Ciencias Marinas (2009), 35(3): 287–296

Inertial currents in the southern Gulf of Mexico

Corrientes inerciales en el sur del Golfo de México

G Expósito-Díaz[1], DA Salas-de León[2]*, MA Monreal-Gómez[2], D Salas-Monreal[3], F Vázquez-Gutiérrez[2]

[1] Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Cd. Universitaria, Col. Copilco, Delegación Coyoacán, 04510 México DF.

[2] Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Cd. Universitaria, Col. Copilco, Delegación Coyoacán, 04510 México DF. * E-mail: salas@mar.icmyl.unam.mx

[3] Centro de Ecología y Pesquerías, Universidad Veracruzana, Hidalgo 617, Col. Río Jamapa, Boca del Río, Veracruz, CP 94290, México.

Abstract

Current velocity data recorded from 1 March to 17 June 1997 at four stations in the Bay of Campeche, southern Gulf of Mexico, were used to describe inertial currents. Data were low-pass filtered using a Lanczos filter, and transformed to the frequency domain with the classical Fast Fourier Transform, rotary spectra, and the Morlet Wavelet Method. The strongest total currents developed in the eastern part of the bay, with a dominant east-west component. The predominant direction of the total current was parallel to the coast. The amplitude of tidal currents was small when compared with subtidal currents. During the sampling period several episodes of inertial currents were observed, some of which corresponded to those predicted by theory. Inertial currents in the lower layer were linked through large phase lags, revealing the baroclinic mode of the inertial currents. Spectral energy was concentrated in the low-frequency bands, corresponding to inertial and subinertial periods. The dominance of spectral energy at low frequencies reveals the influence of mesoscale cyclonic and small-scale anticyclonic eddies in the northeastern Bay of Campeche. These eddies are believed to be the origin of the inertial currents, since the inertial currents observed were unrelated to wind forcing.

Key words: Bay of Campeche, Gulf of Mexico, inertial currents, tides.

Resumen

Las corrientes inerciales en la Bahía de Campeche, al sur del Golfo de México, fueron analizadas a partir de datos de corrientes tomados en cuatro anclajes, del 1 de marzo al 17 de junio de 1997. Los datos se filtraron mediante un filtro pasa bajas Lanczos y fueron transformados al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier, espectros rotacionales y el método de Wavelets usando coeficientes Morlet. Los resultados muestran que las corrientes más intensas se presentan en la parte este de la bahía, con una dominancia de la componente este-oeste y dirección predominante paralela a la costa. La amplitud de las corrientes de marea fue pequeña comparada con la amplitud de las corrientes submareales. Durante el periodo de muestreo se observaron varios episodios de corrientes inerciales, algunos de ellos coincidiendo con los predichos de forma teórica. Las corrientes subsuperficiales no mostraron alta correlación con las superficiales y se observó un desfase importante, indicando el modo baroclinico de las corrientes inerciales. La dominancia de la energía espectral en las frecuencias bajas muestra la influencia de giros de mesoescala y de pequeños giros anticiclónicos del noreste de la Bahía de Campeche. Se considera que estos giros son los que dieron origen a las corrientes inerciales, ya que no se encontró ninguna correlación entre el forzamiento por el viento y las corrientes inerciales.

Palabras clave: corrientes inerciales, Bahía de Campeche, Golfo de México, mareas.

Introduction

Ocean dynamics are characterized by processes that occur at a variety of temporal scales, among them inertial or free oscillations, which are prominent in some areas (e.g., Knauss 2000). Inertial oscillations may play a crucial role in pollution transport (Pickett *et al*. 1984, Schumann *et al*. 2005) and plankton fate (Pingree *et al*. 1982, Van Haren *et al*. 1999). For instance, the Bay of Campeche, in the southern Gulf of Mexico (fig. 1), is an area of major economic resources due to its fisheries and large number of oil platforms in operation (Salas-

Introducción

La dinámica del océano se caracteriza por procesos que ocurren en una amplia variedad de escalas temporales, entre ellas la inercial o de las oscilaciones libres, que son importantes en algunas regiones de los océanos (e.g., Knauss 2000). Las oscilaciones inerciales pueden jugar un papel crucial en el transporte de contaminantes (Pickett *et al.* 1984, Schumann *et al.* 2005) y en la distribución del plancton (Pingree *et al.* 1982, Van Haren *et al.* 1999). Por ejemplo, la Bahía de Campeche, en el sur del Golfo de México (fig. 1), es un sitio con gran

Figure 1. Geographical location of the study area, bathymetry (m), location of the mooring stations (S1–4), and the El Carmen and Dos Bocas weather station.

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio, batimetría (m), localización de los anclajes (S1–4) y de las estaciones meteorológicas El Carmen y Dos Bocas.

de León *et al*. 2007). In the Bay of Campeche, inertial currents derived from numerical solutions have been shown to be relevant for the transport of dissolved and suspended matter (Salas-de Leon *et al*. 1992a). Despite the bay's importance in terms of fisheries and oil production, and even though a number of studies have been conducted on its hydrography, little is known about its dynamics. The purpose of this study is to describe inertial currents in the Bay of Campeche, using field observations.

