

GOLFO DE MÉXICO

CIRCULACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO

Gulf of Mexico Circulation

Francisco V. Vidal Lorandi, Víctor M. V. Vidal Lorandi, Pedro Francisco Rodríguez Espinosa, Lorenzo Zambrano Salgado, Josué Portilla Casillas, J. Rodolfo Rendón Villalobos y Benjamín Jaimes de la Cruz¹.

RESUMEN

El Golfo de México constituye un recurso natural de inmensa importancia ecológica y económica (Vidal, *et al.*, 1997) para México y el Mundo. Nuestra capacidad para explotarlo racionalmente depende del grado de conocimiento que tengamos de su naturaleza, fundamentalmente de su sistema de circulación, entre otros. En este artículo presentamos un recuento del conocimiento de la circulación del Golfo de México, generado fundamentalmente por observaciones *in-situ* y modelaciones numéricas durante los últimos 20 años. Se destaca la importancia de los vórtices anticiclónicos, con diámetros de hasta 600 km, que se desprenden de la Corriente del Lazo y migran hacia el interior del Golfo hasta impactarse contra su talud occidental, en la generación de: turbulencia geostrofica, la Corriente de Frontera en la margen occidental, corrientes de chorro con velocidades de 32 a 85 cm s⁻¹, intensas surgencias de hasta 15 m día⁻¹, y el mecanismo mediante el cual 30 x 10⁶ m³ s⁻¹ de Agua Subtropical Subyacente, proveniente del Mar Caribe, se transforman en Agua Común del Golfo. Analizamos la calidad de los experimentos numéricos a la luz de las observaciones *in-situ*, y concluimos que la falta de gran cantidad de información oceanográfica y meteorológica veraz para definir con exactitud y precisión las condiciones iniciales y de frontera de las simulaciones continúa siendo el problema más grave para realizar los estudios de validación y verificación de los modelos con confiabilidad. Finalmente, por su importancia científica básica y aplicada, presentamos una discusión actualizada del origen y mecanismo de formación de la Corriente de Frontera, observada y simulada, paralela al talud continental occidental del Golfo de México. Concluimos que la Corriente de Frontera en la región occidental del Golfo de México bien podría ser principalmente generada por la colisión, contra el talud occidental, de vórtices anticiclónicos que se desprenden de la Corriente del Lazo.

Palabras Clave: Golfo de México, circulación, vórtices anticiclónicos, Corriente de Frontera, simulaciones numéricas, vorticidad.

ABSTRACT

The Gulf of Mexico constitutes a natural resource of immense ecological and economic importance for Mexico and the World (Vidal, *et al.*, 1997). Our capacity to exploit it rationally depends on our knowledge of its nature, fundamentally of its circulation system, amongst others. In this article we present a review of our knowledge of the Gulf of Mexico circulation, generated fundamentally by *in-situ* observations and numerical modelling during the last 20 years. We emphasize the importance of anticyclonic vortices, with diameters of up to 600 km, shed by the Loop Current, that migrate toward the interior of the Gulf until they collide against the western shelf break, in the generation of: geostrophic turbulence, the Western Boundary Current on the western margin, jet currents with speeds of 32 to 85 cm s⁻¹, intense upwelling of up to 15 m day⁻¹, and the mechanism by which 30 x 10⁶ m³ s⁻¹ of Subtropical Underwater (SUW), from the Caribbean Sea, are transformed into Gulf Common Water. The quality of the numerical experiments is analyzed in the light of the *in-situ* observations, and we conclude that the lack of a great quantity of truthful oceanographic and meteorological data, needed to accurately and precisely define the initial and boundary conditions of the simulations, continues to be the most serious problem in the conduct of reliable model validation and verification

1. Grupo de Estudios Oceanográficos, Instituto Politécnico Nacional, Av. Reforma 113, Colonia Palmira, Temixco, Morelos C.P. 62490, México.

studies. Finally, because of its basic and applied scientific importance, we present an updated discussion of the origin and formation mechanism of the Western Boundary Current, observed and simulated, parallel to the western continental shelf break of the Gulf of Mexico. We conclude that the Western Boundary Current in the western region of the Gulf of Mexico could well be principally generated by the collision of anticyclonic vortices, shed from the Loop Current, against the western continental shelf break.

Key Words: Gulf of Mexico, circulation, anticyclonic vortices, Western Boundary Current, numerical simulations, vorticity.

Introducción

La circulación es un fenómeno hidrodinámico fundamental a estudiar para lograr un conocimiento adecuado de la naturaleza del Golfo de México. Nuestra base de conocimiento moderno de este fenómeno es el resultado de investigaciones científicas realizadas desde los años treinta a la fecha. La reseña más completa de estos estudios hasta principios de los setentas se publicó en el Volumen 2 de la Texas A&M University Oceanographic Series intitulado "Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico" (Capurro y Reid, 1972). Desde entonces los resultados de los estudios de circulación del Golfo de México aparecen publicados dispersos en la literatura científica. Este artículo constituye un modesto esfuerzo por remediar en parte esta situación, y pretende presentar una revisión y discusión actualizada del conocimiento de algunos de los aspectos de la circulación del Golfo de México. Los temas analizados incluyen las observaciones *in-situ* y modelaciones numéricas durante los últimos 20 años; la importancia de los vórtices anticiclónicos que se desprenden de la Corriente del Lazo en la generación de: turbulencia geostrófica, la Corriente de Frontera, surgencias, corrientes de chorro, y procesos de mezcla y; el origen y mecanismo de formación de la Corriente de Frontera en la margen occidental del Golfo. La calidad de los experimentos numéricos la analizamos a la luz de las observaciones *in-situ*. Finalmente, el lector podrá encontrar información adicional y más detallada sobre la circulación del Golfo de México en la extensa lista de literatura citada que presentamos al final del artículo.

Geomorfología del Golfo de México

El área total del Golfo de México es de $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ y contiene un volumen de agua de $2.3 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Bialek, 1966). Si consideramos una profundidad promedio de 1500 metros, el Golfo de México representa el 60% del Mar Mediterráneo Europeo. La dimensión este-oeste del Golfo es de 1600 km,

esta dimensión representa el 30% del Atlántico a latitudes similares. La región occidental del Golfo tiene una extensión norte-sur de 1300 km, mientras que sus regiones central y oriental promedian 900 km. La región central del Golfo, donde se localiza la Fosa de Sigsbee (23° N , 93° W), tiene una profundidad promedio de 3000 m (Figura 1).

De otra parte, la Zona Económica Exclusiva mexicana del Golfo de México es del orden de $0.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ y representa aproximadamente el 55% de la superficie total del Golfo ($1.64 \times 10^6 \text{ km}^2$). El Golfo de México constituye casi el 30% de los 11,500 km de litoral y el 45% de los $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ que integran la Zona Económica Exclusiva Mexicana.

