigue Canek 3 realizado en Invierno de 1999 (Figura 25-d), periodo en el cual el esfuerzo del viento muestra la misma orientación Suroeste; no obstante de los 22° N hacia el Norte del canal, la orientación cambia un poco más hacia el Oeste, presentando en general una mayor intensidad de hasta 0.10 Pascales en la zona Nor-Occidental y 0.06-0.07 Pa en la zona Occidental del canal.

Por otro lado, Canek 1 y Canek 2 (Figuras 25-b y 25-c) se realizaron durante la Primavera de 1997 y 1998 respectivamente, siendo Canek 2 a principio de esta estación y Canek 1 al final de la misma. En el periodo en el que se realizó Canek 2, el esfuerzo del viento al Sur del canal, muestra dirección Suroeste, mientras que al Norte del canal el esfuerzo del viento presenta una dirección hacia el Noroeste, con una intensidad promedio de entre 0.04 y 0.06 Pascales. En el periodo que comprende Canek 1 (finales de Primavera) el esfuerzo del viento disminuye su intensidad aproximadamente 0.01 Pa y la dirección del esfuerzo del viento cambia, ya que se presenta hacia el Noroeste en toda la zona al Sur del canal, y en la zona Nor-Occidental entre los 22° N y los 26° N, la dirección es un poco más hacia el Oeste.

La siguiente época del año es el Verano, durante el cual se realizaron Canek 5 (Figura 25-f) al principio y Canek 4 a finales del mismo (Figura 25-e). En el primer periodo (Canek 5) se observa una dirección del esfuerzo del viento hacia el Oeste, cambiando un poco el ángulo hacia el Noroeste en la zona Norte (alrededor de los 26° N), presentando una mayor intensidad al Sur de la península y velocidades entre los 0.03 y 0.05 en la zona cercana al canal. En el periodo de Canek 4 (finales de Verano), el esfuerzo del viento presenta cambios tanto en la orientación, como en la intensidad, disminuyendo considerablemente ésta última, ya que en promedio los esfuerzos se

encuentran alrededor de los 0.02 Pascales y la orientación es hacia el Noroeste con un ángulo mayor al que se presenta el resto de los periodos analizados.

Al realizar la descomposición empírica ortogonal, los tres primeros modos representaron un patrón de vientos bien definido en la zona, y al utilizar los datos del esfuerzo del viento para las fechas en las que se realizaron los cruceros, se realizó una comparación cualitativa entre las anomalías de la corriente y el promedio del esfuerzo del viento. Dicha comparación se corroboró con el vector de Ekman calculado a partir del esfuerzo del viento promedio para toda la zona.

En particular para Canek 0 (Figura 26), en el Canal de Yucatán y al Sur del mismo, la corriente presenta un ángulo a la izquierda del esfuerzo del viento. En la zona Sur-Occidental, el ángulo en relación con el esfuerzo del viento es de aproximadamente 45° y en el canal aumenta alrededor de 90° ; al Norte del canal, las anomalías presentan una orientación de 90° a la derecha del esfuerzo del viento. En general, las anomalías en la corriente no muestran una relación en su orientación con el vector de Ekman calculado, a excepción de la zona Occidental del canal, donde presentan una orientación a la derecha del Vector de Ekman, sin embargo el ángulo de las anomalías con respecto al del esfuerzo del viento es mayor que el observado entre el vector de Ekman y el promedio del esfuerzo.

Las anomalías de la corriente medida durante Canek 1 (Figura 27) presentan una orientación a la izquierda del esfuerzo del viento, con ángulos entre los 70° y 100° , a excepción de una zona cercana a las costas de Cuba en el canal y al Norte de la Península de Yucatán (alrededor de los 22.5° N), en las cuales la dirección de las anomalías se encuentra a la derecha del viento, con ángulos menores de alrededor de 45° . Al igual que en Canek 0, al Noroeste del canal (22.5° N y 86.5° W) se observan vectores de anomalías con orientación similar al Vector de Ekman.

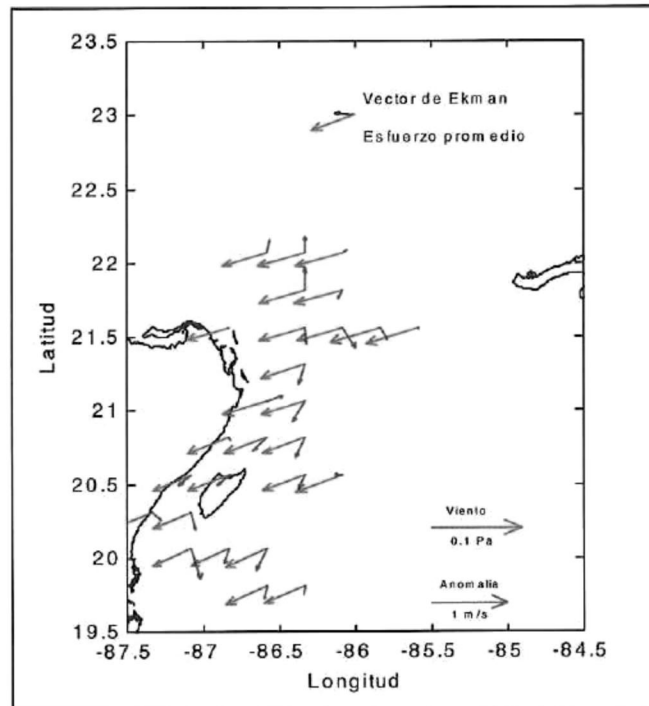


Figura 26. Anomalías de la Corriente (rojo) de Yucatán para Canek 0 [u_a, v_a], esfuerzo del viento [τ] (azul) y vector resultante de las ecuaciones de Ekman [u_E, v_E] (negro).

