

023525



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

“ANÁLISIS DE LA CORRIENTE DEL LAZO DEL
GOLFO DE MEXICO MEDIANTE IMAGENES
DE SATELITE DE 1981 A 1990.”



TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
OCEANOLOGO
PRESENTA:
RAUL MORENO DE LA TORRE.

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA,

OCTUBRE DE 1995.

BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA U.A.B.C.

**“ANALISIS DE LA CORRIENTE DEL LAZO DEL
GOLFO DE MEXICO MEDIANTE IMAGENES
DE SATELITE DE 1981 A 1990.”**

**T E S I S
QUE PRESENTA:
RAUL MORENO DE LA TORRE.**

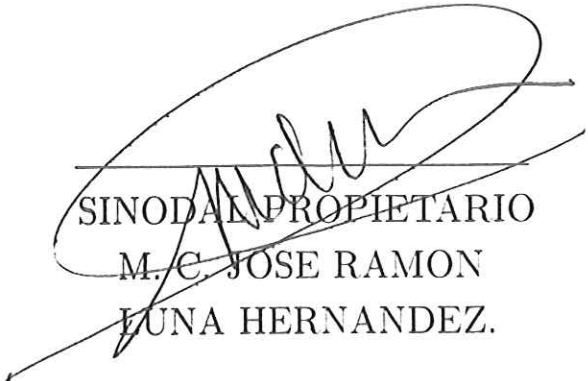
APROBADA POR:



**PRESIDENTE DEL JURADO
DR. EDGAR GERARDO PAVIA LOPEZ.**



**SINODAL PROPIETARIO
DR. JOSE LUIS OCHOA
DE LA TORRE.**



**SINODAL PROPIETARIO
M. C. JOSE RAMON
LUNA HERNANDEZ.**

RESUMEN

Los remolinos oceánicos presentan un fuerte gradiente de temperatura en la proximidad de una frontera, esta es un borde que separa al agua que lo conforma del agua que lo rodea. La importancia de los remolinos anticiclónicos de agua calida (RAC) reside en su capacidad de transporte. En el Golfo de México (GM), que es un mar semicerrado con sólo dos canales de comunicación, estos RAC aunados a la Corriente del Lazo (CL), son la característica más importante de la circulación general.

Conocer la temperatura superficial del mar (TSM), es útil para estudiar la interacción océano-atmósfera y la circulación superficial. Cuando las condiciones atmosféricas lo permiten, las imágenes de satélite obtenidas mediante el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) utilizadas en este estudio determinan la TSM con una precisión de 0.5° C, con esto es posible detectar los RAC.

Existe una serie de imágenes de la TSM tomadas semanalmente en el GM durante 9 años. Se eligió el área de la CL de donde usualmente se desprenden los remolinos. Se tiene la matriz cuadrada de los valores de la TSM en esa área; con estos valores se obtiene la media y la varianza de la temperatura de cada imagen. En este trabajo, se busca una posible relación entre el comportamiento de dichos parámetros estadísticos y el desprendimiento y migración de los RAC de la CL.

Se analizan tres casos, uno es el caso en donde un RAC es desprendido y migra, en otro caso el RAC desprendido es absorbido por la CL. El tercer caso es un promedio de cuatro eventos en los que no hay desprendimiento de remolino.

Los parámetros estadísticos si reflejan la variación térmica anual conocida, pero no presentan relación alguna con el desprendimiento y/o migración de los RAC.

El no haber hallado una relación entre el comportamiento de los parámetros estadísticos (media y varianza) de la TSM y la evolución de los RAC puede deberse a que no existe tal relación, o bien, si la hay, pero el tamaño y/o ubicación del área de estudio son inadecuados. En cualquier caso, es conveniente poder combinar las imágenes de satélite con la información obtenida de los lances hidrográficos.

DEDICATORIA

A mis queridos padres, quienes siempre nos han sabido dar lo mejor de sí y que tanto han luchado por sacarnos adelante. Por todo lo que significan en mi vida. Los quiero mucho, admiro y respeto. Siempre me han apoyado y siempre se los agradeceré.

Gracias por todo Papá. Te quiero mucho.

Gracias Mamá porque nunca dejaste de creer en mí.

A mis hermanas y hermanos que tanto quiero y que me han dado la mano en los momentos difíciles y el corazón siempre.

A Mari, por tu entereza y tolerancia. A mis sobrinas y sobrinos, por ser alegría y esperanza. A mis tíos(as), primos(as) y cuñados(as).

A la familia Tejeda Rodríguez, por la mano franca y la sonrisa amistosa.

A mis amigos Armando Medina, Jerónimo Roa, Federico Sada y todos los demás camaradas.

Por supuesto, a ti mi amor por todo lo que hemos compartido. Sabes que te amo y lo que significas para mí. Dania, gracias por ser quien eres y por todo tu amor.

DEDICATORIA ESPECIAL

"IN MEMORIAN"

Carlos Eduardo Moreno de la Torre

13 de sep de 1957 – 26 de nov de 1993

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Edgar Pavía por haber aceptado dirigirme en este trabajo, por su paciencia infinita, por todas las enseñanzas que me transmitió y por sus acertados consejos.

A mis sinodales: Dr. José Luis Ochoa por todo el apoyo que me brindó y por sus valiosas críticas y sugerencias, y M. C. Ramón Luna por su ayuda en la realización de esta tesis.

Al M. C. Pedro Osuna por todo el tiempo y el esfuerzo que dedicó para ayudarme a realizar este trabajo. Gracias Pedro.

Agradezco a la UABC y a todos mis profesores por la formación profesional que me han dado, así como a toda aquella persona de quien algo he aprendido o que en algo me ha ayudado. Gracias.

Agradezco al CICESE la beca tesis que me otorgó, así como al CONACyT el apoyo económico que me brindó por medio de los proyectos No. 1002-T9111 (“Corrientes y Remolinos en el Golfo de México y Mar Caribe”) y 4919-E9406.

Al Jet Propulsion Laboratory de la NASA Ocean Data System por proporcionar las imágenes de satélite en base a las cuales se realizó este trabajo.

INDICE

	Página
LISTA DE TABLAS	<i>ii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>iii</i>
1.- INTRODUCCION	1
1.1.- MOTIVACION DEL ESTUDIO	1
1.2.- CIRCULACION EN EL GOLFO DE MEXICO	2
1.3.- CARACTERISTICAS DE LOS REMOLINOS GEOSTROFICOS	6
1.4.- PERCEPCION REMOTA DE LOS REMOLINOS GEOSTROFICOS	10
1.5.- OBJETIVO	13
2.- METODOLOGIA	14
2.1.- DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	14
2.2.- DESCRIPCION DE LOS DATOS	16
2.3.- METODO	22
3.- RESULTADOS	29
4.- DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	34
5.- LITERATURA CITADA	39

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
I Relación de las imágenes infrarrojas de satélite de la TSM observadas en este estudio (en días julianos). Los primeros dos dígitos indican el año y los últimos tres, el día consecutivo	18
II Características espectrales de los sensores remotos AVHRR y AVHRR/2	19
III Relación de las imágenes de satélite de la temperatura superficial del GM caracterizadas por sus parámetros estadísticos básicos: media y varianza (en días julianos, similar a la tabla I) ...	23

LISTA DE FIGURAS

(continuación)

Figura	Página
inviernos restantes (1984, 1987, 1988 y 1990) ...	31
8 Varianza de la temperatura contra tiempo en los inviernos de 1986, 1989 y la media del resto de los inviernos. La simbología de las líneas es similar a la figura 5	32

I INTRODUCCION

1.- Motivación del estudio

Determinar la temperatura superficial del mar (TSM) puede ayudarnos a estudiar el océano y la atmósfera. La estructura termal de la superficie marina juega un papel crítico al regular en buena parte al clima. Además, el conocimiento de la TSM es útil para verificar los resultados de los modelos de circulación general (Chahine, 1980; McClain *et al.*, 1985).

En particular, existe un gran interés por el estudio de las variaciones de la TSM debido a su fuerte impacto sobre las condiciones ambientales en las regiones costeras y continentales de Norteamérica (Namias, 1970; Herrera-Cervantes y Parés-Sierra, 1994).

Los fenómenos dinámicos más importantes en la circulación del Golfo de México (GM), son la Corriente del Lazo (CL) (Kindle, 1986) y los grandes remolinos anticiclónicos de agua cálida (RAC) que de ella se desprenden (Behringer *et al.*, 1977; Vukovich y Crissman, 1986; Sturges, 1994).

Tales remolinos anticiclónicos no solo son muy importantes en el equilibrio térmico y salino en el Oeste del GM, sino que también parecen ser el factor dominante en el balance de momentum (Ichiye,

1962; Elliot, 1982; Brooks, 1984; Kirwan *et al.*, 1984a; Lewis y Kirwan, 1985; Lewis *et al.*, 1989).

Las imágenes de los satélites permiten un mayor estudio de las características superficiales dinámicas del océano (Njoku *et al.*, 1985). Si el estado del tiempo es adecuado, se pueden obtener imágenes en infrarrojo de la TSM, en las que se observen claramente la CL y los RAC. Utilizando estas imágenes tal vez sea posible caracterizar estadísticamente las condiciones térmicas superficiales de la CL y de los RAC en un momento dado. Quizá la caracterización tenga un patrón de comportamiento que pueda relacionarse a su vez, al comportamiento de estos fenómenos físicos. En esta tesis se intenta encontrar dicho patrón, para inferir a través de este, el futuro desarrollo del meandro de la CL y el desprendimiento de un RAC.

2.- Circulación en el Golfo de México

La circulación oceánica en el GM, notable por su variabilidad e intensidad, es dominada por procesos de inestabilidad tanto barotrópicos como baroclínicos (Thompson, 1986).

