

**TIDAL CURRENTS IN THE GULF OF CALIFORNIA:  
INTERCOMPARISONS AMONG TWO- AND THREE-DIMENSIONAL  
MODELS WITH OBSERVATIONS**

**CORRIENTES DE MAREA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA:  
INTERCOMPARACIONES ENTRE MODELOS BIDIMENSIONALES Y  
TRIDIMENSIONALES CON OBSERVACIONES**

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: marinone@cicese.mx

*Recibido en agosto de 1999; aceptado en febrero de 2000*

**ABSTRACT**

Two three-dimensional and one two-dimensional models are used to simulate the tides (heights and currents) in the Gulf of California. One of the three-dimensional models uses sigma coordinates and the other uses fixed vertical levels. The results of the models are compared to observations by means of harmonic constants. It is found that tidal heights are better modelled with a simple two-dimensional model, while tidal currents are better modelled with the three-dimensional model with fixed vertical levels.

*Key words:* tidal currents, POM and HAMSOM models, Gulf of California.

**RESUMEN**

Se usaron dos modelos tridimensionales y uno bidimensional para simular las mareas (nivel del mar y corrientes) en el Golfo de California. Uno de los modelos tridimensionales usa coordenadas sigma y el otro usa niveles fijos en la vertical. Los resultados de los modelos se compararon con mediciones por medio de constantes armónicas. Se encontró que las alturas de marea se modelan mejor con el modelo bidimensional, mientras que las corrientes de marea se modelan mejor con el modelo tridimensional que utiliza niveles fijos en la vertical.

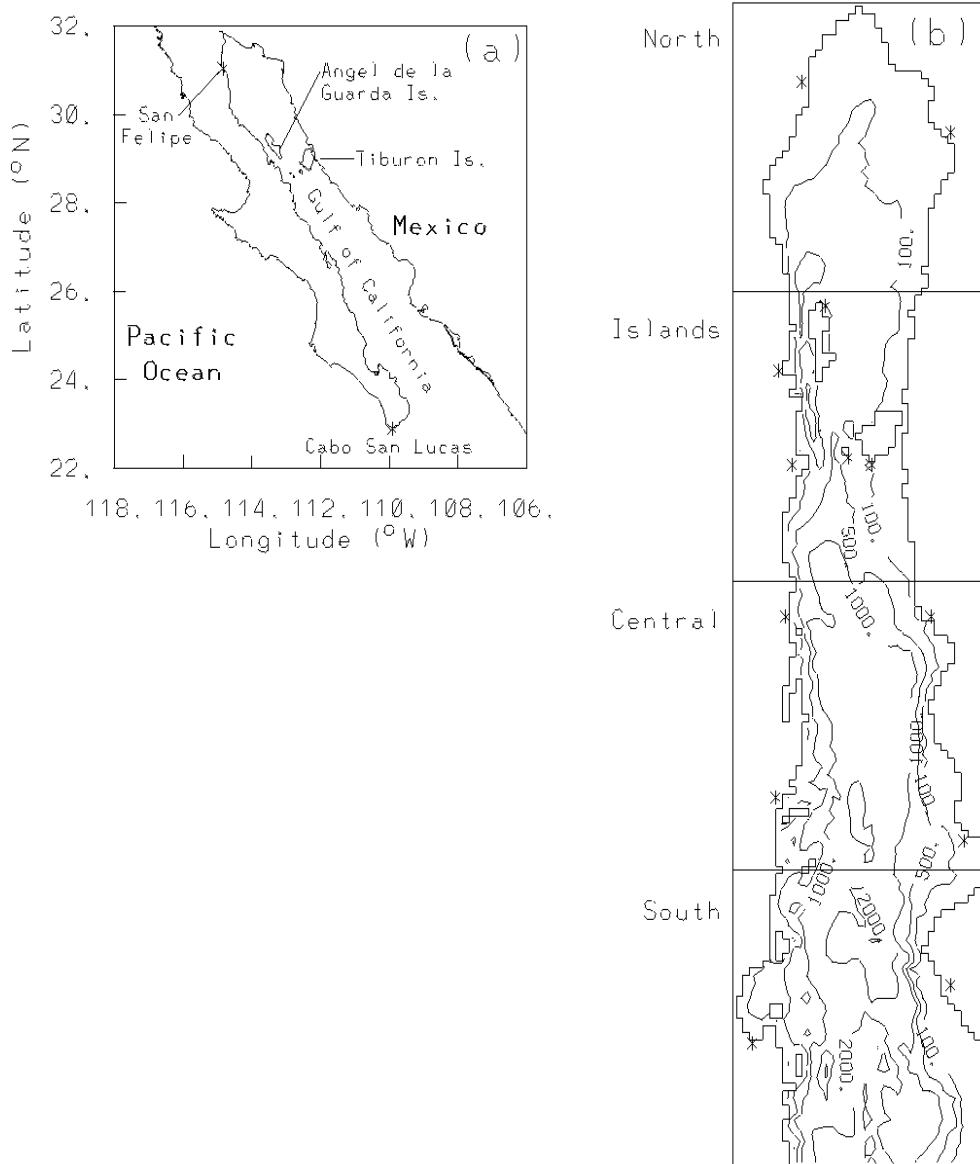
*Palabras clave:* corrientes de marea, modelos POM y HAMSOM, Golfo de California.

**INTRODUCTION**

The general circulation of the Gulf of California (fig. 1) is the result of tidal and low

**INTRODUCCIÓN**

La circulación general del Golfo de California (fig. 1) se debe a la cooscilación de



**Figure 1. (a)** Plan view of the Gulf of California. **(b)** Horizontal layout of the (coarse  $\sim 6.5 \times 6.5$  km) grid and bathymetry in meters. The asterisks show the locations of the tidal stations. The North, Island, Central and South divisions are referred to in the text.

**Figura 1. (a)** Vista de planta del Golfo de California. **(b)** Trazado horizontal de la batimetría y malla (gruesa  $\sim 6.5 \times 6.5$  km) en metros. Los asteriscos indican las posiciones de las estaciones de marea. Se hace referencia a las divisiones norte, de las islas, central y sur en el texto.

frequency co-oscillation with the Pacific Ocean, of forcing by wind and heat fluxes at the sea surface, of the non-linear interactions and of the effect of the topography. With the ultimate goal of modelling the general circulation of the gulf, we start by simulating the tides with two different three-dimensional models. Tides in the Gulf of California have already been modelled with one- (Ripa and Velázquez, 1993), two- (Quirós *et al.*, 1992; Argote *et al.*, 1995) and three-dimensional (Carbajal, 1993) models, but their validation has been restricted to comparisons with the surface elevation (Argote *et al.*, 1995, compared results of a two-dimensional model with a few current-meter observations in the northern gulf, which are used here as well). Here we use some historical and recent current measurements to check the performance of a typical tidal two-dimensional model and two different three-dimensional models.

Why several models? Because one model can perform better than others depending on the process. Here we want to know which one simulates better the tidal streams, a key ingredient of the gulf's circulation, not only because of their significant speeds, but also because of the role that they play in other processes like generating internal tides, producing intense mixing over sills, and forming fronts. The models used here are well known in the literature and they are referred to as the Mellor-Yamada or POM and the HAMSOM models. Both models have been successfully used in several places. The POM model, originally developed by Blumberg and Mellor (1987), is a very well known model and has been widely used; e.g., Cummins and Oey (1997) studied barotropic and baroclinic tides in the northern coast of British Columbia, and Oey and Chen (1992a, b) studied meanders and eddies in the Norwegian Coastal Current and the circulation in the northeast Atlantic shelves and seas, forced with river runoff, M2 tidal

la marea y de baja frecuencia con el Océano Pacífico, al forzamiento por el viento y flujos de calor en la superficie, a la interacción no lineal y al efecto de la topografía. Con el objetivo final de modelar la circulación general del golfo, comenzamos por simular las mareas utilizando dos modelos tridimensionales diferentes. Se han modelado las mareas en el Golfo de California con modelos unidimensionales (Ripa y Velázquez, 1993), bidimensionales (Quirós *et al.*, 1992; Argote *et al.*, 1995) y tridimensionales (Carbajal, 1993), pero la validación de éstas se ha restringido a comparaciones con la elevación superficial (Argote *et al.*, 1995, compararon los resultados de un modelo bidimensional con algunas observaciones de corrientes en el norte del golfo, las cuales también se utilizan aquí). Aquí se usaron mediciones históricas y recientes de las corrientes para evaluar el funcionamiento de un modelo de marea bidimensional típico y dos modelos tridimensionales diferentes.

¿Por qué varios modelos? Porque un modelo puede funcionar mejor que otros dependiendo del proceso. Aquí buscamos el que mejor simula las corrientes de marea que son determinantes en la circulación del golfo, no sólo por sus velocidades significativas, pero también por el papel que juegan en otros procesos como la generación de mareas internas, la mezcla intensa sobre los umbrales y la formación de frentes. Los modelos utilizados en este trabajo son ampliamente conocidos en la literatura y se conocen como el modelo Mellor-Yamada o POM y el modelo HAMSOM. Se han utilizado ambos modelos con éxito en muchos lugares. El modelo POM, desarrollado originalmente por Blumberg y Mellor (1987), es muy conocido y ha sido utilizado ampliamente; e.g., Cummins y Oey (1997) estudiaron las mareas barotrópicas y baroclínicas en la costa norte de la Colombia Británica, y Oey y Chen (1992a, b) estudiaron meandros y giros en la Corriente Costera de

elevations, steady flows at the open boundaries and atmospheric agents. HAMSOM, developed by Backhaus (1985), has successfully reproduced the tides in several areas (Stronach *et al.*, 1993), wind induced currents (Marinone *et al.*, 1996) and deep water renewal (Marinone and Pond, 1996); therefore, the basic objective of this paper is to model the tidal currents of the Gulf of California with the three-dimensional POM and HAMSOM models and compare them with observations. Also, the tidal heights and depth-averaged currents are computed and they are compared with a classical two-dimensional model.

## MODELS AND OBSERVATIONS

### Models

The vertical structures of the three different models used are shown in figure 2. The two-dimensional model, or 2D, integrates the equations of motion from the surface elevation,  $\eta$ , to the bottom,  $H$  (see Marinone, 1997). The HAMSOM model, or 3H, integrates the equations between fixed levels in the vertical direction with variable spacing and calculates vertical mixing coefficients as a function of the Richardson number and vertical shear (see Stronach *et al.*, 1993; Marinone and Pond, 1996). The Mellor-Yamada model, or 3M, converts the vertical coordinate  $z$  to  $\sigma$ -coordinates and uses a turbulent kinetic energy closure scheme to determine vertical mixing coefficients (see Blumberg and Mellor, 1987). All models use a quadratic drag law for bottom friction. Although the three-dimensional models include conservation equations for temperature and salinity, a homogeneous ocean is assumed here.

