

## MODELADO DE CORRIENTES RESIDUALES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLA

### MODELING OF RESIDUAL CURRENTS IN THE GULF OF CALIFORNIA USING DIFFERENT GRID SIZES

G. García-Silva\*  
S.G. Marinone\*\*

Departamento de Oceanografía Física  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
Km. 107 carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, CP 22860, Baja California, México  
\* E-mail: [garciag@cicese.mx](mailto:garciag@cicese.mx)  
\*\* E-mail: [marinone@cicese.mx](mailto:marinone@cicese.mx)

*Recibido en febrero de 1997; aceptado en octubre de 1997*

#### RESUMEN

Se estudió el efecto del tamaño de malla en el modelado de las corrientes residuales producidas por la marea ( $M_2$ ) en el Golfo de California. Los tamaños de malla usados van desde  $14 \times 14$  hasta  $2 \times 2$  km. Los resultados muestran que el modelado de la marea y de las corrientes residuales fue consistente para las diferentes mallas. En el norte del golfo se obtuvo un patrón de circulación residual bien definido y alineado a las isóbatas, mientras que en el archipiélago se encontró un giro anticiclónico al noroeste de la Isla Tiburón. Para el resto del golfo no se presentó un patrón de circulación residual apreciable. Las velocidades máximas se obtuvieron en el archipiélago con magnitudes de hasta  $18 \text{ cm s}^{-1}$ ; en cambio, en la región norte, las magnitudes fueron del orden de  $1 \text{ cm s}^{-1}$ . Finalmente, la malla de  $3 \times 3$  km fue la más adecuada para modelar las corrientes residuales en el norte del golfo.

*Palabras clave:* modelado, mareas, corrientes residuales, Golfo de California.

#### ABSTRACT

The effect of the mesh size resolution to model residual currents produced by the tides ( $M_2$ ) in the Gulf of California was studied. The grid sizes used range from  $14 \times 14$  to  $2 \times 2$  km. The results show consistent tidal and residual currents among the different grids. In the northern gulf, a well-defined circulation pattern, aligned with the isobaths, emerged. In the archipelago area, an anticyclonic eddy was found northwest of Tiburón Island. The rest of the gulf showed no appreciable residual circulation. Maximum modeled velocities of  $\sim 18 \text{ cm s}^{-1}$  were found in the archipelago; the northern gulf velocities were of the order of  $1 \text{ cm s}^{-1}$ . The  $3 \times 3$  km grid was considered suitable to model the residual currents in the northern gulf.

*Key words:* modeling, tides, residual currents, Gulf of California.

#### INTRODUCCIÓN

El Golfo de California (en adelante GC) es un mar marginal ubicado al noroeste de la

#### INTRODUCTION

The Gulf of California (hereafter GC) is a marginal sea located in northwestern Mexico

República Mexicana (fig. 1a). Está limitado al este por los estados de Sonora y Sinaloa y al oeste por la península de Baja California. Mide aproximadamente 180 km de ancho y 1,100 km de largo y presenta una profundidad máxima de 3,600 m en la boca.

La principal componente de marea en el GC es la  $M_2$  (Filloux, 1973); su propagación dentro del golfo es del tipo de una onda de Kelvin y se produce como una cooscilación con la marea del Océano Pacífico (Hendershott y Speranza, 1971). Las condiciones de resonancia que existen en el golfo y la disminución de la profundidad hacia la cabeza, son los causantes de la gran amplificación de la marea en el norte del golfo. El GC absorbe más del 70% de la energía proveniente de la  $M_2$  y la mayor parte de ésta se disipa en la región norte debido a la fricción con el fondo. La gran disipación de energía que existe en esta región da como resultado la presencia de un punto anfídromico virtual ubicado dentro de la península, cerca de Santa Rosalía (Hendershott y Speranza, 1971; Filloux, 1973).

Al propagarse, la marea interactúa con la topografía y produce una circulación residual (Zimmerman, 1978, 1980; Robinson, 1983). En este trabajo, las corrientes residuales se definen como la parte del flujo que queda después de que todas las corrientes de marea han sido filtradas. El término residual se refiere al promedio temporal de las velocidades de marea en un ciclo completo de marea (para este estudio, el ciclo de marea corresponde al de la  $M_2$ ).

La circulación residual en el GC ha sido estudiada a través de modelos numéricos (e.g., Durazo, 1989; Quirós *et al.*, 1992; Carbajal, 1993; Marinone, 1997 [en adelante M97]; Argote *et al.*, en preparación). En estos estudios se ha encontrado que existe una circulación residual importante en el norte del golfo y en el archipiélago (fig. 1b), con magnitudes de velocidad de 1 a 2  $\text{cm s}^{-1}$  en la región norte y de 5 a 30  $\text{cm s}^{-1}$  en el archipiélago.

Zimmerman (1978) mencionó que para obtener una resolución completa de la estructura espacial del campo residual, se necesita un tamaño de malla mínimo, de al menos la mitad de la excursión de marea. M97 encontró que

