

Geof. Int., Vol. 28-1, 1989, pp. 25-46

MAREAS EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

R. A. MORALES-PEREZ*
G. GUTIERREZ DE VELASCO**
(Recibido: 27 de abril, 1988)
(Aceptado: 1o. de junio, 1988)

RESUMEN

En el presente estudio se resume e interpreta la información disponible de niveles del mar para el Golfo de California. Las series de marea de 33 localidades del Golfo se analizaron mediante los métodos de análisis armónico y de admitancia. Los resultados se presentan bajo la forma de mapas cotidales para las principales componentes semidiurnas, diurnas y de período largo.

ABSTRACT

In the present study the available information on sea levels for the Gulf of California is resumed and interpreted. The tidal records of 33 locations were analyzed through the method of harmonic analysis and the admittance function. The results are presented under the form of cotidal charts for the principal semidiurnal, diurnal and long period components.

* Instituto de Investigaciones Eléctricas, Interior Internado Palmira, Apartado Postal 475, 62000 Cuernavaca, Mor., MEXICO.

** Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., Av. Espinoza No. 843, Ensenada, B. C., MEXICO.

INTRODUCCION

La marea en el Golfo de California se produce, principalmente, por cooscilación con la marea del Océano Pacífico y representa un fenómeno importante en la dinámica del Golfo de California, viéndose afectada por una mezcla de efectos friccionales y de resonancia. La marea en el Golfo de California ha sido descrita y modelada numéricamente con anterioridad (Roden, 1958; Roden y Groves, 1959; Roden, 1964; Grivel, 1969; Hendershott y Speranza, 1971; Grijalva, 1972; Filloux, 1973; Stock, 1976; Godin *et al.*, 1980 y Morales, 1983), obteniéndose descripciones más completas a medida que se incrementa el número de estaciones mareográficas desde las cuales se efectúan las mediciones.

ANALISIS DE LOS DATOS

Datos

La información disponible respecto al nivel del mar en el Golfo de California proviene de cuatro conjuntos de mediciones con un total de 33 series de tiempo. En la figura 1 se muestra la localización geográfica de las estaciones mareográficas y en la Tabla 1 la duración de las series de datos.

1. El primer conjunto (serie 1 a la 6) consta de mediciones horarias de tres a 31 años de duración en estaciones mareográficas permanentes que pertenecen a la red mareográfica del Instituto de Geofísica de la UNAM.
2. El segundo conjunto (serie 7 a la 11) comprende mediciones horarias de uno a 11 años en estaciones mareográficas permanentes que pertenecen a la red mareográfica del CICESE.
3. El tercer conjunto (serie 12 a 19) lo forman mediciones horarias de seis meses a un año de duración, registradas con sensores de presión por Scripps Institution of Oceanography (SIO) durante 1984-1985, como parte del estudio interdisciplinario del Golfo de California.
4. El cuarto conjunto (serie 20 a 33) se compone de mediciones horarias de ocho a 50 días de duración registradas con sensores de presión por SIO durante 1970-1971, como parte del estudio 'Tides and Tidal Friction in the Gulf of California' (Filloux, 1973).

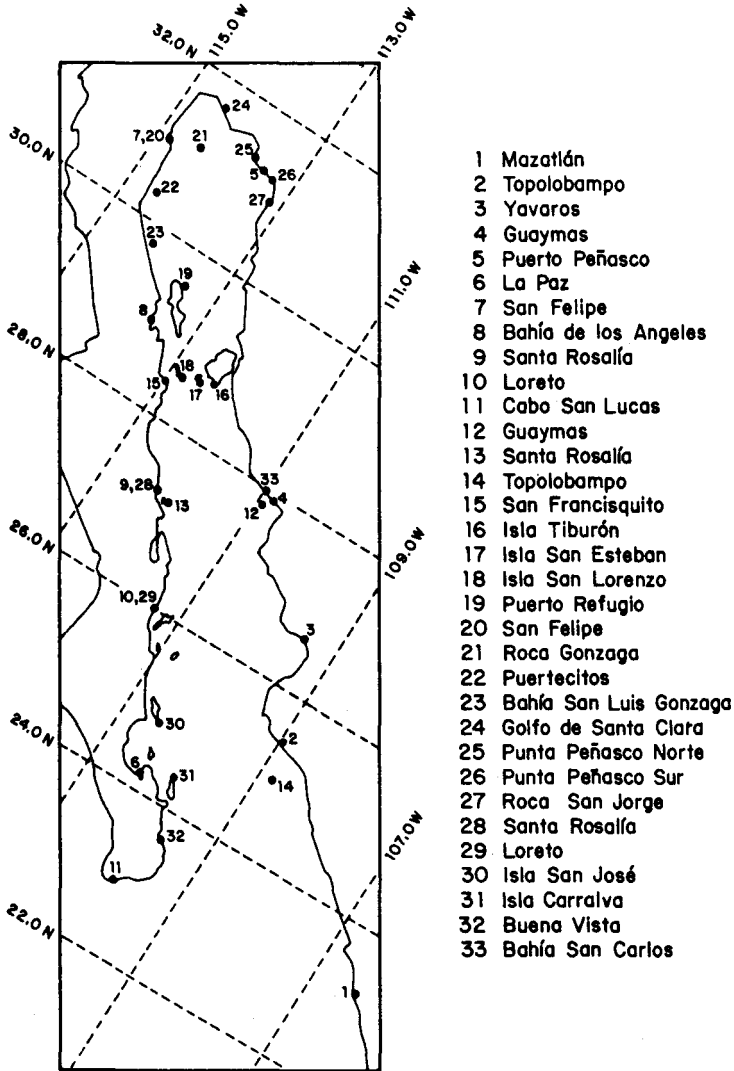


Fig. 1. Localización geográfica de las estaciones mareográficas.