Two bathymetries were used with the three-dimensional models: a coarse one (C) of  $6.5 \times 6.5$  km, digitized from Mexican Navy Chart SM620 and from the chart of Rusnak *et al.* (1964); and a finer one (F) of  $4.6 \times 3.9$  km,

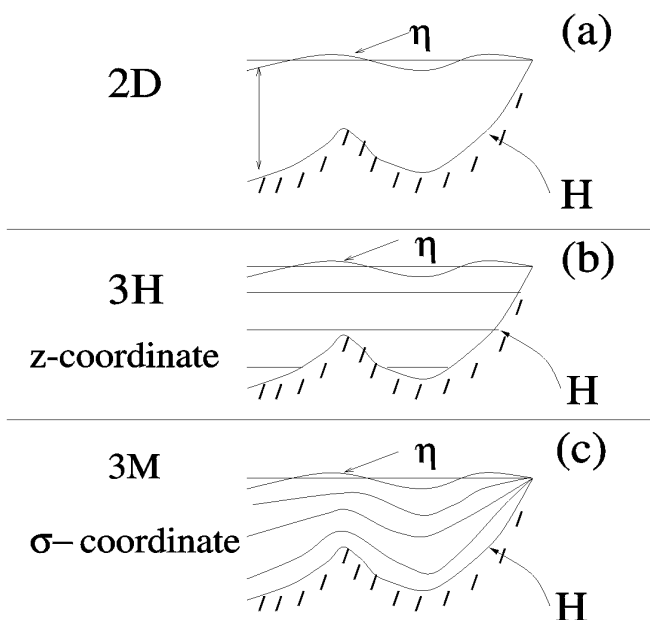
Noruega y la circulación en las plataformas y mares del Atlántico noreste, forzados con escurrimiento de ríos, elevaciones de marea por la M2, flujos estacionarios en las fronteras abiertas y agentes atmosféricos. El modelo HAMSOM, desarrollado por Backhaus (1985), ha reproducido exitosamente las mareas de muchas áreas (Stronach *et al.*, 1993), las corrientes inducidas por el viento (Marinone *et al.*, 1996) y la renovación de agua profunda (Marinone y Pond, 1996). Por tanto, el objetivo de este trabajo es modelar las corrientes de marea en el Golfo de California con los modelos tridimensionales POM y HAMSOM y compararlos con observaciones. Asimismo, se calculan el nivel del mar y las corrientes promediadas con la profundidad y se comparan con un modelo bidimensional clásico.

## MODELOS Y OBSERVACIONES

### Modelos

La figura 2 muestra las estructuras verticales de los tres modelos utilizados. El modelo bidimensional, 2D, incorpora las ecuaciones de movimiento desde la elevación superficial,  $\eta$ , al fondo,  $H$  (ver Marinone, 1997). El modelo HAMSOM, 3H, integra las ecuaciones entre niveles fijos en la vertical con espaciamiento variable y calcula los coeficientes de mezcla vertical como una función del número de Richardson y del corte vertical (ver Stronach *et al.*, 1993; Marinone y Pond, 1996). El modelo Mellor-Yamada, 3M, transforma la coordenada vertical  $z$  a coordenadas  $\sigma$  y utiliza un esquema de cerradura basado en la ecuación de energía cinética turbulenta para determinar los coeficientes de mezcla vertical (ver Blumberg y Mellor, 1987). Todos los modelos utilizan una ley cuadrática para la fricción de fondo. Aunque los modelos tridimensionales incluyen ecuaciones de conservación para la temperatura y salinidad, aquí se supone un océano homogéneo.

## THE MODELS



**Figure 2.** Vertical representation of the different models. **(a)** 2D: two-dimensional, equations are vertically integrated from the surface elevation,  $\eta$ , to the bottom,  $H$ . **(b)** 3H: three-dimensional  $z$ -coordinate, equations are vertically integrated between fixed levels; 3H stands for three-dimensional HAMSOM. **(c)** 3M: three-dimensional  $\sigma$ -coordinate; 3M stands for three-dimensional Mellor-Yamada.

**Figura 2.** Representación vertical de los diferentes modelos. **(a)** 2D: bidimensional, las ecuaciones se integran verticalmente desde la superficie,  $\eta$ , al fondo,  $H$ . **(b)** 3H: tridimensional con coordenada  $z$ , las ecuaciones se integran verticalmente entre niveles fijos; 3H indica HAMSOM tridimensional. **(c)** 3M: tridimensional con coordenada  $\sigma$ ; 3M indica Mellor-Yamada tridimensional.

digitized from the charts of Bischoff and Niemitz (1980). Therefore, the HAMSOM and Mellor-Yamada models will be referred to as 3HC or 3HF and 3MC or 3MF, respectively, with the letters C and F indicating the bathymetry used. Why two bathymetries? Because one expects better simulations with a finer grid; however, it is always important to assess if it really does it and how much is gained with more resolution. García and Marinone (1997) reported, for the gulf, very small differences among the tidal harmonics

Se utilizaron dos batimetrías con los modelos tridimensionales: una gruesa (C) de  $6.5 \times 6.5$  km, digitalizada del mapa SM620 de la Secretaría de Marina de México y del mapa de Rusnak *et al.* (1964); y otra más fina (F) de  $4.6 \times 3.9$  km, digitalizada de los mapas de Bischoff y Niemitz (1980). Por tanto, los modelos HAMSOM y Mellor-Yamada serán referidos como 3HC o 3HF y 3MC o 3MF, respectivamente, las letras C y F indicando la batimetría utilizada. ¿Por qué dos batimetrías? Porque se esperan mejores simulaciones con

obtained with the same two-dimensional model with different bathymetries and observations; therefore, the 2D model was run only with the coarse bathymetry and will be referred to as 2DC.

All models were forced at the open boundary with the seven most important tidal constituents: M2, S2, N2, K2, K1, O1 and P1. Table 1 shows the average amplitude of these constituents at the open boundary and their values in San Felipe, in the northern gulf, in order to show the amplification that the tides experience along the gulf.

### Sea level simulations

Thirteen tidal stations around the gulf (see fig. 1) were used to calibrate the models. The models were run varying the friction coefficients until the optimum or best agreement was found in a root mean square difference sense. Table 2 shows, for the best run of each model, the average and standard deviation of the differences in amplitudes (in centimeters) and phases (degrees) between models and observations, as well as the root mean square (rms) of the difference in sea level for each tidal constituent, according to:

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{1}{2} [A_o^2 + A_m^2 - A_o A_m \cos(\phi_m - \phi_o)]_i} \quad (1)$$

where  $A$  is the amplitude,  $\phi$  the phase, and the subscripts  $o$  and  $m$  refer to observations and models, respectively, for each station  $i$ . The smaller rms values for the semidiurnal constituents, which are the largest, are obtained with the 2DC model. For the diurnal components, the lowest rms values are achieved by the 3HC model; however, their rms values are very similar to the corresponding values of the other models. Comparing the results of only the three-dimensional models with different bathymetries, we see that the layer model elevations are closer to the observations with the

una malla más fina; sin embargo, siempre es importante determinar si realmente sucede y qué tanto se gana con más resolución. García y Marinone (1997) reportaron, para el golfo, diferencias muy pequeñas entre las constantes armónicas de marea obtenidas con el mismo modelo bidimensional con diferentes batimetrías y observaciones; por tanto, el modelo 2D solamente se corrió con la batimetría gruesa y será referido como 2DC.

Se forzaron todos los modelos en la frontera abierta con las siete componentes de marea más importantes: M2, S2, N2, K2, K1, O1 y P1. La tabla 1 muestra la amplitud promedio de estas componentes en la frontera abierta y sus valores en San Felipe, en el norte del golfo, para mostrar la amplificación de las mareas a lo largo del golfo.

### Simulaciones del nivel del mar

Se usaron 13 estaciones de marea en el golfo (ver fig. 1) para calibrar los modelos. Se corrieron los modelos variando los coeficientes de fricción hasta encontrar la mejor o óptima concordancia con base en las diferencias de la raíz cuadrática media. La tabla 2 muestra, para la mejor corrida de cada modelo, los promedios y la desviación estándar de las diferencias en amplitud (centímetros) y fases (grados) entre los modelos y las observaciones, así como la raíz cuadrática media (rms) de la diferencia en el nivel del mar para cada componente de marea, con base en:

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{1}{2} [A_o^2 + A_m^2 - A_o A_m \cos(\phi_m - \phi_o)]_i} \quad (1)$$

donde  $A$  es la amplitud,  $\phi$  la fase, y los subíndices  $o$  y  $m$  se refieren a las observaciones y modelos, respectivamente, para cada estación  $i$ . Los valores menores de rms para las componentes semidiurnas, que son las mayores, se obtienen con el modelo 2DC. Para las componentes diurnas, los valores más bajos de rms se

**Table 1.** Amplitudes (cm) of the tidal constituents at the open boundary (OB) and in San Felipe (SF). AF is the ratio of the amplitudes in SF and OB.

**Tabla 1.** Amplitudes (cm) de las componentes de marea en la frontera abierta (OB) y en San Felipe (SF). AF es la razón de las amplitudes en SF y OB.

Constituent	OB	SF	AF	Constituent	OB	SF	AF
M2	36.8	164.5	4.5	K1	22.2	41.6	1.9
S2	23.7	99.3	4.2	O1	15.2	26.3	1.7
N2	8.8	42.0	4.8	P1	6.9	13.0	1.9
K2	6.6	26.4	4.0				

coarse bathymetry, while the  $\sigma$ -coordinate model elevations improve, in general, with the finer grid. The rms values of the 3HC and 3HF models are very similar, but the corresponding rms values of the 3MC and 3MF models are significantly reduced for the M2 and S2 components. The 3HF model worsening is due to larger differences in the phases for the semi-diurnal components, while for the diurnal components the larger differences are in the amplitudes. Given that the semi-diurnal components account for most of the variance of the surface elevation in the gulf, we can conclude that a two-dimensional model is sufficient to simulate tidal elevations.

### Current meter observations

There are 123 time series at 67 different stations along the gulf and their positions are indicated in figure 3. In the cases when more than one station lies in a grid point, comparisons between the results of the models and each station were made without averaging the observations; in figure 3 their locations have been grouped by letters to avoid crowding of the labels. Record lengths vary from a few to hundreds of days; most of them have a duration of one month or less (59 of 123). When more than one current meter is available in the water column, the depth-averaged velocity field was calculated. Thus, the data set of currents has 123 time series of *in situ* observations in the

logran con el modelo 3HC; sin embargo, sus valores de rms son muy similares a los valores correspondientes de los otros modelos. Al comparar sólo los resultados de los modelos tridimensionales con batimetrías diferentes, se muestra que las elevaciones del modelo de capas se acercan más a las observaciones con la batimetría gruesa, mientras que las elevaciones del modelo que usa coordenadas  $\sigma$  mejoran, por lo general, con la malla más fina. Los valores de rms de los modelos 3HC y 3HF son muy similares, pero los valores correspondientes de rms de los modelos 3MC y 3MF se reducen significativamente para las componentes M2 y S2. El empeoramiento del modelo 3HF se debe a diferencias más grandes en las fases para las componentes semidiurnas, mientras que para las componentes diurnas las diferencias más grandes se encuentran en las amplitudes. Dado que las componentes semidiurnas explican casi toda la varianza en el nivel del mar en el golfo, se puede concluir que el modelo bidimensional es apropiado para simular las elevaciones de marea.