Observaciones del fenómeno

Hasta hace apenas unos años se pensaba que el fenómeno singular dominante más energético del Golfo de México lo constituía el sistema de Corrientes del Lazo y Yucatán (Capurro y Reid, 1972). Asimismo, se conocía que de este Sistema de Corrientes se desprenden grandes vórtices anticiclónicos, con diámetros de hasta 600 km, aparentemente debido a fenómenos de retroflexión no del todo entendidos (Elliott, 1979, 1982; Lewis y Kirwan, 1985; Sturges, 1993; Vukovich y Crissman, 1986; Vukovich, 1995). Sin embargo, la génesis, comportamiento espacial y temporal, y el efecto de estos giros anticiclónicos sobre la masa central, nor y sudoccidental del Golfo de México quedaban completamente inexplicados (Leipper *et al.*, 1972; Nowlin y Hubertz, 1972). De igual manera, la presencia de giros anticiclónicos en la región noroccidental del Golfo de México está documentada (Figura 2a, b) (Ichiye, 1962; Nowlin y McLellan, 1967; Nowlin *et al.*, 1968; Cochrane, 1972; Vukovich *et al.*, 1979; Elliott, 1982; Vidal *et al.*, 1985a, 1989a, 1989b, 1989c; Vukovich y Crissman, 1986; Vukovich, 1995). Sin embargo, su génesis y características dinámicas y evolutivas no se conocían a profundidad, y la explicación de su presencia en esta región del Golfo quedó irresuelta, aunque se espe-

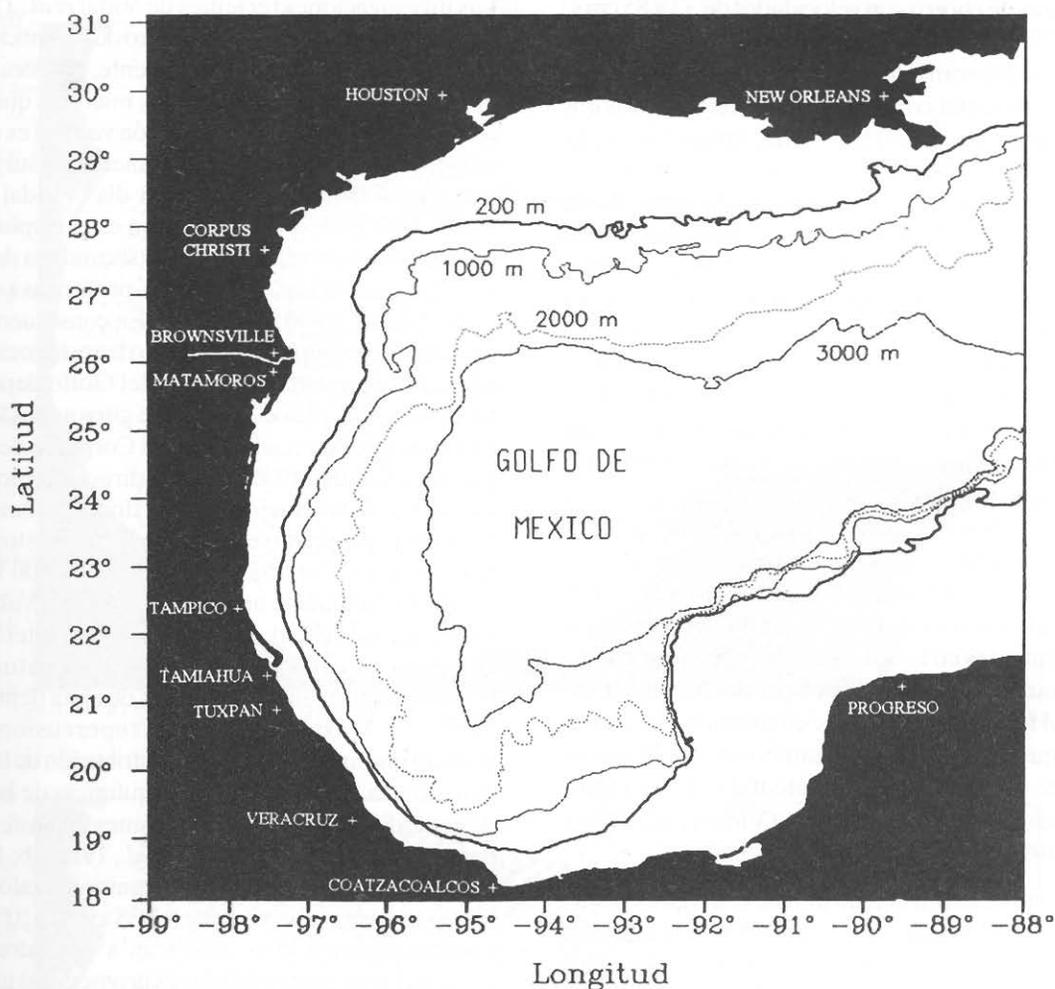


Figura 1. Morfología del Golfo de México.

culaba que provenían de la Corriente del Lazo, y que migraban de este a oeste en el Golfo de México desde su lugar de origen. No fue sino hasta años más tarde que se descubrió que en verdad los giros anticiclónicos observados en las regiones central, nor y sudoccidental del Golfo de México (Figura 2a, b) provenían de la Corriente del Lazo y que migraban al oeste para conservar su vorticidad (Elliot, 1979, 1982). Durante su migración los vórtices anticiclónicos generan en su periferia, mediante la transferencia de cantidad de movimiento angular, vórtices con circulación ciclónica (Vidal *et al.*, 1985b; Vidal *et al.*, 1986a, b; Vukovitch y Crissman, 1986; Vidal *et al.*, 1988a).

El trazador por excelencia de estos vórtices anticiclónicos es precisamente la masa de agua subsuperficial, localizada entre los 100 y 250 m de profundidad, conocida como el Agua Subtropical

Subyacente (SUW) (Elliott, 1982). Esta masa de agua proveniente del Caribe se caracteriza por tener una salinidad de ≥ 36.6 p.s.u., y una temperatura de 22.5 °C (Wust, 1963; Nowlin y McLellan, 1967). Dentro de los vórtices anticiclónicos observados en el Golfo de México existen precisamente salinidades características con estos valores ($36.5 \leq S \text{ p.s.u.} \leq 36.7$), aunque los valores de temperatura decrecen ligeramente hasta $19 \leq T \text{ °C} \leq 21$. En consecuencia, la densidad potencial del Agua Subtropical Subyacente dentro del Golfo es de $25.5 \leq \sigma_{\theta} \leq 26$ (Vidal *et al.*, 1985c; Vidal *et al.*, 1986a, b). Ahora sabemos, por evidencia observacional incontrovertible, que los vórtices anticiclónicos se desprenden de la Corriente del Lazo y migran hacia el oeste al interior del Golfo hasta chocar contra su talud continental occidental, casi siempre a la altura de Tamiagua, generándose intensas

corrientes de chorro con velocidades de 32 a 85 cm s⁻¹ (Vidal *et al.*, 1988a, 1992, 1994c). En la región de choque se generan intensas circulaciones, paralelas al talud continental con dirección norte, mientras que en la convergencia del gran vórtice anticiclón con los ciclones periféricos las circulaciones son corrientes de chorro que meten y sacan inmensos volúmenes de agua (~ 40 Sv) de la plataforma continental al mar profundo y viceversa (Vidal *et al.*, 1994b). Además, las circulaciones ciclónicas observadas en la periferia del vórtice anticiclónico en el talud continental generan a su vez intensas corrientes de chorro paralelas al talud pero con dirección sur (Vidal *et al.*, 1989c, d). Por consiguiente, los vórtices anticiclónicos provenientes de la Corriente del Lazo constituyen el mecanismo primordial mediante el cual ingresan, se dispersan y diluyen las masas de agua del Golfo (Figura 2a, b). La translación de estos giros (~ 6 km día⁻¹), su tiempo de residencia (~ 9-12 meses) y su colisión contra el talud occidental del Golfo de México son determinantes en la distribución de las propiedades fisicoquímicas de las masas de agua desde la superficie hasta el fondo, del campo de circulación y del transporte que controla el intercambio de las masas de agua de la plataforma continental y de la región oceánica del Golfo de México (Vidal *et al.*, 1988a, 1990, 1992, 1994b, c, d).