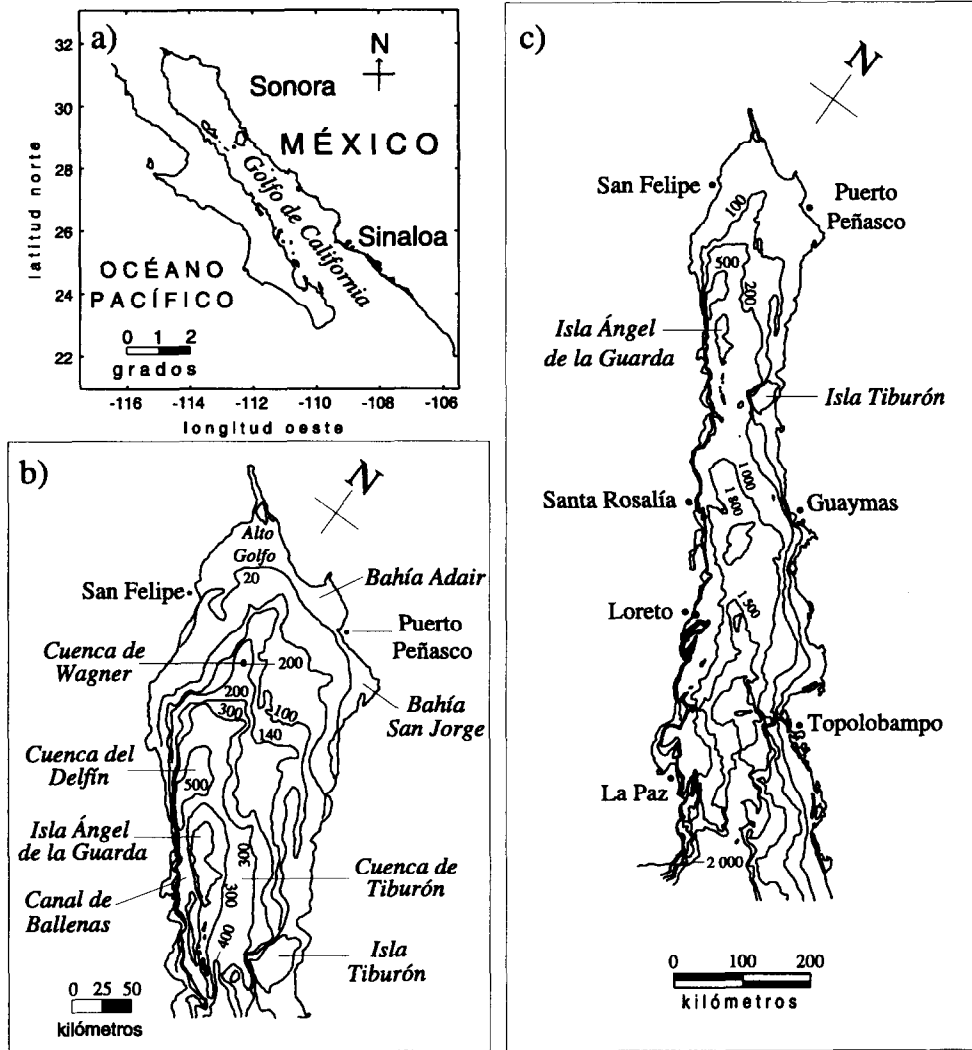
(fig. 1a). It is delimited to the east by the states of Sonora and Sinaloa and to the west by the peninsula of Baja California. It is approximately 180 km wide by 1,100 km long, and has a maximum depth of 3,600 m at the mouth.

The principal tidal component in the GC is  $M_2$  (Filloux, 1973); it propagates inside the gulf as a Kelvin wave, which is formed by a co-oscillation with the tide from the Pacific Ocean (Hendershott and Speranza, 1971). The resonant conditions of the gulf and the decreasing depth towards the head cause a great amplification of the tide in the northern gulf. The GC absorbs more than 70% of the energy from  $M_2$  and most of this dissipates in the northern region due to bottom friction. The great dissipation of energy in this region results in the presence of a virtual amphidromic point located within the peninsula, close to Santa Rosalía (Hendershott and Speranza, 1971; Filloux, 1973).

As the tide propagates, it interacts with the topography and produces a residual circulation (Zimmerman, 1978, 1980; Robinson, 1983). Residual currents are defined in this study as the part of the flow left after all tidal currents have been removed. The term residual refers to the temporal average of the tidal velocities in a complete tidal cycle (in this study, the tidal cycle corresponds to that of  $M_2$ ).

The residual circulation in the GC has been studied with numerical models (e.g., Durazo, 1989; Quirós *et al.*, 1992; Carbajal, 1993; Marinone, 1997 [hereafter M97]; Argote *et al.*, in preparation). These studies indicate an important residual circulation in the northern gulf and in the archipelago (fig. 1b), with speeds of 1 to 2  $\text{cm s}^{-1}$  in the northern region and of 5 to 30  $\text{cm s}^{-1}$  in the archipelago.

Zimmerman (1978) indicated that to obtain a complete resolution of the spatial structure of the residual field, a minimum grid size of at least half the tidal excursion is needed. M97 found that the strongest residual currents in



**Figura 1.** (a) Localización del Golfo de California. (b) Batimetría (metros) del archipiélago y de la región norte del golfo. (c) Batimetría (metros) y ubicación de algunas estaciones mareográficas en el golfo.

**Figure 1.** (a) Location of the Gulf of California. (b) Bathymetry (meters) of the archipelago and northern region of the gulf. (c) Bathymetry (meters) and location of some tidal stations in the gulf.

las magnitudes máximas de velocidad de las corrientes residuales en el GC ocurren donde la excursión de marea es comparable con la escala de longitud topográfica. El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la utilización de diferentes tamaños de malla en el modelado de las corrientes residuales producidas por la  $M_2$  en el GC.

## METODOLOGÍA

### Discretización de la batimetría

El primer paso fue digitalizar la batimetría del GC. La batimetría se obtuvo del mapa CB-002 de la Secretaría de Programación y Presupuesto (1982) y de los mapas DGON-B2 y DGON-B4 de la Secretaría de Marina (1987) (García-Silva *et al.*, 1996).

Posteriormente, se elaboraron las diferentes mallas, para lo cual se utilizó el programa Surfer versión 5.0 para Windows. Dado que el mayor tamaño de malla utilizado en el modelado de corrientes residuales en el GC es de  $14 \times 14$  km (Quirós *et al.*, 1992) y que la excursión de marea en el norte del golfo es de 3 a 5 km (M97), los tamaños de malla escogidos van desde  $14 \times 14$  hasta  $2 \times 2$  km (tabla 1). En el resto de este trabajo, 14 km se refiere a la malla de  $14 \times 14$  km y así para las demás mallas. Mayor información sobre las mallas utilizadas en este trabajo se puede obtener en García-Silva (1996).

### El modelo

Para el presente trabajo se utilizó un modelo numérico bidimensional, integrado verticalmente, desarrollado por Crean (1978). Este modelo ha sido ampliamente usado y reproduce exitosamente las elevaciones, corrientes de marea y residuales de marea de muchos lugares, como el sistema estuarino del Estrecho de Georgia/Juan de Fuca (Crean *et al.*, 1988), la parte central del Estrecho de Georgia (Marinone y Fyfe, 1992) y el GC (M97). Una descripción completa del modelo se puede encontrar en Crean *et al.* (1988).