### Observaciones del medidor de corriente

Existen 123 series de tiempo para 67 estaciones diferentes a lo largo del golfo; sus posiciones se muestran en la figura 3. Cuando más de una estación se encuentra en un punto de malla, las comparaciones entre los resultados de los modelos y cada estación se hicieron sin

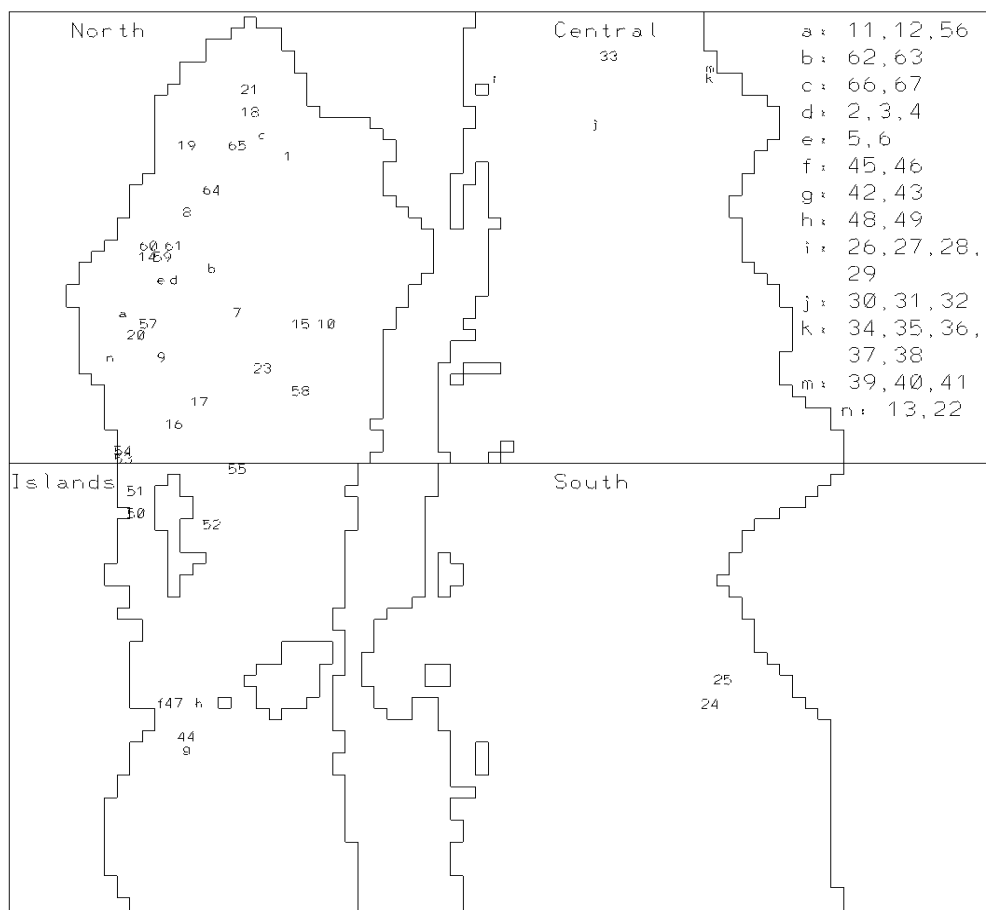
**Table 2.** Average and standard deviation of the differences in amplitude,  $dA$  (cm), and phases,  $d\phi$  (degrees), for the indicated tidal constituents between the different models and observations of 13 tidal stations. The rms is the root mean square of the difference in sea level (cm) as indicated in equation 1. 2DC stands for the two-dimensional model with a coarse bathymetry; 3HC and 3MC stand for the three-dimensional HAMSOM and Mellor-Yamada models, respectively, with a coarse bathymetry; and 3HF and 3MF stand for the three-dimensional models but with a finer bathymetry.

**Tabla 2.** Promedio y desviación estándar de las diferencias en amplitud,  $dA$  (cm), y fases,  $d\phi$  (grados), para las componentes de marea indicadas por los diferentes modelos y observaciones de las 13 estaciones de marea; rms es la raíz cuadrática media de la diferencia en el nivel del mar (cm) como se indica en la ecuación 1. 2DC indica el modelo bidimensional con una batimetría gruesa; 3HC y 3MC indican los modelos tridimensionales HAMSOM y Mellor-Yamada, respectivamente, con una batimetría gruesa; y 3HF y 3MF indican los modelos tridimensionales con una batimetría más fina.

		2DC		3HC		3MC		3HF		3MF	
		dA	$d\phi$	dA	$d\phi$	dA	$d\phi$	dA	$d\phi$	dA	$d\phi$
M2	avg	-1.5	-0.5	4.2	6.5	-1.2	-6.0	3.5	13.9	-6.3	3.0
	std	3.5	12.1	7.7	16.0	10.2	19.0	8.5	19.2	9.5	15.2
	rms	<b>6.4</b>		7.7		11.2		8.0		8.7	
K1	avg	1.4	0.2	0.8	0.8	1.6	1.3	1.2	1.4	1.5	2.6
	std	1.3	4.0	1.1	3.6	1.5	3.6	1.1	4.2	1.3	3.7
	rms	1.5		<b>1.1</b>		1.6		1.5		1.6	
S2	avg	0.7	-0.5	3.3	4.7	1.7	-1.6	2.3	9.8	-1.7	4.7
	std	2.0	11.7	6.4	11.8	5.0	16.1	6.5	12.9	3.0	14.9
	rms	<b>3.4</b>		5.1		5.6		5.3		3.9	
N2	avg	-0.5	2.3	1.1	7.3	-0.6	-4.3	1.1	16.6	-2.0	5.9
	std	0.7	11.8	1.9	17.6	2.9	18.0	2.1	20.4	2.7	16.0
	rms	<b>1.1</b>		2.1		2.8		2.2		2.2	
O1	avg	1.2	-0.3	0.9	0.6	1.2	0.9	1.3	0.4	1.3	1.6
	std	0.9	4.2	0.7	3.9	1.1	3.8	0.8	4.3	0.8	3.9
	rms	1.2		<b>1.0</b>		1.1		1.2		1.2	
K2	avg	0.0	-1.3	0.8	4.6	0.4	-2.6	0.7	9.3	-0.4	4.1
	std	0.7	11.1	1.3	11.4	1.3	14.6	1.5	11.2	1.2	13.1
	rms	<b>0.9</b>		1.2		1.5		1.4		1.1	
P1	avg	0.7	0.5	0.4	1.8	0.8	1.7	0.6	2.0	0.7	3.4
	std	0.7	5.9	0.6	5.4	0.9	5.4	0.6	5.9	0.6	5.6
	rms	0.7		<b>0.5</b>		0.7		0.7		0.7	



Marinone: Intercomparisons of modelled tidal currents and observations in the Gulf of California



**Figure 3.** Positions of the current meters in the Gulf of California. Some stations are too close for their positions to be shown by their station numbers and are grouped by letters.

**Figura 3.** Posiciones de los medidores de corriente en el Golfo de California. Algunas estaciones están muy cercanas entre sí para mostrar sus posiciones con números de estación y se agrupan con letras.

gulf and 67 time series of the depth-averaged currents (note that some stations will have a few current meters, and some will have only one current meter and will be assumed to be the same as the depth-averaged one; therefore, the comparisons with depth averages will be less effective or conclusive). Table 3 shows when, for how long and at what depth the different current meters were recording.

promediar las observaciones; se agruparon sus localidades por letra en la figura 3 para no amontonar las etiquetas. Los registros duraron desde unos cuantos hasta cientos de días; la mayoría tienen una duración de un mes o menos (59 de 123). Cuando más de un medidor de corriente está disponible dentro de la columna de agua, se calculó el campo de velocidad promediado en la vertical. Por

**Table 3.** Current meter information. The letters in the station name are used to locate them in figure 3. The starting date is in day/month/year format. The level column indicates the depth (m) of the current meter and the total depth (m) of the water column in parentheses. The total number of days is in the last column. When a current meter has a different length than the others in the same array, it is indicated with an asterisk.

**Tabla 3.** Información de los correntímetros. Las letras en el nombre de la estación se usan para localizarlas en la figura 3. La fecha de inicio está en el formato día/mes/año. La columna del nivel (*level*) indica la profundidad (m) del correntímetro y en paréntesis se da la profundidad total (m) de la columna de agua. El número total de días se presenta en la última columna. Cuando un correntímetro tiene una longitud diferente a la de otros en el mismo anclaje, se señala con un asterisco.

Station	Start	Level (total)	Days	Station	Start	Level (total)	Days
21	25/08/95	12 (20)	14.8	18	05/02/95	22 (44)	5.2
19	26/01/95	15 (31)	16.4	65	13/03/73	141 (161)	10.5
c 66	23/03/73	72 (82)	26.0	c 67	13/03/73	71 (91)	10.2
01	27/11/94	19, 29 (52)	8.3	64	13/03/73	114 (134)	11.2
08	07/12/94	28,	50.4	60	28/02/88	17 (57)	18.0
		85* (95)	23.1*	61	23/05/84	70 (97)	185.7
14	30/11/94	38, 120 (200)	69.8	59	28/02/88	20 (100)	17.9
b 62	23/03/73	168 (178)	58.2	b 63	13/03/73	150 (170)	10.0
e 05	16/03/95	44, 54, 134, 188 (208)	75.6	e 06	20/09/95	20, 50 (205)	138.4
d 03	13/12/94	21, 60, 120 (150)	40.3	d 02	28/11/94	21, 60, 120 (150)	14.2
a 11	25/01/95	21, 170 (199)	7.4	d 04	23/01/95	28, 67, 127 (157)	44.4
a 56	23/03/73	128 (138)	59.7	a 12	02/02/95	21, 160 (297)	30.5
57	18/06/82	25, 50, 100, 200,		07	28/11/94	25, 120 (150)	56.4
		330 (350)	7.6	15	24/01/95	20 (105)	63.9
20	15/03/95	52, 160, 180, 250 (297)	79.2	10	06/06/95	17 (40)	103.4
n 22	09/06/95	120, 240 (340)	95.5	n 13	19/09/95	50,	139.2
23	12/10/95	20, 50, 85 (145)	140.3			100* (340)	161.5*
17	13/10/95	20 (300)	113.5	09	01/12/94	20, 57, 197 (397)	61.6

**North**

Table 3 (Cont.)

Station	Start	Level (total)	Days	Station	Start	Level (total)	Days
16	07/03/95	35, 107 (297)	86.4	58	19/06/82	25, 50, 100 (120)	6.7
54	19/11/82	25, 150, 285 (300)	4.5	53	20/11/82	150 (700)	3.5
<b>Islands</b>							
51	13/01/90	508, 595 (605)	14.8	50	30/04/83	25, 225, 425 (500)	14.1
55	13/01/90	84, 114 (214)	14.8	52	19/07/90	75, 110, 150,	18.8
f 45	30/04/83	8, 208 (300)	14.8			250*, 350, 428 (440)	15.7*
f 46	06/11/83	100, 200, 450 (500)	193.3	47	09/03/85	150 (550)	14.1
h 48	04/11/85	570 (585)	11.7	h 49	08/10/74	540 (550)	6.6
44	02/12/84	170, 260 (270)	11.6	g 42	12/01/90	340,	11.0
g 43	15/11/84	340, 430 (440)	17.1			430* (440)	9.5*
<b>Central</b>							
33	19/05/84	50, 300, 500,		i 26	29/04/83	10,	564.8
		850 (1000)	178.2			30* (86)	154.5*
i 27	29/04/83	70 (90)	187.0	i 28	05/11/83	70 (90)	375.7
i 29	11/05/84	10 (200)	119.4	k 34	10/05/84	10 (200)	187.5
k 35	18/11/82	10 (100)	208.3	k 36	09/09/83	10 (100)	58.3
k 37	18/11/82	70 (100)	539.2	k 38	01/05/83	75 (100)	150.8
m 39	10/05/84	10, 20 (50)	187.1	m 40	01/05/83	10 (35)	129.0
m 41	07/05/84	5, 12 (17)	191.0	j 30	22/04/74	1880 (1890)	9.0
j 31	07/10/74	1900 (1910)	14.3	j 32	22/04/74	1892 (1895)	9.0
<b>South</b>							
24	17/05/83	70 (100)	152.2	25	09/05/84	10,	78.1
						70* (100)	186.8*

## RESULTS

The models were run for six months after spin up, and time series of the five model versions (2DC, 3HC, 3MC, 3HF and 3MF) at the 67 stations of current meter observations were subjected to tidal harmonic analysis. The HAMSOM model was run with 12 layers and the POM model with 21  $\sigma$  levels. For each station, and from the three-dimensional models, the depth-averaged currents were computed; therefore, the comparisons between model and observations are as follows:

- 123 *in situ* positions (observations vs 3HC, 3MC, 3HF and 3MF).
- 67 stations for the vertical averages (observations vs 2DC, 3HC, 3MC, 3HF and 3MF).