Por ejemplo, la colisión de uno de estos giros contra el talud occidental del Golfo de México, al este de la Laguna de Tamiahua durante enero de 1984, originó una zona de divergencia de 5 x 10⁴ km², corrientes de chorro paralelas al talud con intensidades de 32 a 85 cm s⁻¹, y la formación de remolinos ciclónicos adyacentes al anticiclón (Vidal *et al.*, 1988a, 1992 y 1994c). Durante estas colisiones los giros anticiclónicos se subdividen, como se muestra en la Figura 3, y pierden aproximadamente una tercera parte (2 x 10⁴ km³) de su volumen total (6 x 10⁴ km³). Mediante este mecanismo los vórtices transfieren movimiento angular a la masa de agua circundante, al norte y sur de las zonas de colisión, formando de esta manera giros ciclónicos, como se muestra en la Figura 4, y nuevas masas de agua, como es el caso del Agua Común del Golfo, derivadas de la mezcla convectiva inducida por estas colisiones (Vidal *et al.*, 1988a, 1992, 1994b, c). Las colisiones de estos giros explican el mecanismo mediante el cual 30 x 10⁶ m³ s⁻¹ de Agua Subtropical Subyacente, proveniente del Mar Caribe, se transforman en Agua Común del Golfo (Vidal *et al.*, 1992, 1994c).

Las investigaciones recientes de Vidal *et al.*, (1990 y 1994b) demuestran que en el centro de los anticiclones la circulación vertical es descendente, provocando el hundimiento de la masa de agua, mientras que en el centro de los ciclones la circulación vertical es ascendente, provocando intensos fenómenos de surgencia con intensidades de hasta 15 m día⁻¹ (Vidal *et al.*, 1987). Este patrón de circulación es el responsable de la alta productividad primaria y secundaria del Golfo y afecta sus masas de agua más profundas (~3740 m, Vidal *et al.*, 1990) (Figura 4). En consecuencia, la circulación profunda y el tiempo de residencia (~ 5 años) de la gran masa de agua del Golfo dependen fundamentalmente del número de giros anticiclónicos que se desprenden cada año de la Corriente del Lazo y de su velocidad (6 km día⁻¹) y dirección (noreste-suroeste) de translación. Hasta donde sabemos la frecuencia promedio con que se forman estos giros anticiclónicos, con diámetros de ~ 200-500 km, es de aproximadamente uno cada 11.1 meses (Vukovich, 1995). La vorticidad de estos giros y su interacción acoplada constituyen un mecanismo natural de bombeo e intercambio de masas de agua dentro del Golfo de México, que tiene repercusiones de primerísima magnitud sobre la distribución de la biota planctónica, propiedades fisicoquímicas de la masa de agua, dispersión de contaminantes y transferencia de energía en el Golfo (Vidal *et al.*, 1986a, b; 1988a; 1989a; 1990 y 1994b). Si comparamos los valores de transporte vertical ascendentes (0.38 a 0.60 x 10⁶ m³ s⁻¹) y descendentes (0.38 a 0.73 x 10⁶ m³ s⁻¹) de estos vórtices con el transporte o descarga promedio al mar del Río Amazonas (0.175 x 10⁶ m³ s⁻¹; Gibbs, 1970), es evidente que los volúmenes de agua que suben y bajan dentro de cualquiera de estos giros son considerables y mayores al volumen que aporta el Río Amazonas al Océano Atlántico (Vidal *et al.*, 1990, 1994b, d).

Este mecanismo natural de bombeo controla los mecanismos de mezcla dentro del Golfo y diluye, en las capas superior, intermedia y profunda, los núcleos de masas de agua, como es el caso del Agua Subtropical Subyacente y del remanente del Agua Antártica Intermedia, entre otros. La dilución de los núcleos de máxima y mínima concentración conlleva a la formación de nuevas masas de agua con características intermedias a la de sus progenitores, como es el caso de la formación del Agua Común del Golfo a partir de la dilución del Agua Subtropical Subyacente (Vidal *et al.*, 1988a, 1992, 1994c) (Figuras 5a, b).

Asimismo, la coexistencia de las surgencias y hundimientos de las masas de agua asociados a los pares y

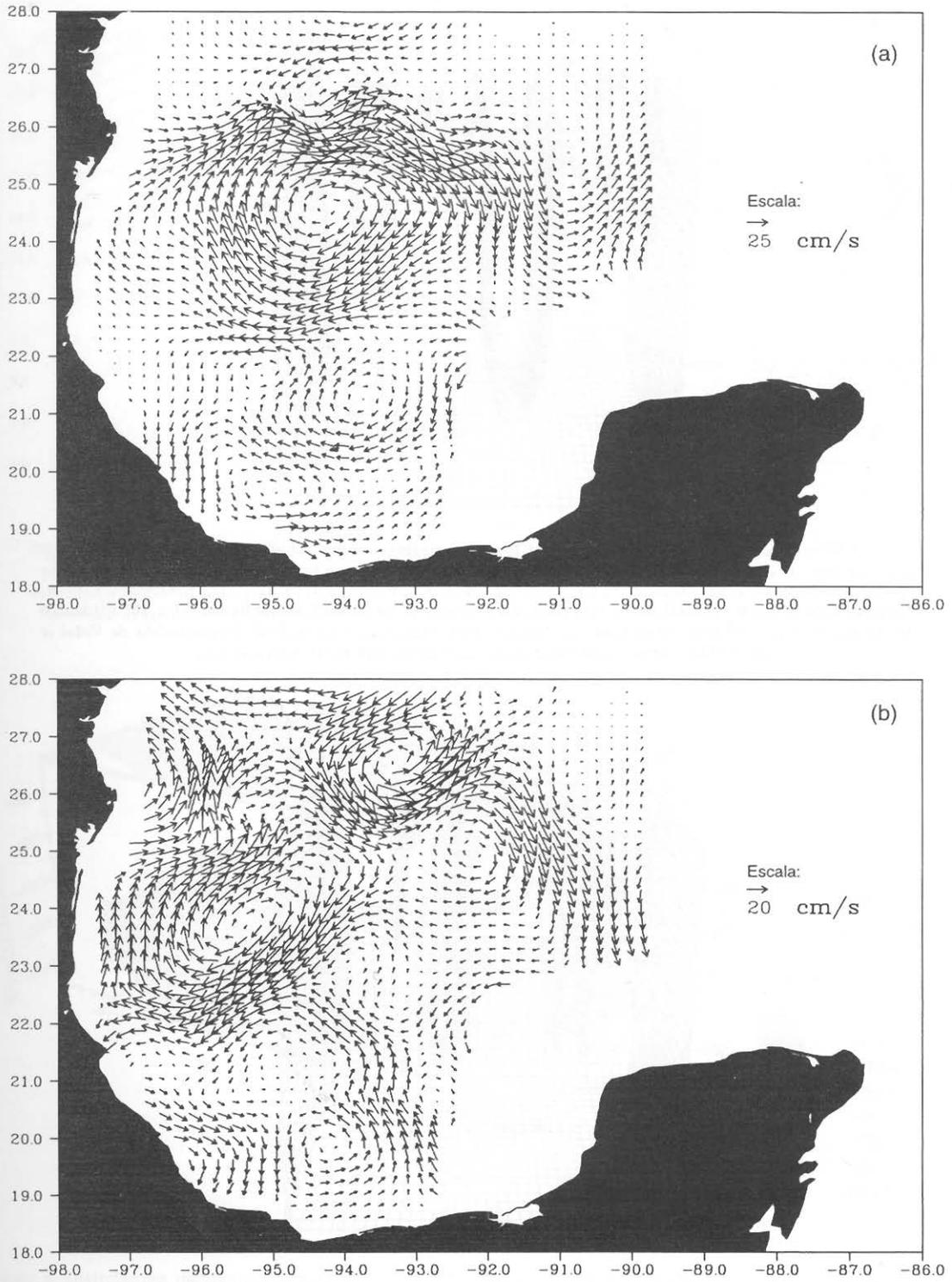


Figura 2. Circulación superficial baroclínica del Golfo de México durante (a) mayo de 1987 y, (b) octubre-noviembre de 1987; (modificada de Vidal, V. M. V. *et al.*, 1989).

