

EVIDENCIA DE UN GIRO CICLONICO EN LA BAHIA DE CAMPECHE

EVIDENCE OF A CYCLONIC EDDY IN THE BAY OF CAMPECHE

Alma Rosa Padilla Pilotze
David Alberto Salas de León
María Adela Monreal Gómez

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria
México, D.F., 04510, México

Padilla Pilotze, A.R., Salas de León, D.A. y Monreal Gómez, M.A. (1990). Evidencia de un giro ciclónico en la Bahía de Campeche. Evidence of a cyclonic eddy in the Bay of Campeche. *Ciencias Marinas*, 16(3): 1-14.

RESUMEN

Se presentan resultados de parámetros físico-químicos: temperatura, oxígeno, sigma-t y la frecuencia de Brunt-Väisälä, a partir de datos primarios obtenidos en 19 estaciones, realizados durante la campaña CIBAC-2 que se efectuó del 7 al 22 de junio de 1978 en la región sur de la Bahía de Campeche, a bordo del B/O Dragaminas 20 de la Secretaría de Marina; así como los resultados de un anclaje de correntómetros. Los resultados que se muestran corresponden a secciones transversales de diferentes parámetros en el transecto II de la Figura 1 y a planos horizontales a 2 y 10 m de profundidad; dichos resultados sugieren la existencia de un giro ciclónico coincidiendo con patrones teóricos desarrollados por Velasco-Mendoza (1989).

ABSTRACT

Results from physical and chemical parameters are presented: temperature, dissolved oxygen, sigma-t, and Brunt-Väisälä frequency; primary data were obtained from 19 oceanographic stations, during the oceanographic cruise CIBAC-2 from June 7th to June 22nd, 1978, in the southern region of Bay of Campeche, Gulf of Mexico, on board the R/V Dragaminas 20 of the Secretaría de Marina; as well as the results obtained from a current meter array. The results that are shown correspond to hydrographic sections from different parameters in transect-II (Fig. 1), and horizontal distribution at 2 and 10 m depth, suggesting the existence of a cyclonic eddy according to the theoretical patterns developed by Velasco-Mendoza (1989).

INTRODUCCION

La Bahía de Campeche está situada en la región sur-oeste del Golfo de México entre 18.1° y 21.5° de latitud Norte y los 90.4° y 97.3° de longitud Oeste, teniendo profundidades que pasan de los 2500 m.

Esta región presenta una circulación predominantemente ciclónica (Nowlin, 1972; Molinari *et al.*, 1978; Merrell y Morrison,

INTRODUCTION

The Bay of Campeche is located in the southwest part of the Gulf of Mexico, between 18.1° and 21.5° North and 90.4° and 97.3° West, with depths beyond 2500 m.

This region presents a predominantly cyclonic circulation (Nowlin, 1972; Molinari *et al.*, 1978; Merrell and Morrison, 1981; Monreal-Gómez and Salas de León, sub-

1981; Monreal-Gómez y Salas de León, sometido a publicación). De los datos de Czitrom *et al.* (1986), Padilla *et al.* (1986) y Yáñez-Arancibia y Sánchez-Gil (1983), se observan valores máximos y promedios en la salinidad de 37.10 y 34.19‰ respectivamente, para la temperatura dichos valores son de 29.94 y 25.62°C.

La Bahía de Campeche representa una región de suma importancia desde el punto de vista económico, debido a las pesquerías y a la explotación de hidrocarburos existentes en el subsuelo. Bajo este contexto el estudio de los procesos hidrodinámicos adquiere una importancia especial debido al papel que la circulación juega en la distribución de desperdicios industriales y en las pesquerías existentes.

MATERIALES Y METODOS

La campaña CIBAC-2 (Circulación de la Bahía de Campeche) formó parte del proyecto de investigación sobre el régimen hidrológico de la Laguna de Términos y áreas marítimas adyacentes, que se desarrolló en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Su objetivo principal fue el estudio de la parte costera sur occidental del Golfo de México y su interacción con las aguas del alto Golfo, por un lado, y con las aguas lacustres por el otro.

Durante la campaña se realizaron 67 estaciones de las cuales 19 se distribuyeron al sur de la Bahía, cubriendo la región delimitada por los 18.6° y 20.2° N y los 91.1° y 93.6° W en donde las profundidades van hasta los 700 m. Las posiciones de las estaciones se muestran en la Figura 1. El número de niveles en cada estación dependió de la profundidad del fondo, tratando de conservar el muestreo sobre profundidades estándar consideradas por el NODC (1964); para tal efecto, se usaron botellas Niskin y termómetros reversibles y en algunos niveles se colocaron termómetros no-protegidos.

De las muestras colectadas se efectuó el análisis de oxígeno disuelto, empleando el método de Carpenter (Micro-Winkler) descrito por Strickland y Parsons (1968). El

mittido for publication). Czitrom *et al.* (1986), Padilla *et al.* (1986) and Yáñez-Arancibia and Sánchez-Gil (1983) observed maximum and mean values in salinity of 37.10 and 34.19‰ respectively, and temperatures of 29.94 and 25.62°C.

The Bay of Campeche is a very important region from an economical point of view, because of the fisheries and oil exploitation in the area. Thus, the hydrodynamic processes are very important due to the role that water circulation plays in the distribution of industrial wastes and fisheries.

MATERIALS AND METHODS

The oceanographic cruise CIBAC-2 (Circulation of the Bay of Campeche), was part of the research program on the hydrologic regime of Términos Lagoon and adjacent marine areas, carried out at Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), National University (UNAM), supported by Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT). The main objective was the study of the southwest coastal part of the Gulf of Mexico, and its interactions with the high waters (latitudinal) and marshy waters of the Gulf.

During the cruise, 67 oceanographic stations were made, of which 19 of them were distributed in the southern part of the Bay (Fig. 1), covering the area between 18.6° and 20.2° N and 91.1° and 93.6° W, where the depths reach 700 m. The amount of depth levels in each station depended on the standard depths, considered by NODC (1964) and total depth; Niskin sampling bottles were used, as well as reverse thermometers, sometimes using non-protected thermometers.