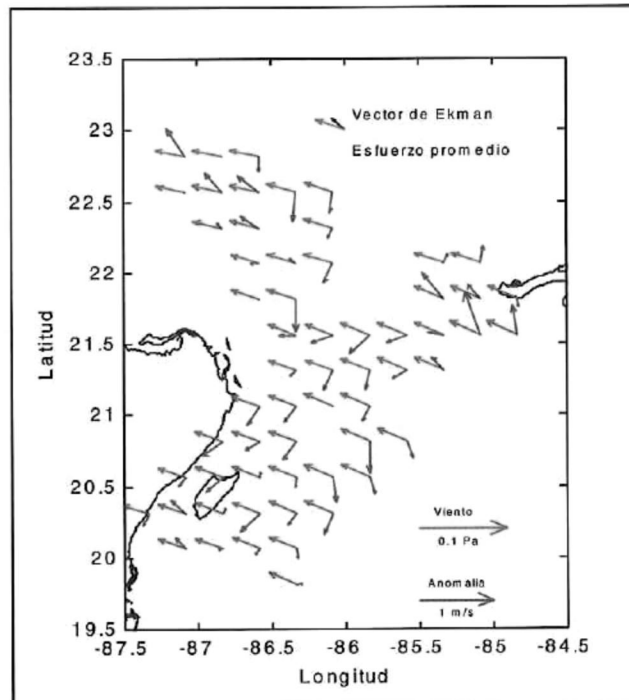


Figura 27. Idem Figura 26 para Canek 1.

En Canek 2 la orientación de las anomalías no muestra un patrón definido en relación con la dirección del vector de Ekman. Adicionalmente las anomalías en el Canal de Yucatán y un poco al Sur del mismo presentan valores muy pequeños, con orientación general a la derecha del viento y un ángulo variable entre los 45° y 150° (Figura 28); en las costas cubanas las anomalías son intensas (entre los 0.5 y 0.8 m/s) y con dirección Noroeste, a la derecha de la dirección del esfuerzo del viento. No se cuenta con datos en la zona Nor-Occidental del canal, por lo que en este caso no se puede determinar si existe relación alguna entre las anomalías y el vector de Ekman en esta zona en particular.

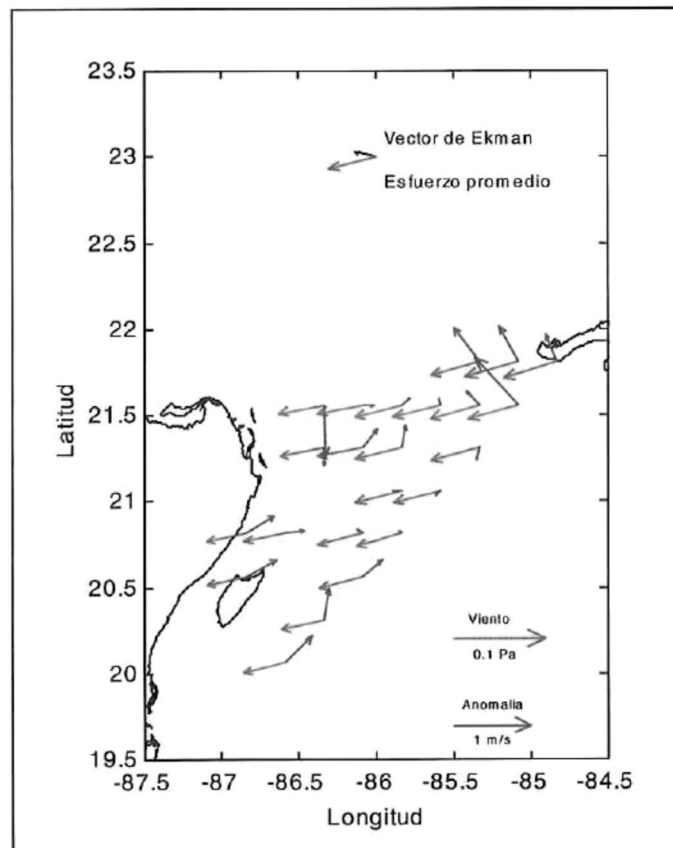


Figura 28. Idem Figura 26 para Canek 2.

En general, en Canek 3 las anomalías en la corriente presentan una orientación a la derecha del esfuerzo del viento, un ángulo variable, mayor intensidad cerca de la costa de Yucatán y pequeña magnitud en el centro del canal (Figura 29); por otro lado, cerca de las costas cubanas las anomalías son hacia el Sureste, lo que muestra la contracorriente cubana en esta época, cuya dirección no es persistente durante el periodo de tiempo estudiado.

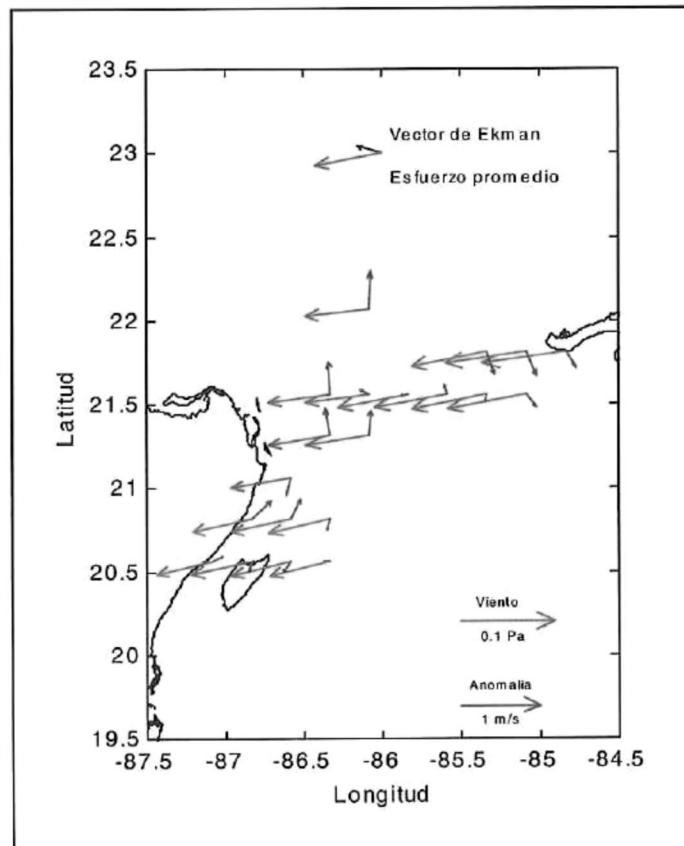


Figura 29. Idem Figura 26 para Canek 3.