Tabla 1

Posición geográfica y duración de las mediciones en las estaciones mareográficas

Estación	Latitud	Longitud	Duración
01 Mazatlán	23° 12.0'	106° 25.2'	23 años
02 Topolobampo	25° 36.0'	109° 03.0'	19 años
03 Yavaros	26° 42.0'	109° 31.2'	2 años
04 Guaymas	27° 55.8'	110° 54.0'	31 años
05 Puerto Peñasco	31° 18.0'	113° 33.0'	1 años
06 La Paz	24° 10.2'	110° 21.0'	28 años
07 San Felipe	31° 01.8'	114° 49.8'	3 años
08 Bahía de los Angeles	28° 58.2'	113° 33.0'	11 años
09 Santa Rosalía	27° 18.0'	112° 16.2'	3 años
10 Loreto	26° 01.2'	111° 19.8'	9 años
11 Cabo San Lucas	22° 52.8'	109° 54.0'	11 años
12 Guaymas	27° 53.4'	110° 57.6'	1 años
13 Santa Rosalía	27° 13.2'	112° 02.4'	1 años
14 Topolobampo	25° 01.8'	108° 54.0'	1 años
15 San Francisquito	28° 26.4'	112° 54.6'	1 años
16 Isla Tiburón	28° 46.8'	112° 18.0'	1 años
17 Isla San Esteban	28° 40.2'	112° 31.8'	6 meses
18 Isla San Lorenzo	28° 35.4'	112° 47.4'	6 meses
19 Puerto Refugio	29° 34.8'	113° 34.8'	6 meses
20 San Felipe	31° 02.7'	114° 49.0'	10 días
21 Roca Gonzaga	31° 06.7'	114° 28.8'	08 días
22 Puertecitos	30° 21.2'	114° 37.9'	20 días
23 Bahía San Luis Gonzaga	29° 45.2'	114° 19.8'	26 días
24 Golfo de Santa Clara	31° 39.9'	114° 30.5'	10 días
25 Punta Peñasco Norte	31° 22.9'	113° 44.9'	24 días
26 Punta Peñasco Sur	31° 14.9'	113° 22.4'	24 días
27 Roca San Jorge	31° 00.9'	113° 15.5'	24 días
28 Santa Rosalía	27° 18.3'	112° 16.0'	50 días
29 Loreto	25° 57.8'	111° 20.8'	45 días
30 Isla San José	24° 51.5'	110° 30.5'	28 días
31 Isla Cerralva	24° 21.2'	109° 54.1'	27 días
32 Buena Vista	23° 39.9'	109° 39.2'	33 días
33 Bahía San Carlos	27° 56.5'	111° 02.5'	30 días

Métodos

Los registros con un año o más de duración de las estaciones mareográficas fueron sometidos a análisis armónicos anuales (para una descripción completa del método, ver Godin, 1972) determinando la amplitud y la fase de cada componente armónica de la marea. Finalmente se tomaron como valores representativos de cada armónico el promedio de sus estimaciones anuales. El primer conjunto de datos y parte del segundo han sido analizados con anterioridad (Godin *et al.*, 1980) hasta 1975 y hemos utilizado estos resultados complementándolos con los análisis de la información adicional posterior a esa fecha.

La amplitud y la fase de los armónicos para las series de tiempo con duración menor de un año fueron estimados empleando las funciones espectrales de admitancia y coherencia (Bendat y Piersol, 1966; Godin, 1976) mediante los siguientes pasos:

1. Con un ancho de banda o resolución en frecuencia de un ciclo/día (0.0417 cph) se calculó la función de coherencia entre las series observadas y series de tiempo simultáneas, generadas con los armónicos de estaciones permanentes de la zona, determinándose con cuál estación existía una mayor relación en las frecuencias diurnas y semidiurnas.
2. Se obtuvo, con una resolución en frecuencia de 0.12 ciclos/día, la función de admitancia entre la serie observada y la que presentó mayor coherencia. Posteriormente se interpoló linealmente para obtener valores de la función en las frecuencias correspondientes a los armónicos empleados para generar la serie.
3. Con los resultados de la función de admitancia se calcularon los valores de amplitud y fase de las series observadas, ya que la admitancia es una función compleja que nos indica la relación entre las amplitudes y fases de dos series de tiempo para cada frecuencia del espectro.

Los resultados de los análisis armónicos y de admitancia de las 33 series son descritos en un Informe Técnico del CICESE (Gutiérrez y Morales, 1986) donde se presentaron los valores de amplitud y fase de los principales armónicos de la marea. Los armónicos de período largo no fueron calculados en el caso de las series de corta duración.

TIPO DE MAREA

Caracterizamos la marea en cada localidad mediante el número de forma (Dietrich, 1963) que es la razón entre la suma de amplitudes de las dos componentes principales de la marea en la banda diurna (O_1 y K_1) y la suma de amplitudes de las dos componentes principales en la banda semidiurna (M_2 y S_2); se considera que la marea tiene carácter semidiurno para un número de forma entre 0.0 y 0.25; es de tipo mixto para valores mayores de 0.25 hasta 3.0, y diurna si el número de forma es mayor que 3.0.

La distribución de este parámetro en el Golfo de California (figura 2) indica que el tipo de marea mixta predomina en la región, con una tendencia hacia el tipo semidiurno en el extremo norte, donde los valores del parámetro alcanzan el límite entre estos dos tipos de mareas. En la zona central del Golfo el número de forma muestra una tendencia hacia la marea diurna especialmente en la costa de Baja California, donde toma valores de 3.3 en Santa Rosalía.

MAPAS COTIDALES

Mapas cotidales semidiurnos

Los mapas cotidales de las componentes semidiurnas N_2 , M_2 , S_2 y K_2 (figuras 3 a 6) presentan una región anfidrómica en la parte central del Golfo, indicada por la presencia de un mínimo en la amplitud y un cambio rápido en la fase. El punto de anfidromía o nodo se localiza tierra adentro, en la Península, debido a que la fricción provoca el desplazamiento del nodo a la derecha de la pared reflectora (formada en el Golfo por la costa entre San Felipe y Puerto Peñasco); en este caso se trata de nodos virtuales o degenerados y las líneas cotidales se originan en la costa, con una progresión levógira de la fase alrededor del punto de anfidromía. En las componentes semidiurnas la posición de los nodos se localiza entre Santa Rosalía y Bahía Concepción B.C.S., que distan 85 km entre sí, encontrándose más al norte el correspondiente a la componente de mayor frecuencia (K_2) y por tanto menor longitud de onda, continuando los restantes hacia el Sur en orden descendente de frecuencia. En general, la marea semidiurna progresa del sur hacia el norte a lo largo del Golfo con un retraso entre sus extremos de 5 horas 40 minutos aproximadamente (Tabla 2).

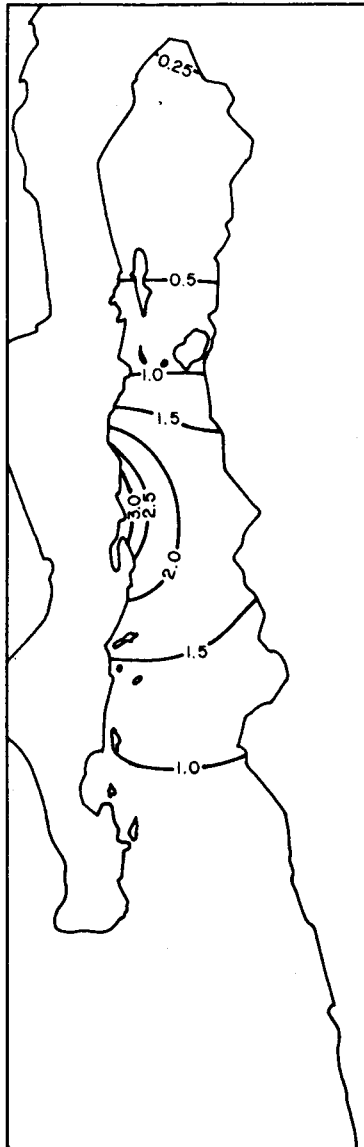


Fig. 2. Distribución del número de forma.