The Bay of Campeche has typical depths beyond 200 m. At the shelf edge, depth increases rapidly to 1000 m, reaching more than 3000 m at the centre of the bay. Water circulation in the entire Gulf of Mexico is dominated by two semi-permanent flow features: the Loop Current and a basin-scale anticyclonic eddy (Behringer *et al*. 1977). These characteristics strongly determine the circulation in the bay (e.g., Salas-de León *et al*. 1992b). In turn, this circulation pattern is conditioned by wind forcing, mass transport entering the gulf through the Yucatan Channel, and upwelling in the eastern corner of the Yucatan Peninsula (Cochrane 1972, Nowlin 1972, Merrell and Morrison 1981, Salas-de León and Monreal-Gómez 1986).

A cyclonic eddy dominates the mesoscale circulation within the Bay of Campeche (Monreal-Gómez and Salas-de León 1997). This eddy oscillates in strength and position during its transport toward the west, giving origin to small eddies (Díaz-Flores 2004). The small eddies, as well as secondary cyclonic and anticyclonic eddies, have been described with model results and observations (Salas-de León *et al*. 1992b).

Easterly winds dominate during the summer, when tropical storms affect the southern Gulf of Mexico. During the winter, the region is affected by storms locally called *Nortes*, i.e., northerly winds (Salas-de León *et al*. 1992a, Hernández-Tellez *et al*. 1993). These winds tend to trigger inertial currents in the cantidad de recursos debido a sus importantes pesquerías y al gran número de plataformas de petróleo que en ella operan (Salas-de León *et al.* 2007). En la Bahía de Campeche, los resultados de modelos numéricos muestran que las corrientes inerciales son importantes para el transporte de material disuelto y en suspensión (Salas-de León *et al.* 1992a). No obstante que la bahía tiene una gran importancia en términos de pesquerías y producción de petróleo y, a que se han realizado una gran cantidad de estudios sobre su hidrografía, se conoce poco acerca de su dinámica. El objetivo de este estudio es describir las corrientes inerciales en la Bahía de Campeche usando resultados de observaciones en el campo.

La Bahía de Campeche tiene profundidades típicas que van de los 200 m en la plataforma continental, profundidades que aumentan rápidamente hasta los 1000 m y alcanzan los 3000 m en el centro de la bahía. La circulación en el Golfo de México es dominada por dos flujos característicos semipermanentes: la Corriente de Lazo y un giro anticiclónico a escala de toda la cuenca (Behringer *et al.* 1977), características que determinan fuertemente la circulación en la bahía (e.g., Salas-de León *et al.* 1992b). A su vez, este patrón de circulación está condicionado por el forzamiento del viento, el transporte de masa que entra al golfo por el Canal de Yucatán y las surgencias que ocurren en la parte este de la Península de Yucatán (Cochran 1972, Nowlin 1972, Merrell y Morrison 1981, Salas-de León y Monreal-Gómez 1986).

Un giro ciclónico de mesoescala domina la circulación en la Bahía de Campeche (Monreal-Gómez y Salas-de León 1997). Este giro oscila tanto en su tamaño como en su posición durante su traslado hacia el oeste, dando origen a pequeños giros (Díaz-Flores 2004). Estos giros más pequeños, así como giros ciclónicos y anticiclónicos secundarios, fueron descritos mediante resultados obtenidos con modelos numéricos y observaciones (Salas-de León *et al.* 1992b).

Los vientos del este son dominantes durante el verano, cuando las tormentas tropicales afectan el sur del Golfo de México. Durante el invierno, la región es afectada por el paso de tormentas, localmente llamadas "Nortes" i.e., "Northerns" (Salas-de León *et al.* 1992a, Hernández-Tellez *et al.* 1993). Estos vientos tienden a formar corrientes inerciales en la Bahía de Campeche, por lo que este tipo de corrientes en el norte del Golfo de México son comúnmente asociadas a los huracanes y los Nortes. Por ejemplo, el paso del Huracán Gilberto durante septiembre de 1988, generó corrientes inerciales de 0.2 m s^{-1} (Shay *et al.* 1998) con un periodo inercial de ~30 h. En el sur del Golfo de México las corrientes inerciales sólo han sido estudiadas numéricamente. Este estudio contribuye a mostrar el desarrollo de las corrientes inerciales en la Bahía de Campeche usando datos observados en el campo.

Materiales y métodos

Marco teórico

Las corrientes inerciales son inducidas por transferencias intermitentes de momentum. Cuando la transferencia de

Bay of Campeche. Thus, inertial currents in the northern Gulf of Mexico are commonly related to hurricanes and *Nortes*. For example, during September 1988, Hurricane Gilbert induced inertial currents of 0.2 m s^{-1} (Shay *et al.* 1998) with an inertial period of ~30 h. In the southern Gulf of Mexico, inertial currents have only been studied numerically. This study contributes observational evidence on the development of inertial currents in the Bay of Campeche, using field measurements.

Material and methods

Theoretical frame

Inertial currents are driven by intermittent momentum transfer. After the momentum transfer ceases, the currents thus driven may be influenced by Coriolis accelerations. Under these conditions, i.e., accelerations only provided by Earth's rotation, the motion is inertial. The inertial currents are represented by (Knauss 2000):

$$u = V\sin(ft) \qquad v = V\cos(ft) \tag{1}$$

where $V^2 = u^2 + v^2$, u and v are water velocity components in the x and y direction, respectively, f is the Coriolis parameter, and t is time. Equation (1) describes the inertial currents or inertial oscillations. Particles driven by inertial currents describe a circle with diameter given by $D_i = 2V/f$ and a period $T_i = 2\pi/f = T/(2 \sin \phi)$, where T is a sidereal day and ϕ is the latitude. Although inertial motions are commonly present in the ocean, they generally are masked by motions with other frequencies.