Las ecuaciones de momentum y continuidad usadas en el modelo son:

the GC occur where the tidal excursion is comparable to the topographic length scale. The objective of this work is to study the effect of using different grid sizes in the modeling of the residual currents produced by  $M_2$  in the GC.

## METHODS

### Discretization of the bathymetry

The first step was to digitalize the bathymetry of the GC. The bathymetry was obtained from map CB-002 of the Secretaría de Programación y Presupuesto (1982) and from maps DGON-B2 and DGON-B4 of the Secretaría de Marina (1987) (García-Silva *et al.*, 1996).

The different grids were then made using the Surfer program, version 5.0 for Windows. Given that the largest grid size used to model residual currents in the GC is  $14 \times 14$  km (Quirós *et al.*, 1992) and that the tidal excursion in the northern gulf is from 3 to 5 km (M97), the grid sizes chosen range from  $14 \times 14$  to  $2 \times 2$  km (table 1). Throughout this study, 14 km refers to the  $14 \times 14$  km grid and so on for the other grids. More information on the grids used in this study can be obtained from García-Silva (1996).

### The model

A two-dimensional, vertically integrated numerical model, developed by Crean (1978), was used in this study. This model has been widely used and successfully reproduces the elevations, tidal currents and tidal residuals of many areas, such as the Juan de Fuca/Georgia Straight system (Crean *et al.*, 1988), the central part of the Georgia Straight (Marinone and Fyfe, 1992) and the GC (M97). A complete description of the model can be found in Crean *et al.* (1988).

The equations of momentum and continuity used in the model are:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{UV}{H} \right) - fV + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{C_d U \sqrt{U^2 + V^2}}{H^2} - k \nabla^2 U &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{UV}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V^2}{H} \right) + fU + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{C_d V \sqrt{U^2 + V^2}}{H^2} - k \nabla^2 V &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}H) &= 0 \end{aligned}$$

La notación usada es la siguiente:  $(x, y)$  son las coordenadas cartesianas transversal y longitudinal al golfo;  $t$  es el tiempo;  $\eta$  es la elevación de la superficie del mar con respecto a  $z = 0$ ;  $h$  es la profundidad del agua;  $H = \eta + h$ ;  $\vec{v}$  es el vector de velocidad con componentes  $(u, v)$ ;  $(U, V)$  son las componentes horizontales de transporte  $(uH, vH)$ ;  $f = 2\Omega \sin(\theta)$  es el parámetro de Coriolis ( $f = 7.1816 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ );  $C_d$  es el coeficiente de fricción ( $C_d = 4.4 \times 10^{-3}$ );  $k$  es el coeficiente de viscosidad de remolino ( $k = 100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ); y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad ( $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ ).

Las ecuaciones del modelo se resuelven explícitamente por el método de diferencias finitas y los pasos de tiempo usados (tabla 1) satisfacen el criterio de Courant-Friedrichs-Lewy (Courant *et al.*, 1928). El modelo es forzado en la boca del golfo, especificando los valores de elevación de la superficie del mar,  $\eta$ , para todos los tiempos a partir de observaciones de marea. Las constantes armónicas se obtuvieron de González *et al.* (1996).

### Simulación numérica

Un estudio reciente sobre la circulación residual del GC es el de M97. Este autor modeló las corrientes residuales que se producen por las principales componentes de marea del golfo y concluyó que estas corrientes son generadas básicamente por las componentes semidiurnas, principalmente por la  $M_2$ . El tamaño de malla utilizado por M97 fue de 6.5 km.

En este trabajo se pretende conocer los cambios que se producen en el modelado de las corrientes residuales en el GC al cambiar única y exclusivamente el tamaño de malla. Por lo tanto, las simulaciones se llevaron a cabo

The following notation was used:  $(x, y)$  are the Cartesian coordinates across and along the gulf;  $t$  is time;  $\eta$  is the sea surface elevation with respect to  $z = 0$ ;  $h$  is water depth;  $H = \eta + h$ ;  $\vec{v}$  is the vector velocity with components  $(u, v)$ ;  $(U, V)$  are the horizontal transport components  $(uH, vH)$ ;  $f = 2\Omega \sin(\theta)$  is the Coriolis parameter ( $f = 7.1816 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ );  $C_d$  is the friction coefficient ( $C_d = 4.4 \times 10^{-3}$ );  $k$  is the eddy viscosity coefficient ( $k = 100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ); and  $g$  is acceleration due to gravity ( $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ ).

The equations of the model are explicitly solved by the finite differences method and the time steps used (table 1) satisfy the Courant-Friedrichs-Lewy criterion (Courant *et al.*, 1928). The model is forced at the mouth of the gulf, specifying the sea surface elevation values,  $\eta$ , for all the times from the tidal observations. The harmonic constants were obtained from González *et al.* (1996).

### Numerical simulation

A recent study on the residual circulation in the GC is that of M97. This author modeled the residual currents produced by the principal tidal components of the gulf and concluded that these currents are basically generated by semi-diurnal components, mainly  $M_2$ . The grid size used in M97 was 6.5 km.

This study aims to determine changes produced in the modeling of the residual currents in the GC by changing only the grid size. Thus, the simulations were conducted using the same friction and viscosity coefficients used by M97. A simulation using the grid of M97 was also made to compare the results.

The duration of all simulations was 30 tidal cycles (the cycle of  $M_2$  equals 12.42 h); it was

**Tabla 1.** Características de las mallas utilizadas: nr = número de renglones, nc = número de columnas, A = área del golfo,  $H_{\max}$  = profundidad máxima,  $\Delta t_{\text{mp}}$  = paso de tiempo máximo permisible y  $\Delta t_u$  = paso de tiempo utilizado. El tamaño de malla subrayado es el de Marinone (1997).

**Table 1.** Characteristics of the grids used: nr = number of rows, nc = number of columns, A = area of the gulf,  $H_{\max}$  = maximum depth,  $\Delta t_{\text{mp}}$  = maximum time step allowed and  $\Delta t_u$  = time step used. The underlined grid size is that of Marinone (1997).