Tabla 2

Amplificación y retraso de las principales componentes diurnas y semidiurnas a lo largo del Golfo de California

Nombre	Frecuencia (grados/hora)	Factor de amplificación	Retraso (horas)
O ₁	13.943	1.81	0.57
P ₁	14.959	1.95	0.83
K ₁	15.041	2.02	0.66
N ₂	28.440	5.11	5.74
M ₂	28.984	4.77	5.78
S ₂	30.000	4.12	5.71
K ₂	30.082	3.77	5.64

Su amplitud decrece de la región sur hacia la región central para después aumentar hacia el norte con un gradiente mucho más pronunciado. La razón de la amplitud de la marea semidiurna en el extremo norte, a la amplitud en el extremo sur, muestra un factor de amplificación de alrededor de 5 para las componentes de esta banda (Tabla 2).

Mapas cotidales diurnos

Los mapas cotidales para las principales componentes diurnas O₁, P₁ y K₁ se muestran en las figuras 7 a 9. Todas las componentes de esta banda presentan en general el mismo patrón; las amplitudes se incrementan con un gradiente casi constante desde la boca hacia el extremo norte con un ligero aumento del gradiente a partir de las islas Tiburón y Angel de la Guarda. El factor de amplificación entre los extremos es de alrededor de dos (Tabla 2) para estas componentes. Las líneas cotidales se orientan casi longitudinalmente al Golfo y progresan de este a oeste con un retraso entre 30 y 45 minutos desde la boca hasta el extremo norte del Golfo.

Mapas cotidales de período largo

Aunque las componentes Sa (solar anual) y Ssa (solar semianual) son representadas en el desarrollo del potencial de marea, reflejan principalmente los cambios meteorológicos que existen en el océano en la vecindad de la estación (Zetler, 1971).

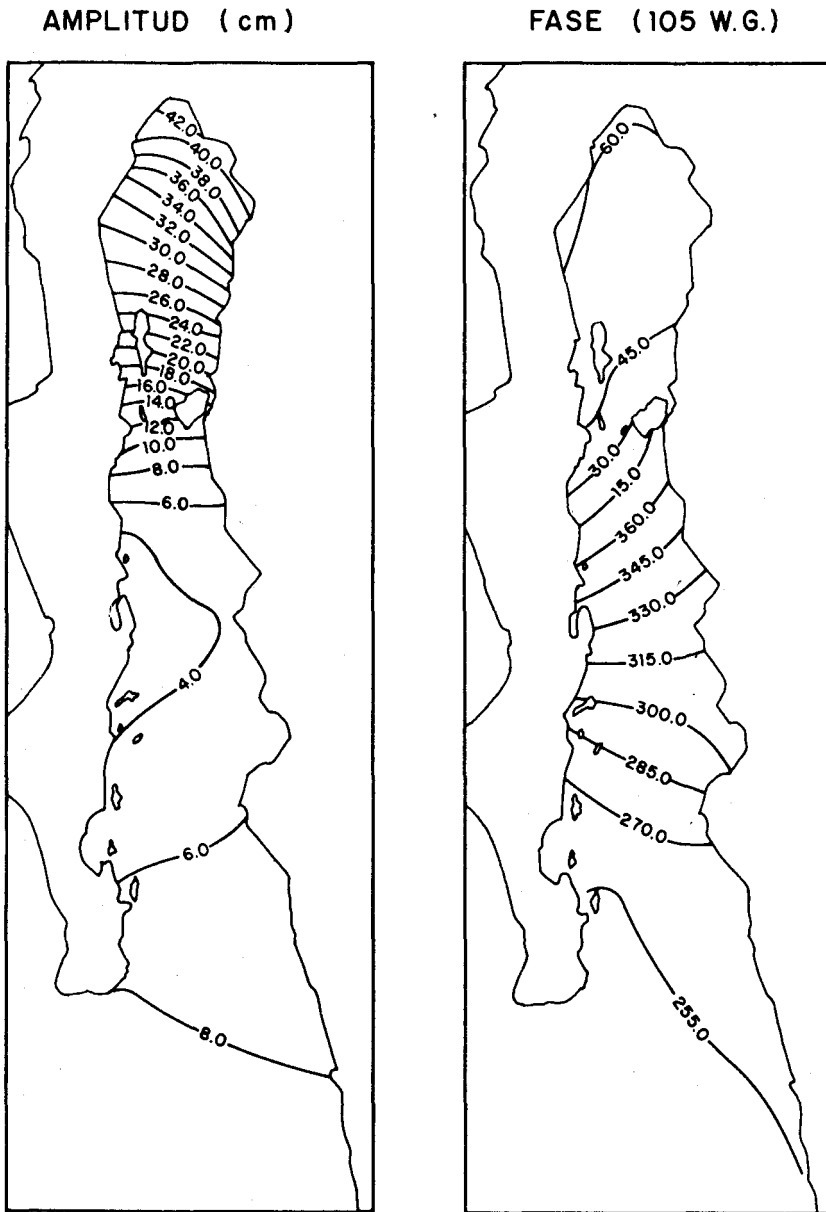


Fig. 3. Mapa cotidal de la componente N₂.