Dissolved oxygen analysis using the Carpenter method (Micro-Winkler) described by Strickland and Parsons (1968) was carried out to all the samples. Salt content was measured with an induction Beckman salinometer, and temperature lectures were

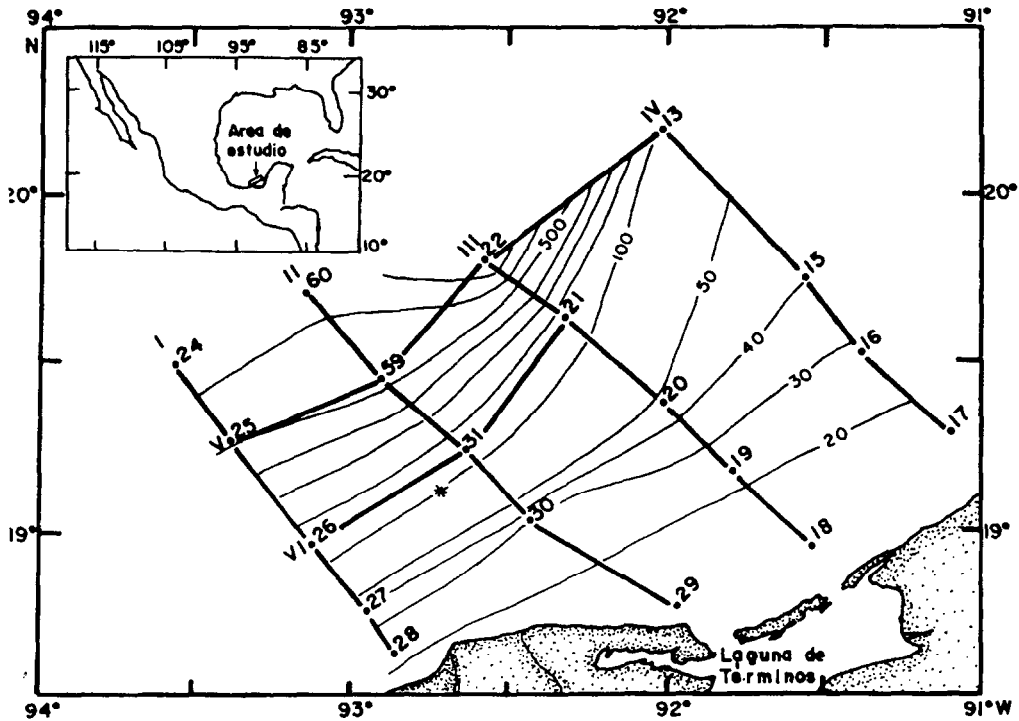


Figura 1. Localización del área de estudio. Distribución de estaciones y transectos (* anclaje de correntómetros).

Figure 1. Location of the study area. Distribution of stations and transects (* current meter array).

contenido de sal de las muestras se determinó mediante un salinómetro de inducción, marca Beckman, y las lecturas de los termómetros se corrigieron parcialmente a bordo, usando las gráficas de corrección de Emilsson (1954). La corrección sistemática de todas las lecturas efectuadas durante la campaña, así como el cómputo de las profundidades termométricas de los niveles donde se colocaron termómetros no-protegidos, se llevó a cabo en tierra utilizando los programas desarrollados por Alatorre-Mendieta (1976).

De igual manera se calculó sigma-t a partir de datos de salinidad, temperatura y presión; posteriormente con los valores de densidad se calculó la frecuencia de Brunt-Väisälä de acuerdo con Pedlosky (1979):

corrected partially on board, using the correction-graphics made by Emilsson (1954). The systematic mend of all the non-protected thermometer temperature lectures, and the thermometric depth levels calculated were made at the Physical Laboratory - (ICMyL), with the computer programs developed by Alatorre-Mendieta (1976).

The sigma-t was calculated from salinity, temperature and pressure data, and the Brunt-Väisälä frequency from density values, according to Pedlosky (1979):

$$N = \left[-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right]^{1/2} \quad (1)$$

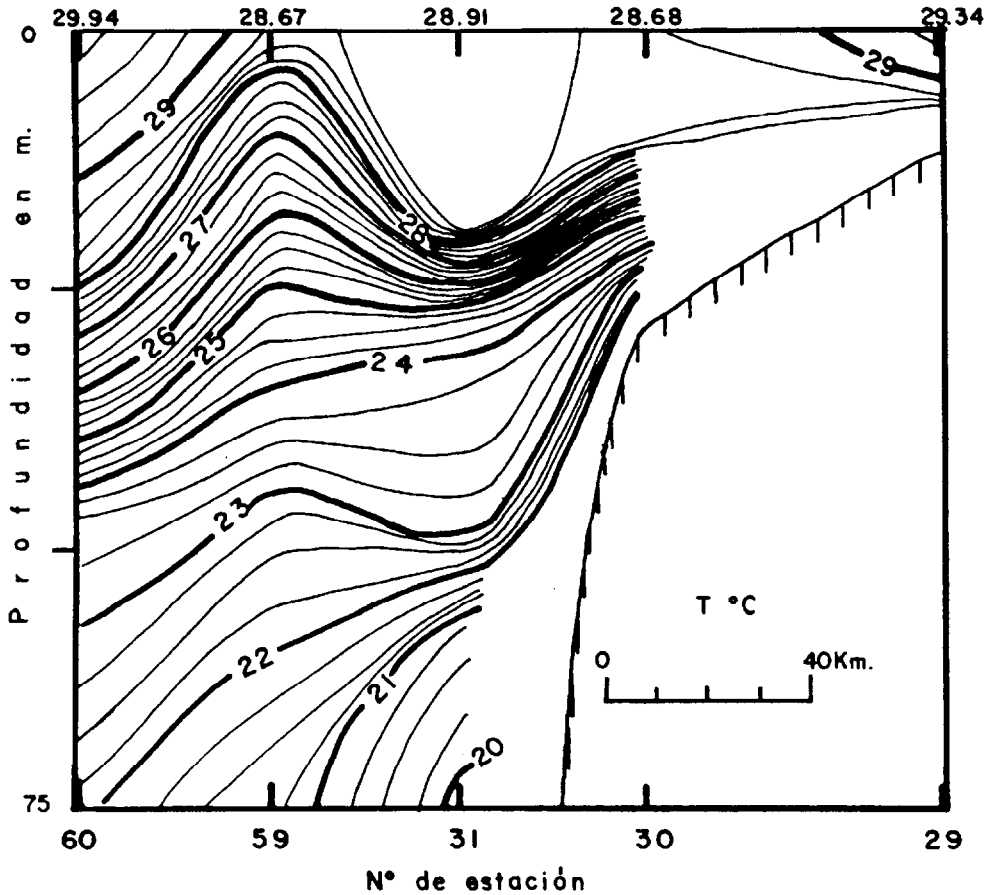


Figura 2. Sección transversal de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el segundo transecto.
Figure 2. Hydrographic section of temperature ($^{\circ}\text{C}$) in the second transect.

Durante la campaña, en los 19°N y 92.7°W se ancló un arreglo tipo "I" con dos correntómetros: uno Aanderaa a 17 m de profundidad y otro Interocean a 70 m, así como una radioboya señaladora en la superficie con un liberador de tiempo cuya localización se muestra en la Figura 1.