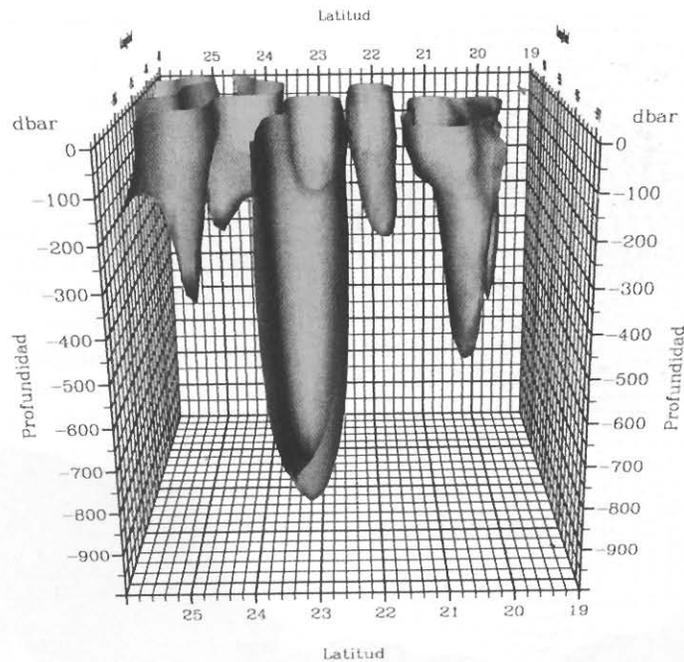


Figura 3. Distribución espacial de la superficie del isonivel de vorticidad anticiclónica ($-1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$) dentro del estrato de 0 a 1000 dbar en el Golfo de México durante julio-agosto de 1985 (reproducida de Vidal *et al.*, 1994d). Proyección vista desde $22^\circ 30' \text{N}$, $97^\circ 00' \text{W}$ hacia el este.

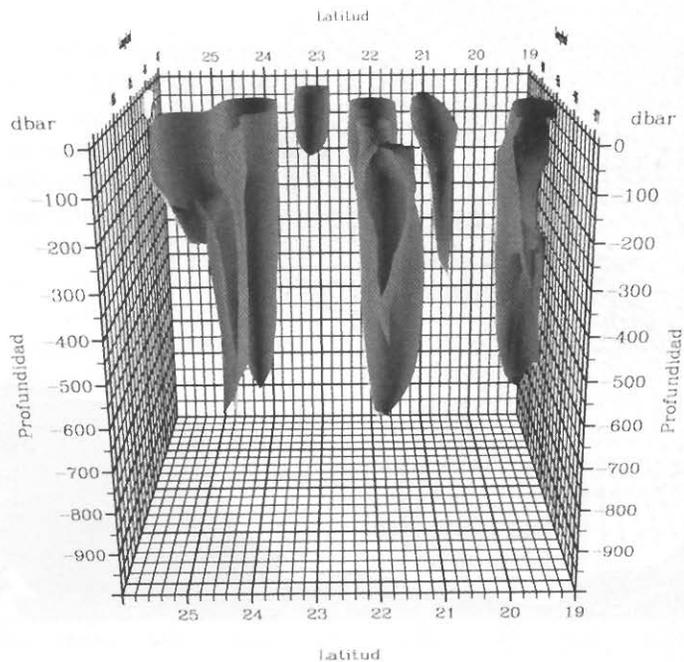


Figura 4. Distribución volumétrica de las circulaciones ciclónicas en el Golfo de México durante julio-agosto de 1985, derivadas de la vorticidad ($0 \text{ a } 6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$) de la superficie del mar referida a 1000 dbar (reproducida de Vidal *et al.*, 1994d). Proyección vista desde $22^\circ 30' \text{N}$, $97^\circ 00' \text{W}$ hacia el este.

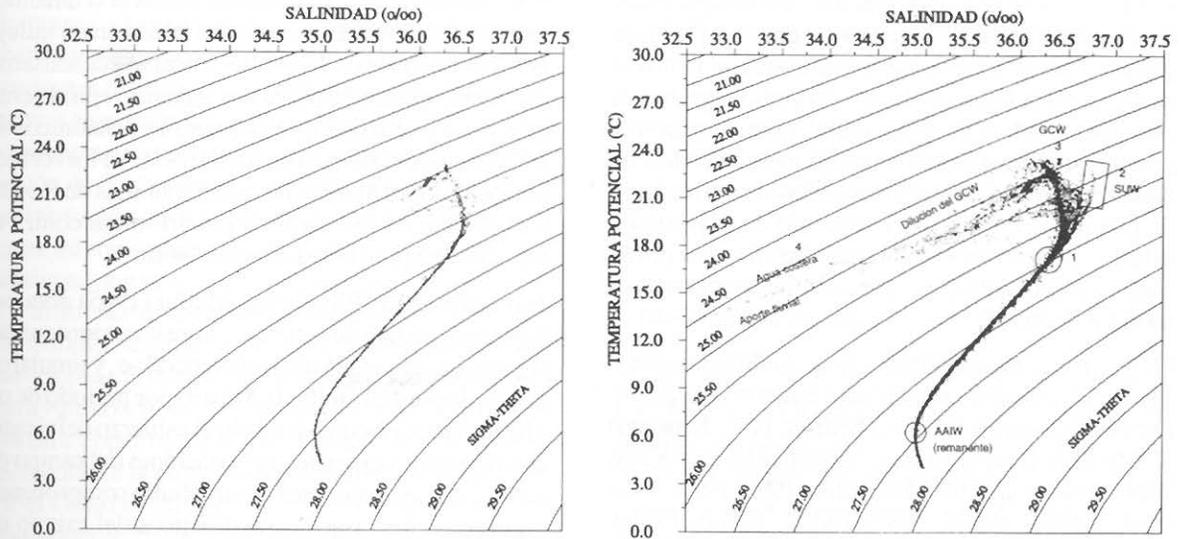


Figura 5 (a). Diagrama T-S de los datos recolectados en el transecto 11 de la campaña Argos 84-1. (b) Las principales masas de agua., en el estrato de 0-1500 m, se identifican por sus relaciones de temperatura, salinidad y densidad potencial. El diagrama T-S de todos los datos del CTD recolectados en crucero Argos 84-1 describe el patrón de mezcla dentro de las capas de agua superior, intermedia y profunda del Golfo de México (reproducida de Vidal *et al.*, 1988a).