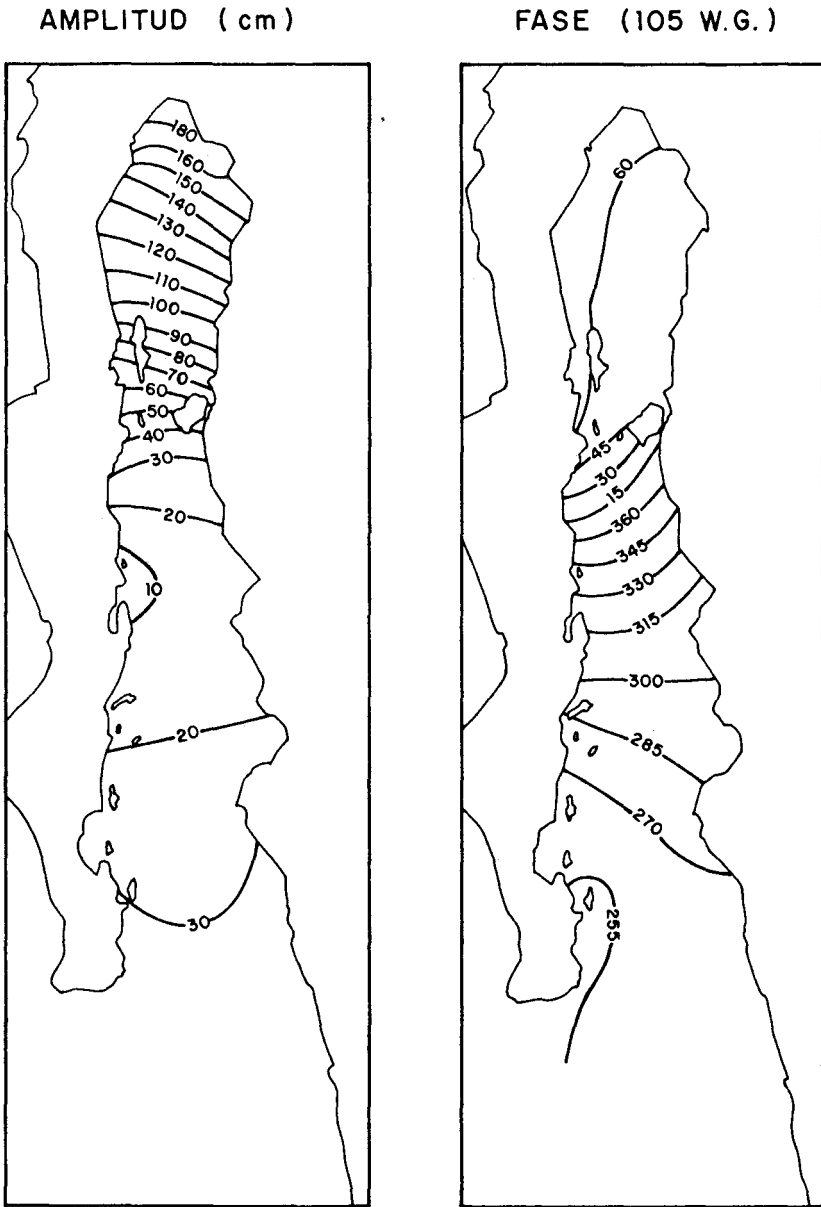


Fig. 4. Mapa cotidal de la componente M_2 .

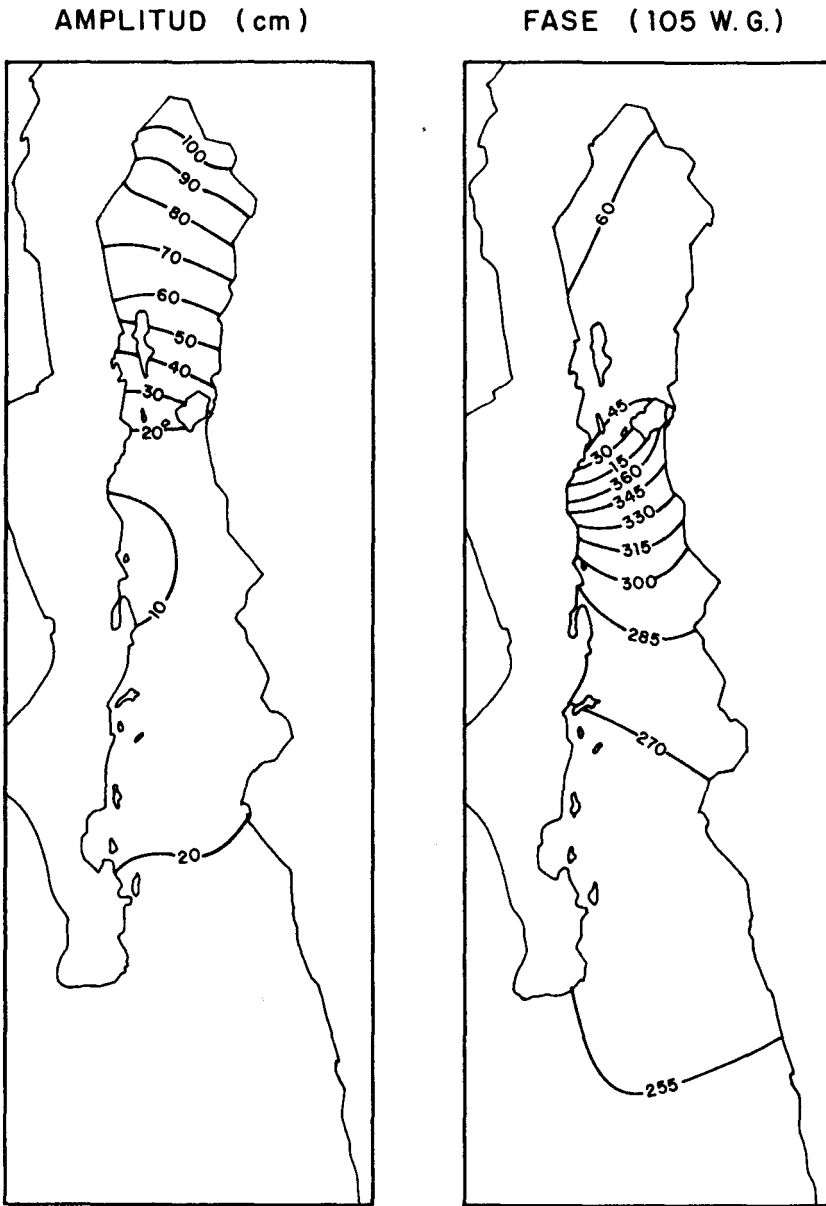


Fig. 5. Mapa cotidal de la componente S_2 .