El GM presenta un patrón de circulación en la parte este muy diferente al de su parte oeste. Las características dominantes de la circulación en la parte Este del GM son la CL (Leipper, 1970:

Molinari y Mayer, 1982; Molinari y Morrison, 1988; Cooper *et al.*, 1990; Sturges, 1992) y la separación de grandes RAC que de ella se desprenden (Sturges, 1994) y migran hacia el oeste hasta llegar a la parte Occidental del GM (Vukovich y Crissman, 1986; Auer, 1987). En la parte Oeste del GM en cambio, Merrell y Morrison (1981), Brooks y Legeckis (1982) y Maul y Herman (1985) encontraron un sistema de dos vórtices acoplados con sentidos opuestos, al que llamaremos par ciclón-anticiclón (PCA). El PCA se compone de un RAC en la parte sur y de un remolino ciclónico en la parte norte, divididos por un frente superficial y subsuperficial.

El patrón general de circulación de la CL es el siguiente: el agua de la CL proviene del Mar Caribe (MC) (Maul, 1974) a través del Estrecho de Yucatán, donde se le llama Corriente de Yucatán (Ichiye *et al.*, 1973) y penetra hacia el Norte del GM una distancia variable (Auer, 1987), desarrollándose un meandro que puede encerrarse en sí mismo y desprender un RAC. Presenta un giro anticiclónico para después salir por el Estrecho de Florida, donde se le conoce como Corriente de Florida (Leipper, 1970; Nowlin, 1972; Nowlin y Hubertz, 1972; Vukovich *et al.*, 1979; Vukovich y Maul, 1985; Kindle, 1986; Thompson, 1986). Se ha observado que la fase de un evento particular de este ciclo presenta variaciones considera-

bles (Molinari y Mayer, 1982; Molinari y Morrison, 1988). El transporte de volumen de la CL es de casi 30 Sv ($1 Sv \equiv 1 \times 10^6 m^3 s^{-1}$) (Nowlin, 1972; Behringer *et al.*, 1977; Thompson, 1986).

Según Leipper (1970) aunque la CL retiene sus características básicas a lo largo de las líneas de flujo, es altamente variable en posición y volumen, estas variaciones bien pueden tener un efecto significativo en una parte del Océano Atlántico Norte. La trayectoria e intensidad de la CL varían grandemente estacional y anualmente. La causa de tales variaciones es sólo vagamente conocida y se considera principalmente relacionada con las condiciones iniciales en el Estrecho de Yucatán (vorticidad, distribución de velocidades a través del estrecho, magnitud y dirección de la velocidad, profundidad de la corriente) (Ichiye, 1962; Reid, 1972; Ichiye *et al.*, 1973). Molinari *et al.* (1978) concluyeron que la intrusión estacional de la CL variaba directamente con el transporte geostrófico a través del Canal de Yucatán. Más tarde, Molinari y Morrison (1988) encontraron que la penetración de la CL en el GM, está fuertemente relacionada con la ubicación de la Corriente de Yucatán sobre el Banco de Campeche. Maul (1974) concluyó que la CL tiene un ciclo anual, pero con variaciones interanuales desconocidas e impredecibles y que influye fuertemente en la circulación en la Plataforma

de Florida propiciando el intercambio de agua y por lo tanto de partículas y organismos. Según Thompson (1986) la CL puede extenderse hasta cerca del delta del Río Mississippi antes de girar hacia el sur y salir por el Estrecho de Florida. En febrero de 1977. Huh *et al.* (1981) registraron una gran introducción de agua de la CL en la plataforma continental al Oeste de Florida, evento que provocó un impacto significativo en las aguas costeras y de la plataforma.

Merrell y Morrison (1981) encontraron el PCA en la parte Oeste del GM durante la primavera de 1978, el ciclón se ubicó casi en 25° N y 95° W, mientras que el anticiclón se ubicó cerca de 23° N y 95° W. Ambos con escala de giro norte-sur de aproximadamente 225 km y este-oeste mayor que 450 km. Brooks y Legeckis (1982) en abril de 1980 también encontraron el PCA ubicado casi en el mismo sitio. Maul y Herman (1985) identificaron el PCA donde se había reportado. Estudiando la evolución de un RAC en el Oeste del GM, Vukovich y Waddell (1991) también observaron el PCA. Algunos autores sólo mencionan una celda de circulación anticiclónica en la frontera occidental del GM (Nowlin y Mclellan, 1967; Nowlin, 1972; Behringer *et al.*, 1977; Lewis y Kirwan, 1985). Ichiye (1962) sugirió que un RAC desprendido de la CL, podría derivar a través del golfo y mantener una circulación anticiclónica en la parte Oeste del

GM. Basándose en la comparación de datos de salinidad, Schroeder *et al.* (1974) infirieron que el remolino anticiclónico en el Oeste del GM, proviene de la CL. Merrell y Morrison (1981) y Cooper *et al.* (1990) también encontraron similitudes en la salinidad que apoyan la suposición de Ichiye (1962). Portilla-Casillas (1988) reporta que logró medir la dilución progresiva del núcleo de dos RAC debido al mezclamiento vertical descendente. También se ha observado que los RAC desprendidos de la CL, presentan una clara tendencia a migrar hacia el Oeste del GM (Thompson, 1986; Vukovich y Crissman, 1986; Auer, 1987; Sturges *et al.*, 1993).

3.- Características de los remolinos geostróficos

Según Richardson *et al.* (1979), un remolino geostrófico es un fenómeno energético en el cual existe un fuerte contraste en las propiedades del agua. Csanady (1979) enfatiza que existe una diferencia significativa en la temperatura y salinidad del agua que conforma a un remolino geostrófico y el agua que lo rodea. Pavía-López y Cushman-Roisin (1990) apuntan que existe un fuerte gradiente de temperatura y densidad en la horizontal, especialmente en el filo o límite externo. Estos remolinos oceánicos, tienen una escala horizontal del orden de cientos de kilómetros. Por su parte, Robinson (1983) señala que la generación, propagación y destrucción de los

remolinos son algunos de los fenómenos físicos más importantes en el océano y están siendo objeto de difíciles y vigorosos esfuerzos de investigación que requieren de la cooperación internacional para poder ser llevados a cabo.

Ahora se reconoce que los remolinos de mesoescala son de interés e importancia tanto para los químicos y biólogos marinos como para los oceanógrafos físicos y los meteorólogos. Estudiar a estos remolinos como un fluido geofísico dinámico es difícil y su relativamente pequeña escala y larga permanencia se combinan para hacer que observaciones estadísticamente significativas requieran series de tiempo muy largas y por lo tanto costosas (Simpson, 1983).

Las corrientes y remolinos geostróficos son energéticamente dominantes y tienen gran capacidad de transporte y de mezcla. Así, el conocimiento de la física de estos fenómenos tiene importantes implicaciones en la oceanografía biológica, química y geológica; para las modernas ciencias oceánicas interdisciplinarias y para actividades prácticas en el mar incluyendo explotación y manejo del medio ambiente marino y sus recursos (Robinson, 1983).

La escala horizontal de los RAC está dada por el orden de magnitud del radio. Para los RAC del GM, algunos valores típicos del radio reportados son: 50-150 *km* (Vukovich y Maul, 1985); 75-

200 *km* (Vukovich, 1988a); 100–250 *km* (Kindle, 1986); Auer (1987) promedió 13 remolinos y encontró un valor de 111 *km*: 125–200 *km* (Vukovich, 1988b); mayores que 125 *km* (Vukovich *et al.*, 1979); 150 *km* (Elliot, 1982; Lewis *et al.*, 1989); 150–200 *km* (Vukovich y Crissman, 1986); mayores que 150 *km* (Thompson, 1986); 175 *km* (Vukovich y Waddell, 1991) y 180 *km* (Kirwan *et al.*, 1984b).

Las velocidades angulares observadas son del orden de 50–70 $cm\ s^{-1}$ a una distancia de 50–80 *km* del centro del remolino y de 60 a 90 $cm\ s^{-1}$ a un radio de 60 a 100 *km* (Lewis *et al.*, 1989), las cuales se asemejan a la reportada por Lewis y Kirwan (1987) de 80 $cm\ s^{-1}$ a un radio de 90 *km*. Kirwan *et al.* (1984a) reportaron que la rapidez es del orden de 50 $cm\ s^{-1}$. Kirwan *et al.* (1984b) reportan 40–75 $cm\ s^{-1}$. Elliot (1982) cita una velocidad azimutal máxima de 88 $cm\ s^{-1}$ derivada de los calculos geostróficos de Nowlin y Hubertz (1972). Cooper *et al.* (1990) observaron simultáneamente dos remolinos, uno de ellos con 200 *km* de diámetro y velocidades angulares máximas de casi 1 $m\ s^{-1}$ a 100 *m* de profundidad y el otro de ellos (recién formado) de 300 *km* de diámetro y velocidades máximas de casi 2 $m\ s^{-1}$ a 100 *m* de profundidad.

La frecuencia con la que los RAC se desprenden de la CL es un parámetro básico de la circulación del GM (Sturges, 1994).

Varios autores han sugerido una periodicidad casi-anual (Behringer *et al.*, 1977; Elliot, 1982; Kindle, 1986) consistente con los resultados obtenidos de un modelo numérico de Hurlburt y Thompson (1980; 1982). Estudios posteriores coinciden en señalar que no existe periodicidad del desprendimiento pues es áltamente variable (Vukovich, 1988b; Maul y Vukovich, 1993) y se reportan valores promedio entre 8–9 meses (Auer, 1987; Maul *et al.*, 1985; Sturges, 1992) y 10–11 meses (Maul y Vukovich, 1993; Vukovich, 1988b). En un estudio más reciente, Sturges (1994) utilizando 20 años de datos encontró dos modos primarios: uno con periodo de 8–9 meses y otro con periodo de 13–14 meses. Los rangos reportados son de 4–16 meses (Auer, 1987); 6–17 meses (Sturges, 1994; Maul y Vukovich, 1993; Vukovich, 1988b) y 8–17 meses (Behringer *et al.*, 1977; Molinari *et al.*, 1978; Vukovich *et al.*, 1979). Mientras Auer (1987) argumenta que no hay una preferencia estacional en los desprendimientos, Vukovich (1988b) opina que la separación ocurre más frecuentemente en el periodo de invierno.