Field observations

Current data were recorded with ten Aandera current meters from 1 March to 17 June 1997, placed in an array of four moorings. The ten current meters (two RCM-7, three RCM-4, and five RCM-S4) had a sampling period of 20 min. The position and total depth of the mooring sites (fig. 1) were measured with a GPS and an echosounder mounted on the R/V *Justo Sierra* of the National Autonomous University of Mexico (UNAM). Table 1 gives the location, the local inertial period in days, and the total depth at the mooring stations. Table 2 shows

momentum cesa, las corrientes son gobernadas por la influencia de la aceleración de Coriolis. Bajo estas condiciones, i.e., sólo bajo la aceleración debida a la rotación de la Tierra, el movimiento es inercial. Las corrientes inerciales son representadas por (Knauss 2000):

$$u = V\sin(ft) \qquad v = V\cos(ft) \tag{1}$$

donde $V^2 = u^2 + v^2$, u y v son las componentes en x y y de la velocidad del agua, respectivamente, f es el parámetro de Coriolis y t es tiempo. La ecuación (1) describe las corrientes inerciales u oscilaciones inerciales. Las partículas transportadas por las corrientes inerciales describen círculos cuyos diámetros están dados por $D_i = 2V/f$ y periodos $T_i = 2\pi/f = T/(2 \sin \phi)$, donde T es un día sideral y ϕ la latitud. No obstante que los movimientos inerciales están comúnmente presentes en el océano, éstos se encuentra por lo general, enmascarados por movimientos de otras frecuencias.

Observaciones en campo

Los datos de corrientes se obtuvieron del 1 de marzo al 17 de junio de 1997 con diez correntímetros Aandera colocados en cuatro anclajes o arreglos de correntímetros. Los diez correntímetros, dos RCM-7, tres RCM-4 y cinco RCM-S4, fueron programados para tomar datos cada 20 minutos. La posición y profundidad de los sitios de los anclajes (fig. 1) se ubicó con el GPS y la ecosonda del B/O *Justo Sierra* de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La tabla 1 muestra el nombre de los anclajes, su ubicación, el periodo inercial local en días y la profundidad total en la ubicación del anclaje. La tabla 2 muestra el nombre del instrumento, el tipo de instrumento, la profundidad de muestreo y la fecha de inicio y fin de la operación de los correntímetros.

Con el objeto de obtener la corriente de baja frecuencia, las frecuencias mayores a 0.04 cph (periodos menores a 25 h) que corresponden a la marea, fueron filtradas de la corriente total (Salas-Monreal y Valle-Levinson 2008), lo anterior fue para evitar la contaminación espectral por las componentes de alta frecuencia (Priestley 1981). Previo al análisis espectral se eliminó la tendencia de las series aplicando un filtro mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados (Salas-Monreal y Valle-

Table 1. Location, local inertial period, and total depth at the mooring stations.
Tabla 1. Ubicación, periodo inercial local y profundidad total en el sitio del anclaje.

Station	Latitude	Longitude	Local inertial period (days)	Total depth (m)
S1	20º08.035′	92º02.601′	1.4525	77.0
S2	19º26.762′	92º08.957′	1.5018	51.3
S3	18º37.199′	93º12.337′	1.5659	28.0
S4	18º32.868′	94º01.216′	1.5718	75.5

Table 2. Name of the instrument at the mooring site, type of instrument, sampling depth, and recording start and end times for each current meter.
Tabla 2. Nombre del instrumento en el anclaje, tipo de instrumento, profundidad de muestreo, y tiempo inicial y final del registro para cada correntímetro.

Instrument name	Instrument type	Sampling depth (m)	Start time (GMT)	End time (GMT)
S1S	RCM7	36.5	22:40/06/03	11:20/22/05
S1B	RCM4	70.5	22:40/06/03	15:20/27/04
S2S	RCM7	23.0	16:20/06/03	19:00/21/05
S2M	RCM4-S	34.5	16:20/06/03	19:00/21/05
S2B	RCM4	44.5	16:20/06/03	19:00/21/05
S3S	RCM4-S	16.0	17:40/03/03	19:00/12/06
S3B	RCM4-S	23.5	17:40/03/03	19:00/12/06
S4S	RCM4-S	17.3	17:40/02/03	12:00/20/05
S4M	RCM4-S	47.5	17:40/02/03	12:00/20/05
S4B	RCM4	66.0	17:40/02/03	12:00/20/05

the instrument name, type of instrument, sampling depth, and recording start and end times for each current meter.

To eliminate noise from the measurements, data were low-pass filtered using a Lanczos-type cosine filter of 0.04 cycles per hour for the inertial analysis (Salas-Monreal and Valle-Levinson 2008) in order to avoid aliasing by high-frequency components (Priestley 1981). Trends in the time series were removed prior to spectral analysis by fitting a linear least-square regression to the data from the series (Salas-Monreal and Valle-Levisnon 2008) to avoid distortion of low frequencies in the spectrum (Weedon 2003). In turn, series were transformed to the frequency domain using the classical Fast Fourier Transform (FFT) (Salas-de León *et al.* 1992a), rotary spectra (Godin 1988, Emery and Thomson 2001, Deepa *et al*. 2007), and the Morlet Wavelet Method (MWM) (Expósito-Díaz 2006).