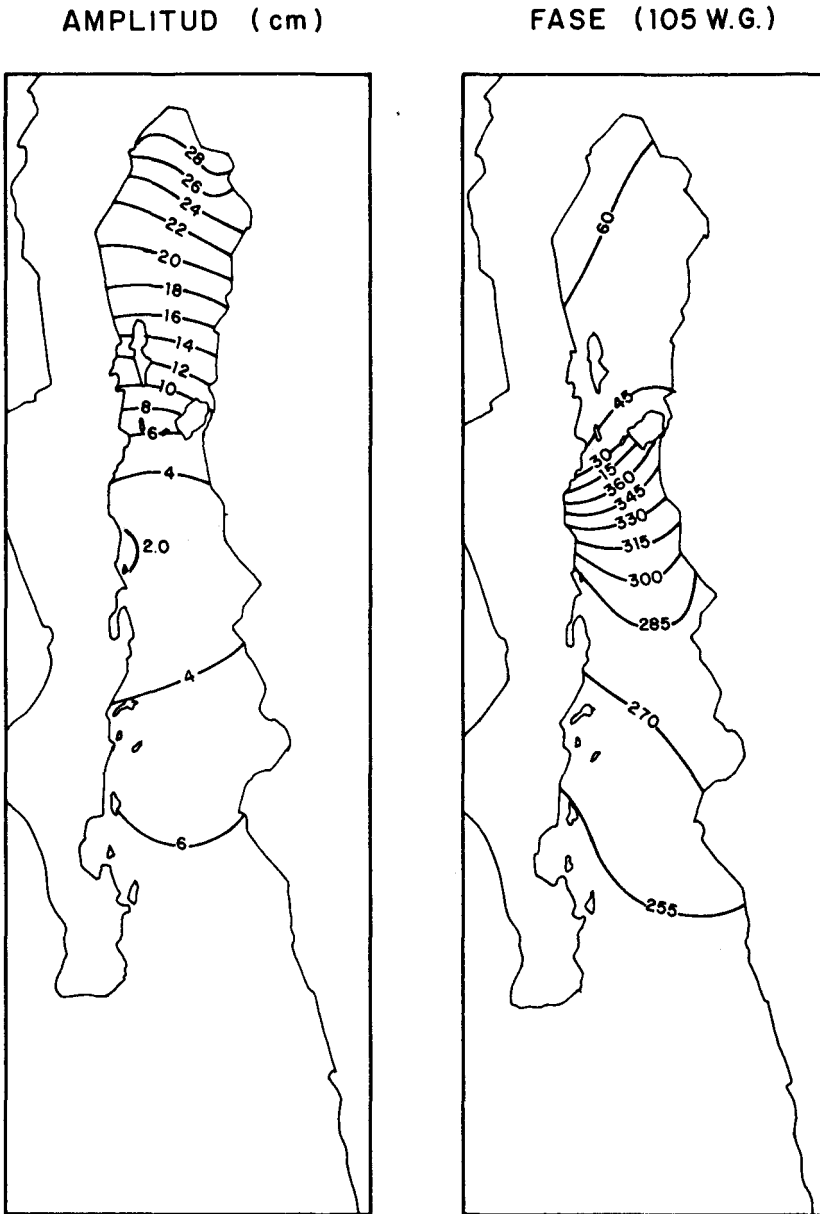
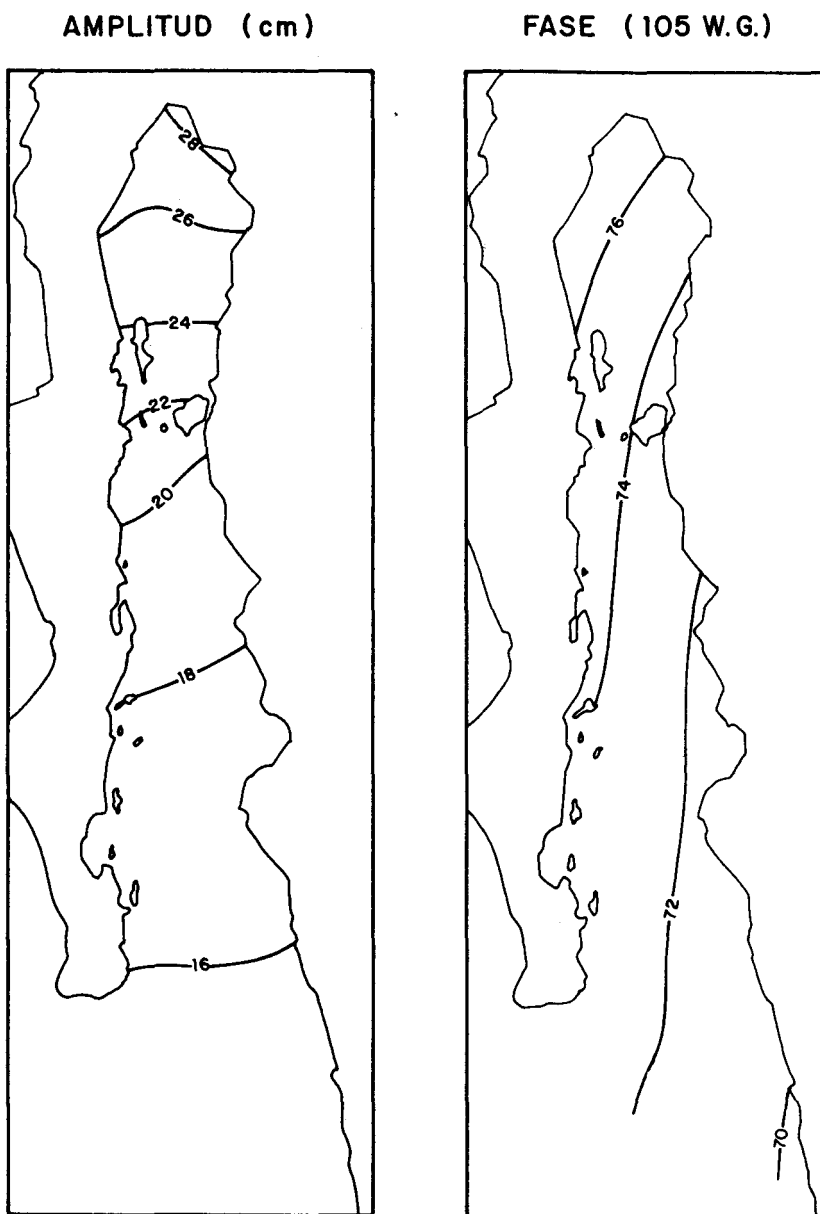


Fig. 6. Mapa cotidal de la componente K_2 .

Fig. 7. Mapa cotidal de la componente O_1 .