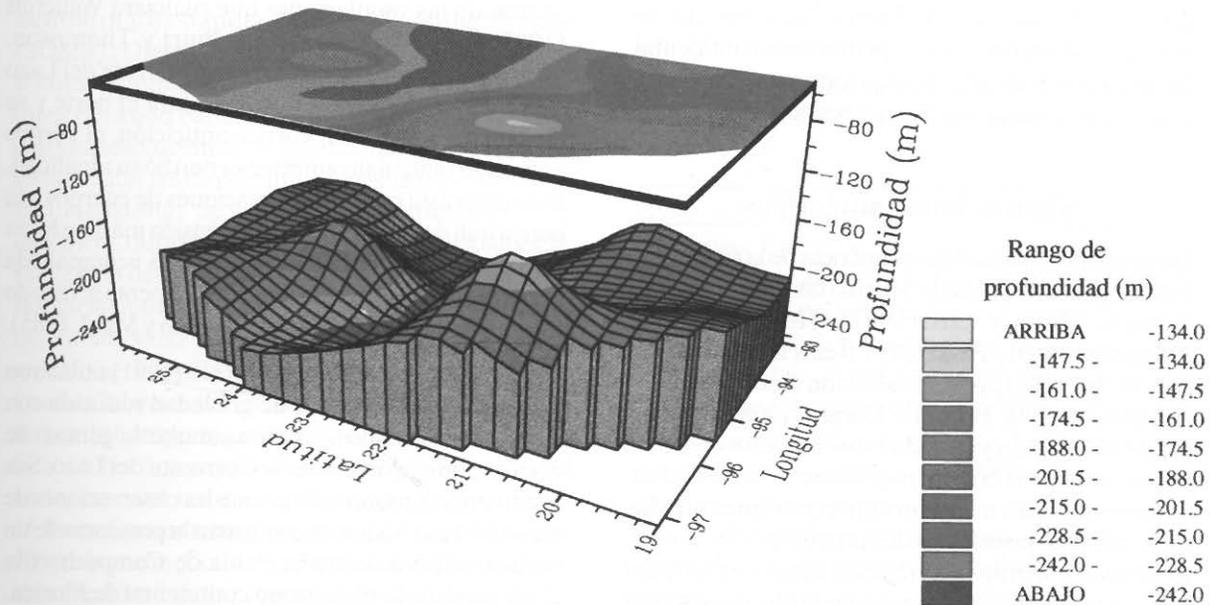


Figura 6. Distribución topográfica de la isoterma de 15° C dentro de una triada ciclónica-anticiclónica-ciclónica en el Golfo de México, durante marzo de 1985 (Vidal *et al.*, 1994d). La migración vertical de la isoterma es de ~150 m dentro del dominio del ciclón sur, su longitud de onda es de ~300 km, equivalente a la distancia horizontal entre los centros de rotación de los ciclones norte y sur.

triadas de vórtices origina que las propiedades fisicoquímicas de las masas de agua del Golfo se distribuyan de una manera ondulatoria, como se muestra en la Figura 6. La ubicación y magnitud de las cimas y valles de esta "onda" coinciden con la posición e intensidad de la componente vertical de las velocidades ciclónica y anticiclónica. La longitud de la "onda" (~ 300 km) depende de la posición relativa de los centros de giro, dictada ésta por la traslación acoplada de los pares ciclones-anticiclones en el Golfo de México (Vidal *et al.*, 1990, 1994b).

De otra parte, aunque el número de mediciones *in-situ*, hidrográficas, corrientométricas y meteorológicas, son comparativamente escasas (Brooks, 1984; Kirwan *et al.*, 1984a, b; Lewis y Kirwan, 1985; Cochrane y Kelly, 1986; Lewis *et al.*, 1989; Hamilton, 1990, 1992; Vidal *et al.*, 1986a, 1986b, 1987, 1988a, 1988b, 1989a, 1990, 1992, 1994a, 1994b, 1994c, 1994d, 1997); los resultados de éstas, combinados con los resultados de observaciones satelitales (Brooks y Legeckis, 1982; Vukovich y Crissman, 1986; Leben *et al.*, 1990; Biggs y Muller-Karger, 1994; Biggs *et al.*, 1996), han proveído información valiosa e indispensable para el modelado de los procesos hidrodinámicos circulatorios que dominan en el Golfo, tales como las Corrientes del Lazo, de Yucatán, de Florida, de Frontera, las corrientes costeras sobre la plataforma continental, las corrientes inducidas por las tormentas tropicales, y la génesis y traslación de vórtices oceánicos.

Simulaciones numéricas

Las primeras simulaciones numéricas de la circulación barotrópica del Golfo de México las realizaron, por ejemplo, Brian y Cox (1967), Holland (1967), Paskausky (1969) y Paskausky y Reid (1972); mientras que las baroclínicas las realizaron Baer, Adamo y Adelfang (1968), Hamm y Lesser (1968) y Wert y Reid (1972). Aún y cuando estos modelos constituyeron primeras aproximaciones a la realidad, sorprendentemente reprodujeron algunas de las características principales de la circulación del Golfo, fundamentalmente la formación de la Corriente del Lazo y la génesis y desprendimiento de vórtices anticiclónicos de ésta.

Hurlburt y Thompson (1980, 1982) fueron los primeros en estudiar la circulación del Golfo de México utilizando un modelo de dos capas con superficie libre, ecuaciones primitivas y un correspondiente modelo de gravedad reducida. El principal resultado de sus simulaciones fue el corroborar la existencia de un

flujo cíclico natural, cuasi-anual, debido a la dinámica interna del Golfo, aún y cuando utilizaron un influjo constante al través del Canal de Yucatán y descartaron el esfuerzo tangencial del viento. Además reprodujeron la génesis y separación de vórtices anticiclónicos de la Corriente del Lazo, la traslación oeste de los vórtices anticiclónicos a manera de ondas solitarias de Rossby y el choque de los vórtices anticiclónicos contra el talud continental occidental del Golfo.

Posteriormente, Blumberg y Mellor (1985) desarrollaron un modelo de superficie libre con coordenadas sigma y un submodelo de turbulencia k-e, y simularon la circulación del Golfo de México por período de un año tomando en consideración el esfuerzo del viento, calentamiento superficial y variaciones del campo de salinidad. Los resultados de su estudio comprobaron algunos de los rasgos característicos del campo de circulación del Golfo, mas no el desprendimiento de vórtices anticiclónicos de la Corriente del Lazo; probablemente por los valores relativamente altos de difusividad por remolinos que utilizaron.

Más adelante Lewis y Kirwan (1987) reportaron el proceso secuencial de la génesis y desprendimiento de los vórtices anticiclónicos de la Corriente del Lazo utilizando las simulaciones que realizara Wallcraft (1986) con el modelo de Hurlburt y Thompson. Concluyeron que para cuando la Corriente del Lazo alcanza su penetración máxima hacia el norte y se alista para generar un vórtice anticiclón, el vórtice anticiclón inmediato anterior ya perdió su identidad. Esto contrasta con las observaciones de cuerpos a la deriva que demuestran que la extensión máxima hacia el norte de la Corriente del Lazo está acompañada por la presencia de un vórtice originalmente generado frente a las costas de Cuba (Vukovich y Maul, 1985).

Más recientemente Arango y Reid (1991) utilizaron un modelo generalizado de gravedad reducida con coordenadas isopícnicas para simular la génesis de vórtices anticiclónicos de la Corriente del Lazo. Sus resultados reproducen fielmente las observaciones de dicho proceso y además confirman la presencia de un vórtice ciclónico entre la Bahía de Campeche y la parte oeste de la plataforma continental de Florida. La presencia de este vórtice ciclónico ha sido observado durante la génesis de los vórtices anticiclónicos de la Corriente del Lazo (Vukovich y Maul, 1985).