En Canek 4 se puede observar el esfuerzo del viento con dirección Noroeste y las anomalías con un ángulo entre los 45° y 90° a la derecha del esfuerzo, presentando a su vez una mayor intensidad en la zona Oeste del canal, al igual que al Norte y Sur del mismo (Figura 30). Mientras tanto en el centro del canal, las anomalías son considerablemente pequeñas y con una dirección opuesta a la del esfuerzo del viento. Finalmente en el lado Este del canal, las anomalías muestran la contracorriente cubana, con una intensidad menor a Canek 3 y un ángulo de entre 135° y 180° en relación con el esfuerzo del viento. Nuevamente, al igual que para Canek 0 y 1, al Noroeste del Canal de Yucatán las anomalías presentan un ángulo hacia la derecha del esfuerzo del viento.

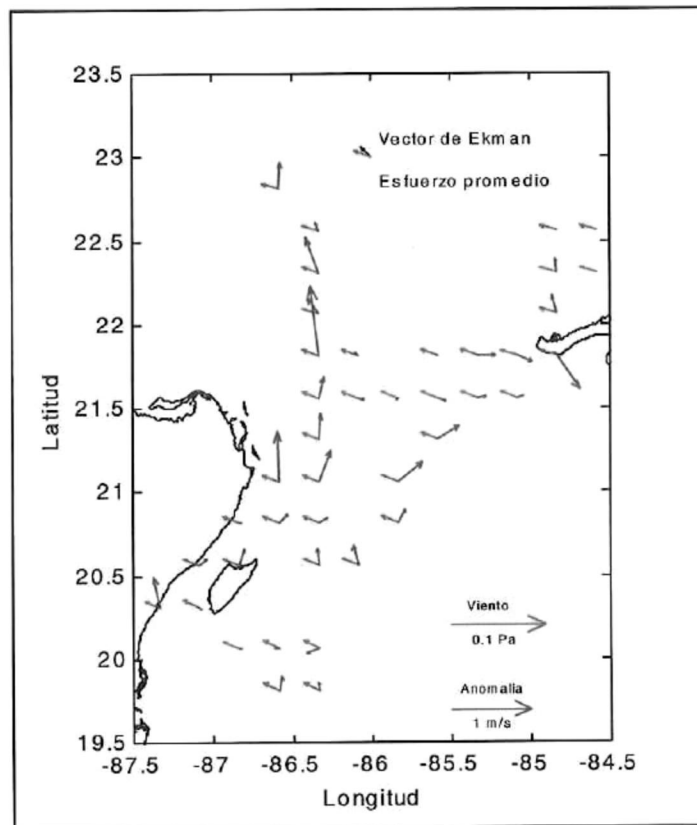


Figura 30. Idem Figura 26 para Canek 4.

En Canek 5 se observa un patrón con base en la orientación de las anomalías y la dirección del esfuerzo del viento, ya que al Sur del canal de Yucatán las anomalías presentan un ángulo variable entre los 45° y los 140° a la derecha del viento, y en la zona Norte del Canal la orientación de las anomalías se presenta en general a la izquierda del viento. Las anomalías que se presentan del lado Oriental del canal indican la contracorriente cubana con una intensidad similar a la de Canek 4. En la zona Nor-Occidental las anomalías son intensas, y presentan una orientación Sur-Sureste (Figura 31) contraria a la dirección del vector de Ekman; lo anterior contrasta con lo observado en Canek 0, 1, 3 y 4 en esta zona del canal, en donde la orientación de las anomalías presentó un ángulo a la derecha del esfuerzo del viento, similar a la del vector de Ekman. A todo lo largo del Canal de Yucatán (21.5° N), las anomalías de la corriente presentan valores menores a 0.2 m/s, lo que indica que en esta zona y durante este periodo de tiempo, la corriente presentó variaciones pequeñas en relación a la corriente general promedio en la zona.

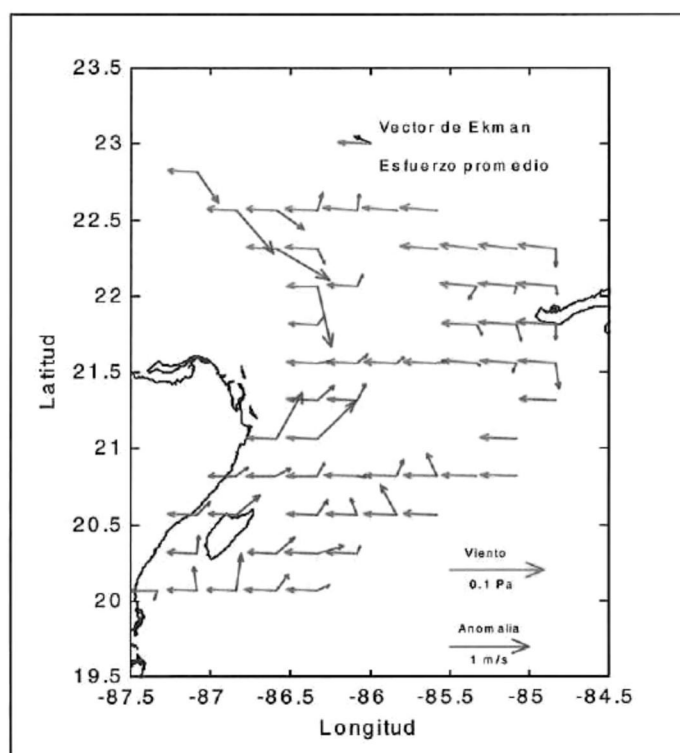


Figura 31. Idem Figura 26 para Canek 5.