Decomposition of the time series in time and frequency domains (FFT) allows identifying the variability of the dominant processes and their time dependence. A limitation of FFT and rotary spectra is that they do not provide identification of the exact frequency of interest for an energetic spectral peak, nor can they detect irregular or non-stationary spaced events; however, they provide useful information on the spectral energy associated with each frequency and the sense of rotation of the currents. By using a combination of FFT, rotary spectra, vector representation, and wavelet analysis, the timing of the different components of the frequency was identified reliably. In addition, the wavelet analysis provided detection of non-stationary events (Smith *et al*. 1998). Finally, the theoretical inertial frequency (f) and period (T) were computed for each of the mooring stations and compared with that obtained by the spectral analysis of the currents.

Results

A casual inspection of the current time series (fig. 2) shows a clockwise rotation tendency with increasing depth, which is consistent with the expected Coriolis effect in the northern

Levinson 2008), lo que evita la distorsión en las frecuencias bajas de los espectros (Weedon 2003). Posteriormente se transformaron las series de tiempo al dominio de las frecuencias mediante el método clásico de la transformada rápida de Fourier (FFT) (Salas-de León *et al.* 1992a), espectros rotacionales (Godin 1988, Emery y Thomson 2001, Deepa *et al.* 2007), y se aplicó un análisis mediante el método de Wavelets usando el filtro de Morlet (MWM) (Expósito-Díaz 2006).

La descomposición de la series de tiempo en el dominio de las frecuencias (FFT) permite identificar la variabilidad de los procesos dominantes y su dependencia en el tiempo. Sin embargo, una limitante de los espectros vía FFT y rotacionales es que no nos permiten identificar la variabilidad de la frecuencia de un pico espectral, ni detectar irregularidades o eventos no-estacionarios; no obstante dan información útil de la energía espectral asociada con cada frecuencia, así como proporcionan el sentido de rotación de las corrientes. Usando una combinación de los métodos FFT, rotacionales, representaciones vectoriales y análisis wavelets, se pueden identificar los diferentes componentes espectrales en el domino de las frecuencias de las series. Además, el método de wavelets permite identificar eventos no estacionarios (Smith *et al.* 1998). Finalmente se calcularon las frecuencias y periodos teóricos que correspondían a cada lugar de los anclajes y éstos se compararon con los obtenidos a partir del análisis espectral de las series de corrientes.

Resultados

Una inspección rápida de las series de tiempo de las corrientes de baja frecuencia (fig. 2) muestra una tendencia de las corrientes a rotar en dirección de las manecillas del reloj con la profundidad, lo que es consistente con lo esperado por el efecto de Coriolis en el hemisferio norte (Salas-de León *et al.* 1992b). Los espectros de las componentes de la velocidad u y v, que son las velocidades en la dirección x y y (fig. 3), en los que u es positiva hacia el este y v hacia el norte en el anclaje S1, muestran picos espectrales con periodos de 12.42 y

Figure 2. Time series of low-frequency currents (<0.04 cph) at mooring stations S1, S2, S3, and S4. Component *u* (left panel) is positive eastward and component *v* (right panel) is positive northward.

Figura 2. Series de tiempo de las corrientes de baja frecuencia (<0.04 cph) en los anclajes S1, S2, S3 y S4. En el panel de la izquierda se muestra la componente *u* que es positiva hacia el este y en el panel de la derecha la componente *v* que es positiva hacia el norte.

Figure 3. Power spectrum for current components *u* and *v* at mooring stations S1, S2, S3, and S4. The spectrum was performed with 14 degrees of freedom obtained by smoothing. The frequency value represented by the letter "f" corresponds to inertial processes.

Figura 3. Espectros de potencia de las componentes *u* y *v* de las corrientes en los anclajes S1, S2, S3 y S4. El espectro se obtuvo con 14 grados de libertad mediante filtrado. El lugar indicado por la letra "f" corresponde a la frecuencia de los procesos inerciales.

hemisphere (Salas-de León *et al*. 1992b). The spectral components of the *u* and *v* current velocities in the *x* and *y* direction (fig. 3), where *u* is positive eastward and *v* northward, at mooring station 1 (S1) show main peaks at periods of 12.42 and 25.82 h, corresponding to the principal lunar semidiurnal (M_2) and principal lunar diurnal (O_1) tide components, respectively. The letter "f" in figure 3 indicates the inertial frequency. The theoretical calculation for the inertial oscillations at this location gave a period of 34.86 h, equal to this obtained by spectral analysis. The peak in both frequency components was observed from surface to bottom.

Spectral analysis of the *u* and *v* current components at station 2 (S2) also showed a peak at the 12.42 h period, corresponding to the main lunar component (M_2). The *u* component showed a peak at the 23.93 h period (K_1). In the *v* component, the peak was observed at a period of 25.82 h (O_1). At this site, there were peaks corresponding to the inertial frequency of 36.00 h (1f) in both components, coinciding with the calculated theoretical frequency at this location (36.04 h).

The spectrum of the *u* and *v* velocity components at mooring station 3 (S3) shows the highest spectral density for both components (*u* and *v*) at periods of 25.82, 12.42, and 33.6 h. The calculated theoretical inertial period for this site was 37.58 h, which is consistent with the one calculated using the data (37.58 h).