Por otra parte, Martínez López (1993) realizó una simulación de la circulación barotrópica tridimensional del Golfo de México y reprodujo

satisfactoriamente las amplitudes y fases de la onda de marea y las direcciones e intensidades de las corrientes asociadas con ésta. Concluyó que: (1) las corrientes residuales lagrangeanas asociadas con las mareas tienen intensidades menores a 0.5 cm s^{-1} , por lo que la marea tiene un papel secundario en la propagación de contaminantes en el Golfo de México; (2) las intrusiones que se observan en la Corriente del Lazo, así como el desprendimiento de vórtices de esta corriente, son procesos esencialmente baroclínicos y, (3) al forzar el modelo con los campos de viento mensuales se genera una circulación anticiclónica barotrópica en la zona occidental del Golfo de México para verano e invierno con intensidades máximas de $1-4 \text{ cm s}^{-1}$, por lo que para poder predecir correctamente, mediante la modelación numérica, la circulación en el Golfo de México es imprescindible incluir la componente baroclínica inducida por los vórtices anticiclónicos provenientes de la Corriente de Lazo.

Últimamente, los estudios numéricos más completos y confiables acerca de la génesis de vórtices anticiclónicos provenientes de la Corriente del Lazo y la circulación baroclínica más energética del Golfo de México son los realizados por Dietrich y Lin (1994) utilizando el modelo Euleriano de multicapas denominado Sandia Ocean Modeling System (SOMS) (Dietrich *et al.*, 1987). Estas simulaciones tridimensionales diferenciales se han realizado incorporando batimetrías y líneas de costa realistas con una resolución de 20 km. La muy alta resolución en la vertical les ha permitido investigar la estructura tridimensional de los vórtices anticiclónicos y ciclónicos durante su génesis. Las simulaciones se realizaron despreciando el forzamiento del viento y las variaciones de salinidad, y considerando a la densidad como la variable dinámica primaria. El modelo se inicializó forzando un influjo Caribeño "realista" al través del Estrecho de Yucatán, representado por un transporte geostrofico oriental equivalente a 5 Sv en las dos capas superiores y 5 Sv en las 14 restantes, y un transporte de frontera occidental de 15 Sv uniformemente distribuido en la vertical y de 40 km de ancho. Con esto se logra una representación más "realista" de la Corriente de Yucatán y de las condiciones geostroficas en la región del Mar Caribe inmediatamente contigua al Estrecho de Yucatán. Los resultados de las simulaciones concuerdan con los resultados de los estudios observacionales realizados a la fecha por Kirwan *et al* (1988) y Vidal *et al* (1988a, 1992). El modelo reproduce fielmente y periódicamente la génesis de vórtices anticiclónicos de la

Corriente del Lazo, el desplazamiento de los vórtices anticiclónicos hacia el oeste con velocidades de traslación de aproximadamente 4 cm s^{-1} , la interacción y choque de los vórtices anticiclónicos contra el talud continental occidental del Golfo y su consecuente deformación y subdivisión, la intensidad ($70-80 \text{ cm s}^{-1}$) de las corrientes asociadas con los vórtices anticiclónicos, la presencia de un vórtice ciclónico de aproximadamente 100 km entre la punta norte de la Corriente del Lazo y la plataforma continental occidental de Florida, y la Corriente de Frontera paralela al talud continental occidental del Golfo derivada de la interacción y choque de los vórtices anticiclónicos. Este último resultado constituye un descubrimiento numérico importante que corrobora las observaciones y teoría de Elliott (1979) y Vidal *et al.*, (1992, 1994d, 1997), misma que estipula que la Corriente de Frontera en la margen occidental del Golfo de México se debe fundamentalmente al choque de giros anticiclónicos provenientes de la Corriente del Lazo y no necesariamente al forzamiento inducido por el rotacional del viento como lo sugiere Sturges (1993). Las simulaciones de Dietrich y Lin (1994) y de Martínez López (1993) demuestran que la Corriente de Frontera del Golfo de México es fundamentalmente un proceso baroclínico, tal y como lo sugieren Elliott (1979) y Vidal *et al* (1992, 1994d y 1997).

De otra parte, la simulación numérica de la interacción de los vórtices anticiclónicos provenientes de la Corriente del Lazo con la topografía y talud continental occidental del Golfo la realizó inicialmente Smith (1986) utilizando un modelo de dos capas y ecuaciones primitivas. Encontró que existen dos regímenes dinámicos dependientes de la fuerza rotacional de la capa profunda del vórtice. Sin embargo, los estudios observacionales demuestran que el efecto topográfico β no direcciona el desplazamiento de los vórtices anticiclónicos en sentido paralelo a las isóbatas. Más recientemente, Shi y Nof (1993, 1994) realizaron simulaciones numéricas de la colisión de vórtices contra fronteras, tales como los taludes continentales, utilizando modelos de dinámica de contornos e isopícnas, completamente dependientes del tiempo, en virtud de que el problema es alineal. La discusión y validación de sus resultados las presentaron en el contexto de las investigaciones observacionales del impacto de vórtices anticiclónicos provenientes de la Corriente del Lazo contra el talud continental occidental del Golfo de México realizadas por Vidal *et al* (1992) y Kirwan *et al* (1988), de las investigaciones del comportamiento de vórtices provenientes de la

hacia el norte, paralela al talud continental, a lo largo de 900 km, con intensidades promedio de 25 cm s^{-1} , y dos vórtices ciclónicos de 100-200 km de diámetro en su periferia, conforme éste se subdividió y erosionó cediendo su masa-volumétrica. Esta triada vortical, con velocidades características de 40 cm s^{-1} , permaneció en la región occidental del Golfo durante más de 150 días, tiempo en el cual la vorticalidad ciclónica-anticiclónica del Golfo occidental decayó $\sim 50\%$. Por lo que el período evolutivo de la Corriente de Frontera, desde su génesis hasta su decaimiento absoluto, se estimó del orden de 300 días. Con base en estas investigaciones preliminares Vidal *et al* (1997) concluyen que la Corriente de Frontera en la región occidental del Golfo de México bien podría ser generada principalmente por la colisión de vórtices anticiclónicos que se desprenden de la Corriente del Lazo y que colisionan contra el talud continental.

Conclusiones

No obstante la circulación del Golfo de México constituye un fenómeno de fundamental importancia para conocer adecuadamente su naturaleza, nuestra base de conocimiento de este fenómeno es todavía relativamente elemental. La ausencia de información oceanográfica y meteorológica veraz, principalmente de la parte mexicana del Golfo, sigue siendo el problema más grave a resolver. En la ausencia de esta información no hay posibilidad de realizar simulaciones numéricas confiables, ni tampoco de realizar los estudios de validación y verificación de los modelos.

Los vórtices anticiclónicos, con diámetros de hasta 600 km, que se desprenden de la Corriente del Lazo y migran hacia el interior del Golfo hasta impactarse contra su talud occidental constituyen la componente más energética de la circulación al interior del Golfo de México. Y el mecanismo más importante mediante el cual $30 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de Agua Subtropical Subyacente (SUW), proveniente del Mar Caribe, se transforman en Agua Común del Golfo.

Las observaciones *in-situ* y los experimentos numéricos demuestran que el choque de los anticiclones contra la margen occidental constituye el mecanismo principal que da origen a la Corriente de Frontera del Golfo de México. El forzamiento inducido por el rotacional del viento tiene una importancia relativamente secundaria en la génesis de esta Corriente.