The comparisons are based on harmonic constants, which were extracted from all time series (*in situ* and the vertical averages) with standard tidal harmonic analysis. The number of constituents fitted to the observations depends on the record length: for records shorter than two weeks, only M2 and K1 were extracted; for records longer than one month, the S2 and O1 components were also included, and so on. Inference is made for the S2 and K1 components from K2 and P1, respectively, for short record lengths.

On average (from the different series), the associated tidal currents of the M2 component alone explain more than 50% of the variance of the currents in the upper half of the gulf, but only about 13% of the variance in the lower half. The corresponding figures for the K1 component are only 8% and 2% in the upper and lower halves of the gulf, respectively. As an example, table 4 shows the harmonic constants of three stations in the gulf for the leading semidiurnal and diurnal constituents. Note that at stations 5(e) and 46(f), which are located in the north and island regions,

tanto, el conjunto de datos de las corrientes tiene 123 series de tiempo de observaciones *in situ* dentro del golfo y 67 series de tiempo de las corrientes promediadas en la vertical (note que algunas estaciones tendrán unos cuantos medidores de corriente y otros tendrán uno solo y se considerará igual que las promediadas en la vertical; por tanto, las comparaciones con los promedios verticales serán menos efectivas o conclusivas). La tabla 3 muestra cuándo, por cuánto tiempo y a qué profundidad registraban los diferentes medidores de corriente.

## RESULTADOS

Se corrieron los modelos por seis meses después de inicializados, y se aplicó un análisis armónico de marea a las series de tiempo de las cinco versiones de los modelos (2DC, 3HC, 3MC, 3HF y 3MF) de 67 estaciones de observaciones de corrientes. El modelo HAMSOM se corrió con 12 capas y el modelo POM con 21 niveles  $\sigma$ . Para cada estación y a partir de los modelos tridimensionales, se calcularon las corrientes promediadas con la profundidad; por tanto, las comparaciones entre los modelos y observaciones son las siguientes:

- 123 posiciones *in situ* (observaciones vs 3HC, 3MC, 3HF y 3MF).
- 67 estaciones para los promedios verticales (observaciones vs 2DC, 3HC, 3MC, 3HF y 3MF).

Se basaron las comparaciones en constantes armónicas, que se obtuvieron de todas las series de tiempo (*in situ* y promedios verticales) con un análisis armónico de marea estándar. El número de componentes ajustado a las observaciones depende de la longitud de tiempo del registro: para registros más cortos que dos semanas, sólo se extrajeron M2 y K1;

**Table 4.** Harmonic constants of the depth-averaged (DA, first row) and *in situ* observed velocity components ( $u$ ,  $v$ ) at the indicated depth ( $H$ ) and station (stn).  $A$ ,  $\phi$  and % correspond to the amplitude ( $\text{cm s}^{-1}$ ), phase (degrees) and explained variance by the indicated tidal constituent, respectively.

**Tabla 4.** Constantes armónicas de las componentes de velocidad ( $u$ ,  $v$ ) promediadas con la profundidad (DA, primera fila) y observadas *in situ* en la profundidad ( $H$ ) y estación (stn) indicadas.  $A$ ,  $\phi$  y % corresponden a la amplitud ( $\text{cm s}^{-1}$ ), fase (grados) y varianza explicada por la componente de marea indicada, respectivamente.

Stn	$H$	M2						K1					
		$u$			$v$			$u$			$v$		
		$A$	$\phi$	%	$A$	$\phi$	%	$A$	$\phi$	%	$A$	$\phi$	%
05	DA	4.8	86.4	29.8	16.8	86.4	57.6	1.4	33.7	3.6	2.6	146.3	2.0
(e)	44	5.1	86.1	14.0	10.9	86.1	29.3	5.0	348.0	18.9	6.7	12.0	16.3
	54	5.8	81.6	12.8	19.6	98.4	47.4	4.4	18.8	10.4	5.9	161.2	6.5
	134	4.5	78.9	12.9	20.4	78.9	55.7	5.5	318.0	27.1	4.8	42.0	4.6
	188	3.4	73.6	4.4	16.8	106.4	35.8	1.8	261.6	1.7	1.9	98.4	0.7
46	$\int()dz$	24.8	270.5	58.6	33.3	89.5	62.9	4.0	201.4	1.6	5.3	338.6	1.6
(f)	100	22.8	248.6	41.8	35.9	111.4	53.5	2.8	181.8	0.6	8.3	3.3	2.9
	200	25.9	275.7	48.8	38.9	84.3	59.7	5.3	170.4	2.0	3.6	352.0	0.5
	450	28.2	257.0	52.9	26.9	77.0	53.0	5.0	130.3	1.7	5.0	309.9	1.9
26	$\int()dz$	3.1	237.4	8.4	9.6	122.6	27.1	1.9	16.7	3.4	4.9	16.7	8.0
(i)	10	0.6	215.1	0.4	7.1	144.9	10.1	1.0	213.6	1.0	4.1	146.4	3.3
	30	5.3	238.9	8.3	8.8	121.1	18.0	2.1	9.1	1.5	3.9	9.1	3.8

respectively (see fig. 3), the tides account for most of the time variability of the currents, especially at station 46, and most of this variance is due to the M2 tidal constituent. At these stations, the tides explain more than 70% of the variance. In the central area [station 26(i)] the tides account for only ~20% of the variance; other processes are present there. In general, the harmonic constants show important variations with depth, and the variance explained by the tides is larger for the depth-averaged currents than for the *in situ* currents, especially for the M2 and S2 components.

para registros más largos que un mes, también se incluyeron las componentes S2 y O1, y así sucesivamente. Se hace inferencia para las componentes S2 y K1 de las K2 y P1, respectivamente, para los registros de corta duración.

En promedio (de las diferentes series), las corrientes de marea asociadas con la componente M2 explican más del 50% de la varianza de las corrientes en la parte superior del golfo, pero sólo alrededor del 13% de la varianza de la parte inferior. Los números correspondientes de la componente K1 son solamente el 8% y 2% en las partes superior e inferior del golfo,

### Tidal ellipses

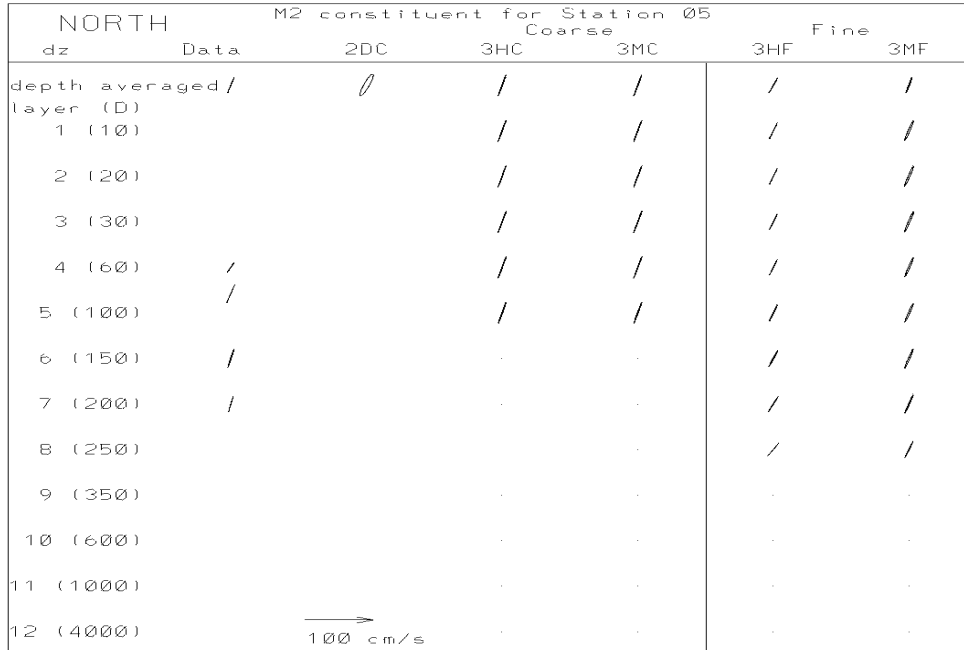
Figures 4, 5 and 6 show the tidal ellipses of the M2 tidal constituent, from the observations and models for stations 5(e), 46(f) and 26(i), which are examples of the north, island and central regions, respectively (see fig. 3 for their location in the gulf). The first row corresponds to the depth-averaged currents; the rest of the rows are located in the vertical direction with respect to the HAMSOM layers. The currents in the central and southern areas have smaller speeds than in the island and northern regions. The rest of the stations in the gulf show the same qualitative behaviour: for some stations all the models reproduce the observations very well, whereas for others none of them do; for some stations some models work well and for others they do not. At the stations west and northwest of Ángel de la Guarda Island (stations 50, 51, 53 and 54), the models, in general, overestimate the tidal currents; in the rest of the gulf there is no correlation of the model performance with, say, the topography or the proximity to the boundaries.

Large spatial variability is present in the observations. Stations very close together give different degrees of agreement with the modelled currents, mainly because of the large variability contained in the measurements that is not captured with our models because of our actual bathymetric resolution. For example, at station 14 we have two time series, at 38 and 120 m depth, and at station 61 we have one time series at 70 m depth, i.e., between the two levels of station 14; the largest amplitude for the M2 component corresponds to the meridional velocity. Their amplitudes are 11.3, 13.1 and 24.4 cm s<sup>-1</sup>, respectively; 24.4 cm s<sup>-1</sup> is well outside the range given between 11.3 and 13.1 cm s<sup>-1</sup>. However, the total depths (table 3) are 200 and 97 m, respectively, i.e., the depth is reduced by ~50% at station 61 and, by continuity, we can expect a doubling in

respectivamente. Como ejemplo, la tabla 4 muestra las constantes armónicas de tres estaciones en el golfo para las principales componentes semidiurnas y diurnas. Note que en las estaciones 5(e) y 46(f), localizadas en las regiones norte y de las islas, respectivamente (ver fig. 3), las mareas explican casi toda la variabilidad temporal de las corrientes, especialmente en la estación 46, y casi toda esa varianza se debe a la componente de marea M2. En estas estaciones, las mareas explican más del 70% de la varianza. En la región central [estación 26(i)] las mareas explican sólo ~20% de la varianza; allí se presentan otros procesos. En general, las componentes armónicas muestran variaciones importantes con la profundidad, y la varianza explicada por las mareas es mayor para las corrientes promediadas con la profundidad que para las corrientes *in situ*, especialmente para las componentes M2 y S2.