Una vez que la CL desprende un RAC, este migra hacia el oeste (Cochrane, 1972; Thompson, 1986) llegando hasta la plataforma continental en la parte Occidental del GM (Molinari *et al.*, 1978; Kirwan *et al.*, 1984a; Lewis y Kirwan, 1987). Vukovich y Crissman

(1986), usando 12 años de datos, hallaron tres trayectorias características de los remolinos: la vía norte, la vía a medio golfo y la vía por el suroeste del golfo. Observaron que independientemente de la vía seguida por los remolinos, estos terminan en la porción noroeste del golfo (el área definida de 25° N a 28° N y de 93° W a 96° W). Calcularon además que una vez desprendido de la CL, el área superficial de un remolino decrece casi al 55 % de su tamaño inicial en aproximadamente 150 días y a cerca del 31 % de su tamaño inicial en casi 300 días.

Los valores de la rapidez promedio del desplazamiento de los RAC, reportados por distintos autores, igualmente presentan variaciones. Se han reportado, por ejemplo: 2.1 km d^{-1} (Elliot, 1982); casi 2.6 km d^{-1} (Kindle, 1986); 5 km d^{-1} (Vukovich y Crissman, 1986); alrededor de 6 km d^{-1} (Cooper *et al.*, 1990) y 6.2 km d^{-1} (Auer, 1987). En cuanto a los rangos, los valores reportados son: $1\text{--}5 \text{ km d}^{-1}$ (Vukovich, 1988b); $1\text{--}8 \text{ km d}^{-1}$ (Vukovich y Crissman, 1986); $2.2\text{--}4.9 \text{ km d}^{-1}$ (Elliot, 1982); $2.6\text{--}7 \text{ km d}^{-1}$ (Lewis *et al.*, 1989) y $4.5\text{--}8.7 \text{ km d}^{-1}$ (Kirwan *et al.*, 1984b).

4.- Percepción remota de remolinos geostroficados

La TSM puede ser medida por radiómetros de infrarrojo montados en satélites. Esta es la técnica de percepción remota oceánica

con el más amplio impacto en la oceanografía (Robinson, 1985).

En el análisis de la TSM medida así, es necesario considerar las interferencias atmosféricas. En las bandas infrarrojas de interés (3–14 μm), la atmósfera presenta principalmente absorción y re-emisión de la radiación que recibe dependiendo de las longitudes de onda. En suma, los efectos atmosféricos reducen la radiación recibida por el sensor que, por lo tanto, mide una temperatura menor a la real, lo que en algunos casos se puede rectificar aplicando una corrección por efectos atmosféricos (Robinson, 1985).

El entendimiento y parametrizado de los remolinos geostroficados requieren observaciones repetidas de grandes áreas del océano bajo condiciones muy diferentes, con una resolución espacial del orden de decenas de kilómetros (Stewart, 1985). De ahí que las observaciones del océano realizadas desde un satélite a través de sensores remotos, sean particularmente apropiadas para el estudio de fenómenos de mesoescala (Robinson, 1983; Njoku *et al.*, 1985; Stewart, 1985). Específicamente, al analizar las características dinámicas, es común utilizar imágenes de infrarrojo en donde se muestran estructuras frontales de mesoescala tales como los filamentos de remolinos geostroficados (Vukovich *et al.*, 1979; Robinson, 1985).

La percepción remota pasiva en las longitudes de onda del

infrarrojo ha impulsado muchas investigaciones desde el inicio de la década de los años cincuenta (Maul, 1985). A partir de 1978, se han realizado considerables esfuerzos para mejorar la estimación de la TSM obtenida por sensores remotos desde satélite (Bernstein y Chelton, 1985).

5.- Objetivo

Determinar si es posible pronosticar, a través de una caracterización estadística de los patrones de la TSM obtenidos de imágenes de satélite, el desprendimiento de un RAC de la Corriente del Lazo del Golfo de México.

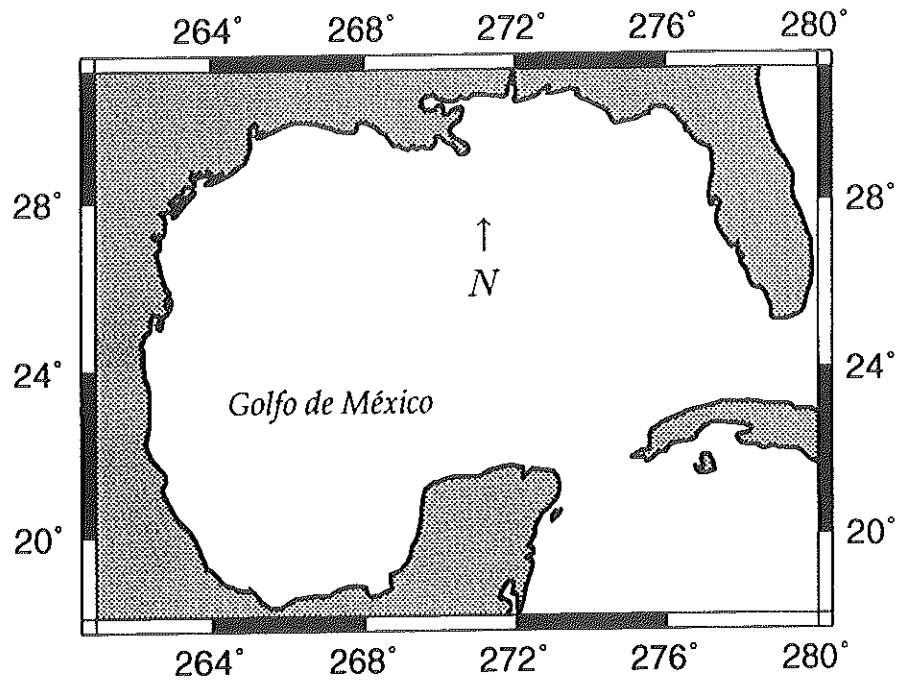


Figura 1.- Golfo de México.

tres años y encontraron un flujo persistente hacia el sur. Similarmente, Hansen y Molinari (1979) en dos ocasiones midieron, debajo del nivel de 1 000 *m*, un flujo hacia el sur, en base al cual calcularon un transporte hacia afuera del GM de entre 1.7 y 2.8 *Sv*.

El Estrecho de Florida presenta una profundidad máxima de casi 800 *m* (Schroeder *et al.*, 1974; Hofmann y Worley, 1986). El volumen que en promedio transporta a través de él es de 30 *Sv* hacia afuera del GM, sin existir entrada significativa (Niiler y Richardson, 1973; Hofmann y Worley, 1986; Auer, 1987; Schott *et al.*, 1988).

2.- Descripción de los datos

Se tiene un conjunto de imágenes de la temperatura superficial del GM (ver figura 2), tomados semanalmente desde satélite (serie NOAA-N), utilizando alternativamente el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) y el AVHRR/2. Esta serie de casi 9 años (ver tabla I), está integrada por imágenes semanales consecutivas de noviembre de 1981 a junio de 1990 (en días julianos), faltando los meses de enero, febrero y marzo de 1982.

Algunas características de los satélites NOAA-6 y NOAA-7 según Robinson (1985) se mencionan a continuación.

El NOAA-6, lanzado el 27 de junio de 1979, tiene una órbita polar sincrónica al sol alrededor de la tierra a 815 *km* de altura, porta el AVHRR y tiene un periodo de 101 minutos.

El NOAA-7, lanzado el 23 de junio de 1981, presenta una órbita similar a la del NOAA-6, pero su altura orbital es de 860 *km* y su periodo es de 102.3 minutos. Utiliza el AVHRR/2.

Por su parte, los sensores de percepción remota AVHRR y AVHRR/2 presentan 4 y 5 bandas espectrales respectivamente (ver tabla II), siendo esta la única diferencia entre ellos, razón por la cual lo que en adelante se diga para el AVHRR deberá entenderse para ambos sensores.

↑
N

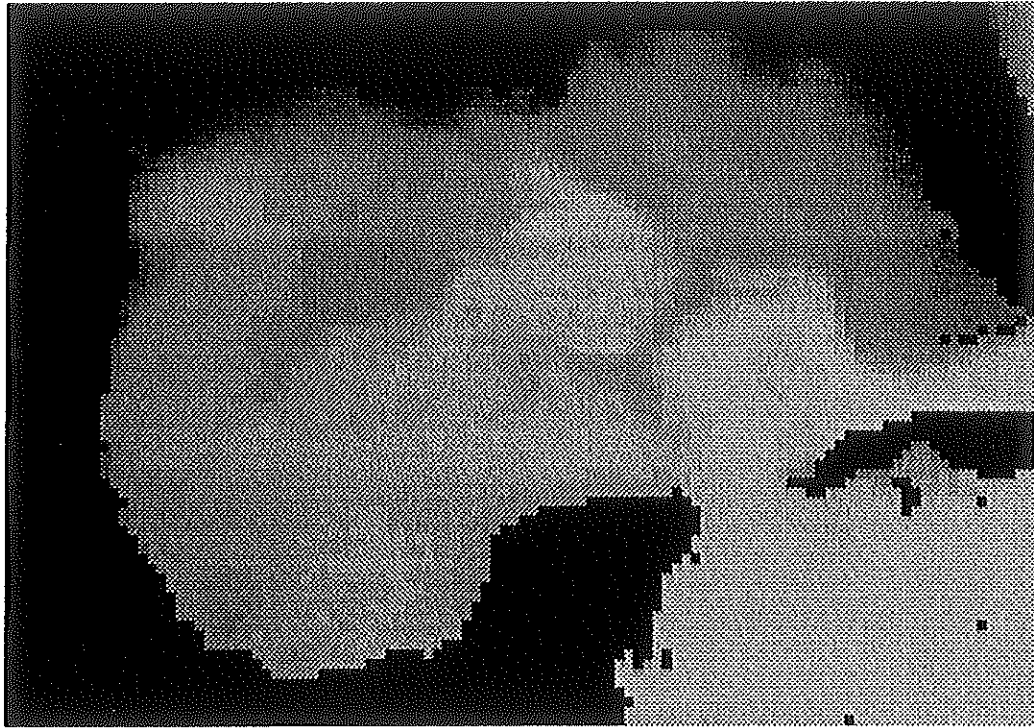


Figura 2.- Imagen de satélite de la temperatura superficial del Golfo de México. Registrada el 15 de enero de 1986 (corresponde al día juliano 86015). Los tonos más claros representan las aguas más cálidas, mientras que los tonos menos claros indican aguas frías. Las áreas terrestres están representadas por el color negro.