La vorticalidad de estos giros y su interacción acoplada constituyen un mecanismo natural de bombeo e

intercambio de masas de agua dentro del Golfo, que da origen a intensas surgencias de hasta 15 m día^{-1} . Este patrón de circulación es el responsable de la ventilación, tiempo de residencia de las masas de agua (5 años), y alta productividad primaria y secundaria del Golfo.

Finalmente, la generación de nuevo conocimiento sobre la circulación del Golfo de México dependerá fundamentalmente de la cantidad y calidad de observaciones *in-situ* y experimentos numéricos validados y verificados que seamos capaces de realizar. La instalación de un sistema regional de observación oceánico mexicano en el Golfo de México constituye una prioridad si es que queremos hacer uso racional de sus recursos.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló con el apoyo del Instituto Politécnico Nacional y del Instituto Mexicano del Petróleo mediante el contrato FIES-97-05-IV.

Literatura citada

- Arango, H. G., y R. O. Reid, 1991. A generalized reduced-gravity ocean model, *Atmos. Ocean*, 29: 256-287.
- Baer, L., L. Adamo, y S. Adelfang, 1968. Experiments in oceanic forecasting for the advective region by numerical modeling, Pt. 2, Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 73(16): 5091-5104.
- Bialek, E. L., 1966. Handbook of oceanographic Tables. U.S. Naval Oceanographic Office, Washington, D.C., 427 p.
- Blahe, J., y W. Sturges, 1981. Evidence for wind-forced circulation in the Gulf of Mexico, *J. Mar. Res.*, 9(4):711-734.
- Blumberg, A. F., y G. L. Mellor, 1985. A simulation of the circulation in the Gulf of Mexico, *Isr. J. Earth Sci.*, 34:122-144.
- Brooks, D. A., 1984. Current and hydrographic variability in the northwestern Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 89(C5):8022-8032.
- Brooks, D. A., y 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.
- Bryan, K., y Cox, M., 1967. A numerical investigation of the oceanic general circulation, *Tellus*, 19(1):54-80.

- Capurro, L. R. A. y J. L. Reid (Eds.), 1972.** Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Volume 2, Texas A&M University Oceanographic Studies Series, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 288 p.
- Cochrane, J. D., 1972.** Separation of an anticyclone and subsequent developments in the Loop Current, p. 91-106. In: Capurro, L. R. A. y J. L. Reid (Eds.), Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Volume 2, Texas A&M University Oceanographic Studies Series, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 288 p.
- Cochrane, J. D., and F. J. Kelly, 1986.** Low-frequency circulation on the Texas-Louisiana Continental Shelf, *J. Geophys. Res.*, 91:10,645-10,659.
- Cornillon, P., R. Weyer, and G. Flierl, 1989.** Translation velocity of warm core rings relative to the slope water, *J. Phys. Oceanogr.*, 19:1317-1332.
- Dietrich, D.E., y C.A. Lin, 1994.** Numerical studies of eddy shedding in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 99(C4):7599-7615.
- Dietrich, D. E., M. G. Marietta, and P. J. Roache, 1987.** An ocean modelling system with turbulent boundary layers and topography, Numerical Description, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 7:833-855.
- Elliott, B. A., 1979.** Anticyclonic rings and the energetics of the circulation of the Gulf of Mexico, Ph.D. dissertation, Tex. A&M Univ., College Station, 188 p.
- Elliott, B. A., 1982.** Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 12: 1292-1309.
- Evans, R., K. Baker, O. Brown, and R. Smith, 1985.** Chronology of warm core ring 82B, *J. Phys. Oceanogr.*, 90:8803-8811.
- Flierl, G., 1984.** Rossby wave radiation from a strongly nonlinear warm eddy, *J. Phys. Oceanogr.* 14, p. 47-58.
- Forristal, G. Z., K. J. Schaudt, and C.K. Cooper, 1992.** Evolution and kinematics of a Loop Current Eddy in the Gulf of Mexico during 1985, *J. Geophys. Res.*, 97(C2):2173-2184.
- Gibbs, R. J., 1970.** Circulation in the Amazon River estuary and adjacent Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.* 28(2):113-123.
- Hamilton, P., 1990.** Deep currents in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 20:1087-1104.
- Hamilton, P., 1992.** Lower continental slope cyclonic eddies in the central Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 97(C2):2185-2200.
- Hamm, D. P., and R. M. Lesser, 1968.** Experiments in oceanic forecasting for the advective region in numerical modeling, 1, The Model, *J. Geophys. Res.*, 73(16):5081-5089.
- Hamon, B., 1965.** The east Australian current 1960-1964, *Deep Sea Res.* 12:899-921.
- Hurlburt, E. H., y J. D. Thompson, 1980.** A numerical study of Loop Current intrusions and eddy shedding, *J. Phys. Oceanogr.* 10:1611-1651.
- Hurlburt, E. H., y J. D. Thompson, 1982.** The dynamics of the Loop Current and shed eddies in a numerical model of the Gulf of Mexico, En: Hydrodynamics of Semi-enclosed Seas, J. C. J. Nihoul (Ed.), Elsevier Science, New York.
- Ichiye, T.,** Circulation and Water Mass Distribution in the Gulf of Mexico. *Geofis. Int.*, 2:47-76, 1962.
- Kirwan, A. D., Jr., W. J. Merrell, Jr., J. K. Lewis, y R. E. Whitaker, 1984 a.** Lagrangian observations of an anticyclonic ring in the western Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 89(C3):3417-3424.
- Kirwan, A. D., Jr., W. J. Merrell, Jr., J. K. Lewis, R. E. Whitaker, y R. 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.
- Kirwan, A. D., Jr., J.K. Lewis, A. W. Indest, P. Reinersman y I. Quintero, 1988.** Observed and simulated kinematic properties of loop current rings, *J. Geophys. Res.*, 93:1189-1198.
- Leben, R. R., G. H. Born, J. D. Thompson, y C. A. Fox, 1990.** Mean sea surface variability of the Gulf of Mexico using Geosat altimetry data. *J. Geophys. Res.*, 95(C3):3025-3032.
- Leipper, D.F., 1970.** A Sequence of Current-Patterns in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.* 75(3):637-657.
- Lewis, J. K., 1992.** The physics of the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 97(C2):2141-2142.
- Lewis, J. K., y 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.
- Lewis, J. K., y A. D. Kirwan Jr, 1987.** Genesis of a Gulf of Mexico ring as determined from kinematic analyses. *J. Geophys. Res.* 92, 11, p. 727-11, 740.