Tamaño de malla (km)	nr	nc	A (km <sup>2</sup> )	$H_{\max}$ (m)	$\Delta t_{\text{mp}}$ (s)	$\Delta t_u$ (s)
14	78	20	162,680	3,508	53.36	22.356
12	90	23	160,560	3,213	47.79	22.356
10	107	28	162,400	3,364	38.92	22.356
8	134	34	160,000	3,508	30.49	22.356
7	154	38	159,740	3,508	26.68	22.356
6.5	165	41	159,963	3,563	24.58	22.356
<u>6.5</u>	162	40	149,519	3,657	24.27	22.500
6	178	44	160,452	3,542	22.76	22.356
5	214	53	160,100	3,622	18.76	18.000
4	268	66	159,872	3,636	14.98	12.000
3	356	87	159,768	3,622	11.25	9.000
2	533	129	159,232	3,636	7.49	6.000

utilizando los mismos coeficientes de fricción y de viscosidad usados por M97. Además, se llevó a cabo una simulación con la malla de M97 para comparar resultados.

La duración de todas las simulaciones fue de 30 ciclos de marea (el ciclo de la  $M_2$  equivale a 12.42 h) y se observó que el patrón de circulación residual alcanzó un estado estacionario.

## RESULTADOS

### Mareas

El comportamiento global de la marea no cambió al utilizar diferentes tamaños de malla. La fig. 2 muestra un ejemplo de la distribución de amplitudes y fases de la marea modelada para el tamaño de malla de 6 km. Estos resultados son muy similares a los reportados por Morales y Gutiérrez (1989).

Las tablas 2 y 3 muestran las amplitudes y fases modeladas y observadas en diferentes estaciones alrededor del golfo (ver fig. 1c para

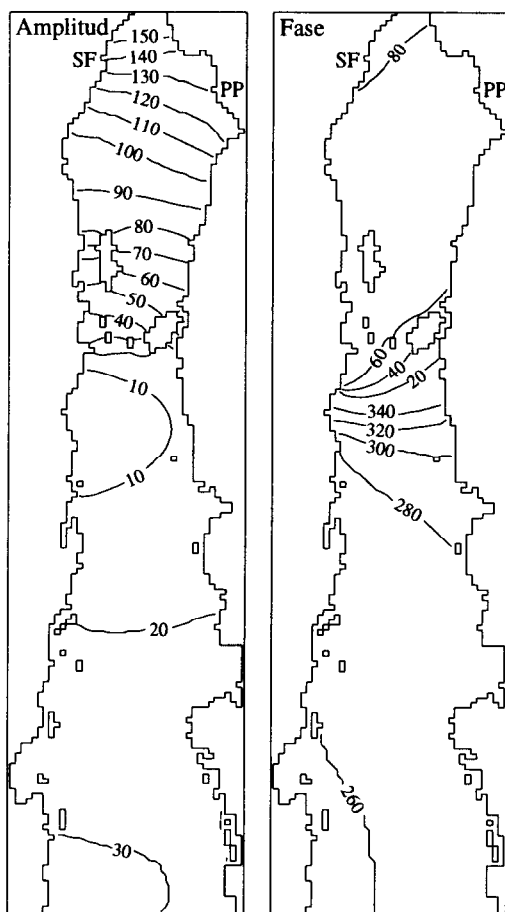
observed that the residual circulation pattern reached a steady state.

## RESULTS

### Tides

The overall behavior of the tide did not change with the different grid sizes. Figure 2 shows the distribution of the tidal amplitudes and phases modeled with the 6-km grid size. These results are very similar to those reported by Morales and Gutiérrez (1989).

Tables 2 and 3 show the modeled and observed amplitudes and phases at different stations around the gulf (see fig. 1c for the locations). It can be observed that the results obtained are consistent with the different grids. The differences between the results of the model and observations are minimal for almost all the stations (table 4); there are considerable differences in the amplitudes of San Felipe and Puerto Peñasco, and the greatest error in the phases occurs at Santa Rosalía and Guaymas.



**Figura 2.** Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de 6 km. Amplitudes en centímetros y fases en grados con respecto a Greenwich. Ubicación de San Felipe (SF) y Puerto Peñasco (PP).

**Figure 2.** Cotidal map of the tide modeled for the 6-km grid size. Amplitudes in centimeters and phases in degrees relative to Greenwich. Location of San Felipe (SF) and Puerto Peñasco (PP).

su ubicación). En ellas se puede observar que los resultados obtenidos son consistentes para las diferentes mallas. Las diferencias entre los resultados del modelo y las observaciones son mínimas para casi todas las estaciones (tabla 4); en San Felipe y Puerto Peñasco las diferencias de las amplitudes son considerables y el mayor error en las fases se da en Santa Rosalía y Guaymas.

#### Residual circulation

The residual currents were obtained by averaging the last 25 tidal cycles. They show a well-defined residual circulation pattern in the northern gulf, with magnitudes of the order of  $1 \text{ cm s}^{-1}$ ; in contrast, the archipelago showed magnitudes of up to  $18 \text{ cm s}^{-1}$ . No appreciable residual circulation pattern was observed in the rest of the gulf.

**Tabla 2.** Amplitudes modeladas y observadas ( $A_{obs}$ ) en algunas estaciones del Golfo de California. Amplitudes en metros.

**Table 2.** Modeled and observed amplitudes ( $A_{obs}$ ) at different stations in the Gulf of California. Amplitudes in meters.

Tamaño de malla	San Felipe	Puerto Peñasco	Santa Rosalía	Guaymas	Loreto	Topolobampo	La Paz
14	1.26	1.17	0.11	0.17	0.21	0.29	0.29
12	1.43	1.33	0.06	0.12	0.17	0.29	0.28
10	1.40	1.26	0.07	0.14	0.18	0.28	0.27
8	1.41	1.27	0.07	0.14	0.18	0.29	0.27
7	1.39	1.26	0.08	0.14	0.19	0.29	0.27
6.5	1.34	1.27	0.07	0.14	0.18	0.29	0.28
6	1.42	1.28	0.07	0.14	0.19	0.28	0.28
5	1.39	1.26	0.07	0.14	0.18	0.29	0.27
4	1.41	1.27	0.07	0.14	0.18	0.29	0.27
3	1.39	1.26	0.07	0.14	0.18	0.29	0.28
2	1.40	1.27	0.07	0.14	0.18	0.30	0.28
$A_{obs}$	1.65	1.57	0.09	0.14	0.15	0.29	0.24

**Tabla 3.** Fases modeladas y observadas ( $F_{obs}$ ) en algunas estaciones del Golfo de California. Fases en grados con respecto a Greenwich.