IV. DISCUSIONES.

En general el flujo superficial (de 0 a 500 m) de la Corriente de Yucatán, se dirige desde el Caribe por el Sur de la Península de Yucatán y cruza dicho canal hacia el Norte; posteriormente gira hacia el interior del Golfo de México, lo que indica que sigue la topografía de la zona. De esta misma forma lo establecieron Molinari y Cochrane (1972, en: Molinari y Morrison, 1988) los cuales presentan evidencia de que la Corriente de Yucatán es controlada la batimetría entre los 21° N y los 23.5° N.

Al cruzar a través del canal la corriente presenta variaciones en su orientación que van desde el Noroeste hasta el Noreste; sin embargo en la zona del canal, donde se realizaron los cruces entre los 21.4° N y 22.5° N, la corriente presenta variaciones en la orientación entre un crucero y otro. Con respecto a la rapidez de la corriente, los promedios para cada crucero varían entre 0.40 ± 0.22 y 0.65 ± 0.23 m/s, sin embargo se detecta un intervalo total desde 0.1 m/s hasta 2 m/s para la zona del canal, lo que indica una alta variabilidad.

El intervalo de velocidad encontrado durante los cruces, coincide con lo observado por Maul (1977) a partir de cálculos de geostrofia. La velocidad máxima observada por este autor fue de 1.45 m/s, mientras que en el presente estudio, la velocidad máxima fue de 2 m/s; sin embargo es necesario considerar que los datos obtenidos por Maul (1977), corresponden a un solo periodo de dos días, mientras que los las seis mediciones realizadas durante los cruces de Canek, se encuentran dentro de un intervalo de 8 a 21 días en diferentes épocas del año.

En el presente trabajo se considera que los promedios realizados para todas las mediciones durante los seis años que abarca este estudio (Canek 0-5), son representativos del flujo promedio principal en la zona; sin embargo, es necesario

considerar que solamente se realizó el muestreo durante un periodo corto (entre 8 y 21 días) en diferentes años, abarcando las cuatro estaciones del año.

Con base en el criterio establecido en el párrafo anterior, se tiene que la corriente superficial promedio en el Canal de Yucatán, presenta una orientación hacia el Nor-Noreste con velocidades alrededor de 1 m/s en la zona Occidental del canal y de alrededor de 0.5 m/s en la parte central del mismo. En general, al pasar a través del Canal de Yucatán, la velocidad de la corriente aumenta. Lo anterior podría deberse principalmente a una disminución de la sección transversal en comparación con el Mar del Caribe, ya que las plataformas de Yucatán y Cuba disminuyen el área por la que cruza la corriente proveniente de la Cuenca del Caribe.

Otra característica que se observa en el flujo principal y en cada uno de los cruceros, es el máximo de velocidad hacia el extremo Oeste (zona Occidental) y el mínimo en el centro del canal; mientras que en los cruceros donde no se presenta la contracorriente, el flujo hacia el interior del Golfo de México vuelve a incrementar su velocidad hacia el extremo cubano (zona Oriental). Con respecto a lo anterior Maul (1977) menciona que la batimetría en la zona representa un factor de forzamiento sobre el flujo.

Como parte de la batimetría en la zona, sobre el umbral del Canal de Yucatán, se observa una elevación del fondo hasta los 600 m de profundidad, ubicada entre los 85.55° W y los 85.3° W (Apéndice A), zona en la cual se ubica la velocidad mínima de todos los cruceros. Probablemente esta elevación en la batimetría divide el flujo y genere fricción en esta zona, y dada la reducción del área de incidencia del flujo en los extremos la velocidad aumente, siendo mayor hacia el Oeste. Por otro lado, Ochoa *et al.* (2001), reportan un flujo de tipo geostrófico a través del Canal de Yucatán, lo que implica que al no remontar topografía, en la parte superior de la elevación mencionada, se forme un flujo de menor velocidad y la rapidez en los extremos se incremente.

La mayor variabilidad en la intensidad de la corriente fue observada en los extremos Occidental y Oriental del canal, mientras que en el centro la variabilidad es menor; lo anterior podría deberse a interacciones de la corriente con las plataformas continentales de Yucatán y Cuba, ya que en el centro del canal, dicha interacción es menor. Otra zona en la que se observa variabilidad es el Canal de Cozumel, ésta es debida posiblemente a la influencia de la costa, ya que al interactuar la corriente con esta isla, se forma turbulencia generando mayor variabilidad en esta zona, en comparación con el lado Este de la isla (Caribe).

Estudios realizados por Murphy *et al.* (1999); Murphy y Hurlburt (1999); y Ohlmann *et al.* (2001), han determinado que la zona comprendida por las cuencas del Caribe y del Golfo de México (las cuales tienen como punto medio el Canal de Yucatán) son zonas de alta vorticidad. En el análisis de la corriente superficial, así como de los promedios en la columna de agua para cada crucero, se detectaron también algunos cambios en la orientación de la corriente en el plano horizontal, que podrían indicar la presencia de giros en la zona, sin embargo éstos sólo fueron medidos parcialmente, por lo que no se puede demostrar la presencia de giros a partir de los datos analizados.

En Canek 4 se observa aparentemente un giro anticiclónico en la parte Oriental del canal justo antes de la contracorriente; en Canek 5 dentro del golfo, al Norte de la Península de Yucatán, se observa un flujo hacia el Sur que gira de forma ciclónica y se une con el flujo principal hacia el Noroeste; finalmente en Canek 1, al Sur del Canal de Yucatán, se observa un flujo que gira hacia el Este, que podría ser un giro más grande que los mencionados, y el cual se observa en la columna de agua de los 50 a los 300 m de profundidad.