- Lewis, J. K., A. D. Kirwan, y 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, Tesis de Maestría, CICESE, División de Oceanología, Dept. Oceanogr. Fís., Ensenada, B. C., México, 100 p.
- Nowlin, W. D. Jr., and H. J. McLellan, 1967.** A Characterization of the Gulf of Mexico Waters in Winter. *J. Mar. Res.* 25:29-59.
- Nowlin, W. D., Jr., J. M. Hubertz and R. O. Reid, 1968.** A detached Eddy in the Gulf of Mexico. *J. Mar. Res.*, 26(2):185-186.
- Nowlin, W. D. Jr., y J. M. Hubertz, 1972.** Contrasting Summer Circulation Patterns for the Eastern Gulf-Loop Current Versus Anticyclonic Ring, p. 119-138. *In:* L. R. A. Capurro y J. L. Reid (Eds.), Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Volume 2, Texas A&M Oceanographic Studies. Gulf Publishing Co, Houston, Texas, U.S.A. 288 p.
- Science Applications International Corporation,** Gulf of Mexico physical Oceanography Program, Final Report: Year 3. Volume 1, Exec. Summary, 1988a. OCS Rep., MMS 88-0046, 15 p.
- Science Applications International Corporation,** Gulf of Mexico Physical Oceanography Program, Final Report: Year 3. Volume II, 1988b. Tech. Rep., OCS Rep., MMS 88-0046, 241 p.
- Shaudt, 1992.** Formation of a western boundary current in the Gulf of Mexico from decay of Loop Current anticyclonic rings (Resumen), *Eos Trans., AGU*, 75(3):223.
- Shi, C., y D. Nof, 1993.** The splitting of eddies along boundaries, *J. Mar. Res.*, 51, p. 771-795.
- Shi, C., y D. Nof, 1994.** The destruction of lenses and generation of vortices. *J. Phys. Oceanogr.*, 24(4):1120-1136.
- Smith, D. C., IV, 1994.** A numerical study of Loop Current eddy interaction with topography in the western Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 16:1260-1272.
- Smith, D. C., IV, and J. J. O'Brien, 1983.** The interaction of a two layer isolated mesoscale eddy with bottom topography. *J. Phys. Oceanogr.* 13: 1681-1697.
- Sturges, W., 1993.** The annual cycle of the western boundary current in the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 98(C10):18,053-18, 068.
- Sturges, W., and J. P. Blaha, 1976.** A western boundary current in the Gulf of Mexico. *Science*, 192: 367-369.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, J. M. Pérez, R. Morales, A. Rivera, and L. Zambrano, 1985a.** Hydrographic Evidence for the Southwest migration of a Loop Current Ring in the Gulf of Mexico During Winter of 1984. (Resumen) EOS Transactions, American Geophysical Union, Volume 66, No. 46, p. 924.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, J. M. Pérez, R. Morales, R. Alanís and L. Zambrano, 1985b.** Hydrographic Evidence of Cyclonic-Anticyclonic Ring Interactions in the Gulf of Mexico During March 1985 (Resumen), EOS Transactions, American Geophysical Union, Volume 67, No. 44, p. 1049-1050.
- Vidal, M. V. V., F. V. Vidal., R. Morales, A. Rivera, L. Zambrano and R. Anaya, 1985c.** CTD Observations in the Western Gulf of Mexico during the Winter of 1984. (Resumen), EOS Transactions, American Geophysical Union, Volume 66, No. 46, p. 931.
- Vidal, V. M. V., V., F. V. Vidal, R. Morales, J. M. Pérez y L. Zambrano, 1986a.** Análisis de la Campaña Oceanográfica Argos 84-1. Informe IIE/13/1926/I02/P, Ins. de Inves. Eléct., Apdo. Postal 1-475, Cuernavaca, Morelos, 62001, México, 136 p.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal and R. Morales, 1986b.** Hydrographic Evidence for the Collision of a Loop Current ring in the Western Gulf of Mexico, (Resumen), EOS Transactions, American Geophysical Union, Volume 67, No. 44, p. 1049.
- Vidal, F. V., V. M. Vidal, R. Morales, A. Hernández and J. M. Pérez-Molero, 1987.** On the Influence of Cyclonic-Anticyclonic Ring Interactions on the Distribution of Hydrographic Properties in the Gulf of Mexico During the Fall of 1986 (Resumen), EOS Transactions, American Geophysical Union, volume 68, No. 44, p. 134.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, y J. M. Pérez-Molero, 1988a.** Atlas Oceanográfico del Golfo de México, Vol. 1, Inst. de Invest. Electr., Cuernavaca, Morelos, México, 415 p.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal., A. Hernández, R. Morales and J. M. Pérez, 1988b.** On the circulation and kinematic properties of cyclonic and anticyclonic rings in the Gulf of Mexico, Joint Oceanographic Assembly, 115, Acapulco, México, August 23-31.

- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, J. M. Pérez-Molero, A. Hernández, R. A. Morales, E. Suárez y E. Meza, 1989a.** Informe Final de las Campañas Oceanográficas ARGOS realizadas en el Golfo de México 1984-1988, Rep. IIE/13/1926/I 14/F, Inst. de Invest. Electr., Cuernavaca, Morelos, México, p. 280.
- Vidal, V. F., V. M. V. Vidal, R. Morales and A. Hernández, 1989b.** Hydrographic Properties Distribution in Cyclonic-Anticyclonic Ring Pairs in the Gulf of Mexico During May-June 1987 (Resumen), EOS Transactions. American Geophysical Union. Volumen 70, No. 32, p. 769.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, R. Morales, A. Hernández and J. M. Pérez-Molero, 1989c.** Geostrophic Transports in the Gulf of Mexico Associated to Cyclonic- Anticyclonic Ring Pairs Interactions During May-June 1987 (Resumen), EOS Transactions. American Geophysical Union. Volumen 70, No. 32, p. 769.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal y A. Hernández, 1990.** Atlas Oceanográfico del Golfo de México, Vol. 2, Inst. de Invest. Electr., Cuernavaca, Morelos, México, 707 p.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal and J. M. Pérez-Molero, 1992.** Collision of a Loop Current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 97(C2):2155-2172.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, E. Meza, A. Hernández, L. Zambrano, D. C. Biggs, and K. J. Shaudt, 1992.** Formation of a western boundary current in the Gulf of Mexico from decay of Loop Current anticyclonic rings (Resumen), *Eos Trans., AGU*, 75(3):223.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, A. Hernández, E. Meza, and J. M. Pérez-Molero, 1994b.** Baroclinic flows, transports, and kinematic properties in a cyclonic-anticyclonic-cyclonic ring triad in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 99(C4):7571-7597.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, E. Meza, A. Hernández, y L. Zambrano, 1994c.** Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *J. Oceanogr.*, 50(5):559-588.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, and A. Hernández, E. Meza, y L. Zambrano, 1994d.** Atlas Oceanográfico del Golfo de México, Vol. 3, Inst. de Invest. Electr., Cuernavaca, Morelos, México, 586 p.
- Vidal, V. M. V., y F. V. Vidal, 1997.** La Importancia de los Estudios Regionales de Circulación Oceánica en el Golfo de México, *Rev. Soc. Hist. Nat.*, 47:191-200.
- Vidal, V. M. V., F. V. Vidal, E. Meza, L. Zambrano and J. Portilla, 1998.** Ring Slope Interactions and the Formation of the Western Boundary Current in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, (en revisión).
- Vukovich, F. M., 1995.** An updated evaluation of the Loop Current's eddy shedding frequency. *J. Geophys. Res.*, 100(C5):8655-8659.
- Vukovich, F. M., 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.
- Vukovich, F. M., and G. A. Maul, 1985.** Cyclonic eddies in the eastern Gulf of Mexico, *J. Phys. Oceanogr.* 15:105-117.
- Vukovich, F. M., and B. W. Crissman, 1986.** Aspects of warm rings in the Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 91(C2):2645-2660.
- Vukovich, F. M., y E. Waddell, 1991.** Interactions of a warm ring with the western slope in the Gulf of Mexico, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, p. 1062-1074.
- Wert, R. T., and R. O. Reid, 1972.** A baroclinic prognostic numerical circulation Model, p. 177-209, En: L. R. A. Capurro y J. L. Reid (Eds.), Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico, Volume 2, Texas A&M Oceanographic Studies. Gulf Publishing Co, Houston, Texas, U.S.A., 288 p.
- Wust, G., 1963.** On the stratification and the circulation in the cold water sphere of the Antillean-Caribbean Basins, *Deep Sea Res.*, Volume 10, p. 165-187.