### Elipses de marea

Las figuras 4, 5 y 6 muestran las elipses de marea de la componente de marea M2, a partir de las observaciones y modelos para las estaciones 5(e), 46(f) y 26(i), que son ejemplos de las regiones norte, de las islas y central, respectivamente (ver fig. 3 para su ubicación en el golfo). La primera fila corresponde a las corrientes promediadas con la profundidad; las demás se ubican en la dirección vertical con respecto a las capas HAMSOM. Las corrientes en las regiones central y sur presentan velocidades menores que las de las regiones de las islas y norte. Las demás estaciones en el golfo muestran el mismo comportamiento cualitativo: para algunas estaciones todos los modelos reproducen muy bien las observaciones, mientras que para otras estaciones ninguno lo hace; para algunas estaciones algunos modelos funcionan bien y para otras no. En las estaciones al oeste y noroeste de la Isla Ángel de la Guarda (estaciones 50, 51, 53 y 54), en general



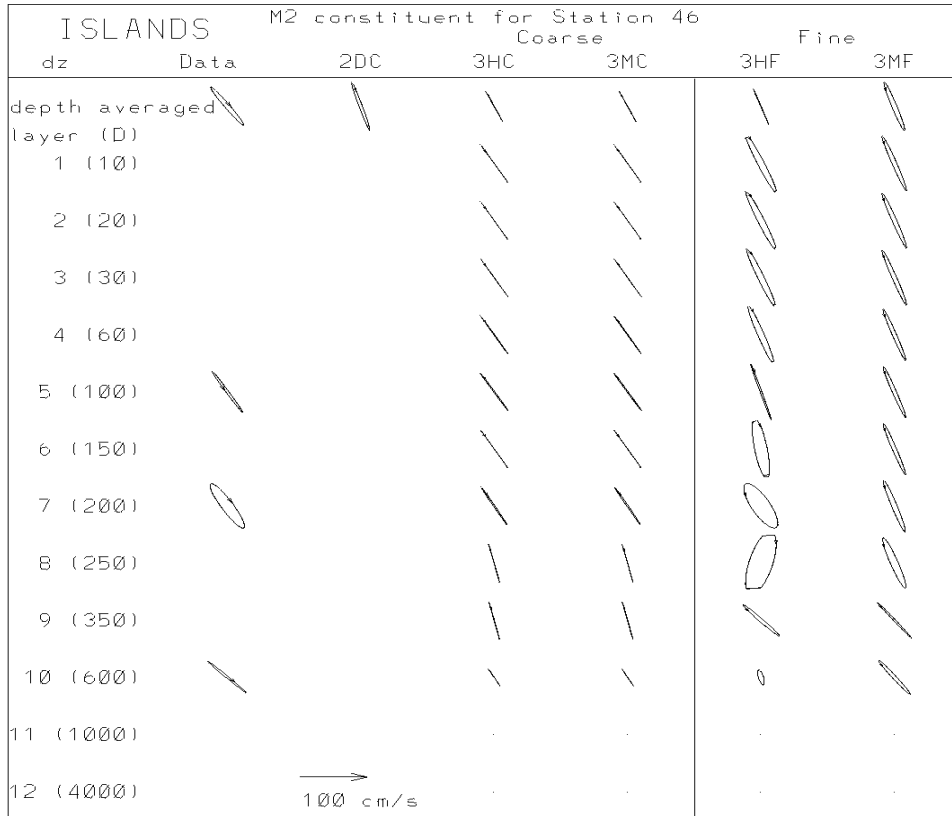
**Figure 4.** Tidal ellipses for the M2 tidal constituents for station 5. The first column labels the layer number (from the HAMSOM model) and the nominal lower depth of that layer (in meters) is within parentheses. *Coarse* and *fine* indicate the results from the coarse and fine bathymetries used in the three-dimensional models. The first row of ellipses was computed from the depth-averaged currents.

**Figura 4.** Elipses de marea para la componente de marea M2 para la estación 5. La primera columna indica el número de capa (del modelo HAMSOM) y la profundidad inferior nominal de esa capa (en metros) está entre paréntesis. *Coarse* y *fine* indican los resultados de las batimetrías gruesa y fina utilizadas en los modelos tridimensionales. La primera fila de elipses se calculó a partir de las corrientes promediadas en la vertical.

the velocity explaining the difference. The models' velocity does not vary between the corresponding grid points ( $\sim 24 \text{ cm s}^{-1}$ ), which have a depth of 110 and 109 m, respectively. A different situation is given by stations 11 and 56, which are located in one grid point (label *a* in figure 3). Station 11 has time series at 21 and 170 m depth, and station 56 at 128 m. The magnitudes of their velocity field associated with the M2 component are 17.5, 21.7 and  $9.9 \text{ cm s}^{-1}$ , respectively; the last figure is much smaller, but in this case, it is very close to the bottom and probably within the bottom

los modelos sobrestiman las corrientes de marea; en el resto del golfo, no hay correlación entre el funcionamiento del modelo con, por ejemplo, la topografía o la proximidad de las fronteras.

Las observaciones presentan gran variabilidad espacial. Las estaciones cercanas entre sí presentan diferentes grados de concordancia con las corrientes modeladas, debido principalmente a la variabilidad en las mediciones que no se capturó con nuestros modelos por la resolución batimétrica actual. Por ejemplo, hay dos series de tiempo para la estación 14, a 38 y



**Figure 5.** As figure 4 for station 46.  
**Figura 5.** Igual que la figura 4 para la estación 46.

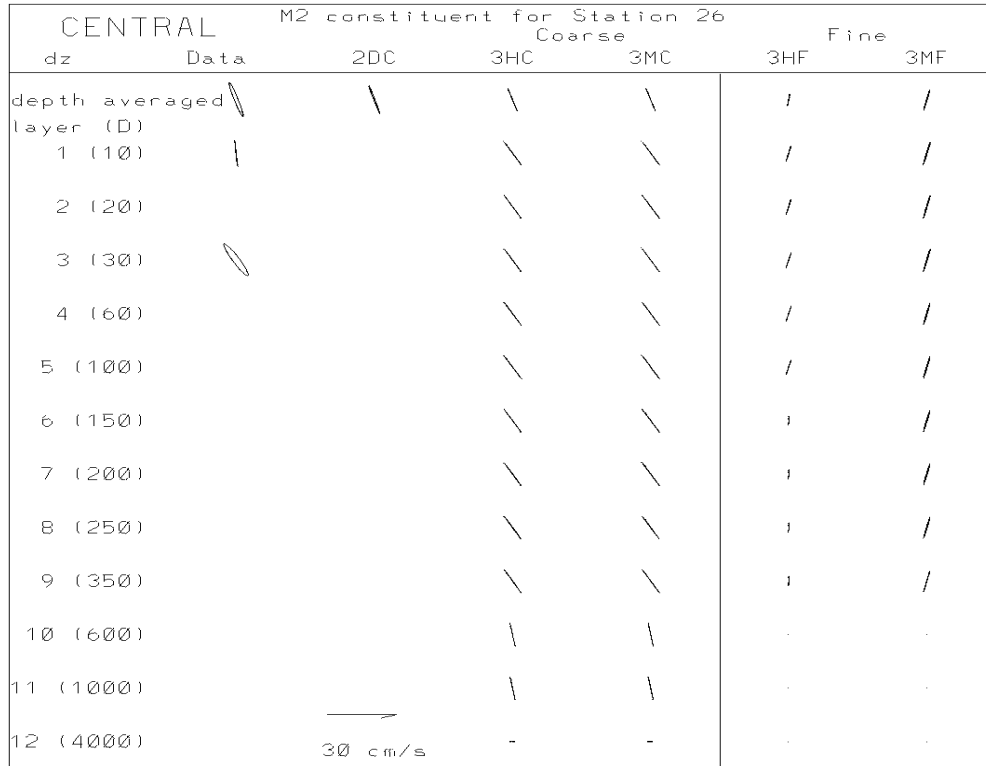
boundary layer. Local effects are important; e.g., their total depths differ: at station 11 it is 199 m, while station 56 has a depth of 138 m and the model depth here is greater than 200 m.

The same analyses were performed with the rest of the tidal constituents (not shown) and the similitudes and differences between models and observations are basically the same as those for the M2 constituent.

In general, the currents are almost rectilinear; however, there are several places where the current ellipses have some eccentricity and the simulations with the finer grid reproduce

120 m de profundidad, y sólo una para la estación 61 a 70 m de profundidad, i.e., entre los dos niveles de la estación 14; la mayor amplitud de la componente M2 corresponde a la velocidad meridional. Sus amplitudes son 11.3, 13.1 y 24.4  $\text{cm s}^{-1}$ , respectivamente; 24.4  $\text{cm s}^{-1}$  está muy por afuera del rango dado entre 11.3 y 13.1  $\text{cm s}^{-1}$ . Sin embargo, las profundidades totales (ver tabla 3) son 200 y 97 m, respectivamente, i.e., la profundidad se reduce por ~50% en la estación 61 y, por continuidad, se puede esperar que la velocidad se duplique y explicar así la diferencia. La velocidad de los





**Figure 6.** As figure 4 for station 26. Note the change in scale for the magnitude of the velocities with respect to the previous figures.

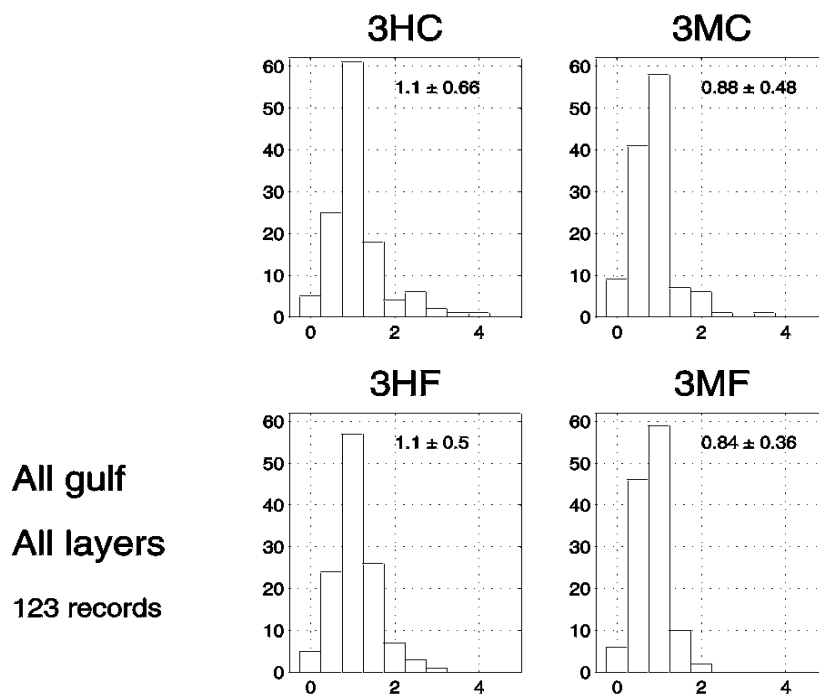
**Figura 6.** Igual que la figura 4 para la estación 26. Note el cambio de escala en la magnitud de las velocidades con respecto a las figuras anteriores.

this behaviour (e.g., fig. 5) better than those with the coarse grid.