La presencia de estos posibles giros tanto en el Caribe, como en el Canal y en el golfo se apoya con los estudios de los giros liberados por la corriente de lazo, que viajan a través del Golfo de México (Maul, 1977; Vukovich *et al.*, 1979; Elliot, 1982, Lewis *et al.*, 1989 y Maul y Vukovich, 1993); y también los giros estudiados por Murphy

y Hurlburt (1999) formados en el Caribe, que viajan hacia el Norte y en ocasiones llegan al Canal de Yucatán donde a veces son comprimidos por el mismo.

Los giros que viajan a través de la cuenca del Caribe, transmiten vorticidad al flujo principal de la zona (Murphy y Hurlburt, 1999), el cual es posible que presente una intensificación hacia la costa Oeste (en este caso Yucatán), con el fin de liberar parte de la vorticidad mencionada. Lo anterior es una posible explicación del máximo de velocidad detectado en la zona cercana a la Península de Yucatán, aunado a la influencia de la batimetría de la zona.

Con base en las gráficas de promedios verticales (Figuras 9-14), se encontró una variabilidad posiblemente estacional en la dirección de la corriente en el Canal de Yucatán. Durante Invierno y Verano se encontraron los valores máximos de velocidad en la corriente, con una orientación hacia el Norte en Invierno y hacia el Noreste en Verano, mientras que los mínimos se detectaron en Otoño (Canek 0) y en Primavera (Canek 1 y 2).

No se cuenta con estudios que analicen el patrón estacional a través del Canal de Yucatán; sin embargo se cuenta con estudios de este tipo en el Estrecho de Florida, tanto por mediciones directas, como por datos de satélite y modelación numérica. No obstante, no se ha establecido claramente la existencia de una relación entre el flujo en el Estrecho de Florida y el Canal de Yucatán.

Los estudios en el Estrecho de Florida, han coincidido en detectar un máximo de la velocidad de la corriente principalmente en Verano, (Niiler y Richardson, 1973; Anderson y Corry, 1985; Larsen, 1992 y Maul y Vukovich, 1993) y también durante el Invierno (Anderson y Corry, 1985), sin embargo Niiler y Richardson (1973) detectaron el mínimo a principios de Invierno. Los autores mencionados han coincidido en detectar el mínimo transporte en Otoño. Por otro lado Maul y Vukovich (1993), con base en su periodo de muestreo, encontraron una relación entre el transporte en el Canal de

Yucatán y la intrusión de la Corriente de Lazo, existiendo una máxima intrusión durante el Invierno y Verano, aunque dicha relación entre ambas corrientes aún no está bien establecida.

Los estudios mencionados en el párrafo anterior, coinciden con el presente trabajo en que el máximo de velocidad fue detectado en Invierno, seguido por Verano, sin mucha diferencia de velocidad entre ambos. Los valores mínimos de velocidad pertenecen al periodo de Primavera y Otoño, con valores muy similares. El mínimo se detectó en Otoño, sin embargo en esta fecha el área de muestreo es considerablemente menor al resto de los cruceros, por lo que ambos periodos (Primavera y Otoño) se consideran como valores mínimos.

Los transportes obtenidos para la sección superficial (50-500 m) del Canal de Yucatán, difieren con respecto a lo observado en la velocidad de la corriente, ya que el máximo transporte fue durante Primavera (Canek 2), seguido por Verano (Canek 3), posteriormente por Invierno (Canek 5 y 4) y el mínimo durante Canek 1 (Primavera) y Canek 0 (Otoño) aunque en este último no se consideró la sección del canal completa (de Yucatán a Cuba).

A partir de mediciones directas en el Canal de Yucatán durante un periodo de nueve meses, Sheinbaum *et al.* (en prensa) determinaron un transporte promedio de 23 Sv para toda la columna de agua. De los datos de transporte obtenidos durante el presente trabajo, se tiene que el promedio en aguas superficiales (50-500 m) para los cinco cruceros que cuentan con secciones completas (Canek 1-5) fue de 20.57 ± 3.46 Sv, lo que representa el 89.43% del transporte a través de toda la columna de agua. Lo anterior podría ser un indicador de que la corriente en los primeros 500 m de profundidad presenta mayor velocidad, en relación con aguas profundas.

El análisis anterior se llevó a cabo con base en la existencia de una relación estrecha entre el flujo de todo el sistema MC-GM. Se ha establecido en algunos

estudios una relación entre el flujo del Estrecho de Florida y el Canal de Yucatán (Leaman *et al.*, 1978, en: Molinari y Morrison, 1988); estos estudios han tenido una duración limitada y sus conclusiones están basadas únicamente en lo observado durante un periodo de muestreo generalmente menor a un año, lo cual debe considerarse dentro de dicha comparación.

Aunado a lo anterior, se tiene que no existen estudios previos de este tipo en el Canal de Yucatán y solamente se cuenta con datos de transporte en el Estrecho de Florida a partir de mediciones directas. Los datos de transporte se refieren al gasto de agua (m^3/s) a través de un área determinada, lo que ciertamente difiere en dimensión, con respecto a la velocidad de la corriente superficial detectada a lo largo del recorrido del barco en el Canal de Yucatán.

Por otro lado, no se puede determinar con certeza si las variaciones estacionales observadas representan un ciclo, ya que en Invierno y Otoño solamente se tiene una sola medición, mientras que en Primavera y Verano, se cuenta con dos mediciones. En Primavera, los patrones entre ambos cruceros no coinciden al relacionar la orientación de la corriente, y la alta variabilidad registrada en Canek 2, disminuye a finales de Primavera en Canek 1. En Verano se cuenta también con dos mediciones, sin embargo la orientación de la corriente hacia el Noreste coincide para ambos cruceros, aunque a finales de la estación, el ángulo de orientación aumenta un poco hacia el Norte.