RESULTADOS

Con los datos se graficaron secciones transversales y planos horizontales de algunos parámetros físico-químicos, se calculó la frecuencia de Brunt-Väisälä a lo largo del transecto II y se obtuvo la variación temporal de las corrientes registradas por los correntómetros.

Also, two current meters at 19°N and 92.7°W were settled in an "I" type arrangement: the first one, Aanderaa at 17 m depth and the second one, Interocean at 70 m depth, including a radio buoy at sea surface, with a timer signal (Fig. 1).

RESULTS

Using observational data, horizontal distributions and hydrographic sections were plotted from some physical and chemical parameters; the Brunt-Väisälä frequency was calculated along transect-II and the temporal variation of the currents was obtained from the current meters.

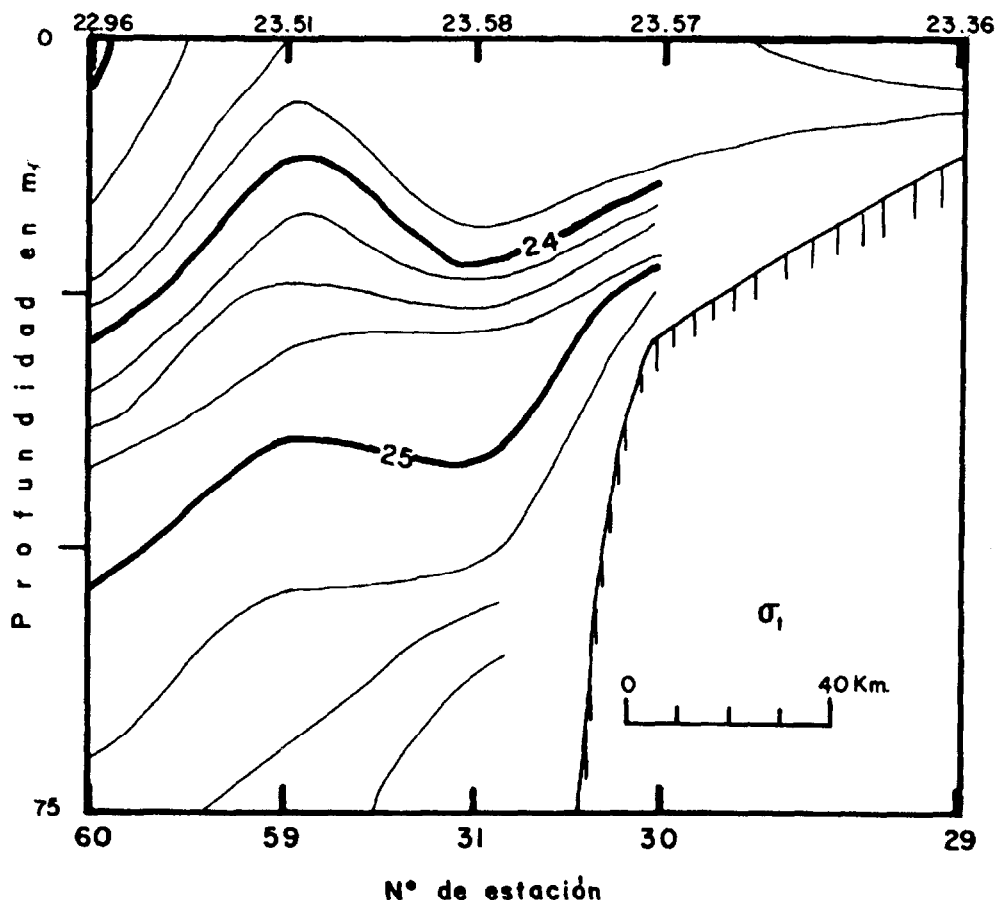


Figura 3. Sección transversal de sigma-t en el segundo transecto.
 Figure 3. Hydrographic section of sigma-t in the second transect.

La Figura 2 muestra la elevación de las isotermas en la estación 59; como se puede observar esta elevación decrece hacia las estaciones adyacentes. Los rangos de temperatura en este transecto van de 19.83 a 29.94°C presentando una pendiente máxima aproximadamente a los 15 m de profundidad.

La sección transversal de sigma-t presenta un rango entre 22.96 y 25.92, manifestando un surgimiento de las isopícnas en la estación 59 (Fig. 3).

Figure 2 shows the rise of the isotherms at station 59, which decreases towards adjacent stations. The temperature range in this transect goes from 19.83 to 29.94°C showing a maximum vertical gradient at 15 m depth approximately.

The sigma-t hydrographic section shows a range from 22.96 to 25.92 and a significant rise of the isopycnals at station 59 (Fig. 3).

Los valores obtenidos del cuadro de la frecuencia de Brunt-Väisälä fueron del orden de 10^{-4} s^{-2} ; en cada una de las estaciones hidrográficas se encontraron máximos relativos a diferentes profundidades (Fig. 4).

Las isotermas a 2 m de profundidad muestran un fuerte gradiente cercano a la costa, entre las longitudes 92.5° y 93° W y entre las latitudes 18.5° y 19.2° N aproximadamente; y un núcleo caliente ubicado a los 19.3° N y 92.6° W (Fig. 5); mientras que las isotermas a 10 m presentan un núcleo frío localizado a 19.5° N y 92.8° W y un gradiente costero más fuerte que el superficial (Fig. 6). Las isopícnas a 10 m muestran un núcleo de alta densidad en la misma región donde se presenta el núcleo de baja temperatura (Fig. 7); de igual manera las líneas de igual concentración de oxígeno a 2 y 10 m de profundidad presentan núcleos de alta concentración (Figs. 8 y 9) coincidiendo con los núcleos descritos anteriormente.

La magnitud de la velocidad registrada por el correntómetro a 17 m de profundidad fue del orden de 30 cm s^{-1} con dirección predominante suroeste; mientras que la registrada a 70 m de profundidad, es menor que la anterior, alcanzando los 10 cm s^{-1} , con una alta variabilidad en la dirección (Figs. 10 y 11).

Los resultados obtenidos de las observaciones fueron comparados con modelos teóricos de movimientos ciclónicos y anticiclónicos en donde las principales fuerzas actuantes son: las fuerzas de gradiente de presión, la fuerza de Coriolis y la fuerza centrífuga. Tales movimientos giratorios experimentan una circulación paralela a las superficies isobáricas; en coordenadas cilíndricas (r, θ, z), las ecuaciones que los gobiernan están escritas como (e.g. Neumann y Pierson, 1966):

$$f v + \frac{v^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad , \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g \quad , \quad (3)$$

Values obtained from the Brunt-Väisälä square frequency were about 10^{-4} s^{-2} ; relative maximums were found in each hydrographic station at different depths (Fig. 4).