### Histograms

In order to quantify the performance of the models as compared to the observations, histograms of the ratio of the observed to the modelled semimajor axis ( $M_o/M_m$ ) were calculated for each model; this was done for both the *in situ* and depth-averaged currents' harmonics. Figure 7 shows the histograms for the *in situ* currents due to the M2 tidal constituent. (The figures in each histogram are the mean and

modelos no varía entre los puntos de malla correspondientes ( $\sim 24 \text{ cm s}^{-1}$ ), que tienen una profundidad de 110 y 109 m, respectivamente. Se presenta otra situación en las estaciones 11 y 56, localizadas en un punto de malla (etiqueta *a* en la figura 3). La estación 11 tiene series de tiempo a 21 y 170 m de profundidad, y la estación 56 a 128 m. Las magnitudes de su campo de velocidad asociadas con la componente M2 son 17.5, 21.7 y 9.9  $\text{cm s}^{-1}$ , respectivamente; la última cifra es mucho menor, pero en este caso, está muy cerca al fondo y probablemente dentro de la capa límite. Los efectos locales son importantes; e.g., hay diferencia en sus



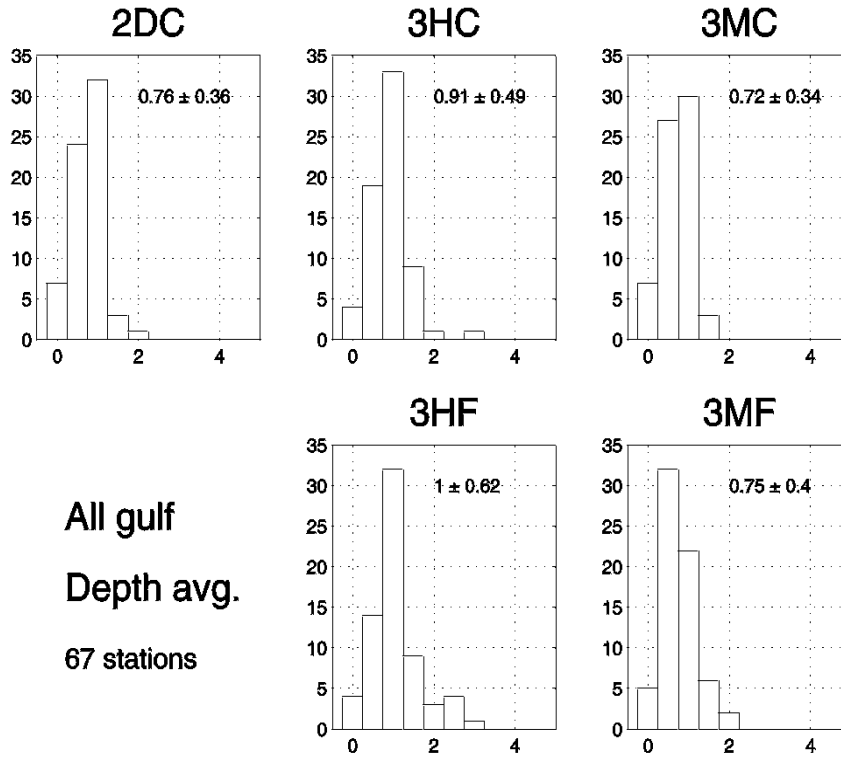
**Figure 7.** Histogram of the observed to modelled ratio of the semimajor axes,  $M_o/M_m$ , of the *in situ* currents of the M2 tidal constituent. The numbers in the histograms are the mean and standard deviation. **Figura 7.** Histograma de la razón observada y modelada de los semiejes mayores,  $M_o/M_m$ , de las corrientes *in situ* de la componente de marea M2. Los números en el histograma son la media y desviación estándar.

standard deviation of  $M_o/M_m$ .) About 50% of the time series are well simulated by both three-dimensional models with both bathymetries, i.e.,  $M_o/M_m \sim 1$ . The models under- or over-predict the currents: the HAMSOM model with both bathymetries underestimates the semimajor axis by 10% (but the 3HF model with smaller variance) and the POM model overestimates them by 12% and 16% with the coarse and fine bathymetries, respectively. Figure 8 shows the histograms of the same ratio for the depth-averaged currents (remember that many stations have only one or few current meters). With the exception of the 3HF model, the depth-averaged currents are overestimated,

profundidades totales: la estación 11 tiene una profundidad de 199 m, mientras que la de la estación 56 es de 138 m, y la profundidad del modelo es mayor que 200 m.

Se llevaron a cabo los mismos análisis con las componentes de marea restantes (no ilustradas), y las similitudes y diferencias entre los modelos y observaciones son básicamente las mismas que las de la componente M2.

En general, las corrientes son casi rectilíneas; sin embargo, hay muchos lugares donde las elipses de corriente presentan excentricidad y las simulaciones con la malla más fina reproducen este comportamiento (e.g., fig. 5) mejor que las con la malla gruesa.



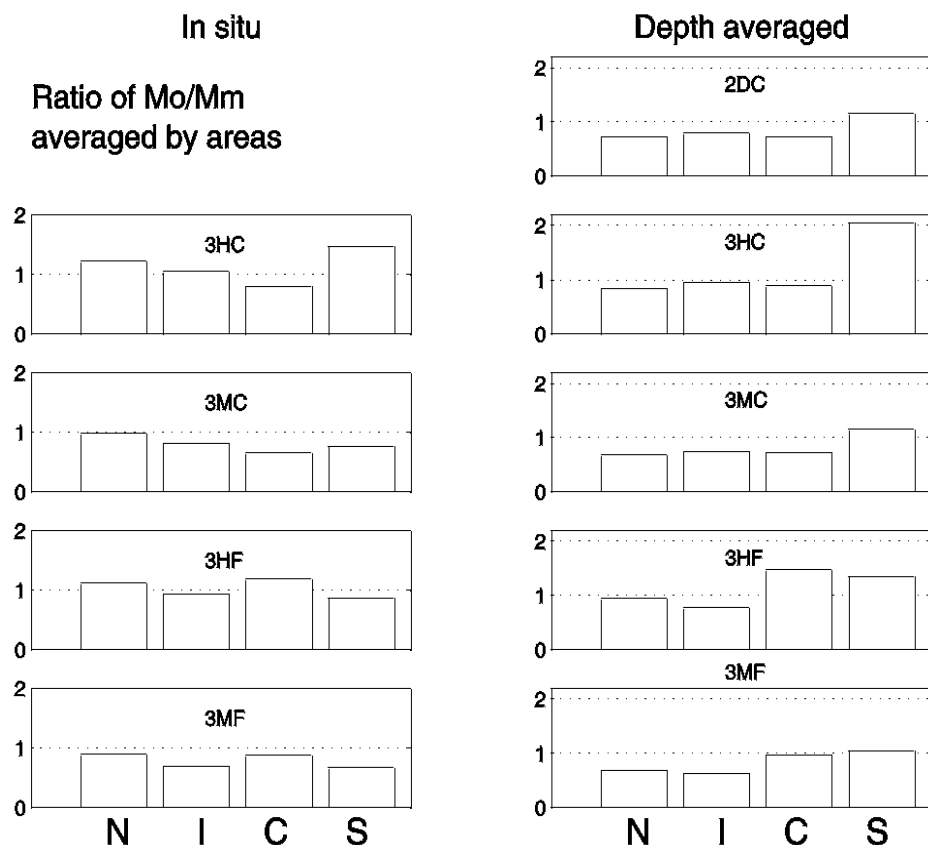
**Figure 8.** Histogram of the observed to modelled ratio of the semimajor axes  $M_o/M_m$ , of the depth-averaged currents of the M2 tidal constituent. The numbers in the histograms are the mean and standard deviation.

**Figura 8.** Histograma de la razón observada y modelada de los semiejes mayores,  $M_o/M_m$ , de las corrientes promediadas con la profundidad de la componente de marea M2. Los números en los histogramas son la media y desviación estándar.

on average, by all models; the 3HC model overestimation is only 9%. Figure 9 shows the mean of the  $M_o/M_m$  ratio for each region of the gulf (see fig. 1) for both the *in situ* and depth-averaged currents due to the M2 tidal component. The layer model performance is in general the same over all the gulf for the *in situ* comparisons ( $M_o/M_m \sim 1$ ). The  $\sigma$  model overestimates the tidal currents everywhere. For the depth-averaged currents all the models overestimate the currents with the exception of the southern region, for all models, and the central

### Histogramas

Para poder cuantificar el funcionamiento de los modelos en comparación con las observaciones, se calcularon histogramas de la razón del semieje mayor ( $M_o/M_m$ ) observado y modelado para cada modelo; esto se realizó para las constantes armónicas de las corrientes *in situ* y de las corrientes promediadas con la profundidad. Los histogramas de las corrientes *in situ* que se deben a la componente de marea M2 se muestran en la figura 7. (Las cifras en cada



**Figure 9.** Mean value of the observed to modelled ratio of the semimajor axes  $M_o/M_m$ , for the northern (N), island (I), central (C) and southern (S) regions of the gulf for the *in situ* currents of the M2 tidal constituent.

**Figura 9.** Valor promedio de la razón observada y modelada de los semiejes mayores,  $M_o/M_m$ , para las regiones norte (N), de las islas (I), central (C) y sur (S) del golfo para las corrientes *in situ* de la componente de marea M2.

region for the 3HF model. The same analyses were done for the other semidiurnal tidal constituents, which in general have smaller amplitudes (both observed and modelled), but the results are similar to those of the M2 and are not shown.

The corresponding histograms (not shown) of the ratio  $M_o/M_m$  for the *in situ* currents due to the K1 tidal constituent give the same results

histograma son la media y desviación estándar de  $M_o/M_m$ .) Cerca del 50% de las series de tiempo se simulan bien con ambos modelos tridimensionales con ambas batimetrías, i.e.,  $M_o/M_m \sim 1$ . Los modelos sub o sobrestiman las corrientes: el modelo HAMSOM subestima el semieje mayor con ambas batimetrías por 10% (pero el modelo 3HF con menor varianza) y el modelo POM lo sobrestima por 12% y 16%

**Table 5.** Averages and standard deviations of the semimajor axes ratio,  $M_o/M_m$ , for the M2 and K1 constituents, from all the *in situ* (123 time series) and depth-averaged (67 stations) currents, respectively. (The *in situ* column for the K1 averages and standard deviations are not equal with two digits.)

**Tabla 5.** Promedios y desviación estándar de la razón de los semiejes mayores,  $M_o/M_m$ , para las componentes M2 y K1, de todas las corrientes *in situ* (123 series de tiempo) y promediadas con la profundidad (67 estaciones), respectivamente. (La columna *in situ* de los promedios y la desviación estándar de K1 no son iguales con dos dígitos.)