Tabla I.- Relación de las imágenes infrarrojas de satélite de la TSM observadas en este estudio (en días julianos). Los primeros dos dígitos indican el año y los últimos tres, el día consecutivo.

81308	82363	83334	84312	85275	86246	87245	88230	89200
81315	83005	83341	84318	85282	86253	87252	88237	89208
81321	83012	83348	84326	85289	86260	87259	88244	89214
81329	83019	84004	84333	85296	86267	87266	88251	89221
81336	83026	84011	84340	85302	86274	87273	88258	89227
81343	83033	84018	84346	85310	86281	87280	88265	89235
81350	83040	84025	84354	85317	86288	87293	88272	89242
81357	83047	84032	84361	85324	86295	87308	88279	89249
81364	83054	84039	85002	85330	86302	87315	88286	89255
82097	83061	84046	85009	85338	86315	87322	88293	89263
82104	83068	84053	85016	85345	86322	87329	88300	89270
82111	83075	84060	85021	85352	86330	87336	88307	89277
82118	83082	84067	85030	85360	86336	87343	88321	89284
82125	83089	84074	85037	86001	86344	87350	88327	89291
82132	83095	84081	85044	86008	86351	87357	88335	89298
82139	83103	84088	85051	86015	86365	87364	88342	89304
82146	83110	84095	85058	86022	87007	88006	88349	89312
82153	83117	84102	85065	86029	87014	88013	88355	89319
82160	83124	84109	85072	86036	87028	88020	88363	89326
82167	83131	84116	85079	86043	87035	88027	89004	89333
82174	83138	84123	85086	86050	87042	88034	89012	89340
82181	83145	84130	85093	86057	87049	88041	89018	89346
82188	83152	84137	85099	86065	87056	88048	89025	90003
82195	83159	84144	85107	86071	87063	88055	89031	90010
82202	83166	84152	85114	86078	87070	88062	89039	90017
82209	83173	84158	85120	86085	87077	88069	89046	90031
82216	83180	84165	85128	86092	87084	88076	89053	90037
82223	83187	84172	85135	86099	87091	88084	89059	90045
82230	83193	84179	85142	86106	87098	88090	89067	90051
82237	83201	84186	85148	86113	87105	88097	89073	90059
82244	83207	84193	85156	86120	87112	88104	89080	90066
82250	83215	84199	85163	86126	87119	88111	89089	90074
82258	83222	84207	85170	86134	87133	88118	89095	90079
82265	83229	84214	85177	86141	87140	88125	89102	90087
82272	83236	84221	85184	86148	87147	88132	89108	90094
82279	83243	84228	85191	86155	87154	88139	89115	90101
82286	83250	84235	85198	86162	87161	88146	89123	90107
82293	83257	84242	85205	86169	87168	88152	89129	90114
82302	83264	84249	85212	86183	87175	88160	89136	90122
82307	83278	84256	85219	86190	87189	88167	89143	90129
82314	83285	84263	85225	86197	87196	88174	89151	90135
82321	83292	84269	85233	86204	87203	88181	89157	90143
82328	83299	84277	85240	86210	87211	88188	89165	90150
82335	83306	84284	85247	86218	87217	88195	89173	90157
82342	83313	84291	85254	86225	87224	88202	89178	90164
82349	83320	84298	85261	86232	87231	88215	89186	90171
82356	83327	84305	85268	86239	87239	88222	89193	90178

En el diseño de los canales que utiliza el AVHRR, se ha considerado que la atmósfera es opaca a la radiación electromagnética en algunas longitudes de onda, por lo que sólo ciertas longitudes son apropiadas para la detección de dicha radiación (Robinson, 1985).

Tabla II.- Características espectrales de los sensores remotos AVHRR y AVHRR/2 (Maul, 1985; Robinson, 1985).

Canal	AVHRR (μm)	AVHRR/2 (μm)	Nombre común.
1	0.58 – 0.68	0.58 – 0.68	Visible.
2	0.725 – 1.10	0.725 – 1.10	Cercano al infrarrojo.
3	3.55 – 3.93	3.55 – 3.93	Infrarrojo.
4	10.5 – 11.5	10.3 – 11.3	Infrarrojo térmico.
5	canal 4 repite	11.5 – 12.5	Infrarrojo térmico.

El sensor AVHRR tiene una resolución espacial de 1.1 *km* por 1.1 *km* (4 *km* por 4 *km* en el modo de resolución baja) en la dirección del nadir (Bernstein, 1984; Cracknell, 1981; Fleming, 1980; Philippe y Harang, 1982), y una cobertura espacial de 2580 *km* (4000 *km* en el modo de resolución baja) (Robinson, 1985). Sin embargo, en este estudio se utilizaron valores de la TSM con una resolución espacial de 18 *km* por 18 *km* aproximadamente, proporcionados a

la comunidad científica por el JPL de la NASA.

La cobertura global una vez al día, obtenida con el sensor AVHRR montado en el NOAA-6 (Bernstein, 1982). es adecuada para la mayoría de los propósitos, dado que la estructura termal del océano cambia muy poco en 24 horas (Fleming, 1980).

Características tales como la cobertura espacial-temporal y el grado de precisión de los radiómetros utilizados, indican su alta confiabilidad en la determinación de la TSM. De hecho, cuando los datos del AVHRR son manejados correctamente, pueden ser utilizados como un sustituto más adecuado que los reportes de la TSM de barcos de ocasión, en aplicaciones tales como los estudios de variabilidad climática que requieren una precisión de 0.5–1.0° C (Bernstein, 1982; Bernstein y Chelton, 1985). Estos datos de la TSM obtenidos por el AVHRR están siendo ampliamente utilizados en el estudio de los remolinos geostroficos (por ejemplo, Philippe y Harang, 1982; Vukovich, 1988b; Vukovich y Waddell, 1991).

La principal desventaja de la percepción remota desde satélite es que la radiación electromagnética registrada por el sensor debe atravesar la atmósfera, lo que produce diversos efectos atmosféricos cuya suma resulta en una disminución de la temperatura registrada por el sensor con respecto a la emitida por el océano (Bernstein,

1982; Robinson, 1985). Tales efectos atmosféricos no afectan por igual a cada longitud de onda. Además, varían significativamente en espacio y tiempo. Las fuentes principales de error en la medición de la TSM con el AVHRR son la contaminación por nubes y la absorción de la radiación superficial por el vapor de agua atmosférico (Bernstein, 1982; Fleming, 1980; Walton, 1980).

El nivel de incertidumbre de 0.6°C característico de los datos de la TSM obtenidos por el radiómetro AVHRR (Bernstein, 1982), está en función de la interferencia atmosférica y del ruido electrónico en el sistema del radiómetro (Vukovich *et al.*, 1979). El propio radiómetro AVHRR tiene un nivel de ruido de $0.1\text{--}0.2^{\circ}\text{C}$ (Bernstein, 1984; Maul, 1985). El AVHRR puede resolver la TSM con una precisión de 0.5°C y funciona aún mejor al definir gradientes de la TSM (McClain *et al.*, 1985; Njoku *et al.*, 1985; Auer, 1987).

En los análisis de rutina de los datos de la TSM provenientes del AVHRR, se aplica una corrección basada en un promedio de los efectos atmosféricos, lo que elimina la mayor parte del error debido a la atmósfera. Resultando finalmente en un rango de incertidumbre bastante aceptable. Más aún, cuando se analizan frentes oceánicos, no es tan importante realizar correcciones atmosféricas y hasta pueden ser inecesarias (Robinson, 1985).

3.- Método

Los datos de la temperatura superficial del GM, son obtenidos de las imágenes de satélite (serie NOAA-N), tomadas por el sensor AVHRR y arregladas en serie de una por semana durante casi 9 años.

El conjunto de imágenes de satélite (ver tabla I) fué cuidadosamente inspeccionado en forma visual. Se eliminaron las imágenes que presentaron un marcado oscurecimiento de la señal por nubosidad o algún otro efecto atmosférico o técnico (todas las imágenes previas a julio de 1983). Las imágenes clasificadas como adecuadas (ver tabla III) comprenden de julio de 1983 a junio de 1990 (en días julianos de 83187 a 90178).

Dada la gran cantidad de datos puntuales de la TSM que se obtienen, es conveniente trabajar estadísticamente. Las imágenes de la tabla III son caracterizadas por sus parámetros estadísticos básicos: media y varianza. Se analizaron a fin de estudiar el desarrollo del meandro de la CL y el desprendimiento de los remolinos.

Para evitar que los parámetros estadísticos básicos calculados sean contaminados al considerar las bajas temperaturas costeras (aparentemente causadas por fenómenos de surgencias), se obtiene una subimagen (ver figura 3) de cada imagen de la tabla III. Esta nueva área (de 21 a 27° N y de 83 a 89° W, aproximadamente) es

Tabla III.- Relación de imágenes de satélite de la temperatura superficial del GM caracterizadas por sus parámetros estadísticos básicos: media y varianza (en días julianos, similar a la tabla I).