The 2 m depth isotherms show a strong gradient near the coast, between 92.5° and 93° W and 18.5° and 19.2° N; and a warm core at 19.3° N, 92.6° W (Fig. 5); while the 10 m isotherms show a cold core at 19.5° N and 92.8° W and a coastal gradient stronger than the surface one (Fig. 6). The isopycnals at 10 m depth show a high density core at the same region of the low temperature core (Fig. 7); the lines of same dissolved oxygen concentration at 2 and 10 m depth show cores of high concentration (Figs. 8 and 9) agreeing with those previously described.

Current velocity registered at 17 m depth was 30 cm s^{-1} southwest; while that registered at 70 m depth was 10 cm s^{-1} , with high variations in its direction (Figs. 10 and 11).

Results obtained from observations were compared with theoretical models of cyclonic and anticyclonic motions, in which the main forces are: the pressure gradient force, the Coriolis force and the centrifugal force. These curved motions follow the isobaric surfaces; in cylindrical coordinates (r, θ, z), equations of motion become as (e.g. Neumann and Pierson, 1966):

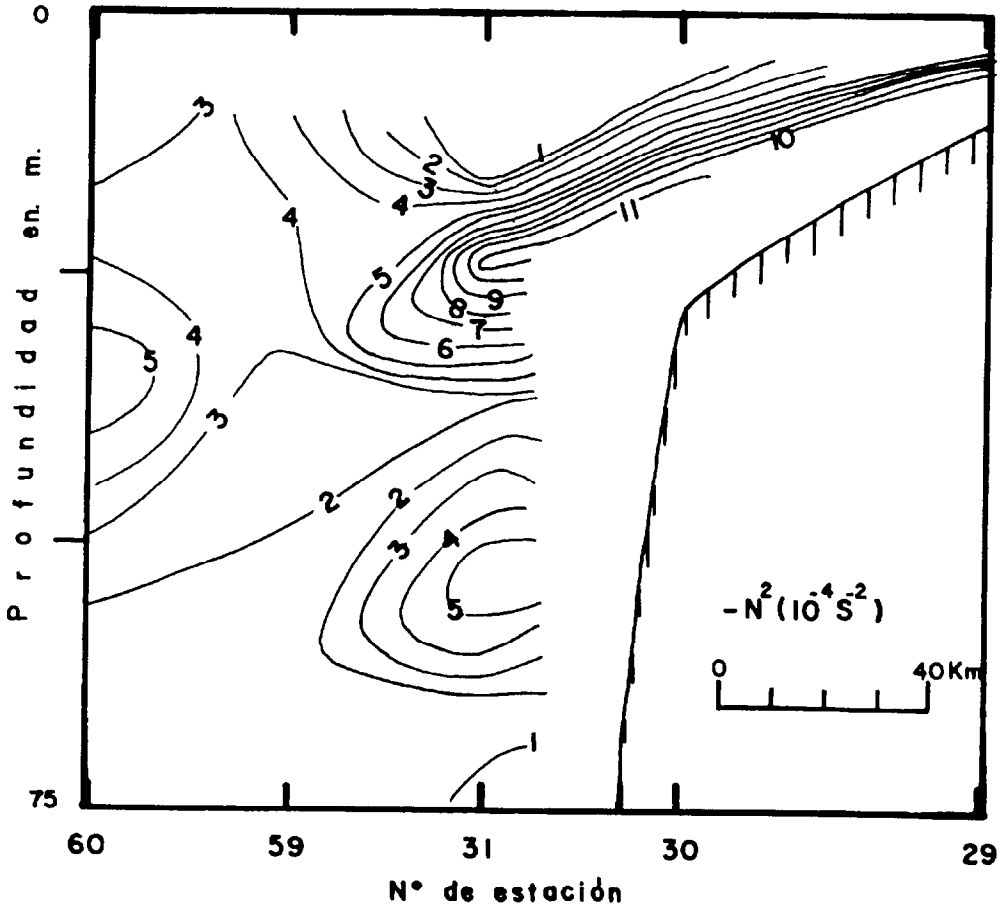


Figura 4. Sección transversal del cuadrado de la frecuencia de Brunt-Väisälä.
 Figure 4. Hydrographic section of the Brunt-Väisälä square frequency.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

donde las cantidades P , ρ , f , g y v representan la presión, la densidad del agua de mar, el parámetro de Coriolis, la aceleración de la gravedad y la velocidad tangencial, respectivamente. La solución de la ecuación (2) para la velocidad tangencial está dada por:

where P , ρ , f , g and v are pressure, density, Coriolis parameter, acceleration of gravity and tangential velocity, respectively. The solution of equation (2) for the tangential velocity is given as:

$$v = -\frac{rf}{2} \pm \left(\frac{r^2 f^2}{4} + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \right)^{1/2} \quad (5)$$

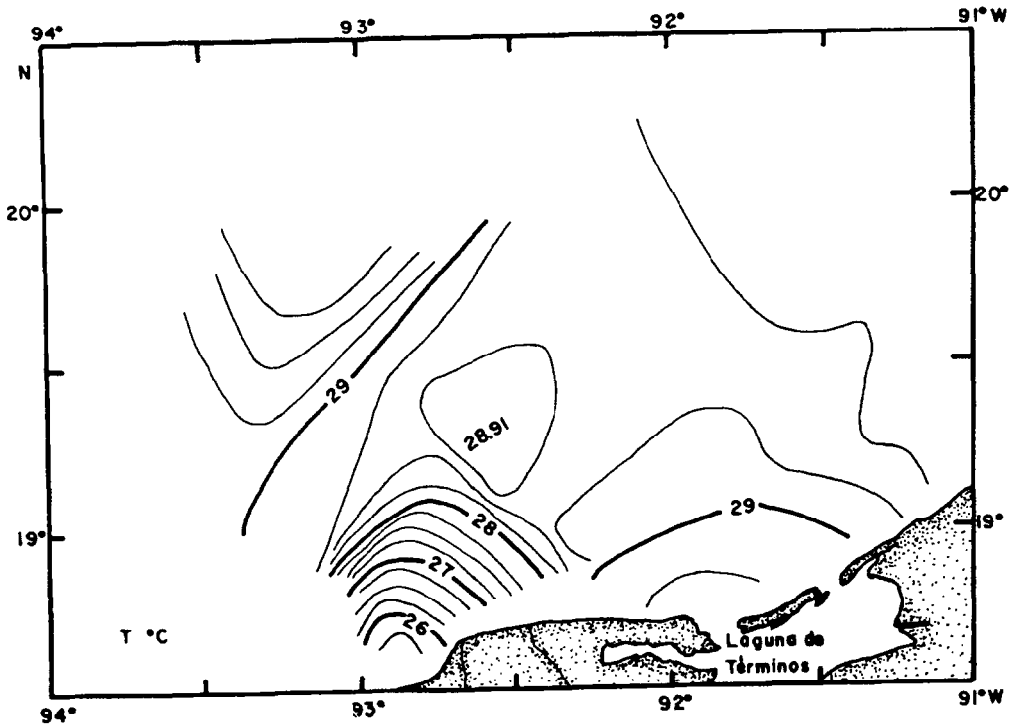


Figura 5. Isothermas a 2 m de profundidad.
Figure 5. Isotherms at 2 m depth.