Debido a la alta variabilidad observada en el Canal de Yucatán, las variaciones entre un crucero y otro se podrían deber a fluctuaciones de la velocidad de forma permanente, caracterizadas por un patrón interanual, es decir con dos periodos de máxima velocidad a lo largo del año y no a un patrón estrictamente estacional.

La variabilidad detectada en el extremo Oriente del canal (Figura 21), muestra que la contracorriente cubana no es persistente a largo plazo, lo que se corrobora con las gráficas para cada crucero en las cuales, en tres de los cruceros, dicha

contracorriente se detectó de forma bien establecida. En el Canek 1 se observó la contracorriente únicamente durante un solo cruce del barco a través del canal y en Canek 2 se detectó entre 300 y 500 m de igual forma, en un solo cruce.

Sin embargo, la corriente promedio para todos los cruceros en esta zona, presenta orientación Noreste, ya que cuando no se presenta la contracorriente las velocidades hacia el Noroeste son mayores.

Los promedios observados en la Figura 21 con dirección Suroeste y Sureste al Norte y Sur de la isla respectivamente, se detectaron únicamente en un crucero, Canek 4 para el primero y Canek 5 para el segundo, por lo que no se considera que sean representativos del promedio.

Las fechas en las que se detectó la contracorriente mejor establecida, fueron durante el Verano e Invierno, presentando una velocidad similar en ambas estaciones del año (0.18 m/s). La contracorriente cubana fue registrada también a finales de Primavera, aunque de forma más variable y únicamente durante un periodo de tiempo corto (dos días). Durante Canek 2 la presencia de dicha contracorriente, se observó sólo a una profundidad entre los 300 y 500 m.

No existen estudios que registren esta corriente superficial con dirección hacia el Caribe, sin embargo a partir de las observaciones de este trabajo, es posible determinar algunas de sus características, entre las que destaca su intermitencia a corto y largo plazo.

Con respecto a los datos de esfuerzo del viento analizados para las fechas en las que se llevaron a cabo los cruceros y con base en la descomposición en valores singulares, se tiene que la variabilidad obtenida para la zona del Canal de Yucatán desde 1996 al año 2000, está representada principalmente por los Vientos Alisios, los cuales consisten en vientos provenientes del Este (55% de la variabilidad) y los frentes fríos que generan vientos de dirección variable Norte-Sur (27% de la variabilidad). Con

base en la serie de tiempo, los vientos Alisios podrían ejercer influencia sobre Canek 2 y 3.

Los valores altos de variabilidad para el modo 2 muestran una posible influencia sobre Canek 0, 2 y 3, sin embargo en el análisis de relación entre anomalías de la corriente y el esfuerzo del viento, no se observó una relación cualitativa entre ambos. Finalmente, el modo 3 sólo representa el 6% de la variabilidad, y dicho giro podría tener influencia sobre Canek 1, sin embargo además de no encontrar evidencia de esta influencia en el patrón de corrientes para este crucero, se considera que el porcentaje de varianza que representa es muy pequeño.

Existen variaciones en la velocidad y orientación de los vientos entre las fechas en las que se realizaron los cruceros, sin embargo para la zona que abarca el Canal de Yucatán, los vientos muestran una orientación constante. Esto se debe en parte a la interpolación, ya que la diferencia entre el área que abarcan los datos originales de vientos y el área de las celdas de los datos interpolados es de más de un grado tanto en latitud como en longitud.

Las anomalías de la Corriente de Yucatán para cada crucero, no presentan una orientación persistente, por otro lado, en general no muestran una relación en su orientación con el vector resultante de la corriente, calculado por las ecuaciones de Ekman.

Se observa que en tres de los seis cruceros (Canek 0, 1 y 4), al Noroeste del Canal de Yucatán, las anomalías de la corriente presentan una orientación con un intervalo entre 0° y 20° a la derecha del vector de Ekman orientado en relación con el vector de esfuerzo del viento, sin embargo se considera que la zona es muy pequeña y abarca pocos datos. Por otro lado, Canek 2 y 3 no cuentan con datos en esta zona, mientras que los datos en la zona Noroeste del canal para Canek 5, no muestran relación alguna en su orientación con el vector de Ekman calculado para esa época.

Con base en las comparaciones cualitativas entre la variabilidad de la corriente y los datos de viento interpolados para las épocas en las que se realizaron los cruceros, se considera que no existe una relación entre el patrón de vientos analizados y las anomalías de la corriente en el Canal de Yucatán.

Es necesario considerar que en esta parte del trabajo, existen algunos factores de error que influyen en la comparación del patrón de corrientes y el patrón de vientos en la zona. En primer lugar las anomalías fueron calculadas considerando la corriente promedio de todos los cruceros como representativa del flujo medio de la zona, y dicho promedio abarca un periodo de sólo seis años, en los que el muestreo no fue continuo (se realizaron mediciones de 8 a 21 días aproximadamente una vez por año). Aunado a lo anterior, los datos de viento pertenecen a datos globales en una malla con celdas cuya área es de 44,097 Km² aproximadamente, la cual se considera grande en relación con la escala de medición en el canal de Yucatán.

V. CONCLUSIONES.

- ♦ La Corriente de Yucatán se presenta de forma persistente con dirección promedio hacia el Norte, durante todo el año; sin embargo se observan variaciones en su orientación, que van desde el Noroeste hasta el Noreste.
- ♦ El flujo medio a través del canal, podría estar regido en gran parte por la topografía de la zona, ya que al pasar de la Cuenca del Caribe a la Cuenca del Golfo de México, presenta una intensificación debida a la reducción del área de incidencia por las plataformas continentales de Cuba y Yucatán.
- ♦ Se encontró que el flujo principal de la Corriente de Yucatán, presenta velocidad máxima en la zona Oeste del canal, y velocidad mínima en el centro del canal, dicho comportamiento podría deberse principalmente a dos factores:
 - ♦ La liberación de vorticidad, la cual es transmitida al flujo promedio, por medio de los giros que viajan a través de la Cuenca Caribeña.
 - ♦ La elevación ubicada sobre el umbral entre los 85.55° W y los 85.3° W, que debido al flujo geostrófico a través del canal, no remonta topografía, lo que provoca una velocidad mínima sobre dicha elevación, detectada en el centro del canal y la máxima en los extremos.
- ♦ Se determinó un patrón, interanual en la intensidad en la velocidad de la corriente, ya que presenta dos máximos a lo largo del año, en Invierno (0.65 ± 0.23 m/s) y Verano (0.57 ± 0.30 y 0.49 ± 0.24 m/s), mientras que la mínima velocidad fue detectada durante Otoño (0.42 ± 0.14 m/s) y Primavera (0.47 ± 0.22 y 0.40 ± 0.22).