83180	84109	85016	85289	86204	87140	88069	88355	89263
83187	84116	85021	85296	86210	87147	88076	88363	89270
83193	84123	85030	85302	86218	87154	88084	89004	89277
83201	84130	85037	85310	86225	87161	88090	89012	89284
83207	84137	85044	85317	86232	87168	88097	89018	89291
83215	84144	85051	85324	86239	87175	88104	89025	89298
83222	84152	85058	85330	86246	87189	88111	89031	89304
83229	84158	85065	85338	86253	87196	88118	89039	89312
83236	84165	85072	85345	86260	87203	88125	89046	89319
83243	84172	85079	85352	86267	87211	88132	89053	89326
83250	84179	85086	85360	86274	87217	88139	89059	89333
83257	84186	85093	86001	86281	87224	88146	89067	89340
83264	84193	85099	86008	86288	87231	88152	89073	89346
83278	84199	85107	86015	86295	87239	88160	89080	90003
83285	84207	85114	86022	86302	87245	88167	89089	90010
83292	84214	85120	86029	86315	87252	88174	89095	90017
83299	84221	85128	86036	86322	87259	88181	89102	90031
83306	84228	85135	86043	86330	87266	88188	89108	90037
83313	84235	85142	86050	86336	87273	88195	89115	90045
83320	84242	85148	86057	86344	87280	88202	89123	90051
83327	84249	85156	86065	86451	87293	88215	89129	90059
83334	84256	85163	86071	86365	87308	88222	89136	90066
83341	84263	85170	86078	87007	87315	88230	89143	90074
83348	84269	85177	86085	87014	87322	88237	89151	90079
84004	84277	85184	86092	87028	87329	88244	89157	90087
84011	84284	85191	86099	87035	87336	88251	89165	90094
84018	84291	85198	86106	87042	87343	88258	89173	90101
84025	84298	85205	86113	87049	87350	88265	89178	90107
84032	84305	85212	86120	87056	87357	88272	89186	90114
84039	84312	85219	86126	87063	87364	88279	89193	90122
84046	84318	85225	86134	87070	88006	88286	89200	90129
84053	84326	85233	86141	87077	88013	88293	89208	90135
84060	84333	85240	86148	87084	88020	88300	89214	90143
84067	84340	85247	86155	87091	88027	88307	89221	90150
84074	84346	85254	86162	87098	88034	88312	89227	89157
84081	84354	85261	86169	87105	88041	88327	89235	90164
84088	84361	85268	86183	87112	88048	88335	89242	90171
84095	85002	85275	86190	87119	88055	88342	89249	90178
84102	85009	85282	86197	87133	88062	88349	89255	

↑
N

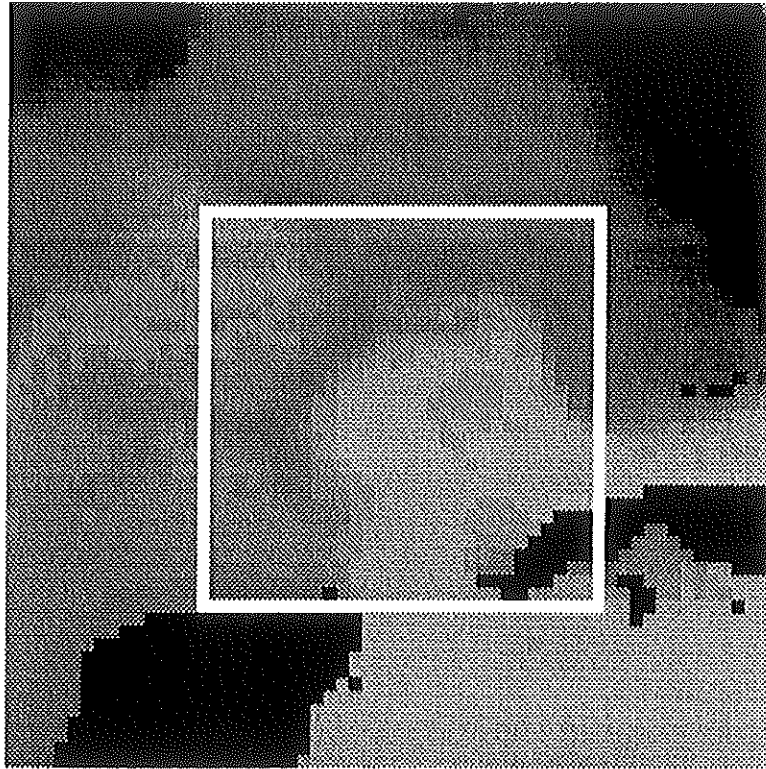


Figura 3.- Subimagen de la figura 2. El cuadrado indica el área comprendida por la matriz de 30×30 datos, utilizada en los cálculos de los parámetros estadísticos básicos. Mide alrededor de 540 km por lado, por lo que tiene una superficie de $290\,000 \text{ km}^2$, aproximadamente.

muy adecuada para observar claramente el desarrollo del meandro y desprendimiento del remolino, puesto que, según Hamilton (1990) los RAC son frecuentemente desprendidos cerca de 89° W. Cada subimagen consta de una matriz de 30 × 30 datos. Eliminando los puntos que representan tierra, tenemos que cada subimagen consta de 865 valores de la temperatura superficial del GM. en base a los cuales se calculan la media y la varianza de cada subimagen.

Para observar con mayor detalle el comportamiento de dichos parámetros estadísticos, se hace una nueva selección de imágenes en donde ocurren tres eventos de especial interés para este estudio. En dos de estos tres casos, se presenta un gran desarrollo del meandro y el desprendimiento de un RAC, pero, el resultado final es diferente. Durante el tercer caso, no se observa remolino alguno.

En el primer caso hay un gran desarrollo del meandro y ocurre el desprendimiento y consiguiente migración de un RAC. corresponde al invierno de 1986. Algunas imágenes de esta serie se observan en la figura 4

En el segundo caso hay un gran desarrollo del meandro y ocurre el desprendimiento de un RAC, pero este no alcanza a migrar. sino que es absorbido por la CL, corresponde al invierno de 1989. La figura 5 presenta algunas imágenes de esta serie.

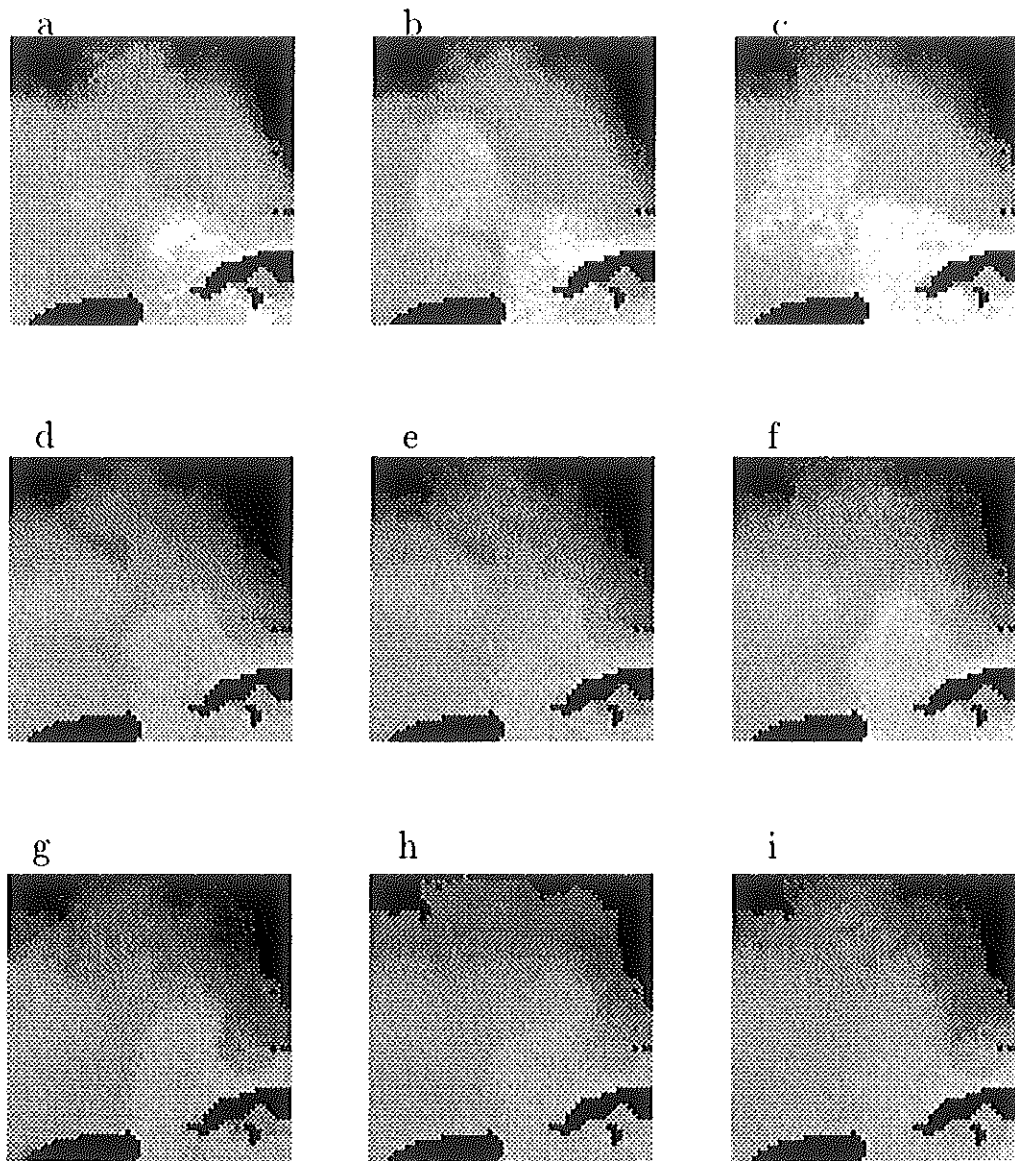


Figura 4.- Secuencia de 9 imágenes semanales (85360 a 86050) del invierno de 1986 donde se observan: el estado inicial (a), el desarrollo del meandro y desprendimiento del remolino (b, c y d), la migración del RAC (e, f, g y h) y nuevamente el estado inicial. La simbología de las tonalidades es similar a la figura 2.