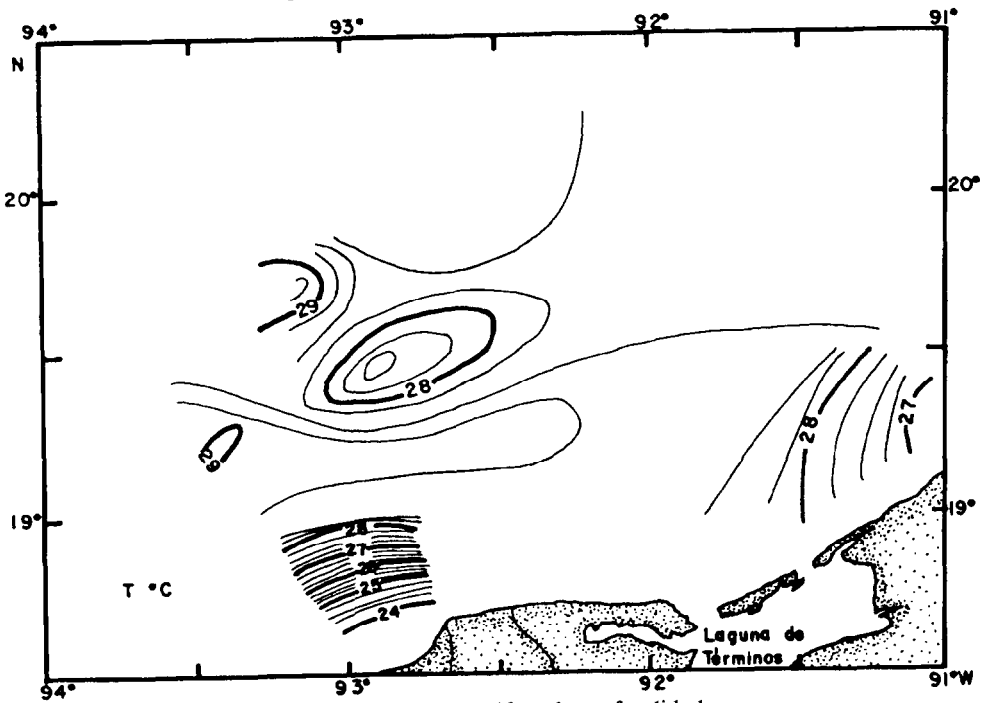


Figura 6. Isothermas a 10 m de profundidad.
Figure 6. Isotherms at 10 m depth.

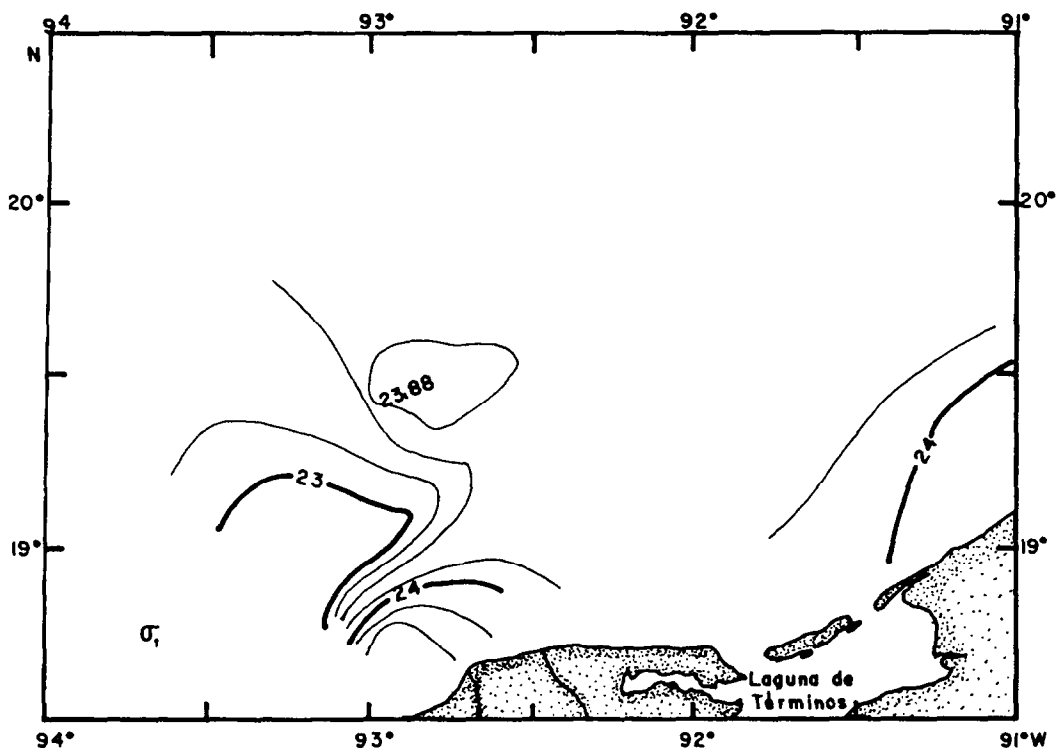


Figura 7. Isopicnas a 10 m de profundidad.
Figure 7. Isopycnals at 10 m depth.

donde los signos positivo y negativo corresponden a movimientos ciclónicos y anticiclónicos respectivamente. Teniendo en cuenta la distribución de masa y la inclinación de las superficies isobáricas en ambos tipos de movimientos giratorios, el gradiente vertical de la velocidad tangencial está dado por (e.g. Velasco-Mendoza, 1989):

where positive and negative signs are used in cyclonic and anticyclonic motions respectively. In accordance with mass distribution and inclination of isobaric surfaces in both circular motions, the vertical gradient of tangential velocity is given as (e.g. Velasco-Mendoza, 1989):

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\left(f + \frac{2v}{r}\right)\rho} \left[g \frac{\partial \rho}{\partial r} - \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}\right) \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] \quad (6)$$