The spectral density decreases gradually from station 1 (S1) to station 4 (S4), i.e., it diminishes from east to west in the area studied. At S4, the peaks had periods of 25.82 and 12.42 h for both components. The inertial theoretical period computed at this station was 37.72 h, which is consistent with the one obtained from the observations (37.72 h) using the spectral analysis (1f). The results of the FFT spectral analysis revealed

25.82 h, que corresponden a las principales componentes de marea lunar (M_2) y (O_1), respectivamente. La letra "f" en la figura 3 indica las frecuencias inerciales. El periodo inercial obtenido por el análisis espectral para el anclaje S1 fue de 34.86 h, similar al obtenido de forma teórica. El pico espectral inercial se encontró tanto en las series de superficie como en las de fondo para las dos componentes de velocidad.

El análisis espectral de las componentes *u* y *v* en el anclaje S2 también mostró picos con periodos de 12.42 h, correspondiendo con la componente principal lunar semidiurna (M_2). La componente *u* presentó un pico con periodo de 23.93 h (K_1). Para la componente *v* el pico se observó a un periodo de 25.82 h (O_1). En este lugar se observaron picos espectrales en ambas series que coincidieron con la frecuencia inercial teórica de 36.04 h.

El espectro de las componentes de velocidad *u* y *v* en la estación S3 muestra que la mayor densidad espectral para ambas componentes (*u* y *v*) ocurren en periodos de 25.82, 12.42 y 33.6 h. El periodo inercial obtenido mediante análisis espectral de los datos (37.58 h) fue consistente con el periodo teórico inercial para esta estación, que es de 37.58 h.

La densidad espectral decae gradualmente de la estación S1 a la estación S4, i.e., a una disminución de este a oeste en la

Figure 4. Time series of wind speed (m s^{-1}) at El Carmen weather station, and current speed (cm s^{-1}) at station S2.

Figura 4. Series de tiempo de la velocidad del viento (m s^{-1}) en la estación meteorológica El Carmen y velocidades de las corrientes (cm s^{-1}) en la estación S2.

Figure 5. Time series of wind speed (m s^{-1}) at Dos Bocas weather station, and current speed (cm s^{-1}) at station S4.

Figura 5. Series de tiempo de la velocidad del viento (m s^{-1}) en la estación meteorológica Dos Bocas y velocidades de las corrientes (cm s^{-1}) en la estación S4.

the presence of oscillations with inertial periods in the dynamics of the Bay of Campeche. Similar results were obtained with the rotary spectra (figures not shown).

Cross-correlation and cross-spectral analysis between current time series and time series of winds (figs. 4, 5) do not show any significant correlation (r^2 = 0.023) between inertial oscillations and winds. It is thus likely that the inertial events are forced by the oscillations of the centers of the cyclonic and anticyclonic eddies observed in the northern part of the study area. These oscillations were observed from satellite images starting one day before the inertial events and their influence is noticeable at the mooring sites (Díaz-Flores 2004).

The time series were filtered with the Lanczos low-pass filter to eliminate tidal frequencies, i.e., periods smaller than 25 h. The filtered series were also used to analyze subtidal current components with the MWM to identify inertial oscillaitions, as well as their phase and approximate time of duration. The wavelet transform shows that the low-frequency oscillations (higher period) remain throughout the sampling period (fig. 6), while higher frequency (smaller period) oscillations are ephemeral. The inertial oscillations can be identified in figure 6 with periods of 1.57 days and lower variance. The occurrence of inertial oscillations in time, obtained by wavelets, was confirmed using progressive vector diagrams (fig. 7).

This study only shows the wavelet spectrum obtained for station 4 because this figure clearly shows the inertial events. At station 1, two oscillations were observed, with a period of 34.80 h on days 91 and 133, corresponding to 2 April and 14 May 2007, respectively. At station 2, the oscillations with a period of 36.00 h occurred on days 87 and 122, corresponding to 29 March and 3 May, respectively. At station 3, the oscillations with an inertial period of 37.58 h in the *u* component occurred on days 93 and 126, corresponding to 4 April and 7 May, respectively. Finally, at station 4, three inertial oscillations of 37.72 h were observed at the surface during days 76 (18 March), 92 (3 April) and 127 (8May), persisting for

densidad espectral en la región de estudio. En la estación correspondiente al anclaje S4 los picos espectrales tienen periodos de 25.82 y 12.42 h para ambas componentes de la velocidad. El periodo inercial teórico calculado para esta estación es de 37.72 h, mientras que el periodo calculado espectralmente de los datos (37.72 h) fue similar al periodo teórico. El análisis espectral obtenido mediante FFT reveló la presencia de oscilaciones con periodos inerciales en la dinámica de la Bahía de Campeche. Resultados similares se obtuvieron mediante espectros rotacionales (no mostrados).

La correlación y los espectros cruzados de las componentes de la velocidad con las series de tiempo de vientos (figs. 4, 5) no muestran una correlación significativa (r^2 = 0.023) especialmente entre oscilaciones inerciales y viento. Por esta razón parece ser que las oscilaciones inerciales fueron forzadas por las oscilaciones de los centros de los giros ciclónico y anticiclónico observados en la parte norte de la zona de estudios. Se observó a partir de imágenes de satélite que estas oscilaciones iniciaron un día antes de presentarse los eventos inerciales y su influencia en la zona de los anclajes es notable (Díaz-Flores 2004).