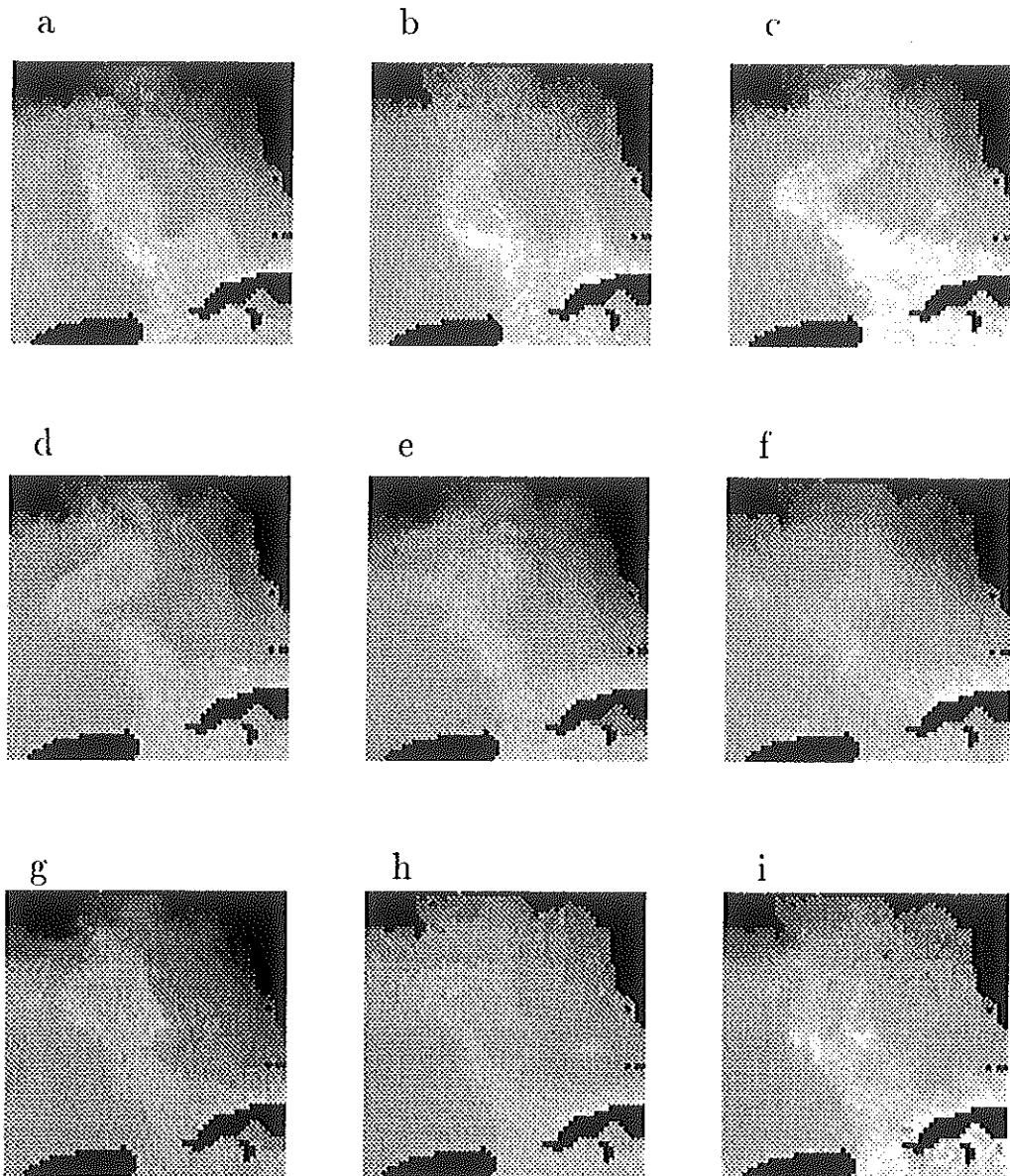


Figura 5.- Secuencia de 9 imágenes semanales (89031 a 89089) del invierno de 1989 donde se observan: el desarrollo y la penetración del meandro (a y b), la formación y el desprendimiento de un RAC (c y d) y su posterior absorción (e, f, g, h e i) por la CL. La simbología de las tonalidades es similar a la figura 2.

En el tercero de estos eventos, se realiza un promedio de los inviernos de 1984, 1987, 1988 y 1990; cuyos comportamientos son muy similares entre sí. En estos cuatro inviernos no se observa el desprendimiento de RAC alguno.

Se caracteriza cada caso por sus parámetros estadísticos básicos: media y varianza.

Se analiza cada caso y se buscan similitudes y diferencias para tratar de encontrar algún comportamiento de los parámetros estadísticos que pueda indicar, a partir del desarrollo del meandro, si ocurrirá o no el desprendimiento de un remolino y si este migra o no.

III RESULTADOS

Los parámetros estadísticos básicos calculados para cada una de las imágenes de la tabla III, en el área indicada en la figura 3. se muestran en la figura 6.

En la figura 6a se observan las variaciones temporales de la temperatura promedio en el área de interés. Es fácilmente apreciable la variación anual. Al inicio de cada año presentado (durante invierno), se observan los valores mínimos cercanos a 23°C , se observa también cómo la temperatura promedio aumenta a una tasa de casi 1°C por mes hasta alcanzar, a mediados o finales del verano, los valores máximos cercanos a 30°C .

Respecto a la varianza de las imágenes analizadas, en la figura 6b puede observarse que los valores más altos corresponden al invierno, mientras que durante el verano disminuye marcadamente la variabilidad de las temperaturas registradas.

El comportamiento de los parámetros estadísticos básicos durante los inviernos de mayor interés (1986 y 1989) y los inviernos en que no se observó un desprendimiento de remolino, se observa detalladamente en las figuras 7 y 8. En la figura 7 se presenta el comportamiento temporal de la temperatura promedio y la figura 8 representa la varianza de la temperatura contra el tiempo.

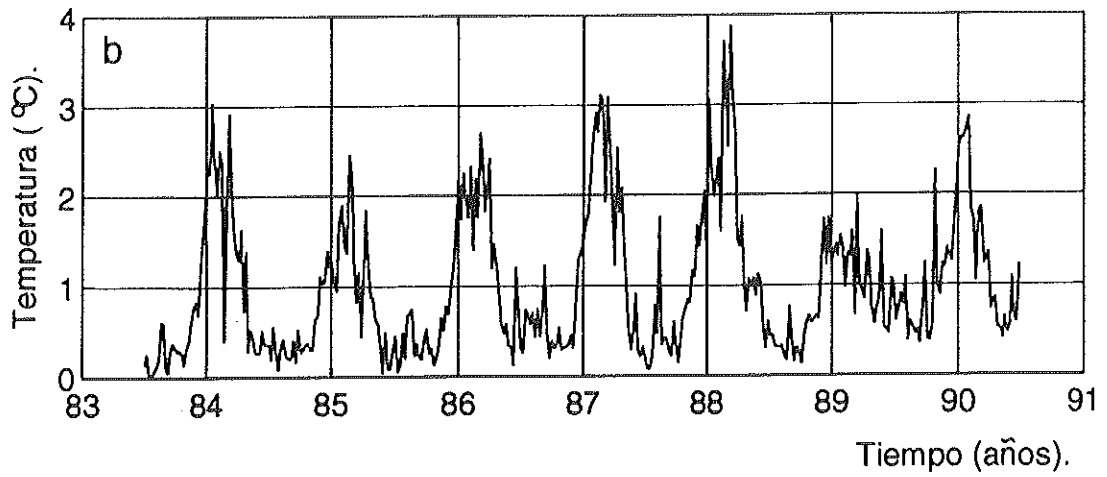
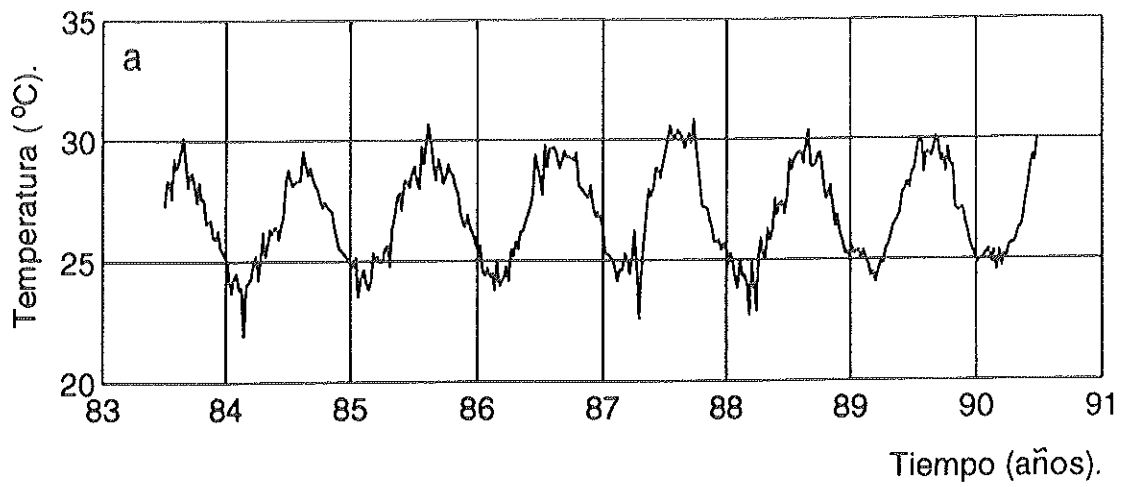
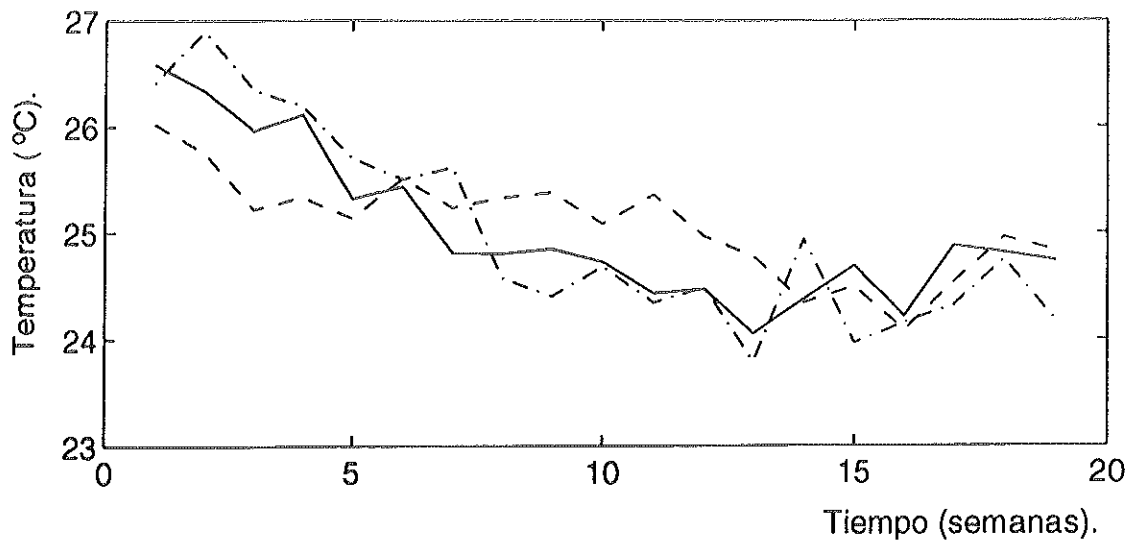


Figura 6.- Parámetros calculados de la temperatura de julio de 1983 a junio de 1990. a).- Promedio y b).- Varianza.