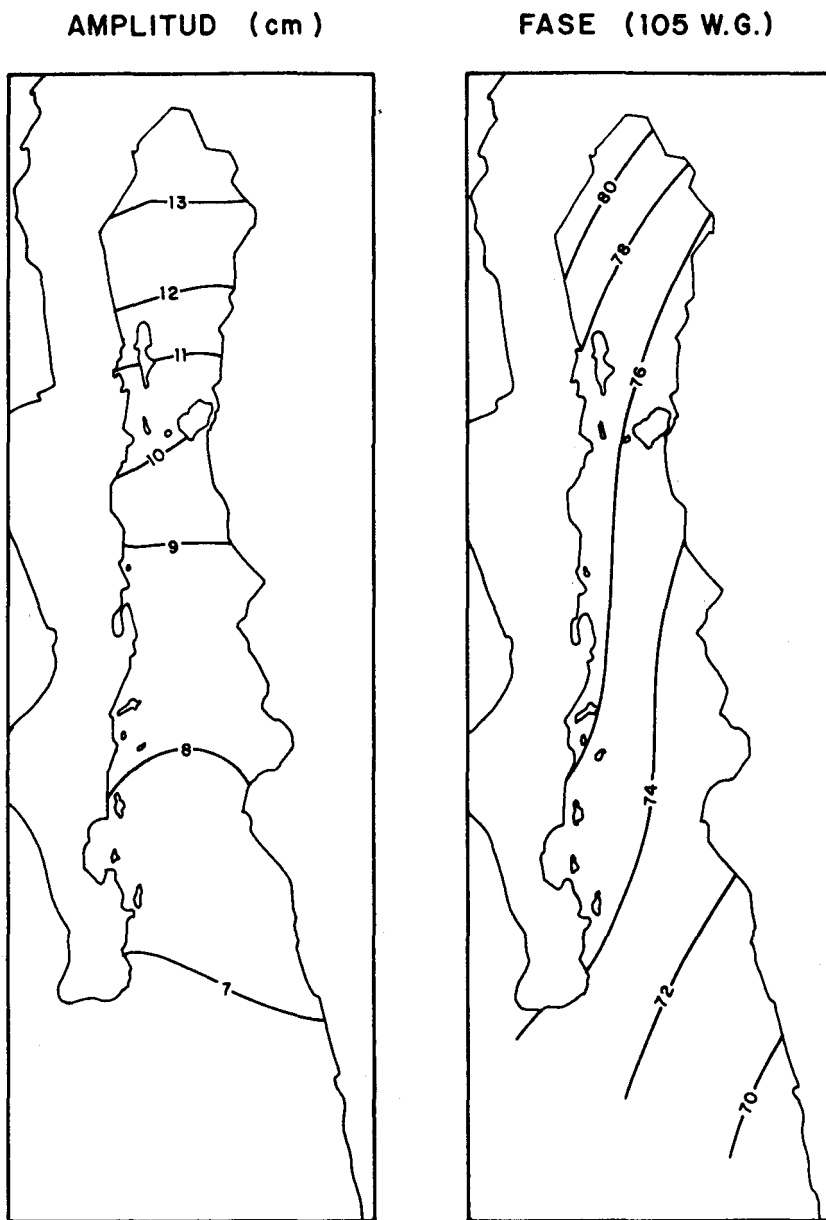


Fig. 8. Mapa cotidal de la componente P_1 .

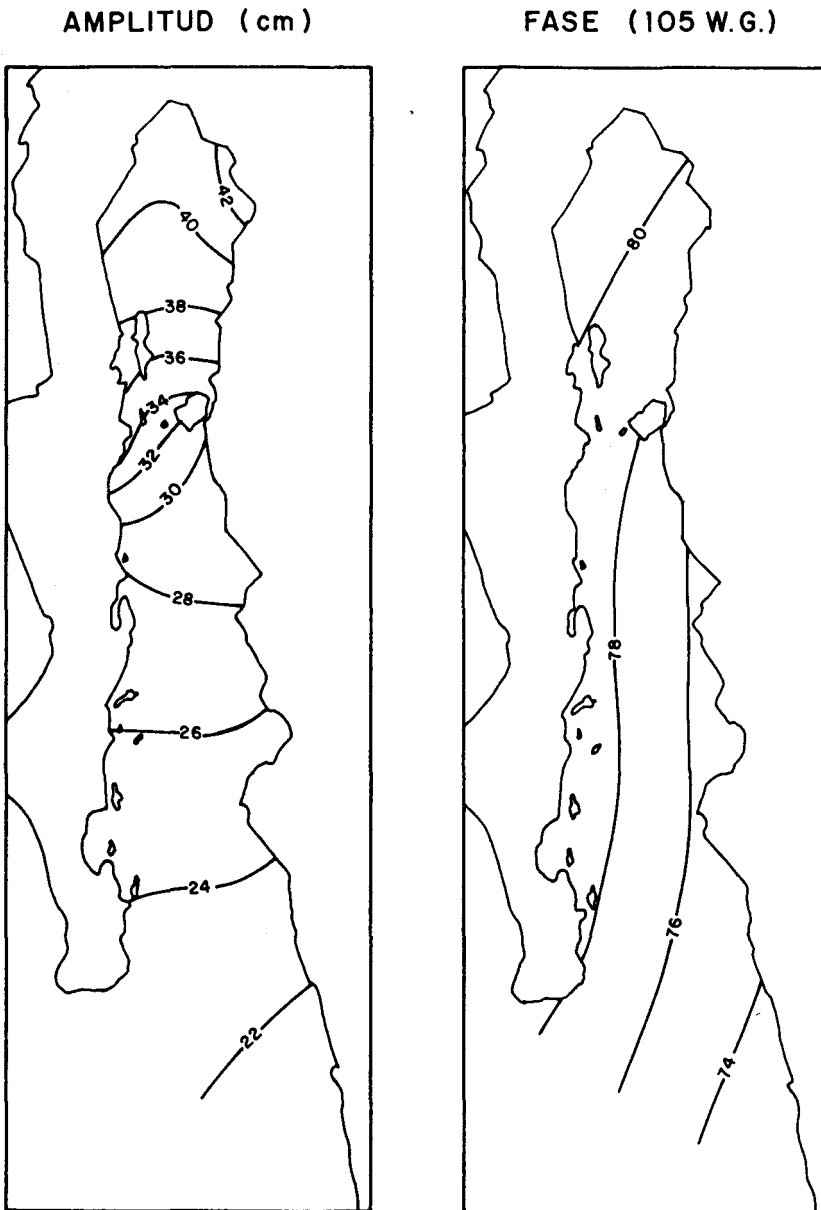


Fig. 9. Mapa cotidal de la componente K_1 .

En el Golfo los resultados de estas componentes han mostrado ser fuertes y estables. La estabilidad de las componentes indica que son repetitivas y, por lo tanto, son una característica auténtica de la climatología local del océano.

La componente Sa (figura 10) con período de un año refleja la variación anual del nivel del mar. Esta presenta un incremento en su amplitud de la región de la boca (14 cm) al extremo norte (25 cm), siendo el rango de variación anual en la parte norte del Golfo del orden de 50 cm. Las líneas cotidales se orientan casi longitudinales al Golfo y progresan de este a oeste de la región de Puerto Peñasco a la punta de la Península. La fase de Sa traducida a tiempo da la fecha en la cual el desplazamiento es máximo, lo que ocurre inicialmente en la región norte a principios de agosto (1), progresando las fechas hacia el sur hasta septiembre (10), cuando alcanza la punta de la Península, siendo su retraso de 40 días.

La componente Ssa (figura 11) con un período de seis meses refleja la variación semianual del nivel del mar. La amplitud de esta componente en la entrada del Golfo es de 3.5 cm, incrementándose hacia el interior del Golfo, hasta alcanzar valores máximos de amplitud (5.7 cm) en la costa de Baja California en la región de Loreto, para posteriormente decrecer a 2.0 cm en la parte norte del Golfo. El rango de variación semianual en la región de Loreto es de 11 cm. Las líneas cotidales progresan de la región de Topolobampo hacia el norte del Golfo y hacia la punta de la Península. La fase representada en tiempo nos indica que el desplazamiento máximo ocurre inicialmente en la región de Topolobampo el 4 de mayo y el 3 de noviembre, terminando en la región norte el 1o. de junio y el 30 de noviembre, mientras que en la punta de la Península ocurre el 21 de junio y el 21 de diciembre. El retraso corresponde a 28 días hacia el norte y a 48 días en la punta de la Península. Estos máximos ocurren a mitad de primavera y otoño, terminando junto con la estación.