Las series de tiempo fueron filtradas con un filtro pasabajas Lanczos para eliminar las frecuencias correspondientes a eventos de mareas, i.e., periodos menores a 25 h. Las series filtradas fueron usadas para su análisis espectral mediante el método MWM para identificar oscilaciones inerciales, así como para ver sus fases y tiempo de duración. La transformada mediante el método de wavelets muestra que las frecuencias bajas de las oscilaciones (periodos altos) son permanentes durante el tiempo del muestreo (fig. 6), mientras que las oscilaciones de frecuencias altas (periodos bajos) son efímeras. En la figura 6 se pueden identificar las oscilaciones inerciales con periodos de 1.57 días en la parte baja de la varianza. La ocurrencia de las oscilaciones inerciales en el tiempo, obtenida mediante wavelets, fue confirmada mediante el análisis de los diagramas de vectores progresivos (fig. 7).

approximately 10 days. Figure 7 shows the progressive vector diagrams at station 4 with the corresponding inertial loop on 3 April and the trajectory and dissipation time of the inertial event.

Discussion

In the northernmost section (station 1) the amplitude of the inertial oscillations was slightly higher for the *v* component than for the *u* component, decaying slowly with depth. Diagnostic calculations (Xing and Davies 2004) show that, in the near-coastal region, inertial oscillations are inhibited by the coastal boundary. Away from the boundary, the magnitude of the inertial oscillations increases, showing a 180º phase shift in the vertical. This feature was observed at stations 2 and 4, where the amplitude of the inertial oscillations was slightly higher below the upper layer. The wavelet method revealed inertial oscillations of two and three days duration. The progressive vector diagram shows that the dissipation time of the inertial events is between 6 and 9 h. This is consistent with Pollard (1970) and Millard (1970), who also found that the evolution and decline of the inertial currents are due to a dispersion of the inertial oscillations generated within the region. The disappearance of the inertial oscillations is usually produced by a second wind pulse with opposite direction to the one that forced the inertial oscillations in the surface layer. Smith (1973) supported this argument. Kundu (1976) stated that this is possible, but suggested that it is not the only factor responsible for the intermittence of the inertial oscillations. Intermittence is produced by several mechanisms, such as the horizontal heterogeneity of the ocean, the horizontal component of the Coriolis parameter, and non-linear interactions with currents of low frequencies (Hasselman 1970), as in this study.

The amplitude of tidal currents found in this study is small when compared with total motion amplitudes. During the sampling period, several episodes of inertial currents were observed, some of which corresponded to those predicted by theory. The currents in the lower layer are not strongly linked to those at the surface. A typical phase lag of 0.85 h for M_2 and 3.46 h for K_1 is observed between lower and upper layers, evidencing that the inertial currents have a baroclinic first mode. The spectral energy was concentrated at the low-frequency bands, corresponding to tidal and inertial periods. Some of these oscillations were also observed in the progressive vector diagrams in a semicircular path. The dominance of the MWM spectral energy at low frequencies revealed the influence of the mesoscale cyclonic and small anticyclonic eddies of the northeastern Bay of Campeche. This was because the oscillations of the cyclonic and anticyclonic eddy cores observed in the northeastern part of the study area were highly correlated with the inertial events. Those eddies can be the origin for the inertial currents because the observed inertial currents were unrelated to wind forcing. Similar responses have been reported for other regions of the world ocean (Benitez-Nelson and McGillicuddy 2008).

En este estudio se muestra sólo el resultado del espectro obtenido mediante el método de wavelets Morlet de la estación S4, ya que esta figura es la que muestra más claramente los eventos inerciales. En la estación S1 se observaron dos oscilaciones con periodos de 34.80 h durante los días 91 y 133, correspondientes al 2 de abril y 14 de mayo de 2007, respectivamente. En la estación S2 se encontraron oscilaciones inerciales con periodos de 36.00 h durante los días 87 y 122, que corresponden al 29 de marzo y al 3 de mayo, respectivamente. En la estación S3, las oscilaciones observadas con un periodo inercial de 37.58 h en la componente *u* ocurrieron durante los días 93 y 126, que corresponden al 4 de abril y 7 de mayo, respectivamente. Finalmente, en la estación S4 se observaron tres oscilaciones inerciales con periodos de 37.72 h en la serie de datos del correntímetro superficial durante los días 76 (18 de marzo), 92 (3 de abril) y 127 (8 de mayo), persistiendo por aproximadamente 10 días. La figura 7 muestra el diagrama de vectores progresivos para la estación S4 con un rizo inercial durante el 3 de abril, así como su trayectoria y tiempo de disipación.

Discusión

En la porción más al norte (estación 1) la amplitud de las oscilaciones inerciales fue ligeramente mayor para la componente *v* que para la componente *u* de las corrientes y decayó suavemente con la profundidad, mientras que en las otras tres localidades *u* es más grande que la componente *v*. Cálculos efectuados por Xing y Davis (2004) muestran que, cerca de la costa, las oscilaciones inerciales son inhibidas por la frontera, que es la costa. Al alejarse de la costa la magnitud de las oscilaciones inerciales se incrementa, mostrando un defasamiento de 180° en la vertical. Esta característica se observó en las estaciones 2 y 4, donde la amplitud de las oscilaciones inerciales fue ligeramente mayor debajo de la capa superficial. El método de wavelets reveló la ocurrencia de oscilaciones inerciales con duraciones de dos y tres días. El diagrama de vectores progresivos muestra que el tiempo de disipación de los eventos inerciales fue entre 6 y 9 h. Esto es consistente con lo encontrado por Pollard (1970) y Millard (1970), quienes también encontraron que la evolución y declive de las corrientes inerciales se deben a la dispersión de las oscilaciones inerciales generada en la región. La desaparición de las oscilaciones inerciales es usualmente producida por un segundo impulso de viento en dirección opuesta a la del forzamiento que produjo la oscilación inercial en la capa superficial. Smith (1973) apoya este argumento. Kundo (1976) dice que es posible, sin embargo sugiere que éste no es el único factor responsable de la intermitencia de las oscilaciones inerciales. La intermitencia se produce por varios mecanismos tales como la heterogeneidad en las condiciones horizontales del océano, la componente horizontal del parámetro de Coriolis y la no linealidad de las interacciones de las corrientes de baja frecuencia (Hasselman 1970), como es el caso en este estudio.