Invierno de 1986 - . - . - . - (si desprende remolino y este migra),
 Invierno de 1989 - - - - (si desprende remolino, pero no migra).
 Media inviernos ————— (media de los inv. sin desprendimiento).

Figura 7.- Temperatura promedio contra tiempo en los eventos de interés. En el invierno de 1986, se desprendió el remolino entre las semanas 7 y 9. En el invierno de 1989, se desprende el remolino entre las semanas 12 y 13, fué absorbido sólo una semana más tarde. La línea continua es el promedio de los inviernos restantes (1984, 1987, 1988 y 1990).

Las variaciones de la temperatura media contra el tiempo, en cada uno de los tres eventos (ver figura 7), *no* presentan un patrón de comportamiento que permita diferenciar un evento de otro.

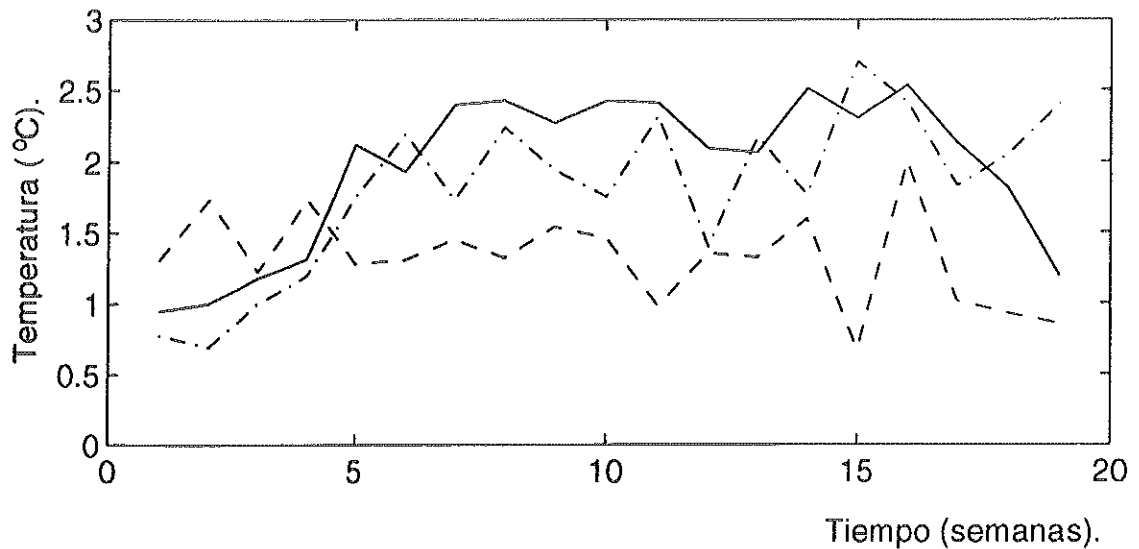


Figura 8.- Varianza de la temperatura contra tiempo en los inviernos de 1986, 1989 y la media del resto de los inviernos. La simbología de las líneas es similar a la figura 7.

La varianza de cada una de las imágenes analizadas (ver figura 8), *tampoco* presenta un comportamiento que pueda asociarse a cada uno de los eventos considerados. Antes bien, al igual que las variaciones de la temperatura promedio, *muestra cada una entre sí un comportamiento similar*. No se observa relación alguna entre el comportamiento de dichos parámetros durante los eventos de interés y el proceso del fenómeno físico que se intenta representar.

En la literatura consultada (Sturges, 1994) se reportan siete eventos de desprendimiento de remolinos en el periodo que incluye este estudio (ver tabla III). En las imágenes seleccionadas se observaron claramente tres de los siete remolinos reportados. El resto no se pudo observar con claridad.

IV DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En base a los datos de la TSM, obtenidos de las imágenes de satélite, se logra representar correctamente la variación térmica anual ya conocida (ver figuras 6a y 6b). Esto es, valores máximos ($29-31^{\circ}\text{C}$) en el verano y valores mínimos ($22-24^{\circ}\text{C}$) en el invierno. Durante la primavera, la temperatura aumenta unos $4-6^{\circ}\text{C}$, mismos que lógicamente descienden durante el otoño. Aunado a esta variación, los valores de la varianza demuestran que en verano la temperatura es más uniforme que en invierno, estación en la cual se presentan mayores contrastes de la TSM en esta zona.

Independientemente de la variación térmica anual, se espera que en el área de interés (ver figura 3), la temperatura promedio presente cierto comportamiento relacionado a la etapa de desarrollo del meandro y desprendimiento (o no) del remolino.

Parece lógico pensar que en el área comprendida por la CL, la temperatura promedio deba aumentar conforme la intrusión de agua cálida es más profunda hacia el GM, mientras se desarrolla el meandro. Así como pensar que una vez separado el remolino cálido y habiendo abandonado el área adyacente a la CL, aunado al hecho de que al desprenderse un RAC, la CL se retrae hacia el

sur, la temperatura promedio en esa zona deba disminuir: proceso que trató de observarse al caracterizar estadísticamente a dichas imágenes.

A partir de la estadística básica de la TSM, *no* fué posible inferir si ocurre o no el desprendimiento de un RAC y si este migra *o no*. Lo anterior se debe en parte, al hecho de que estos RAC pueden ser manifestaciones de fenómenos baroclínicos, tal como lo sugieren los modelajes numéricos de Holland y Lin (1975) y Martínez-López (1993). Aunque la TSM medida desde satélites tiene la ventaja de proporcionar una excelente resolución en espacio y tiempo, e información muy útil para los modelos de circulación, no es muy apropiada para obtener información subsuperficial (Hurlburt, 1986). Es evidente que la TSM no puede sustituir la información que se obtiene de un lance hidrográfico (Tenorio-González, 1985), por lo tanto, es necesario conocer la estructura vertical y no solo la TSM. Según Joyce (1991), a partir del análisis de la TSM, es posible estimar la estructura horizontal: el centro y el diámetro de los remolinos. Pero, parece claro que se necesita información en la vertical si se quiere predecir la formación y desprendimiento de un RAC. De hecho, esta necesidad de más información podría explicar las limitaciones de otros trabajos similares pero mucho más

exhaustivos (por ejemplo Sturges, 1994)

Con la medida de la dispersión utilizada (varianza), también se logra representar correctamente el comportamiento ya observado. Durante invierno se encontraron los mayores gradientes de la temperatura, mientras que los valores mínimos de la varianza se hallaron invariablemente en el verano (ver figura 6b), estación en la cual el calentamiento superficial es más intenso y se debilita el gradiente de la TSM (Auer, 1987; Cooper *et al.*, 1990; Sturges, 1992).

El hecho de que no se haya observado una relación entre el comportamiento de los parámetros estadísticos básicos utilizados (media y varianza) y la evolución y desarrollo del fenómeno físico estudiado, no debe interpretarse como la no existencia de tal relación. Es posible que tal relación si exista y no se haya encontrado por haberse utilizado un tamaño y/o ubicación inadecuada del área usada para el cálculo de tales parámetros. Es muy difícil determinar objetiva y precisamente dónde y cuándo se separa un remolino. Como señala Sturges (1994), uno de los aspectos más frustrantes de estudiar la separación de remolinos de la CL, es que un remolino puede parecer separarse, pero entonces, se le vé unirse a la corriente y separarse nuevamente después de un mes o más tarde aún. Además, la media es sólo una de las diferentes medidas del

valor central, así como la varianza es sólo una de las diferentes medidas de la dispersión. Es posible que al utilizar otros parámetros estadísticos, logre encontrarse la relación buscada.

A pesar de que las imágenes infrarrojas de satélite han demostrado ser muy útiles en el estudio de la TSM (Philippe y Harang, 1982; Tenorio-González, 1985; Vukovich y Waddell, 1991), y esta puede relacionarse a los campos de flujo subsuperficiales (Brooks y Legeckis, 1982), deben de considerarse sus limitaciones (Njoku *et al.*, 1985). Bernstein y Chelton (1985) señalan que los datos de la TSM obtenidos desde satélites, deben manejarse cuidadosamente para evitar malinterpretar los errores de la medición, como una diferencia real de temperaturas. Además, existe una diferencia entre la TSM y la temperatura medida a, digamos, un metro de profundidad, la cual puede ir de 0.1 a 0.5° C, dependiendo de la tasa de transferencia de calor y momentum a través de la interfase océano-atmósfera (Paulson y Simpson, 1981; Bernstein, 1982).

La percepción remota es una tecnología muy apropiada para el estudio de vastas áreas oceánicas, ya que permite, junto con el respaldo de la información obtenida durante los cruceros oceanográficos, llegar a consideraciones sólidas acerca de la estructura y dinámica de los sistemas oceánicos y de atributos y movimientos

superficiales de mares y océanos profundos, por ejemplo, temperaturas y corrientes superficiales (Ortiz-Gallarza *et al.*, 1992). Así pues, es clara la conveniencia de combinar la capacidad de muestreos profundos de instrumentos registrando en el mar, con la vista sinóptica detallada desde un satélite, para obtener una poderosa herramienta combinada de investigación a fin de muestrear adecuadamente el fenómeno en estudio (Robinson, 1985).

V LITERATURA CITADA

- Auer, S. J., 1987. Five-year climatological survey of the Gulf Stream System and its associated rings. **J. Geophys. Res.**, 92(C11):11709–11726.
- Behringer, D. W., R. L. Molinari and J. F. Festa, 1977. The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 82(34):5469–5476.
- Bernstein, R. L., 1982. Sea surface temperature estimation using the NOAA 6 satellite advanced very high resolution radiometer. **J. Geophys. Res.**, 87(C12):9455–9465.
- , 1984. Satellite sea surface temperature determination from microwave and infrared radiometry. *Large-Scale Oceanographic Experiments and Satellites*, C. Gautier and M. Fieux. Eds., NATO ASI series, series c, Mathematical and Physical Sciences; vol. 128:87–98.
- and D. B. Chelton, 1985. Large-scale sea surface temperature variability from satellite and shipboard measurements. **J. Geophys. Res.**, 90(C6):11619–11630.
- Britannica, The New Encyclopedia., 1988. 15th edition. Encyclopedia Britannica, Inc., Chicago, U.S.A., 29 volumes.