	M2		K1	
	<i>In situ</i>	Depth-averaged	<i>In situ</i>	Depth-averaged
2DC		0.8 ± 0.4		<b>1.1 ± 0.8</b>
3HC	1.1 ± 0.7	0.9 ± 0.5	1.5 ± 1.2	1.2 ± 0.9
3MC	0.9 ± 0.5	0.7 ± 0.3	1.5 ± 1.2	1.2 ± 0.9
3HF	<b>1.1 ± 0.5</b>	<b>1.0 ± 0.6</b>	<b>1.5 ± 1.2</b>	1.3 ± 1.6
3MF	0.8 ± 0.4	0.8 ± 0.4	1.5 ± 1.3	1.3 ± 1.3

as the rest of the diurnal constituents, but in general these components are underestimated. The *in situ* currents are, on average, underestimated by ~50% by all the models; only in the island area is the ratio of these components well modelled ( $M_o/M_m \sim 1$ ). On the other hand, the depth-averaged currents are less underestimated, between 10% and 30%, depending on the model; the models reproduce these components well in the north and island area and the worst results are obtained for the central area.

The overall mean and standard deviation of the ratio of the semimajor axes,  $M_o/M_m$ , for the M2 and K1 constituents are tabulated in table 5, which indicates that the three-dimensional layer model with the finer bathymetry (3HF) gives the best simulation of the observed tidal currents, except for the depth-averaged current of the K1 component, which is better simulated by the 2DC model.

#### Root mean squares and differences

Table 6 shows statistics of the  $u$  (transversal) and  $v$  (longitudinal) velocity components and of the semimajor ( $M$ ) and semiminor ( $m$ )

con la batimetría gruesa y la fina, respectivamente. En la figura 8 se muestran los histogramas de la misma razón de las corrientes promediadas con la profundidad (recuerde que muchas estaciones tienen sólo uno o pocos correntímetros). Con excepción del modelo 3HF, las corrientes promediadas con la profundidad son sobrestimadas, en promedio, con todos los modelos; la sobrestimación del modelo 3HC es de sólo 9%. Se muestra en la figura 9 la media de la razón  $M_o/M_m$  para cada región del golfo (ver fig. 1) para las corrientes *in situ* y las promediadas con la profundidad debido a la componente de marea M2. El funcionamiento del modelo de capas es, en general, igual para todo el golfo para las comparaciones *in situ* ( $M_o/M_m \sim 1$ ). El modelo  $\sigma$  sobrestima las corrientes de marea en todas partes. Para las corrientes promediadas con la profundidad, todos los modelos sobrestiman las corrientes, con excepción de la región sur, para todos los modelos, y la región central para el modelo 3HF. Se llevaron a cabo los mismos análisis para las otras componentes de marea semidiurnas, que en general tienen amplitudes menores (observadas y modeladas), pero los resultados son similares a los del M2 que no se muestran.

**Table 6.** M2 tidal constituent statistics of the (a) *in situ* and (b) depth-averaged velocity components;  $u$  and  $v$  are the east-west and north-south velocity components, respectively, and  $M$  and  $m$  are the semi-major and semiminor axes ( $\text{cm s}^{-1}$ ), respectively. The statistics are calculated over all the 123 time series for the *in situ* fields and from the 67 stations for the depth-averaged fields. The root mean squares (rms) are computed according to equation 1 for  $u$  and  $v$ , and the differences,  $du$ ,  $dv$ ,  $dM$  and  $dm$ , are calculated according to equation 2.

**Tabla 6.** Estadísticas de la componente de marea M2 de las componentes de velocidad (a) *in situ* y (b) promediadas con la profundidad;  $u$  y  $v$  son las componentes de velocidad este-oeste y norte-sur, respectivamente, y  $M$  y  $m$  son los semiejes mayor y menor ( $\text{cm s}^{-1}$ ), respectivamente. Se calcularon las estadísticas para todas las 123 series de tiempo para los campos *in situ* y para los campos promediados con la profundidad de las 67 estaciones. Las raíces cuadráticas medias (rms) se calculan con base en la ecuación 1 para  $u$  y  $v$ , y las diferencias,  $du$ ,  $dv$ ,  $dM$  y  $dm$ , se calculan con base en la ecuación 2.

Model	$u$	rms	$du$	$v$	rms	$dv$	$M$	$dM$	$m$	$dm$
<b>(a) <i>In situ</i> velocity fields</b>										
3HC	$3.7 \pm 3.7$	<b>5.7</b>	4.5	$18.5 \pm 10.4$	<b>18.9</b>	6.6	$19.1 \pm 10.6$	6.8	$-0.1 \pm 0.4$	<b>1.8</b>
3MC	$5.4 \pm 4.8$	6.0	4.4	$22.9 \pm 12.4$	21.4	7.9	$23.8 \pm 12.7$	7.5	$-0.8 \pm 2.1$	2.2
3HF	$4.9 \pm 4.5$	6.0	4.1	$18.9 \pm 11.3$	19.0	<b>6.2</b>	$19.6 \pm 11.7$	<b>6.3</b>	$-0.3 \pm 2.5$	2.2
3MF	$5.4 \pm 4.6$	6.1	<b>4.1</b>	$24.5 \pm 15.2$	22.3	8.5	$25.2 \pm 15.4$	8.1	$-0.7 \pm 2.0$	2.1
OBS	$7.3 \pm 8.0$			$18.2 \pm 11.7$			$19.9 \pm 13.1$		$-0.6 \pm 2.8$	
<b>(b) Depth-averaged velocity components</b>										
2DC	$4.9 \pm 3.8$	5.8	4.4	$22.3 \pm 13.4$	18.9	8.1	$23.0 \pm 13.5$	7.4	$-0.7 \pm 1.8$	1.9
3HC	$3.9 \pm 3.0$	<b>5.6</b>	<b>4.0</b>	$19.2 \pm 12.1$	17.1	7.0	$19.8 \pm 12.1$	6.7	$0.0 \pm 0.5$	<b>1.6</b>
3MC	$5.6 \pm 4.5$	6.6	4.1	$23.6 \pm 14.3$	18.8	9.2	$24.5 \pm 14.6$	8.5	$-1.0 \pm 2.1$	2.1
3HF	$4.3 \pm 3.5$	5.9	4.3	$18.3 \pm 12.8$	<b>16.6</b>	<b>6.6</b>	$18.9 \pm 13.0$	<b>6.1</b>	$-0.6 \pm 1.7$	1.7
3MF	$5.8 \pm 4.9$	6.7	<b>4.0</b>	$24.8 \pm 16.6$	19.6	10.5	$25.7 \pm 16.9$	9.8	$-1.1 \pm 2.2$	2.1
OBS	$6.8 \pm 7.3$			$15.5 \pm 11.7$			$17.1 \pm 12.9$		$-0.7 \pm 2.3$	

axes of the M2 tidal constituent for the *in situ* and depth-averaged currents. For the  $u$  and  $v$  variables, a rms difference between models and observations, according to equation 1, is included. Also, the averages of the absolute value of the differences between the models and observations are included, which are calculated as:

$$dB = \frac{1}{N} \sum_i |B_o - B_m|_i \quad (2)$$

Los histogramas correspondientes (no ilustrados) de la razón  $M_o/M_m$  para las corrientes *in situ* debidas a la componente de marea K1 dan los mismos resultados que las demás componentes diurnas, pero en general estas componentes son subestimadas. Las corrientes *in situ* son, en promedio, subestimadas por ~50% con todos los modelos; solamente en la región de las islas se modela bien la razón de estas componentes ( $M_o/M_m \sim 1$ ). Por otro lado, se subestiman menos las corrientes

where  $B$  is  $M$ ,  $m$ , the amplitude of  $u$  or the amplitude of  $v$ . Note that the smallest rms of the  $u$  or  $v$  fields is not necessarily the one that has smallest differences of amplitude between models and observations,  $du$  or  $dv$ , because the rms takes into account the phase as well. This table also indicates that HAMSOM with the finer grid performs best; the smaller rms are for the  $dv$  and  $M$  variables, which contain the largest signal. For the K1 constituent (table 7) and the other constituents not shown, the statistics are very close and vaguely suggest a better performance of the 3HF model; however, the associated velocities are much smaller than those due to the M2 tidal component.

## SUMMARY

This work is concerned with numerical modelling of tidal currents in the Gulf of California. One two-dimensional and two three-dimensional (homogeneous) models were used to simulate them and the results are compared against observations. The three-dimensional models are HAMSOM and POM. The first one is a layer model where the equations are depth-averaged between fixed levels, and the second one is a model of  $\sigma$ -coordinates (in the vertical). HAMSOM uses a simple parameterization of vertical mixing coefficients and POM a 2.5 Mellor-Yamada closure scheme. Two bathymetries were used to assess the effect of horizontal resolution in the three-dimensional models. The models are forced with the major tidal constituents at the open boundary, the mouth of the gulf.

The model simulations were compared to observations computing rms differences of harmonic constants. It was found that the tidal currents are slightly better modelled (in the rms difference sense) with the level model, HAMSOM, using a fine grid, than with the  $\sigma$

promediadas con la profundidad, entre 10% y 30%, dependiendo del modelo; los modelos reproducen bien estas componentes en las regiones norte y de las islas y los peores resultados se obtienen para la región central.

Los promedios y la desviación estándar de la razón de los semiejes mayores,  $M_o/M_m$ , para las componentes M2 y K1 se muestran en la tabla 5, la cual indica que el modelo de capas tridimensional con la batimetría más fina (3HF) provee la mejor simulación de las corrientes de marea observadas, excepto para la corriente promediada con la profundidad de la componente K1, que se simula mejor con el modelo 2DC.

## Raíces cuadráticas medias y diferencias

La tabla 6 muestra las estadísticas de las componentes de velocidad  $u$  (transversal) y  $v$  (longitudinal) y de los semiejes mayores ( $M$ ) y menores ( $m$ ) de la componente de marea M2 para las corrientes *in situ* y promediadas con la profundidad. Para las variables  $u$  y  $v$ , se incluye una diferencia de rms entre los modelos y observaciones, con base en la ecuación 1. También se incluye el promedio del valor absoluto de las diferencias entre los modelos y observaciones, que se calculó como:

$$dB = \frac{1}{N} \sum_i |B_o - B_{m_i}| \quad (2)$$

donde  $B$  es  $M$ ,  $m$ , la amplitud de  $u$  o la amplitud de  $v$ . Note que la menor rms de los campos  $u$  o  $v$  no es necesariamente la que tenga las diferencias más pequeñas de amplitud entre los modelos y las observaciones,  $du$  o  $dv$ , porque la rms también toma en cuenta la fase. Esta tabla también indica que el modelo HAMSOM con la malla más fina funciona mejor; las rms menores son para las variables  $dv$  y  $M$ , que contienen la señal más grande. Para la componente K1 (tabla 7) y las otras componentes no

**Table 7.** K1 tidal constituent statistics of the (a) *in situ* and (b) depth-averaged velocity components;  $u$  and  $v$  are the east-west and north-south velocity components, respectively, and  $M$  and  $m$  are the semi-major and semiminor axes ( $\text{cm s}^{-1}$ ), respectively. The statistics are calculated over all the 123 time series for the *in situ* fields and from the 67 stations for the depth-averaged fields. The root mean squares (rms) are computed according to equation 1 for  $u$  and  $v$ , and the differences,  $du$ ,  $dv$ ,  $dM$  and  $dm$ , are calculated according to equation 2.