Comparando la distribución de densidad, de temperatura y de frecuencia de Brunt-Väisälä con los modelos teóricos, se observó que el modelo que más se ajusta es el que corresponde al de un movimiento ciclónico (Fig. 12), en donde el gradiente vertical de velocidad estará dado por:

Comparing density, temperature and Brunt-Väisälä frequency distributions with theoretical models, we can observe that the best model in this case is that corresponding to a cyclonic motion (Fig. 12), where the vertical gradient of tangential velocity will be given by:

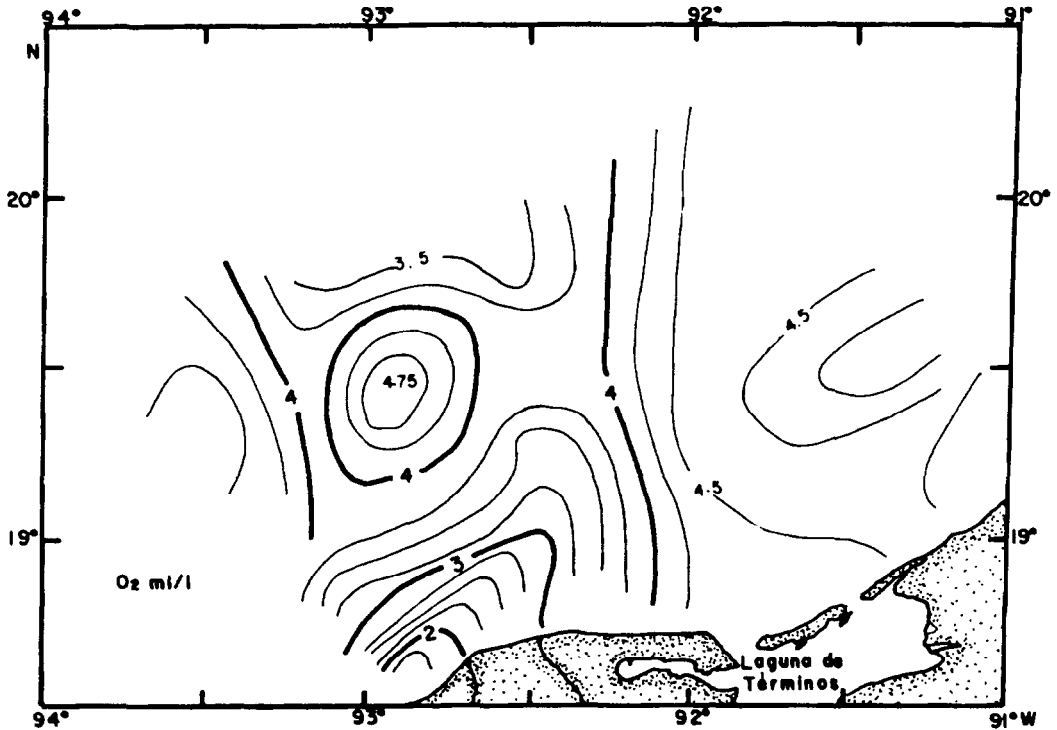


Figura 8. Isolíneas de concentración de oxígeno disuelto a 2 m de profundidad.
 Figure 8. Isolines of dissolved oxygen concentration at 2 m depth.

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\left(f + \frac{2|v|}{r}\right)\rho} \left[g \left| \frac{\partial \rho}{\partial r} \right| + \left(\frac{1}{\rho} \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] \quad (7)$$

En el caso particular del giro ciclónico observado en el sur de la Bahía de Campeche, el orden de magnitud del gradiente vertical de velocidad calculado es de 10^{-3} s^{-1} .

In the particular case of the cyclonic eddy observed in the south of the Bay of Campeche, an estimation of the magnitude order of the vertical gradient of tangential velocity is 10^{-3} s^{-1} .

DISCUSION

Comparando los cuatro casos de movimientos circulares para el Hemisferio Norte (Neumann y Pierson, 1966), dos del tipo ciclónico y dos del tipo anticiclónico, dependiendo de la distribución de masa y del gradiente vertical de velocidad tangencial

DISCUSSION

Comparing the four different cases of circular motions for the Northern Hemisphere (Neuman and Pierson, 1966), two cyclonic type and two anticyclonic type, depending on the mass distribution and on the vertical gradient of the tangential velocity (Velasco-

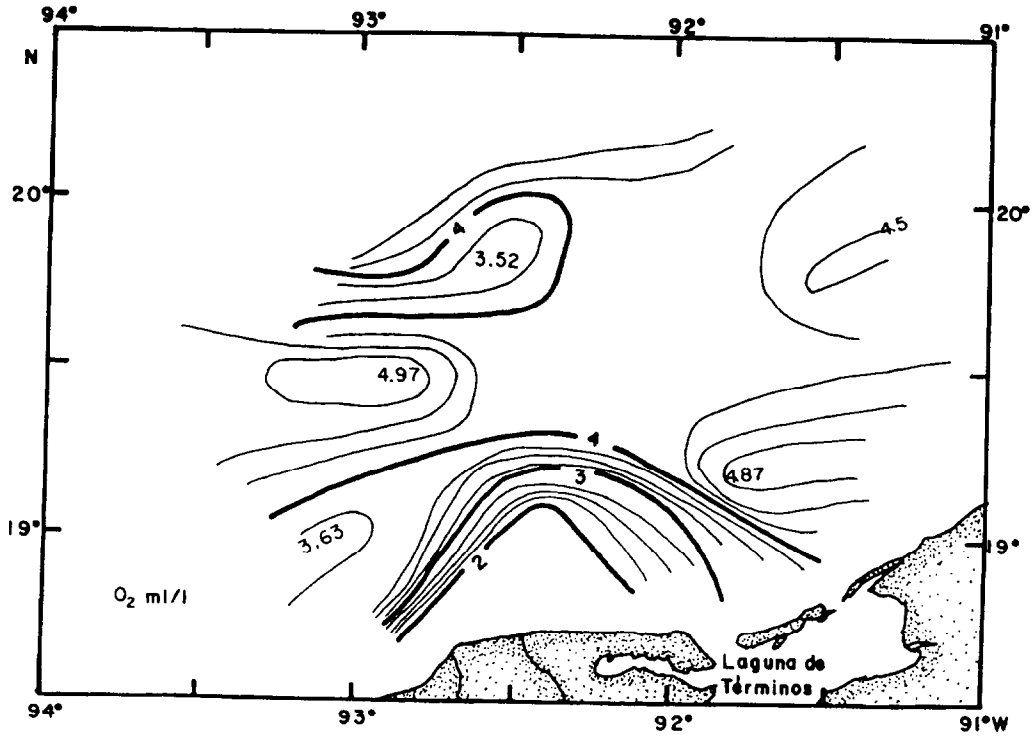


Figura 9. Isolíneas de concentración de oxígeno disuelto a 10 m de profundidad.
Figure 9. Isolines of dissolved oxygen concentration at 10 m depth.