**Table 3.** Modeled and observed phases ( $F_{obs}$ ) at different stations in the Gulf of California. Phases in degrees relative to Greenwich.

Tamaño de malla	San Felipe	Puerto Peñasco	Santa Rosalía	Guaymas	Loreto	Topolobampo	La Paz
14	79	67	277	282	263	264	259
12	81	70	288	292	263	266	259
10	83	70	278	287	261	266	258
8	83	70	279	287	262	265	259
7	83	70	278	286	262	266	259
6.5	81	70	277	286	261	266	259
6	83	70	278	285	261	265	259
5	83	70	278	286	262	266	259
4	82	69	281	287	262	266	259
3	83	70	279	285	262	266	259
2	83	70	280	287	262	267	259
$F_{obs}$	65	59	354	316	276	298	275



**Tabla 4.** Promedio de las diferencias entre los valores modelados y observados para cada tamaño de malla;  $n$  es el número total de estaciones mostradas en la tabla 2. La desviación estándar indica la consistencia de los resultados. Amplitudes en metros y fases en grados con respecto a Greenwich.

**Table 4.** Average of the differences between the modeled and observed values for each grid size;  $n$  is the total number of stations shown in table 2. Standard deviation indicates the consistency of the results. Amplitudes in meters and phases in degrees relative to Greenwich.

Tamaño de malla	$\frac{\sum_{i=1}^n (A_{\text{mod}} - A_{\text{obs}})_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n (F_{\text{mod}} - F_{\text{obs}})_i}{n}$
14	-0.09	-21.71
12	-0.06	-17.71
10	-0.08	-20.00
8	-0.07	-19.71
7	-0.07	-19.86
6.5	-0.08	-20.43
6	-0.07	-20.29
5	-0.08	-19.86
4	-0.07	-19.57
3	-0.07	-19.86
2	-0.07	-19.29
Desviación estándar	0.01	0.95

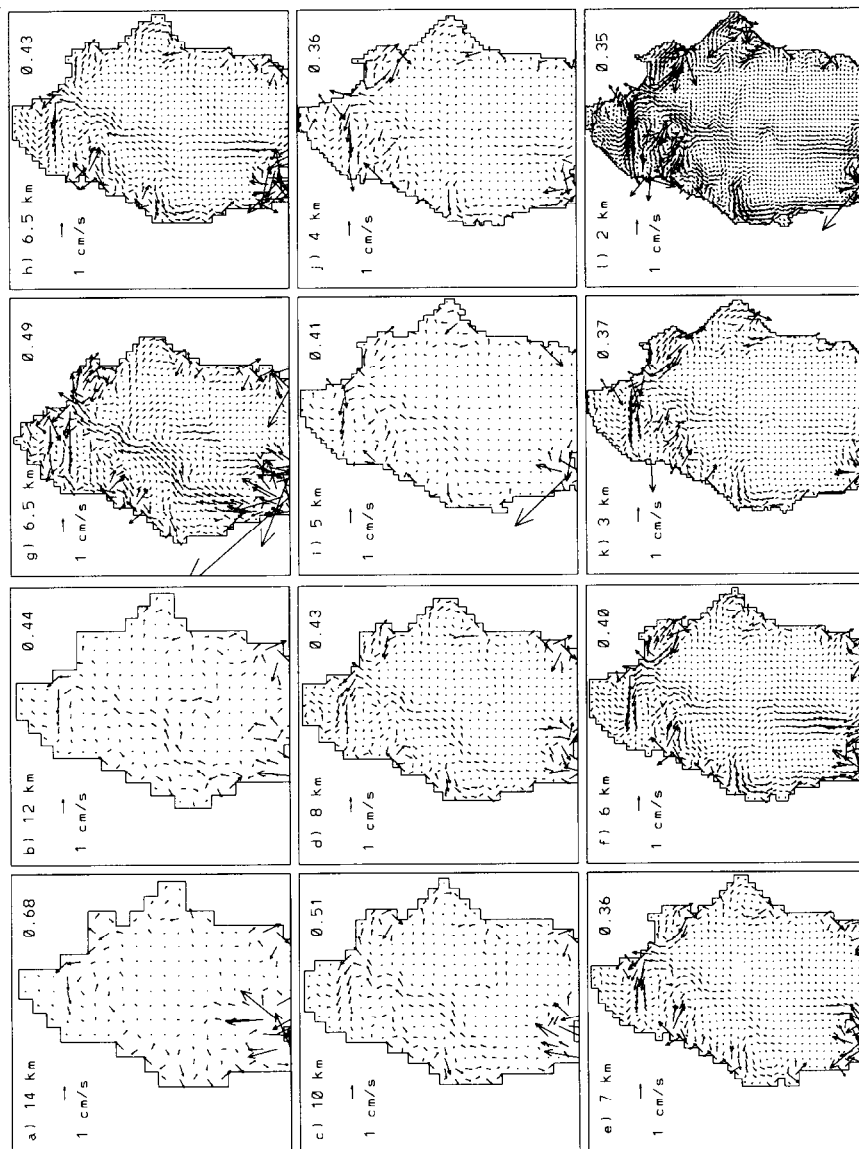
### Circulación residual

Las corrientes residuales se obtuvieron al promediar los últimos 25 ciclos de marea. Presentan un patrón de circulación residual bien definido en el norte del golfo, con magnitudes del orden de  $1 \text{ cm s}^{-1}$ ; en cambio, en el archipiélago, se obtuvieron magnitudes de hasta  $18 \text{ cm s}^{-1}$ . En el resto del golfo no se encontró un patrón de circulación residual apreciable.