- ◆ Se identificó una contracorriente que se presenta de forma intermitente y posiblemente interanual en el lado Este del Canal de Yucatán, la cual varía en intensidad y orientación. Se encontró una contracorriente más intensa y mejor establecida durante Invierno (0.20 ± 0.09 m/s), mientras que en Verano (0.18 ± 0.09 y 0.16 ± 0.11 m/s) la velocidad detectada fue menor.
- ◆ Se observó un transporte promedio superficial (50-500 m) de 20.57 ± 3.46 , lo que representa el 89.43% del transporte total a través del Canal de Yucatán.
- ◆ Se encontró una alta variabilidad en la Corriente de Yucatán a partir del flujo promedio principal. Una mayor variabilidad fue detectada en los extremos Occidental y Oriental del canal y en la parte Suroeste del mismo, zona donde se encuentra ubicada la Isla Cozumel, la cual se considera que posiblemente genere influencia sobre la variabilidad de la corriente en el extremo Oeste del canal.
- ◆ No se detectó una relación cualitativa entre las anomalías de la corriente y el patrón de vientos en la zona; sin embargo se determinó que dicho patrón de vientos está dominado principalmente por los Vientos Alisios la mayor parte del año y por los vientos eventuales atribuidos al paso de frentes fríos durante el Invierno.

V.1. Trabajos Futuros.

Debido a los pocos estudios realizados en el Canal de Yucatán, se considera la necesidad de realizar estudios posteriores, en los cuales se realicen mediciones continuas a corto, mediano y largo plazo en la zona.

Con el fin de determinar la existencia o ausencia de un patrón estacional en la zona, se recomienda la medición continua de la velocidad de la corriente, en la sección del Canal de Yucatán durante un periodo mayor a dos años (como mínimo), para de esta forma contar con por lo menos dos mediciones de cada estación del año.

Dada la clara existencia de una contracorriente en el extremo Oriental del Canal de Yucatán, y debido a que se sabe muy poco sobre el comportamiento de este flujo, se recomienda un estudio más detallado del comportamiento y variabilidad de dicha contracorriente.

Por otro lado, debido que durante el presente estudio no se encontró una relación de las anomalías de la corriente con el esfuerzo del viento a una escala global, se recomienda realizar estudios posteriores en los que se mida de forma puntual y simultánea por medio de aparatos fijos, tales como boyas y anclajes, la velocidad de la corriente superficial y el esfuerzo del viento local sobre la superficie del mar en la zona del Canal de Yucatán, para de esta forma poder contar con series de tiempo compatibles, de ambas variables.

VI. REFERENCIAS.

- Allen, J. T. 1995. Subtidal and Tidal Currents in the Vicinity of the Iceland-Faeroes Front. *American Meteorological Society*. 12:567-588.
- Anderson, D.L., y R.A. Corry. 1985. Seasonal transport variations in the Florida Straits: A model study. *Journal of Physical Oceanography*. 15: 773-786.
- Blaža, J. y W. Sturges. 1981. Evidence for wind-forced circulation in the Gulf of México. *Journal of Marinal Research* 39: 711-734.
- Brooks, I.H. 1979. Fluctuations in the Transport of the Florida Current at Periods Between Tidal and Two Weeks. *Journal of Physical Oceanography*. 22:1048-1053.
- Bunge, L., J. Ochoa, A. Badan, J. Candela y J. Sheinbaum. 2002. Deep flows in the Yucatán Channel and their relation to changes in the Loop Current extension. *Journal of Geophysical Research*, (en prensa).
- Candela, J., R.C. Beardsley y R. Limeburner. 1992. Separation of tidal and subtidal currents in Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler observations. *Journal of Geophysical Research*. 97: 769-788.
- Carrillo, F., J.L. Ochoa, J. Candela, O. Ramírez y I. González. 2000. Corrientes de Marea en el Canal de Yucatán. 5o Congreso de Ciencias del Mar, Marcuba 2000. La Habana.
- Elliott, B. A. 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 12: 1292-1309.
- Fratantoni, P.S. 1998. The formation and evolution of Tortugas eddies in the southern Straits of Florida and Gulf of Mexico. Abstract of a doctoral dissertation at the University of Miami. 180 pp.
- García-Górriz, E., J. Font y J. Candela. 1997. Data Quality Control for Vessel Mounted Acoustic Doppler Current Profiler. Application for the Western Mediterranean Sea. *Scientia Marina*. 6(4):417-430.
- Hansen, D.V. y R.L. Molinari. 1979. Deep Current in the Yucatan Strait. *Journal of Geophysical Research*. 84: 350-362
- Hogg, N.G. y W.E. Johns. 1995. Western boundary currents. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics. 95RG00491: 1311-1334.