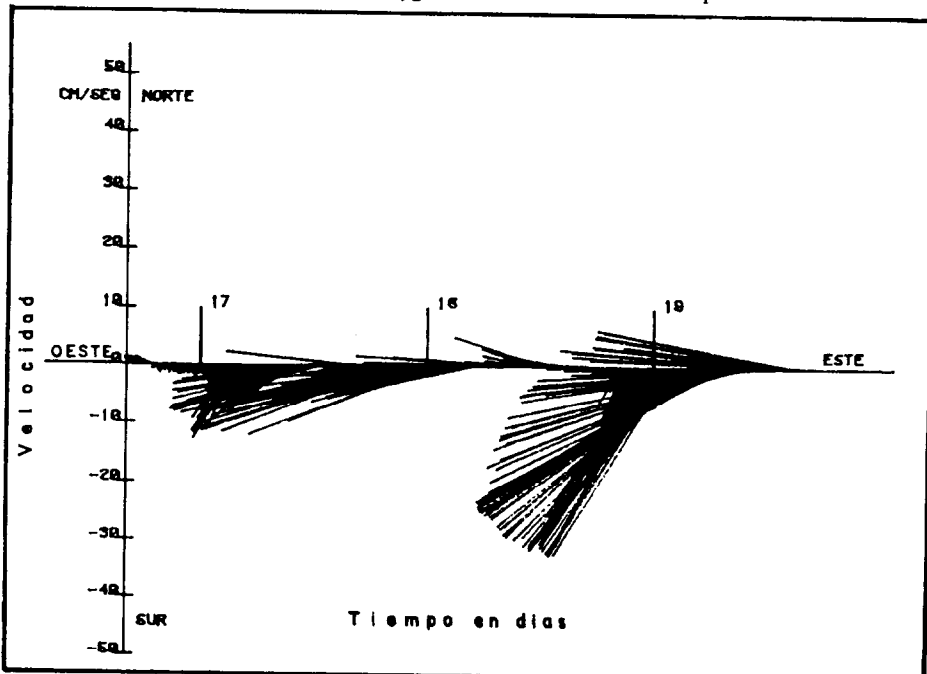


Figura 10. Corrientes observadas a 17 m de profundidad, del 16 de junio a las 16:10 al 19 de junio a las 16:10.
Figure 10. Currents observed at 17 m depth, from 16 June at 16:10 to 19 June at 16:10.

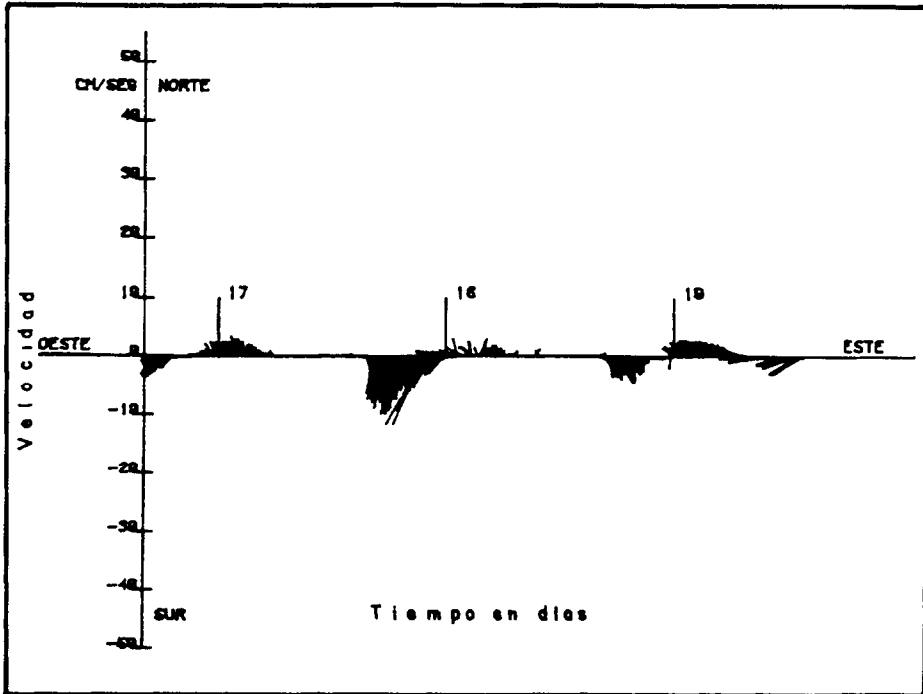


Figura 11. Corrientes observadas a 70 m de profundidad, del 16 de junio a las 16:10 al 19 de junio a las 16:10.

Figure 11. Currents observed at 70 m depth, from 16 June at 16:10 to 19 June at 16:10.

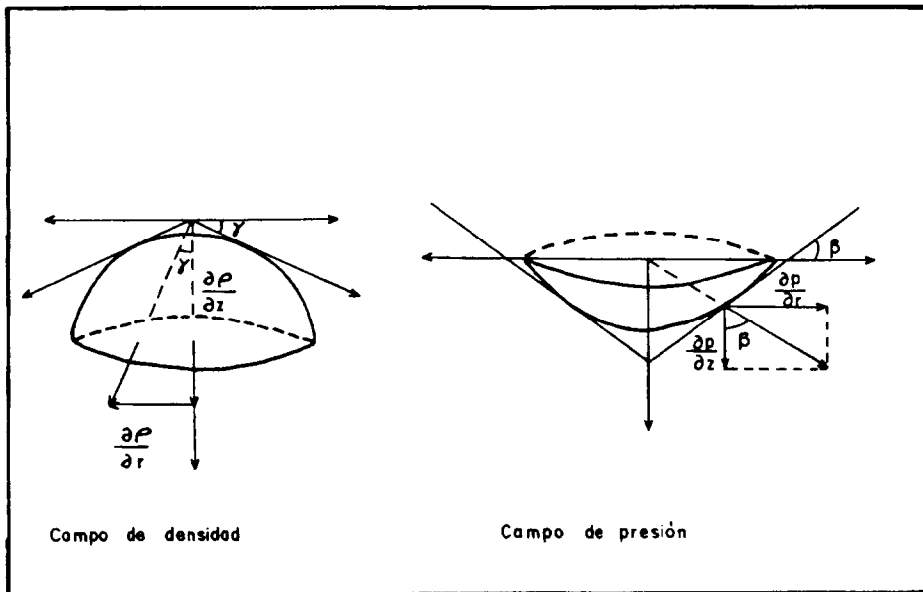


Figura 12. Representación de un giro ciclónico con $|v_r| > |v_s|$ en el Hemisferio Norte.