Figure 6. Morlet wavelet spectrum *u* (left panel) and *v* (right panel) current components at station S4, at depths of 23 m (**a**, **b**), 34.5 m (**c**, **d**), and 44.5 m (**e**, **f**). The period values represented by the dashed line and the letter "f" correspond to inertial processes.

Figura 6. Espectro obtenido mediante el método de Wavelets Morlet componentes *u* (panel izquierdo) y *v* (panel derecho) de la estación S4, a las profundidades de 23 m (**a**, **b**), 34.5 m (**c**, **d**) y 44.5 m (**e**, **f**). Los valores del periodo indicados por una línea punteada y la letra "f" corresponden a los procesos inerciales.

Figure 7. Progressive vector diagrams for low-frequency currents at station S4.

Figura 7. Diagrama de vectores progresivos para las corrientes de baja frecuencia de la estación S4.

This study describes the presence of a low-frequency component in current velocities in the southern Gulf of Mexico. The low frequency variations are related to inertial oscillations with an approximate duration of three days. Spectral analysis indicated that inertial and semidiurnal frequency motions were the major contributors to current velocities. The observed near-inertial frequency was about 0.1% lower than the local inertial frequency, suggesting that the near-inertial motion was embedded in a region of anticyclonic shear.

The highest spectral energy in the inertial oscillations corresponded to the north-south current component, which decayed slowly with depth, although in some cases, as at stations 2 and 4, the spectral density was slightly higher near the bottom than in the surface layer. In turn, in the east-west component, the current amplitude increased seaward reaching a maximum near the shelf break. During the three months of observations, several episodes of inertial currents were observed. The frequencies of these events obtained from the data coincided with those predicted by theory.

Acknowledgements

This study was financed by PEMEX and the Institute of Marine Science and Limnology (UNAM). We would like to acknowledge the crew and officers of the R/V *Justo Sierra* for their dedication during the different stages of sampling. Figures were substantially inproved by J Castro.

References

Behringer DW, Molinari RL, Festas JF. 1977. The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. J. Geophys. Res. 82: 5469–5476.

Benitez-Nelson CR, McGillicuddy Jr. DJ. 2008. Mesoscale physical-biological-biogeochemical linkages in the open ocean: An introduction to the results of the E-Flux and EDDIES programs. Deep-Sea Res. II 55: 1133–1138.

Cochrane JD. 1972. Separation of an anticyclone and subsequent developments in the Loop Current (1969). In: Capurro LRA, Reid JL (eds.), Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico. Gulf Publishing Co., Houston, Texas, pp. 91–106.

Deepa R, Seetaramayya P, Nagar SG, Gnanaseelan C. 2007. Inertial oscillation forced by the September 1997 cyclone in the Bay of Bengal. Curr. Sci. 92: 790–794.

Díaz-Flores MA. 2004 Estudios de las corrientes en la Bahía de Campeche utulizando un perfilador acústico Doppler (ADCP). M.Sc. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 67 pp.

Emery WJ, Thomson RE. 2001. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. 2nd and revised ed. Elsevier, Amsterdam, 654 pp.

Expósito-Díaz G. 2006. Corrientes inerciales al sur del Golfo de México. M.Sc. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 94 pp.

Godin G. 1988. Tides. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Mexico, 290 pp.

Hasselman K. 1970. Wave-driven inertial oscillations. Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 1: 463–502.

Hernández-Téllez J, Aldeco J, Salas-de León DA. 1993. Cooling and heating due to latent and sensible heat over the Yucatan continental shelf. Atmósfera 6: 223–233.

La amplitud de las corrientes de marea encontradas en este trabajo fue pequeña comparada con las amplitudes de las corrientes totales. Durante el tiempo del muestreo se observaron varios episodios de corrientes inerciales, algunos de los cuales correspondieron en periodo con los predichos por la teoría. Las corrientes en las capas profundas no estuvieron fuertemente ligadas con las de la superficie. Se observó un defasamiento típico de 0.85 h para la M_2 y de 3.46 h para la K_1 entre las capas superficiales y las profundas, lo que evidencia que las corrientes inerciales corresponden a un primer modo baroclínico. La energía espectral se concentró en la banda de las frecuencias bajas, correspondiendo a periodos de marea e inerciales. Algunas de estas oscilaciones fueron observadas también en el diagrama de vectores progresivos mediante trayectorias semicirculares. La energía dominante en el espectro obtenido por el método de wavelets con Morlet reveló la influencia de los giros ciclónicos y anticiclónicos de mesoescala del norte de la Bahía de Campeche. Esto se debe a que las oscilaciones del centro de los giros ciclónicos y anticiclónicos observadas en la parte norte de la zona de estudio estuvieron fuertemente correlacionadas con los eventos inerciales. Las oscilaciones de los centros de estos giros pueden ser las que forzaron las corrientes inerciales, ya que estas corrientes no mostraron una correlación significativa con el forzamiento por viento. En otras regiones de los océanos en el mundo se han reportado respuestas similares (Benitez-Nelson y McGillicuddy 2008).