**Tabla 7.** Estadísticas de la componente de marea K1 de las componentes de velocidad (a) *in situ* y (b) promediadas con la profundidad;  $u$  y  $v$  son las componentes de velocidad este-oeste y norte-sur, respectivamente, y  $M$  y  $m$  son los semiejes mayor y menor ( $\text{cm s}^{-1}$ ), respectivamente. Se calcularon las estadísticas para todas las 123 series de tiempo para los campos *in situ* y para los campos promediados con la profundidad de las 67 estaciones. Las raíces cuadráticas medias (rms) se calculan con base en la ecuación 1 para  $u$  y  $v$ , y las diferencias,  $du$ ,  $dv$ ,  $dM$  y  $dm$ , se calculan con base en la ecuación 2.

Model	$u$	rms	$du$	$v$	rms	$dv$	$M$	$dM$	$m$	$dm$
<b>(a) <i>In situ</i> velocity fields</b>										
3HC	$0.6 \pm 0.7$	<b>1.8</b>	2.0	$3.1 \pm 1.7$	<b>3.1</b>	1.9	$3.2 \pm 1.7$	<b>2.0</b>	$0.0 \pm 0.2$	<b>1.4</b>
3MC	$0.8 \pm 0.8$	1.9	1.8	$3.0 \pm 1.6$	<b>3.1</b>	<b>1.8</b>	$3.1 \pm 1.6$	<b>2.0</b>	$-0.3 \pm 0.5$	<b>1.4</b>
3HF	$1.3 \pm 1.2$	1.9	<b>1.6</b>	$3.2 \pm 2.2$	<b>3.1</b>	1.9	$3.4 \pm 2.4$	<b>2.0</b>	$-0.2 \pm 1.0$	<b>1.4</b>
3MF	$0.8 \pm 0.8$	1.9	1.8	$3.2 \pm 2.1$	3.2	1.9	$3.3 \pm 2.1$	<b>2.0</b>	$-0.2 \pm 0.5$	<b>1.4</b>
OBS	$2.6 \pm 2.3$			$3.6 \pm 2.7$			$4.2 \pm 3.0$		$-1.0 \pm 2.1$	
<b>(b) Depth-averaged velocity components</b>										
2DC	$0.8 \pm 0.6$	1.3	1.2	$3.2 \pm 1.7$	<b>2.8</b>	<b>1.7</b>	$3.3 \pm 1.7$	1.7	$-0.2 \pm 0.5$	<b>0.9</b>
3HC	$0.7 \pm 0.5$	<b>1.2</b>	1.2	$3.2 \pm 1.9$	2.9	1.8	$3.3 \pm 1.9$	1.8	$0.0 \pm 0.2$	1.0
3MC	$0.9 \pm 0.7$	1.5	<b>1.1</b>	$3.1 \pm 1.8$	3.1	<b>1.7</b>	$3.2 \pm 1.8$	1.7	$-0.3 \pm 0.6$	<b>0.9</b>
3HF	$0.9 \pm 0.7$	1.3	<b>1.1</b>	$3.1 \pm 2.3$	<b>2.8</b>	<b>1.7</b>	$3.3 \pm 2.3$	<b>1.6</b>	$-0.3 \pm 0.6$	1.0
3MF	$0.9 \pm 0.8$	1.5	<b>1.1</b>	$3.3 \pm 2.2$	3.2	1.8	$3.4 \pm 2.3$	1.7	$-0.3 \pm 0.5$	<b>0.9</b>
OBS	$1.7 \pm 1.5$			$2.8 \pm 2.2$			$3.2 \pm 2.4$		$-0.5 \pm 1.4$	

model, POM. On average, there is a tendency for the HAMSOM model to underestimate the tidal currents (~10%) and for the POM model to overestimate them (~12% to 14%). Note that within a standard deviation, all model results are the same; however, the means are significantly different at the 95% confidence level. The surface elevation is better modelled with a two-dimensional model.

An evident source of error and of differences in these calculations comes from the

ilustradas, las estadísticas son muy cercanas y posiblemente sugieren un mejor funcionamiento del modelo 3HF; sin embargo, las velocidades asociadas son mucho más pequeñas que las debidas a la componente de marea M2.

## CONCLUSIÓN

En este trabajo se realizó un modelado numérico de las corrientes de marea en el Golfo de California. Se usaron dos modelos



different depths between the model bathymetries and the real one. Take for example station 26 (see fig. 3): the bottom depth is at 86 m (see table 3), and the coarse and fine bathymetries have the bottom at 1024 and 268 m, respectively. Also, station 33 has a real depth of 1000 m, and the coarse bathymetry has a bottom at 1102 m and the fine one at 1005 m. These differences, and others, arise from the grid size in areas of large topographical gradients. Obviously, for an array there would be a real depth at that point; however, the depth assigned to a grid point results from the average of the area of the grid point. Another source of difference comes from the physical environment. The observed currents reveal large vertical shears (not shown), produced by several processes that cannot be simulated with these homogeneous models, whose only source of vertical variability comes from friction. Future work will continue with the inclusion of stratification and we expect the results of the models to come closer to the observations.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This research was financed by CONACYT, through grant 4300P-T, and by CICESE (regular budget). I thank Pedro Ripa, Miguel Lavín and Oscar Velasco for critically reading the manuscript, as well as two anonymous reviewers. I am grateful to Jan Backhaus and Dagmar Hainbucher for making HAMSOM available to me. The current meter measurements were kindly provided by Miguel Lavín (as part of CONACYT contract No. 3209-T) and Antoine Badan. Harmonic constants for surface elevation were provided by Cuauhtémoc Nava and Ignacio González. Manuel Figueroa performed the POM runs.

tridimensionales (homogéneos) y un modelo bidimensional para su simulación y los resultados se compararon con las observaciones. Los modelos tridimensionales fueron los de HAMSOM y POM. El primero es un modelo de capas donde las ecuaciones son integradas con la profundidad entre niveles fijos, y el segundo es un modelo de coordenadas  $\sigma$  (en la vertical). El modelo HAMSOM utiliza una parametrización simple de coeficientes de mezcla vertical y POM una esquema de cerradura 2.5 de Mellor-Yamada. Se utilizaron dos batimetrías para evaluar el efecto de resolución horizontal en los modelos tridimensionales. Los modelos son forzados con las componentes de marea mayores en la frontera abierta, la boca del golfo.

Se compararon las simulaciones del modelo con las observaciones por medio de cálculos de diferencias de rms de las constantes armónicas. Se encontró que las corrientes de marea se modelan ligeramente mejor (en términos de las diferencias de rms) con el modelo de capas, HAMSOM, utilizando una malla fina, que con el modelo  $\sigma$ , POM. En promedio, el modelo HAMSOM tiende a subestimar las corrientes de marea (~10%) y el modelo POM a sobrestimarlas (~12% a 14%). Note que dentro de la desviación estándar, todos los resultados de los modelos son similares; sin embargo, los promedios son significativamente diferentes en el nivel de confianza de 95%. La elevación superficial se modela mejor con el modelo bidimensional.

Una fuente evidente de error y de diferencias en estos cálculos proviene de las profundidades diferentes entre las batimetrías del modelo y la real. Por ejemplo, la estación 26 (ver fig. 3) tiene una profundidad de fondo de 86 m (ver tabla 3), y las batimetrías gruesa y fina ubican el fondo a 1024 y 268 m, respectivamente. La estación 33 tiene una profundidad real de 1000 m, y la batimetría

## REFERENCES

- 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: 16103–16118.
- Backhaus, J.O. (1985). A three-dimensional model for the simulation of shelf-sea dynamics. *Dt. Hydrogr. Z.*, 38: 165–187.
- Bischoff, J.L.G. and Niemitz, J.W. (1980). Bathymetric maps of the Gulf of California. Miscellaneous Investigations Series, Map I-1244 (4 sheets). Department of the Interior, United States Geological Survey.
- Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (ed.), *Three-dimensional Coastal Ocean Models*. AGU, Washington, DC.
- Carbajal, N. (1993). Modelling of the circulation in the Gulf of California. Ph.D. thesis, University of Hamburg, Hamburg, Germany, 186 pp.
- Cummins, P.F. and Oey, L.Y. (1997). Simulation of barotropic and baroclinic tides off northern British Columbia. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 762–781.
- García, G. and Marinone, S.G. (1997). Modeling of residual currents in the Gulf of California using different grid sizes. *Ciencias Marinas*, 23(4): 505–519.
- Marinone, S.G. (1997). Tidal residual currents in the Gulf of California: Is the M2 tidal constituent sufficient to induce them? *J. Geophys. Res.*, 102: 8611–8623.
- Marinone, S.G. and Pond, S. (1996). A three-dimensional model of deep water renewal and its influence on residual currents in the central Strait of Georgia, B.C. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 43: 183–204.
- Marinone, S.G., Pond, S. and Fyfe, J. (1996). A three-dimensional model of tide and wind induced residual currents in the central Strait of Georgia, B.C. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 43: 157–182.
- Oey, L.Y. and Chen, P. (1992a). A nested-grid ocean model: with application to the simulation of meanders and eddies in the Norwegian Coastal Current. *J. Geophys. Res.*, 97: 20063–20086.
- gruesa ubica el fondo a 1102 m y la fina a 1005m. Estas diferencias, entre otras, provienen del tamaño de la malla en áreas de gradientes topográficos grandes. Obviamente, para un anclaje habrá una profundidad real en ese punto; sin embargo, la profundidad asignada a un punto de malla resulta del promedio del área del punto de malla. Otra fuente de diferencia resulta del ambiente físico. Las corrientes observadas muestran cortes verticales grandes (no ilustradas), producidas por varios procesos que no se pueden simular con estos modelos homogéneos, cuyos fuentes de variabilidad vertical solamente vienen de fricción. Futuros trabajos incluirán la estratificación y esperamos que los resultados de los modelos se acerquen más a las observaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió financiamiento del CONACYT (proyecto 4300P-T) y CICESE (presupuesto normal). Agradezco a Pedro Ripa, Miguel Lavín y Oscar Velasco la revisión crítica del manuscrito, así como a dos revisores anónimos, y a Jan Backhaus y Dagmar Hainbucher el haberme proporcionado el modelo HAMSOM. Miguel Lavín (por parte del proyecto CONACYT No. 3209-T) y Antoine Badan amablemente proveyeron las mediciones del medidor de corriente. Cauhtémoc Nava e Ignacio González proveyeron las constantes armónicas de la elevación superficial. Manuel Figueroa realizó las corridas POM.

Traducido al español por Jennifer Davis.

---

Oey, L.Y. and Chen, P. (1992b). A model simulation of the circulation in the Northeast Atlantic shelves and seas. *J. Geophys. Res.*, 97: 20087–20115.

Marinone: Intercomparisons of modelled tidal currents and observations in the Gulf of California

- 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.
- Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California. *Geofís. Int.*, 32: 41–56.
- Stronach, J.A., Backhaus, J.O. and Murty, T.S. (1993). An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: the GF8 model. In: A.D. Ansell, R.N. Gibson and M. Barnes (eds.), *Oceanogr. Mar. Biol. Annu.*, 31: 1–86.
- Rusnak, G.A., Fisher, R.L. and Shepard, F.P. (1964). Bathymetry and faults of the Gulf of California. In: Tj.H. van Andel and G.G. Shor Jr. (eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium. Mem. Am. Assoc. Petroleum Geol.*, 3: 59–75.