Figure 12. Representation of a cyclonic eddy with $|v_r| > |v_s|$ in the Northern Hemisphere.

(Velasco-Mendoza, 1989), con los resultados obtenidos de las observaciones, se encuentra que el comportamiento de las isopícnas, de las isotermas y de la distribución de la frecuencia de Brunt-Väisälä corresponde al modelo de giro ciclónico donde las velocidades tangenciales cumplen con la desigualdad $|\bar{v}_r| > |\bar{v}_\theta|$.

En un giro ciclónico en el Hemisferio Norte en donde el gradiente vertical de velocidad tangencial es negativo (ec. 7) el fluido experimenta un surgimiento mayor en el centro del giro provocando una elevación de las isotermas, un corte horizontal tendrá un gradiente térmico radial positivo. Sin embargo, en la superficie las isotermas sufren un hundimiento (Yentsch, 1984; Salas de León y Monreal-Gómez, 1986), produciendo en este nivel un gradiente térmico radial negativo; la estructura de las isotermas resultantes en el área de estudio coinciden con lo expuesto anteriormente. Por otro lado, los núcleos de alta concentración de oxígeno indican cierta persistencia del giro, debido a que el surgimiento de aguas de mayor concentración de nutrientes favorece el florecimiento del fitoplancton, el cual a su vez produce mayores cantidades de oxígeno.

La evidencia del giro es reforzada con resultados obtenidos de los correntómetros próximos al giro y por los valores máximos de la frecuencia de Brunt-Väisälä asociados a la posición de la pycnoclina, que se encuentra a diferentes profundidades en las distintas estaciones hidrográficas.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos hacer patente nuestro agradecimiento a la Secretaría de Marina, al personal que participó en el crucero oceanográfico, así como a la tripulación del B/O Dragaminas 20, por su valiosa colaboración.

LITERATURA CITADA

Alatorre Mendieta, M.A. (1976). Computer programs in marine science. Key to oceanographic record documentation No. 5, NODC, Oceanographic Programs 5-6.

Czitrom, S.P.R., Ruiz, F., Alatorre, M.A. and Padilla, A.R. (1986). Preliminary study of a front in the Bay of Campeche, Mexico. In:

Mendoza, 1989), with the results obtained during this cruise, it is found that the behaviour of the isopycnals, isotherms and Brunt-Väisälä frequency distribution agree with the cyclonic eddy model where the tangential velocities are $|\bar{v}_r| > |\bar{v}_\theta|$.

In a cyclonic eddy in the Northern Hemisphere where the vertical gradient of the tangential velocity is negative (eq. 7) the fluid experiments a larger rise at the eddy's center, causing a significant rise of the isotherms, where a horizontal cross section will have a positive radial thermal gradient. Yet, at sea surface the isotherms show a sinking (Yentsch, 1984; Salas de León and Monreal-Gómez, 1986), producing at this level a negative radial thermal gradient; this is shown by the structure of the resultant isotherms in the study area. The high dissolved oxygen concentration cores show certain persistence of the eddy, because the rise of higher nutrient concentration waters avail the phytoplankton bloom, which produces larger amounts of oxygen.

Evidence of the eddy is reinforced by results obtained from a current meter array near to the eddy, as well as by the maximum values of the Brunt-Väisälä frequency associated to the position of the pycnocline, which is found at different depths in the different hydrographic sampling stations.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to express their gratitude to the Secretaría de Marina, to the personnel that took an active part in the oceanographic cruises, as well as to the crew of the Dragaminas 20 for their valuable collaboration.

English translation by the author.

Jaques C.J. Nihoul (ed.), Marine Interfaces Ecohydrodynamics. Elsevier Press, pp. 301-311.

Emilsson, I. (1954). On the correction of reversing thermometers and construction of graph for total correction. Bolm. Inst. Oceanogr., S. Paulo, Brasil, 5(1-2): 71-81.

- Merrell, W.J. Jr. and Morrison, J.M. (1981). On the circulation of the western Gulf of Mexico with observations from April 1978. *J. Geophys. Res.*, (86): 4181-4185.
- Molinari, R.L., Festa, J.F. and Behringer, D.W. (1978). The circulation in the Gulf of Mexico derived from estimated dynamic height fields. *J. Phys. Oceanogr.*, 8: 987-996.
- Monreal Gómez, M.A. y Salas de León, D.A. Simulación de la circulación en la Bahía de Campeche (sometido para publicación).
- Neumann, G. and Pierson, W.J. Jr. (1966). *Principles of Physical Oceanography*. Prentice-Hall, 545 pp.
- NODC (1964). *Manual M-2 Processing Physical and Chemical Data from Oceanographic Stations*, National Oceanographic Data Center, Washington, D.C.
- Nowlin, W.D. Jr. (1972). Winter circulation patterns and property distributions. In: L.R.A. Capurro and J.L. Reid (eds.), *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. Texas A & M University Oceanographic Studies, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 2: 3-51.
- Padilla, A.R., Alatorre, M.A., Ruiz, F. y Czitrom, S.P.R. (1986). Observaciones recientes de la estructura termohalina en el sur del Golfo de México. En: J. Urrutia Fucugauchi (ed.), *Memoria UGM*, pp. 434-440.
- Pedlosky, J. (1979). *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag New York Inc., 624 pp.
- Salas de León, D.A. and Monreal Gómez, M.A. (1986). The role of the Loop Current in the Gulf of Mexico fronts. In: Jaques C.J. Nihoul (ed.), *Marine Interfaces Ecohydrodynamics*. Elsevier Press, pp. 295-300.
- Strickland, J.D.N. and Parsons, T.R. (1968). *A practical handbook of seawater analysis*. Fisheries Research of Canada, Bull. 167.
- Velasco Mendoza, H. (1989). Los giros de mesoescala en la Bahía de Campeche. Tesis de Licenciatura, Universidad Veracruzana.
- Yáñez Arancibia, A. and Sánchez Gil, P. (1983). Environmental behavior of Campeche Sound ecological system, off Términos Lagoon, México: Preliminary results. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol., UNAM*, 10(1): 117-136.
- Yentsch, C.S. (1984). Satellite representation of futures of ocean circulation indicated by CZCS colorimetry. In: Jaques C.J. Nihoul (ed.), *Remote Sensing of Shelf Sea Hydrodynamics*. Elsevier Press, pp. 337-354.