La fig. 3 muestra la circulación residual en el norte del golfo para las diferentes mallas. En general, se puede observar que las corrientes residuales son similares en todas ellas, tanto en estructura como en magnitud de velocidad. Las velocidades máximas se presentaron donde los gradientes de profundidad son mayores y, de hecho, la mayoría de las corrientes están alineadas a las isóbatas. En todas las mallas se obtuvo un flujo principal hacia la Cuenca de Wagner, una corriente fuerte que va de Puerto Peñasco a San Felipe, una circulación anticiclónica en

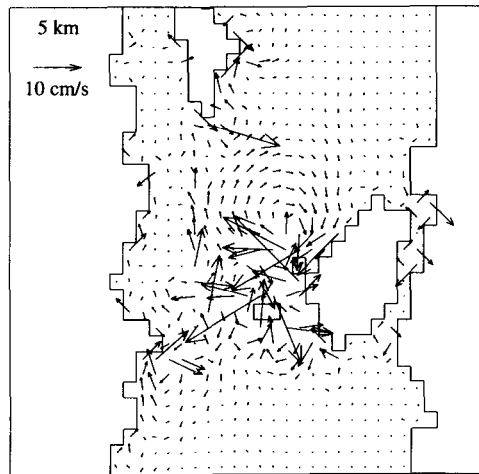
Figure 3 shows the residual circulation in the northern gulf for the different grids. In general, the residual currents are similar for all of them, both in structure and magnitude of velocity. Maximum velocities were observed where the depth gradients are greater and, in fact, most of the currents are aligned with the isobaths. All the grids presented a principal flow towards the Wagner Basin, a strong current that goes from Puerto Peñasco to San Felipe, an anticyclonic circulation in Adair Bay and San Jorge Bay and a cyclonic one close to the coast of Baja California.

Even though the results for the northern gulf are very similar, there is a difference between figs. 3a, 3c, 3f, 3h, 3j, 3k and 3l and figs. 3b, 3c, 3d, and 3i, which consists of the circulation around Delfin Basin. In the former, the current that starts to the northeast of Ángel de la Guarda Island moves around the basin in a cyclonic direction, whereas in the latter, this current starts to the northwest of the island and



**Figura 3.** Circulación residual ( $\text{cm s}^{-1}$ ) en la región norte del Golfo de California para las diferentes mallas. Los números en la esquina superior derecha de cada figura son la raíz cuadrática media de la magnitud de la velocidad para el área mostrada. La simulación de la fig. 3g se llevó a cabo con la malla de Marinone (1997). Note que en las figs. 3i, 3j, 3k y 3l se graficaron únicamente la mitad de los puntos de malla.

**Figure 3.** Residual circulation ( $\text{cm s}^{-1}$ ) in the northern region of the Gulf of California for the different grids. The numbers in the upper right-hand corner of each figure are the mean square root of the magnitude of velocity for the area shown. The simulation of fig. 3g was conducted with the grid of Marinone (1997). Note that only half the grid points were plotted in figs. 3i, 3j, 3k and 3l.



**Figura 4.** Circulación residual ( $\text{cm s}^{-1}$ ) en el archipiélago del Golfo de California para la malla de 5 km.

**Figure 4.** Residual circulation ( $\text{cm s}^{-1}$ ) in the archipelago of the Gulf of California for the 5-km grid.

Bahía Adair y en Bahía San Jorge y una ciclónica cerca de la costa de Baja California.

Aunque los resultados en el norte del golfo son muy similares, existe una diferencia entre las figs. 3a, 3e, 3f, 3h, 3j, 3k y 3l y las figs. 3b, 3c, 3d y 3i, que consiste en la circulación alrededor de la Cuenca del Delfin. En las primeras figuras, la corriente que inicia al noreste de la Isla Ángel de la Guarda le da la vuelta a la cuenca en sentido ciclónico; en cambio, en las otras, esta corriente inicia al noroeste de la isla y continúa en dirección norte. Estas últimas figuras son las más parecidas a los resultados de M97 para la  $M_2$  (la simulación de la fig. 3g se llevó a cabo con la malla de M97).

La fig. 4 muestra la presencia de un giro anticiclónico bien definido al noroeste de la Isla Tiburón. Este remolino se encontró a partir de la malla de 8 km hasta la de 2 km.

## DISCUSIÓN

### Mareas

Como se mencionó anteriormente, en San Felipe y Puerto Peñasco las diferencias entre las amplitudes modeladas y observadas fueron

continuas north. The second group of figures shows great similarity with the results of M97 for  $M_2$  (the simulation of fig. 3g was conducted with the grid from M97).

Figure 4 shows the presence of a well-defined anticyclonic eddy northwest of Tiburón Island. This eddy was observed from the 8-km to 2-km grids.

## DISCUSSION

### Tides

As mentioned above, the differences between the modeled and observed amplitudes at San Felipe and Puerto Peñasco were considerable. It is important to determine why the differences occurred in these areas, since it is precisely in the northern gulf where most of the results are shown. We know that the residual currents were obtained by averaging the last 25 tidal cycles; therefore, it is important to have a good tidal modeling of the study area in order to obtain a good average. For example, the results of Argote *et al.* (1995) and of M97 show greater similarity with the observations at San Felipe and Puerto Peñasco than with those

**Tabla 5.** Amplitudes (en metros) modeladas, observadas y reportadas por Argote *et al.* (1995) ( $A_{A95}$ ) y Marinone (1997) ( $A_{M97}$ ) para la  $M_2$  en algunas estaciones del golfo. Experimentos llevados a cabo con la malla de 6.5 km de este trabajo: (1) simulación realizada con la malla de 6.5 km de este trabajo; (2) igual que la simulación 1, pero la zona del archipiélago fue suavizada; (3) igual que la simulación 1, pero la profundidad de 11 puntos de malla escogidos en el archipiélago fue modificada arbitrariamente (se promedió entre los puntos más cercanos); (4) igual que la simulación 3, pero con toda la malla suavizada; (5) la zona del archipiélago de la malla de Marinone (1997) fue incrustada en la zona del archipiélago de la malla de este trabajo.

**Table 5.** Amplitudes (in meters) modeled, observed and reported by Argote *et al.* (1995) ( $A_{A95}$ ) and Marinone (1997) ( $A_{M97}$ ) for  $M_2$  at some stations of the gulf. Experiments conducted in this study with the 6.5-km grid: (1) simulation conducted with the 6.5-km grid; (2) same as simulation 1, but the archipelago area was smoothed; (3) same as simulation 1, but the depth of 11 grid points chosen from the archipelago was arbitrarily modified (it was averaged between the closest points); (4) same as simulation 3, but the entire grid was smoothed; (5) the archipelago area from the grid of Marinone (1997) was placed in the archipelago area from the grid of this study.