La componente M f (lunar quincenal) es una de las más fuertes en la banda cero del desarrollo del potencial de marea. En el Golfo esta componente es débil (figura 12) comparada con la Sa y Ssa. Su amplitud presenta valores mínimos de 0.56 cm en la costa central de la Península, aumentando hacia el norte, el oeste y el sur de la Península, hasta alcanzar su valor máximo en la región de Mazatlán con 1.0 cm. El rango de esta componente es de 2.0 cm. Las líneas cotidales se orientan casi longitudinalmente al Golfo, progresando de oeste a este de la punta de la Península a la parte norte del Golfo en la región de Puerto Peñasco. El retraso de esta componente de la punta de la Península a la parte norte es de tres días.

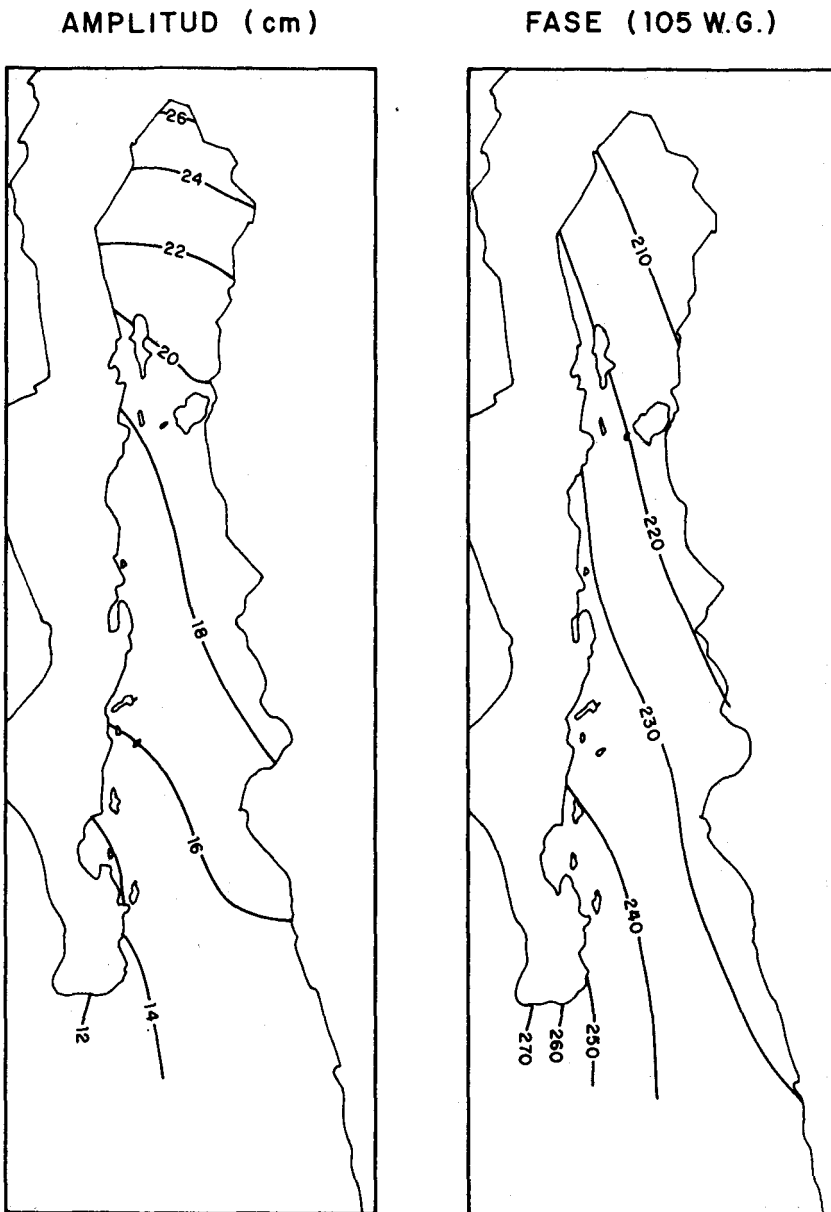


Fig. 10. Mapa cotidal de la componente Sa.

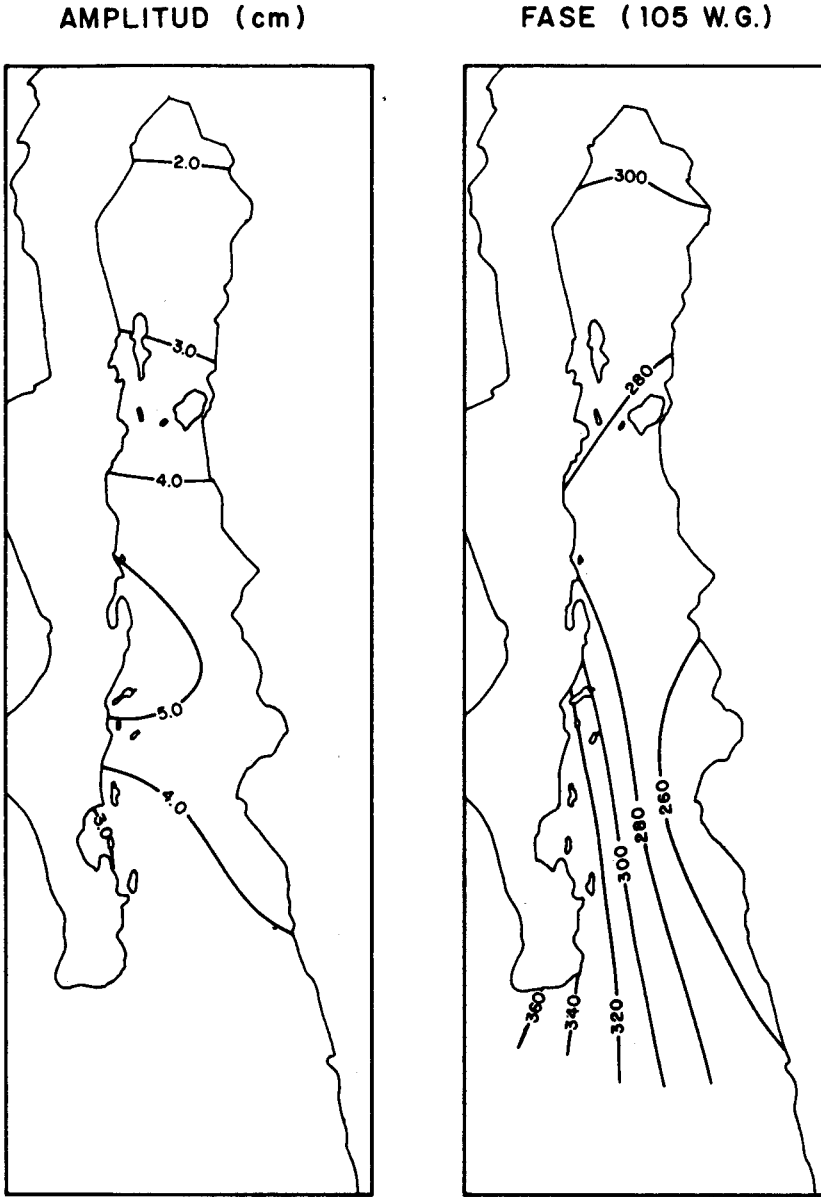


Fig. 11. Mapa cotidal de la componente SSa.