- Jacobs, W.C. 1951. The energy exchange between sea and atmosphere and some of its consequences. *Bulletin, Scripps Institute of Oceanography*. 6: 27-122.
- Joyce, T. M. 1989. On in situ "calibration" of shipboard ADCPs. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology* 6: 169-172.
- Kielmann, J. y W. Düing. 1974. Tidal and sub-inertial fluctuations in the Florida Current. *Journal Physics Oceanography*. 4: 227-236.
- Kirwan, A. D., Jr, W. J. Merrell Jr., J. K. Lewis y R. E. Whitaker. 1984. Lagrangian observations of an anticyclonic ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 89: 3417-3424.
- Large, W. G., y S. Pond. 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography*. 11: 324-336.
- Larsen, J.C. 1992. Transport and heat flux of the Florida Current at 27° N derived from cross-section voltages and profiling data: theory and observations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. 338: 169-236.
- Leaman, K. D., R. L. Molinari y P. S. Vertes. 1987. Structure and variability of the Florida current at 27°N April 1982- July 1984. *Journal of Physical Oceanography*. 17: 565-583.
- Leaman. K.D., P.S. Vetes, L.P. Atkinson, T.N. Lee, P. Hamilton y E. Waddell. 1995. Transport potential vorticity and current/temperature structure Northwest Providence and Santaren Channels and Florida Current off Cay Sal Bank. *Journal of Geophysical Research*. 100: 8561-8569.
- Lewis, J. K., A.D. Kirwan Jr., and G. Z. Forristall. 1989. Evolution of a warm-core ring in the Gulf of Mexico: Lagrangian observations, *Journal of Geophysical Research*. 94: 8163-8178.
- Maul, G.A. 1977. The annual cycle of the Gulf Loop Current, Part I: Observations during a one-year time series. *Journal of Marine Research*. 35: 29-46.
- Maul, G.A. y F.M. Vukovich. 1993. The Relationship between Variations in the Gulf of Mexico Loop Current and Strait of Florida Volume Transport. *Journal of Physical Oceanography*. 23(5): 785-796.
- Molinari, R.L. y J.D. Cochrane. 1972. The effect of topography on the Yucatán Current, in *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. Gulf Publications, Houston. 149-155.

- Molinari, R.L., W.D. Wilson y K. Leaman. 1985. Volume and heat transport of the Florida Current: April 1982 through August 1983. *Science*. 227: 295-297.
- Molinari, R.L., 1987. A review of STACS results on Florida Current variability. *Transactions of the American Geophysical Union*. 68:337.
- Molinari, R.L. y J. Morrison. 1988. The separation of the Yucatán Current from the Campeche Bank and the intrusion of the Loop Current into the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 93:10,645-10,654.
- Montgomery, R.B. 1974. Comments on "Seasonal Variability of the Florida Current" by Niiler and Richardson. 533-555.
- Mooers C.N. y G.A. Maul. 1998. Intra-Americas Sea circulation. *The Sea*. 11:183-208.
- Murphy, S.J. y H.E. Hurlburt. 1999. The connectivity of eddy variability in the Caribbean Sea, the Gulf of México, and the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*. 104:1431-1453.
- Niiler, P.P. y W.S. Richardson. 1973. Seasonal Variability of the Florida Current. *Journal of Marine Research*. 144-167.
- Ochoa, J., J. Sheinbaum, A. Badan, J. Candela y D. Wilson. 2001. Geostrophy via potential vorticity inversión in the Yucatan Channel. *Journal of Marine Research*. 59: 725-747.
- Ohlmann, J.C., P.P. Niiler., C.A. Fox and R.R. Leben. 2001. Eddy energy and shelf interactions in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 106: 2605-2620.
- Pickard, G.L. y W.J. Emery. 1996. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. 5th edition. Ed. Butterworth Heinemann. 320 pp.
- Pond, S. y G. L. Pickard. 1998. *Introductory Dynamical Oceanography*. 2nd edition. Ed. Butterworth Heinemann, 329 pp.
- Price, J. F., C. N. K. Mooers y J. C. Van Leer. 1978. Observations and simulation of storm-induced mixed-layer deepening. *Journal of Physical Oceanography*. 8: 582-599.
- Ralph, E.A. y P.P. Niiler. 1999. Wind-Driven Currents in the Tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography*. 29: 2121-2129.

- Ralph, E.A. y P.P. Niiler. 1999. Wind-Driven Currents in the Tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography*. 29: 2121-2129.
- Sánchez-Montante, O. 2000. Los Flujos de Calor a través de la Superficie de los Mares Intra-Americanos. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Tesis de Maestría. 89 pp.
- Schmitz Jr., W. J., y P. P. Niiler. 1969. A note on the kinetic energy exchange between fluctuations and mean flow in the surface layer of the Florida Current. *Tellus*. II: 814-819.
- Schmitz, W.J. Jr. y L. Richardson. 1990. On the sources of the Florida Current. *Deep Sea Research*. 38: S379-S409.
- Schmitz, W. Jr. 1995. On the Interbasin-Scale Thermohaline Circulation. *Reviews of Geophysics*. 33: 151-173.
- Sheinbaum, J., J. Candela, A. Badan y J. Ochoa. 2002. Flow structure and transports in the Yucatán Channel. *Geophysical research Letters*. (en prensa).
- Sturges, W., J. C. Evans, S. Welsh y W. Holland. 1993. Separation of warm-core rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 23: 250-268.
- Tomzak, M. y S. Godfrey. 1994. *Regional Oceanography: An Introduction*, Pergamon Press, London, England. 420 pp.
- Vukovich, F. M., B. Crissman, M. Bushnell y W. King. 1979. Some aspects of the oceanography of the Gulf of Mexico using satellite and in situ data. *Journal of Geophysical Research*. 84: 7749-7760.
- Weatherly, G. L. 1972. A study of the bottom boundary layer of the Florida Current. *Journal of Physical Oceanography*. 2: 54-72.
- Wilson, W.D. y W.E. Johns. 1996. Velocity structure and transport in the Windward Islands Passages. *Deep Sea Research*. 44: 487-520.
- Wimbush, M. y W. Munk. 1970. The benthic boundary layer. *The Sea*. Vol. 4: 731-758.

APÉNDICE A

En el presente Apéndice, se presenta un esquema de la batimetría del umbral del Canal de Yucatán, en el cual se muestra una elevación ubicada entre los 85.3° W y los 85.6° W, aproximadamente.