Experimento	San Felipe	Puerto Peñasco	Santa Rosalía	Guaymas
1	1.34	1.27	0.07	0.14
2	1.31	1.23	0.08	0.14
3	1.40	1.33	0.05	0.12
4	1.45	1.37	0.04	0.11
5	1.56	1.48	0.03	0.10
$A_{obs}$	1.65	1.57	0.09	0.14
$A_{A95}$	1.63	1.53	0.04	0.11
$A_{M97}$	1.74	1.63	0.07	0.12

considerables. Es importante investigar por qué en estos lugares se dieron esas diferencias, ya que precisamente es en el norte del golfo donde se muestran la mayoría de los resultados. Sabemos que las corrientes residuales se obtuvieron al promediar los últimos 25 ciclos de marea; por lo tanto, para obtener un buen promedio es importante tener un buen modelado de la marea del área de estudio. Por ejemplo, los resultados de Argote *et al.* (1995) y M97 son más parecidos a las observaciones en San Felipe y Puerto Peñasco que los mostrados en este trabajo, debido a que Argote *et al.* (1995) calibraron su modelo hasta hacer que sus resultados de elevación de la  $M_2$  fueran lo más parecido a las observaciones en San Felipe, Puerto Peñasco y Bahía de los Ángeles, mientras que M97 lo calibró con igual peso para todas las estaciones alrededor del golfo.

Para determinar la razón por la cual en este trabajo se encontró una subestimación

of this study, because Argote *et al.* (1995) calibrated their model until obtaining similar results for the elevation of  $M_2$  to the observations from San Felipe, Puerto Peñasco and Bahía de los Ángeles, whereas M97 calibrated the model with the same weight for all the stations around the gulf.

To determine why, in this study, a considerable underestimate was obtained of the tide in the northern gulf and, consequently, an underestimate of the magnitude of the residual currents (for example, the mean square root obtained with the grid of M97 was 0.49, whereas with the 6.5-km grid of this study it was 0.43), we investigated if it was necessary to calibrate the model with different friction coefficients, and conducted many simulations with other coefficients for the different grids. It was observed that friction calibration was not the cause of the differences between the results of the model and observations.

considerable de la marea en el norte del golfo y, por consiguiente, una subestimación de la magnitud de las corrientes residuales (por ejemplo, la raíz cuadrática media obtenida con la malla de M97 fue de 0.49, mientras que para la malla de 6.5 km de este trabajo fue de 0.43), se inspeccionó si sería necesario calibrar el modelo utilizando diferentes coeficientes de fricción, llevando a cabo muchas simulaciones con otros coeficientes para las diferentes mallas. Se encontró que la calibración por fricción no fue la causa de las diferencias entre los resultados del modelo y las observaciones.

Posteriormente, se comparó la batimetría de la malla de este trabajo con la de M97 y se encontró que básicamente la única diferencia entre ellas se localizaba en el archipiélago (García-Silva, 1996). Para determinar si esta diferencia era la causa de la subestimación de la marea en el norte del golfo, se diseñaron algunos experimentos con la malla de 6.5 km de este trabajo, cuyos resultados (tabla 5) mostraron que la discretización de la batimetría en el archipiélago es determinante para la amplificación de la marea en el norte del golfo y para su atenuación en la región central.

### Circulación residual

En general, el patrón de circulación residual en el norte del golfo fue consistente para todos los tamaños de malla. Los resultados de este trabajo concuerdan con los de Carbajal (1993), M97 y Argote *et al.* (en preparación), y difieren con los de Durazo (1989) y Quirós *et al.* (1992).

La circulación residual reportada por Quirós *et al.* (1992) es notablemente diferente a la de este trabajo, debido a que ellos básicamente encontraron un giro ciclónico en el norte del golfo. Para verificar si esta diferencia se debía a la baja resolución de su batimetría (14 km), se llevó a cabo una simulación con su malla, encontrándose que el patrón de circulación residual que resulta en la región norte es básicamente el mismo que el mostrado en este trabajo. Por lo tanto, la diferencia entre sus resultados y los nuestros no se debe a la resolución.

Con respecto a los resultados de Durazo (1989), se sospecha que la diferencia se debe a

The bathymetry of the grid in this study was then compared with that of M97 and, basically, the only difference between them was found at the archipelago (García-Silva, 1996). To determine if this difference caused the underestimate of the tide in the northern gulf, some experiments were designed with the 6.5-km grid of this study. The results (table 5) show that the discretization of the bathymetry in the archipelago determines the amplification of the tide in the northern gulf and its attenuation in the central region.

### Residual circulation

In general, the residual circulation pattern in the northern gulf was consistent for all the grid sizes. The results in this study concur with those of Carbajal (1993), M97 and Argote *et al.* (in preparation), but differ from those of Durazo (1989) and Quirós *et al.* (1992).

The residual circulation reported by Quirós *et al.* (1992) is notably different from that of this study, basically because they found a cyclonic eddy in the northern gulf. To determine if this difference was due to the low resolution of their bathymetry (14 km), a simulation was conducted using their grid. It was found that the residual circulation pattern in the northern region is basically the same as that found in this study. Therefore, the difference between their results and ours is not due to resolution.

With regard to the results obtained by Durazo (1989), it is assumed that the difference is due to the fact this author's model was forced just north of the archipelago and, therefore, much of the dynamics of the tide generated throughout the gulf was not considered.

Even though the residual circulation pattern in the northern gulf was consistent for all the grid sizes, not all the resolutions are appropriate for a good appreciation of the vortices in this region. Kuipers and Vreugdenhil (cited in Crean *et al.*, 1988) estimated that close to five grid points are needed for an appropriate numerical resolution of an eddy. There is no doubt that the 2-km and 3-km grids are the best to observe these eddies in the northern gulf; however, the simulation with the 2-km grid is much more costly than with the 3-km grid

que su modelo fue forzado justo al norte del archipiélago y, por lo tanto, gran parte de la dinámica de la marea que se genera en todo el golfo no fue considerada.