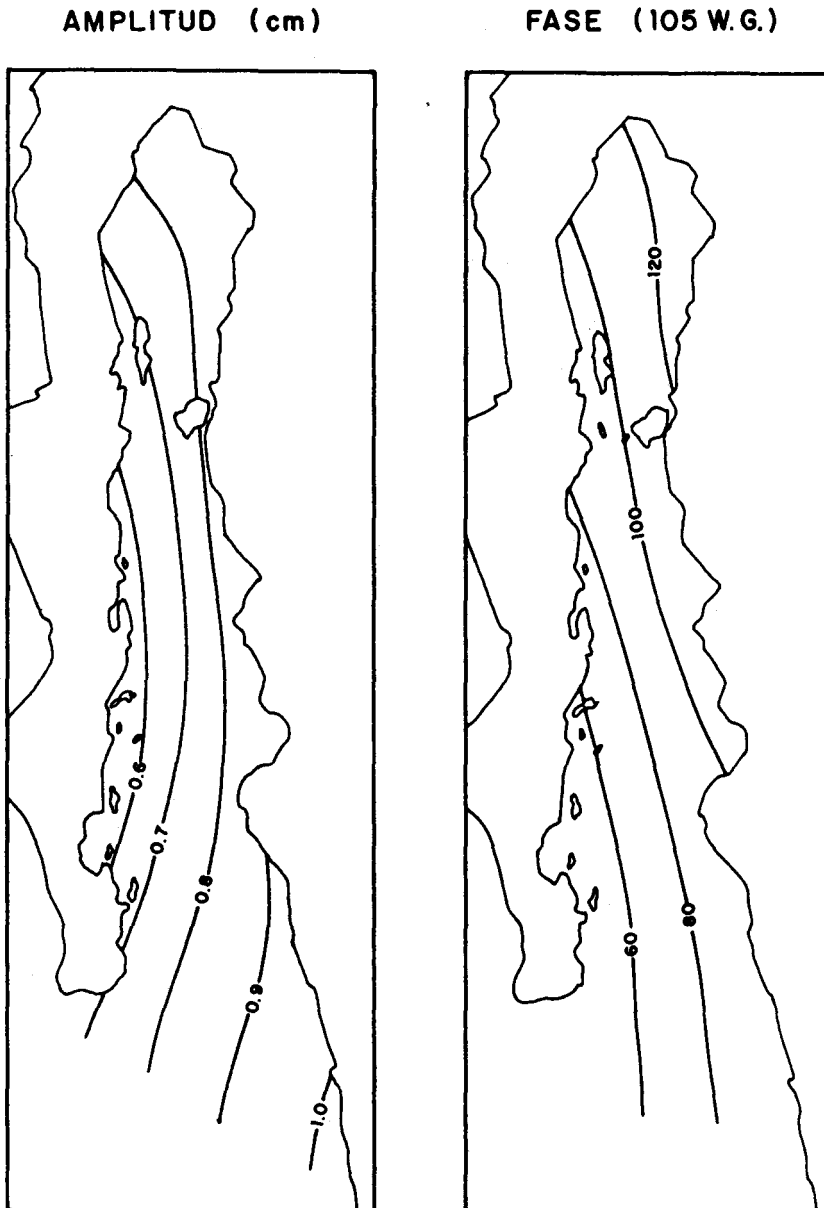


Fig. 12. Mapa cotidal de la componente Mf.

CONCLUSIONES

El análisis armónico y de admitancia del total de la información mareográfica del Golfo de California nos permitió obtener una representación más fina de los mapas cotidales diurnos y semidiurnos. Asimismo la estabilidad que presentan las componentes de período largo hace posible presentar sus mapas cotidales, definiendo en forma clara su comportamiento y la importancia de estas componentes en el interior del Golfo, principalmente el de la componente Sa, cuya amplitud alcanza un máximo de 25.0 cm en el norte del Golfo. Cabe mencionar que los valores de las componentes de período largo en la región norte se estimaron contando con poca información (series de un año), por lo que sería conveniente obtener períodos de medición más largos y, por consiguiente, valores más precisos de estas componentes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Geofísica de la UNAM, a la Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California en La Jolla, Ca. E. U. A. y al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. por habernos proporcionado sus datos del nivel del mar en el Golfo de California.

Asimismo al Dr. Gabriel Godin por sus comentarios y sugerencias y a los Drs. Víctor y Francisco Vidal, del Grupo de Estudios Oceanográficos del Instituto de Investigaciones Eléctricas, por el apoyo recibido.

BIBLIOGRAFIA

- BENDAT, J. S. and A. G. PIERSOL, 1966. Measurement and Analysis of Random Data. John Willey and Sons, Inc., New York, xv, 390 pp.
- DIETRICH, G., 1963. General Oceanography. Interscience Publishers, New York.
- FILLOUX, J. H., 1973. Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California, *Nature*, 243, 217-221.
- GODIN, G., 1972. The Analysis of Tides. University of Toronto Press. 264 pp.
- GODIN, G., 1976. The use of the admittance function for the reduction and interpretation of tidal records. Marine Sciences Directorate MS Rep. 41-46.
- GODIN, G., R. DE LA PAZ, N. RODRIGUEZ y M. ORTIZ, 1980. Revisión de los datos de marea para la costa occidental de México disponibles en el CICESE e interpretación de los resultados. Informe Técnico OC-80-02. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B. C., México.

- GRIJALVA, N., 1972. Tidal computation in the Gulf of California I. *Geofís. Int.*, 12, 2, 13-34.
- GRIVEL, F., 1969. Constantes armónicas de 23 estaciones mareográficas instaladas en las costas de México. *Anales Inst. Geof.*, UNAM, 14, 45-70.
- GUTIERREZ, G. y R. MORALES, 1986. Revisión de los datos de mareas para el Golfo de California. Informe Técnico OC-85-03. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B. C., México.
- HENDERSHOTT, M. C. and A. SPERANZA, 1971. Co-oscillating tides in long, narrow bay. *Deep Sea Res.*, 18, 559-980.
- MORALES, R., 1983. Mapas de isolíneas de constantes armónicas de marea del Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México.
- RODEN, G. I., 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, XII, 1, 21-44.
- RODEN, G. I., 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. Marine geology of the Gulf of California - A Symposium, Memoir No. 3. American Association of Petroleum Geologist, 30-35.
- RODEN, G. I. and G. W. GROVES, 1959. Recent oceanographic investigation in the Gulf of California. *Marine Res. J.*, 18, 1, 10-35.
- STOCK, G. G., 1976. Modelling of tides and tidal dissipation in the Gulf of California. Ph. D. Thesis, Scripps Institution of Oceanography, University of California. La Jolla, California.
- ZETLER, B. D., 1971. Radiational ocean tides along the coasts of the United States. *J. Phys. Oceanography*, 1, 34-38.