- Brooks, D. A., 1984. Current and hydrographic variability in the Northwestern Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 89(C5): 8022-8032.
- and R. V. Legeckis, 1982. A ship and satellite view of hydrographic features in the Western Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 87(C6):4195-4206.
- Chahine, M. T., 1980. Infrared remote sensing of sea surface temperature. *Remote sensing of Atmospheres and Oceans*. A. Deepak, Ed., 411-434.
- Cochrane, J. D., 1972. Separation of an anticyclone and subsequent development in the Loop Current 1969. *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. L. R. A. Capurro and J. L. Reid, Eds., Texas A&M Oceanographic Studies, vol. 2, Gulf Publishing, 91-106.
- Cooper, C., G. Z. Forristal and T. M. Joyce, 1990. Velocity and hydrographic structure of two Gulf of Mexico warm-core rings. **J. Geophys. Res.**, 95(C2):1663-1679.
- Cracknell, A. P., 1981. Background-the physical basis of remote sensing. *Remote sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology*, A. P. Cracknell, Ed., Jhon Wiley & Sons. New York. 27-44.

- Csanady, G. T., 1979. The birth and death of a warm core ring. **J. Geophys. Res.**, 84(C2):777-780.
- Elliot, B. A., 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. **J. Phys. Oceanogr.**, 12(11):1292-1309.
- Fleming, H. E., 1980. Application of the truncated normal distribution technique to the derivation of sea surface temperatures. *Remote sensing of Atmospheres and Oceans*, A. Deepak. Ed., 503-545.
- Hamilton, P., 1990. Deep currents in the Gulf of Mexico. **J. Phys. Oceanogr.**, 20(7):1087-1104.
- Hansen, D. V. and R. L. Molinari, 1979. Deep currents in the Yucatan Strait. **J. Geophys. Res.**, 84(C1):359-362.
- Herrera-Cervantes, H. y A. Parés-Sierra, 1994. Propagación de variaciones de baja frecuencia en la temperatura superficial del Pacífico Nor-oriental. **Geofís. Int.**, 33(3):469-486.
- Hofmann, E. E. and S. J. Worley, 1986. An investigation of the circulation of the Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 91(C12):14221-14236.
- Holland, W. R. and L. B. Ling, 1975. On the generation of mesoscale eddies and their contribution to the oceanic general circulation. I. A preliminary numerical experiment. **J. Phys. Oceanogr.**,

5(4):642-657.

- Huh, O. K., W. J. Wiseman, Jr. and L. J. Rouse, Jr., 1981. Intrusion of Loop Current waters onto the West Florida Continental Shelf. **J. Geophys. Res.**, 86(C5):4186-4192.
- Hurlburt, H. E., 1986. Dynamic transfer of simulated altimeter data into subsurface information by a numerical ocean model. **J. Geophys. Res.**, 91(C2):2372-2400.
- and J. D. Thompson, 1980. A numerical study of Loop Current intrusions and eddy shedding. **J. Phys. Oceanogr.**, 10(10):1611-1651.
- and ———, 1982. The dynamics of the Loop Current and shed eddies in a numerical of the Gulf of Mexico. *Hydrodynamics of Semi-enclosed Seas*. Jacques C. J. Nihoul, Ed., Proceedings of the 13th international Liege Colloquium on ocean hydrodynamics. Amsterdam. Elsevier Scientific Publishing Company. 243-297.
- Ichiye, T., 1962. Circulation and water mass distribution in the Gulf of Mexico. **Geofis. Int.**, 2(3):47-76.
- , H. Kuo and M. R. Carnes, 1973. *Assessment of currents and hydrography of the Eastern Gulf of Mexico*. Department of Oceanography Contribution number 601. College of Geo-

sciences. Texas A&M University.

Joyce, T. M., 1991. Review of U. S. contributions to warm-core rings. **Reviews of Geophysics.**, Supplement. U. S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1987–1990. 610–616.

Kindle, J. C., 1986. Sampling strategies and model assimilation of altimetric data for ocean monitoring and prediction. **J. Geophys. Res.**, 91(C2):2418–2432.

Kirwan, A. D., Jr., W. J. Merrell, Jr., J. K. Lewis and R. E. Whitaker, 1984a. Lagrangian observations of an anticyclonic ring in the Western Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 89(C3):3417–3424.

———, ———, ———, ——— and R. V. Legeckis., 1984b. A model for the analysis of drifter data with an application to a warm core ring in the Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 89(C3):3425–3438.

Leipper, D. F., 1970. A sequence of current patterns in the Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 75(3):637–657.

Lewis, J. K. and A. D. Kirwan, Jr., 1985. Some observations of ring topography and ring-ring interactions in the Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 90(C5):9017–9028.

- and ———, 1987. Genesis of a Gulf of Mexico ring as determined from kinematic analysis. *J. Geophys. Res.*, 92(C1):11727–11740.
- , ——— and G. Z. Forristall, 1989. Evolution of a warm-core ring in the Gulf of Mexico: lagrangian observations. *J. Geophys. Res.*, 94(C6):8163–8178.
- Martínez-López, B., 1993. Circulación barotrópica y dispersión de contaminantes en el Golfo de México. CICESE. Tesis de Maestría en Ciencias. Ensenada, B. C. 100 pgs.
- Maul, G. A., 1974. The Gulf Loop Current. *Marine Environmental Implications of Offshore Drilling Eastern Gulf of Mexico*. Conference/workshops Jan. 31–Feb. 2, 1974., St. Petersburg, Florida. 87–96.
- , 1985. *Introduction to Satellite Oceanography*. Martinus Nijhoff Publishers. The Netherlands. 606 pp.
- and A. Herman, 1985. Mean dynamic topography of the the Gulf of Mexico with application to satellite altimetry. *Mar. Geod.*, 9:27–44.
- and F. M. Vukovich, 1993. The relationship between variations in the Gulf of Mexico Loop Current and Strait of Florida volume transport. *J. Phys. Oceanogr.*, 23:785–796.

- Namias, J., 1970. Macroscale variations in sea-surface temperatures in the North Pacific. **J. Geophys. Res.**, 75(3):565-582.
- Nihoul, J. C. J., 1982. Oceanography of semi-enclosed seas. *Hydrodynamics of Semi-enclosed Seas*. Jacques C. J. Nihoul. Ed., Proceedings of the 13th international Liege Colloquium on ocean hydrodynamics. Amsterdam. Elsevier Scientific Publishing Company. 1-12.
- Niiler, P. P. and W. S. Richardson, 1973. Seasonal variability of the Florida Current. **J. Mar. Res.**, 31(3):144-167.
- Njoku, E. G., T. P. Barnett, R. M. Laurs and A. C. Vastano. 1985. Advances in satellite sea surface temperature measurement and oceanographic applications. **J. Geophys. Res.**, 90(C6):11573-11586.
- Nowlin, W. D., Jr., 1972. Winter circulation patterns and property distributions. *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*, L. R. A. Capurro and J. L. Reid, Eds., Texas A&M Oceanographic Studies, vol. 2. Gulf Publishing, 3-51.
- and H. J. McLellan, 1967. A characterization of the Gulf of Mexico waters in winter. **J. Mar. Res.**, 25:24-59.
- and J. M. Hubertz, 1972. Contrasting summer circulation

- Schroeder, W. W., L. Berern, Jr. and W. D. Nowlin, Jr., 1974. The oceanic waters of the Gulf of Mexico and Yucatan Strait during July 1969. **Bull. Mar. Sci.**, 24(1):1-19.
- Simpson, E. S. W., 1983. *Eddies in Marine Science*. Allan R. Robinson, Ed., Springer-Verlag. Berlin. 609 pp.
- Stewart, R. H., 1985. *Methods of Satellite Oceanography*. University of California Press. Berkeley, U.S.A. 360 pp.
- Sturges, W., 1992. The spectrum of Loop Current variability from gappy data. **J. Phys. Oceanogr.**, 22:1245-1256.
- , 1994. The frequency of ring separations from the Loop Current. **J. Phys. Oceanogr.**, 24:1647-1651.
- , J. L. Evans, S. Welsh and W. Holland, 1993. Separation of warm-core rings in the Gulf of Mexico. **J. Phys. Oceanogr.**, 23:250-268.
- Tenorio González, M. A., 1985. Obtención y procesado de imágenes de satélite para observación de patrones de temperatura superficial en el Golfo de California., Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Memoria del Curso de titulación: Procesos Litorales., Ensenada, B. C. México. 38 pgs.
- Thompson, J. D., 1986. Altimeter data and geoid error in mesoscale ocean prediction: some results from a primitive equation

- model. **J. Geophys. Res.**, 91(C2):2401-2417.
- Vukovich, F. M., 1988a. On the formation of elongated cold perturbations off the Dry Tortugas. **J. Phys. Oceanogr.**, 18(7):1051-1059.
- , 1988b. Loop Current boundary variations. **J. Geophys. Res.**, 93(C12):15585-15591.
- and G. A. Maul, 1985. Cyclonic eddies in the Eastern Gulf of Mexico. **J. Phys. Oceanogr.**, 15:105-117.
- and B. W. Crissman, 1986. Aspects of warm ring in the Gulf of Mexico. **J. Geophys. Res.**, 91(C2):2645-2660.
- and E. Waddell, 1991. Interaction of a warm ring with the western slope in the Gulf of Mexico. **J. Phys. Oceanogr.**, 21(7):1062-1074.
- , B. W. Crissman, M. Bushnell and W. J. King. 1979. Some aspects of the oceanography of the Gulf of Mexico using satellite and *in situ* data. **J. Geophys. Res.**, 84(C12):7749-7768.
- Walton, C., 1980. Deriving sea surface temperatures from TIROS-N data. *Remote sensing of Atmospheres and Oceans*, A. Deepak, Ed., 547-579.