Aunque el patrón de circulación residual en el norte del golfo fue consistente para todos los tamaños de malla, no todas las resoluciones son apropiadas para una buena apreciación de los vórtices de esa región. Kuipers y Vreugdenhil (citados por Crean *et al.*, 1988) estimaron que cerca de cinco puntos de malla son necesarios para una adecuada resolución numérica de un remolino. Indudablemente, las mallas de 2 y 3 km son las mejores para observar estos giros en el norte del golfo; sin embargo, la simulación con la malla de 2 km es mucho más costosa que la de 3 km; por lo tanto, en términos de costo-beneficio, se considera que la malla de 3 km es la más adecuada para representar el campo de velocidad residual en el norte del golfo.

## CONCLUSIONES

El modelado de la marea en el GC no cambió al utilizar diferentes tamaños de malla. Se encontró que el modelado de la marea en el centro y norte del golfo fue muy sensible a modificaciones de la batimetría del archipiélago.

Para todos los tamaños de malla se obtuvo un patrón de circulación residual bien definido y alineado a las isóbatas en el norte del golfo; sin embargo, en el archipiélago se encontró un giro anticiclónico a partir de la malla de 8 km hasta la de 2 km. Para el resto del golfo no se presentó un patrón de circulación residual apreciable. Las velocidades máximas para todas las mallas se obtuvieron en el archipiélago y alcanzaron magnitudes de hasta  $18 \text{ cm s}^{-1}$ , mientras que en la región norte fueron del orden de  $1 \text{ cm s}^{-1}$ .

En términos de costo-beneficio y dado que la diferencia entre los resultados de las mallas de 2 y 3 km es mínima, se considera que el tamaño de malla de 3 km es el más adecuado para obtener una buena resolución del campo de circulación residual en el norte del golfo.

and, therefore, in cost-benefit terms, the 3-km grid is considered the most suitable for representing the residual velocity field in the northern gulf.

## CONCLUSIONS

The modeling of the tide in the GC did not change with different grid sizes. It was found that the tidal modeling of the central and northern gulf was very sensitive to changes in the bathymetry of the archipelago.

A well-defined residual circulation pattern, aligned with the isobaths in the northern gulf, was obtained with all the grid sizes; however, an anticyclonic eddy was observed in the archipelago with the 8-km to 2-km grids. The rest of the gulf showed no appreciable residual circulation pattern. The maximum velocities for all grids were obtained in the archipelago and reached magnitudes of up to  $18 \text{ cm s}^{-1}$ ; they were of the order of  $1 \text{ cm s}^{-1}$  in the northern region.

In cost-benefit terms and due to the fact that there is minimal difference between the results of the 2-km and 3-km grids, the 3-km grid size is considered the most suitable to obtain a good resolution of the residual circulation field in the northern gulf.

## RECOMMENDATIONS

To improve the modeling of the tide in the GC, a high-resolution bathymetry is required, especially of the archipelago, since this region contains basic traits of the gulf, such as channels and sills of scales of hundreds of meters. Better grid sizes can be generated from this new bathymetry, depending on the type of study.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

English translation by Jennifer Davis.

## RECOMENDACIONES

Para mejorar el modelado de la marea en el GC, se requiere una batimetría con una alta resolución, especialmente en el archipiélago, ya que esta región comprende rasgos básicos del golfo, tales como canales y umbrales de escalas de cientos de metros. A partir de esta nueva batimetría se pueden generar mejores mallas de diferentes tamaños, dependiendo del interés de la investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Argote, M.L., Amador, A., Lavín, M.F. and Hunter, J.R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 100(C8): 16103-16118.
- Carbajal, N. (1993). Modelling of the circulation in the Gulf of California. Tesis doctoral, Universidad de Hamburgo, Alemania, 186 pp.
- Courant, R., Friedrichs, K. y Lewy, H. (1928). Über die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik. *Math. Annalen*, 100: 32-74.
- Crean, P. (1978). A numerical model of barotropic mixed tides between Vancouver Island and the mainland and its relation to studies of the estuarine circulation. In: J. Nihoul (ed.), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*. Elsevier, New York, pp. 283-314.
- Crean, P., Murty, T. and Stronach, J. (1988). Mathematical modeling of tides and estuarine circulation. In: *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, Springer-Verlag, 30: XV, 471 pp.
- Durazo, R. (1989). Frentes térmicos de verano en el alto Golfo de California. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, BC, México, 66 pp.
- Filloux, J.H. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature*, 243: 217-221.
- García-Silva, G. (1996). Modelación de corrientes residuales en el Golfo de California mediante la utilización de diferentes tamaños de malla. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México, 48 pp.
- García-Silva, G., Ortiz, M. y Marinone, S.G. (1996). Isóbatas digitalizadas del Golfo de California. Comunicaciones Académicas (CTOFT9601), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC, México.
- González, J.I., Soto, R. y Ochoa, J. (1996). Página en Internet: <http://www.cicese.mx/oceano/OcFisica/GolfoMex/premarea/docs/pmgolfc.html>.
- Hendershott, M.C. and Speranza, A. (1971). Co-oscillating tides in long narrow bays; the Taylor problem revisited. *Deep-Sea Res.*, 18: 959-980.
- Marinone, S.G. and Fyfe, J. (1992). Residual currents in the central Strait of Georgia, BC. *Atmosphere-Ocean*, 30(1): 94-119.
- Marinone, S.G. (1997). Tidal residual currents in the Gulf of California: Is the  $M_2$  tidal constituent sufficient to induce them? *J. Geophys. Res.*, 102(C4): 8611-8623.
- Morales, R.A. y Gutiérrez, G. (1989). Mareas en el Golfo de California. *Geofis. Int.*, 28: 25-46.
- Quirós, G., Badan-Dangon, A. and Ripa, P. (1992).  $M_2$  currents and residual flow in the Gulf of California. *Neth. J. Sea Res.*, 28: 251-259.
- Robinson, I.S. (1983). Tidally induced residual flows. In: B. Johns (ed.), *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*. Elsevier, New York, 470 pp.
- Zimmerman, J.T.F. (1978). Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) current. *Geophys. Astrophys. Fl. Dyn.*, 11: 35-47.
- Zimmerman, J.T.F. (1980). Vorticity transfer by tidal currents over an irregular topography. *J. Mar. Res.*, 38: 601-630.