Este estudio describe la presencia de componentes de baja frecuencia en las velocidades de las corrientes en el sur del Golfo de México. Las variaciones en las frecuencias bajas están relacionadas con las oscilaciones inerciales con duración aproximada de tres días. El análisis espectral indica que los movimientos con frecuencias inerciales y los semidiurnos son las componentes más importantes de las corrientes. Las diferencias entre las frecuencias inerciales observadas y las teóricas fue menor a 0.1%. Estos resultados sugieren que los movimientos inerciales estuvieron insertados en una región de esfuerzos tangenciales de un giro anticiclónico.

La mayor energía espectral de las oscilaciones inerciales correspondió a la componente norte-sur de las corrientes, la cual decayó suavemente con la profundidad; sin embargo, en algunos casos como en las estaciones 2 y 4, la densidad espectral fue ligeramente mayor cerca del fondo que en la capa superficial. A su vez, la amplitud de la componente este-oeste de las corrientes se incrementó mar adentro alcanzando un máximo cerca del borde del talud. Durante los tres meses de observaciones se detectaron varios episodios de corrientes inerciales. Las frecuencias de estos eventos coincidieron con los predichos por la teoría.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por PEMEX y por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Los autores agradecen a la

Knauss JA. 2000. Introduction to Physical Oceanography. Prentice Hall, New Jersey, 309 pp.

Kundu PK. 1976. An analysis of inertial oscillations observed near Oregon coast. J. Phys. Oceanogr. 6: 879–893.

Merrel WJ Jr, Morrison JM. 1981. On the circulation of the Gulf of Mexico with observations from April 1978. J. Geophys. Res. 86: 4181–4185.

Millard RC. 1970. Comparison between observed and simulated wind-generated inertial oscillations. Deep-Sea Res. 17: 813–821.

Monreal-Gómez MA, Salas-de León DA. 1997. Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. In: Lavín-Peregrina MF (ed.), Oceanografía Física en México. Monografía No. 3 de la Unión Geofísica Mexicana, pp. 183–199.

Nowlin WD Jr. 1972. Winter circulation patterns and property distributions. In: Capurro LRA, Reid JL (eds.), Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico. Gulf Publishing Co., Houston, Texas, pp. 3–15.

Pickett RL, Partridge RM, Arnone RA, Galt JA. 1984. The Persian Gulf, oil and natural circulation. Sea Tech. 9: 23–25.

Pingree RD, Mardell GT, Holligan PM, Griffiths DK, Smithers J. 1982. Celtic Sea and Armorican Current structure and the vertical distributions of temperature and chlorophyll. Cont. Shelf Res. 1: 99–116.

Pollard RT. 1970. On the generation by winds of inertial oscillations in the ocean. Deep-Sea Res. 17: 795–812.

Priestley MB. 1981. Spectral Analysis and Time Series. Academic Press, London, 237 pp.

Salas-de León DA, Monreal-Gómez MA. 1986. The role of the Loop Current in the Gulf of Mexico fronts. In: Nihoul JCJ (ed.), Marine Interfaces Ecohydrodynamics. Elsevier Oceanographic Series, pp. 295–300.

Salas-de León DA, Monreal-Gómez MA, Aldeco-Ramírez J. 1992a. Períodos característicos en las oscilaciones de parámetros meteorológicos en Cayo Arcas, México. Atmósfera 5: 193–205.

Salas-de León DA, Monreal-Gómez MA, Colunga-Enríquez G. 1992b. Hidrografía y circulación geostrófica en el sur de la Bahía de Campeche. Geofís. Int. 3: 315–323.

tripulación y oficiales del B/O *Justo Sierra* por su dedicación durante las diferentes etapas del muestreo. Las figuras fueron mejoradas sustancialmente por J Castro.

Salas-de León DA, Monreal-Gómez MA, Salas-Monreal D, Expósito-Díaz G, Riverón-Enzástiga ML, Vázquez-Gutiérrez F. 2007. Tidal current components in the southern Bay of Campeche, Gulf of Mexico. Geofís. Int. 2: 141–147.

Salas-Monreal D, Valle-Levinson A. 2008. Sea level slopes and volume fluxes produced by atmospheric forcing in estuaries: Chesapeake Bay by case. J. Coast. Res. 6: 1–10.

Schumann EH, Churchill JRS, Zaayman HJ. 2005. Oceanic variability in the western sector of Algoa Bay, South Africa. Afr. J. Mar. Sci. 1: 65–80.

Shay LK, Mariano AJ, Jacob SD, Ryan EH. 1998. Mean and near-inertial ocean current response to Hurricane Gilbert. J. Phys. Oceanogr. 5: 858–889.

Smith LC, Turcotte D, Isacks BL. 1998. Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform. Hydrol. Process. 12: 233–249.

Smith R. 1973. Evolution of inertial frequency oscillations. J. Fluid Mech. 60: 383–389.

Van Haren H, Maas L, Zimmerman JTF, Ridderinkhof H, Malschaert H. 1999. Strong inertial currents and marginal internal wave stability in the central North Sea. J. Geophys. Res. L. 19: 2993–2996.

Weedon G. 2003. Time-series Analysis and Cyclostratigraphy. Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles. Cambridge Univ. Press, 259 pp.

Xing J, Davies AM. 2004. A three-dimensional model study of near-inertial motion: Generation and influence of an along-shelf flow. Ocean Dyn. 2: 163–178.

Recibido en febrero de 2008;
aceptado en agosto de 2009.