

Niveles y corrientes de marea en la plataforma de Gran Canaria

ANTONIO MARTÍNEZ MARRERO

RESUMEN

En el presente estudio se analizan medidas de niveles y corrientes de marea registradas en la plataforma que rodea a la Isla de Gran Canaria. Los resultados permiten realizar, por primera vez, un mapa característico que muestra importantes variaciones de las propiedades de la marea alrededor de la isla. Estas variaciones se explican mediante el efecto de difracción de las ondas de marea que inciden sobre la isla. Para ello, se emplea un modelo numérico cuyas condiciones de contorno simulan la propagación de estas ondas en mar abierto.

ABSTRACT

Tidal levels and currents over the Gran Canaria shelf

In the present study, tidal sea-level current measurements from the shelf around Gran Canaria Island are analysed. The results allow us to draw up then first characteristic map which show strong variations in the tidal properties around the island. The observed variations are explained through the diffraction disturbances produced on the incident wave by the island. To this end, we use conditions which simulates the progression of these waves at the open ocean.

Las mareas oceánicas son ondas de gran longitud que producen a su paso oscilaciones de la superficie del mar y de las corrientes, de períodos comprendidos entre 12 y 24 horas principalmente. Estas ondas están generadas por el campo

de fuerzas gravitatorias de la luna y el sol que crean aceleraciones instantáneas diferentes en cada punto de la superficie terrestre. El comportamiento de la marea en el interior de los océanos ha sido objeto de estudio durante años, debido a la escasez de datos en aguas

profundas. Las medidas de niveles tomadas en islas oceánicas han sido apreciadas a la hora de construir cartas que muestren la propagación aproximada de estas ondas, ya que se ha considerado que son más representativas de la marea oceánica que las medidas efec-

tuadas en plataformas continentales. No obstante, Larsen (1977) ha mostrado que la difracción de la marea en islas puede provocar modificaciones locales significativas. El entendimiento de las interacciones entre ondas de marea e islas oceánicas, como la isla de Gran Canaria, es por tanto necesario para poder determinar cuáles de las medidas tomadas en islas son representativas del océano profundo y cuáles no. Este problema ha sido reconocido recientemente por la comunidad científica (Le Provost, 1992) y autores como Kagan y Kivman (1993, 1995) han intentado cuantificar la *representatividad* de las medidas tomadas en islas estimando las perturbaciones de la marea producidas por la difracción en diversas islas, aunque sin tener en cuenta los efectos de las plataformas insulares.

En el presente trabajo se analizan medidas de niveles con el objeto de estudiar las variaciones, en fase y en amplitud, de las componentes de marea en la plataforma que rodea la isla de Gran Canaria. El trabajo estudia también las variaciones de las corrientes de marea, ya que su conocimiento es fundamental para el estudio de comunidades marinas en la plataforma insular, además de ser de utilidad para la realización de obras litorales.

Para poder realizar un estudio concreto del efecto que produce una isla sobre la marea, es necesario disponer de información en el océano abierto. Por ello, este artículo comienza con una breve revisión de los estudios de la marea

oceánica en las aguas profundas cercanas al Archipiélago Canario.

CARACTERÍSTICAS DE LA MAREA EN LAS CERCANÍAS DE LAS ISLAS CANARIAS

En las aguas oceánicas cercanas al Archipiélago canario la marea es de tipo semidiurna, es decir, las periodicidades principales tienen un valor cercano a doce horas. Las cartas globales de marea (Schwiderski, 1980; Andersen et al, 1995) muestran que las componentes semidiurnas de la marea se propagan aproximadamente paralelas al talud de la plataforma africana y que sus amplitudes crecen hacia la costa. Diversos estudios realizados en las aguas oceánicas que rodean a

las islas (Dick y Siedler, 1985; Siedler y Paul, 1991) han mostrado que las corrientes de marea oscilan en una dirección paralela a la plataforma continental africana, la amplitud de la componente semidiurna principal (denominada M_2 , de periodo: 12 horas, 25 minutos, 14 segundos) de la corriente es de 3-4 cm/s, y (e) las componentes semidiurnas se comportan como ondas progresivas. Estos resultados corroboran conclusiones previas de Huthnance y Baines (1991) en las que atribuyen el comportamiento de las componentes semidiurnas en esta zona a un tipo de onda conocida como onda de Kelvin, que se escribe:

$$\eta_{Kelvin} = Ze^{-my} \cos(\sigma t - kx) \quad (1)$$

donde Z es la amplitud, σ es la frecuencia de cada componente, $k = \sigma(gh)^{-1/2}$ es el número de ondas y $m = f(gh)^{-1}$ es un factor de variación exponencial de la amplitud en la dirección (y), perpendicular a la dirección de propagación (x). f representa



TABLA 1

Datos de mareógrafo (WLR) y corrientímetro (C). Los subíndices corresponden a las posiciones señaladas en la figura 1.

Instrumentos	Fechas de fondeo	Duración de registros (días)	Fondo (metros)	Profundidad de instrumentos (m)
WLR _A	03-02-89	536	15	15
WLR _B	14-05-86	50	15	15
WLR _D	12-07-94	72	2	2
WLR _E	22-01-88	38	5	5
WLR _G	10-08-95	74	7	7
C _A -1	18-12-89	201	50	15
C _A -2	18-12-89	124	50	30
C _B -1	23-06-87	29	50	20
C _B -2	23-06-87	29	50	40
C _C	27-11-90	46	40	20
C _E	26-01-88	46	40	20
C _F	03-11-94	58	45	20
C _H	19-06-95	12	40	20

el parámetro de coriolis y *h* la profundidad.

MEDIDAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Gran Canaria se caracteriza por poseer una forma redondeada de aproximadamente 45 km de diámetro y por tener una estrecha plataforma insular que se ensancha en la parte Sur. En el talud, la profundidad aumenta rápidamente hasta alcanzar 2000-

3000 metros de profundidad. En la *Figura 1* se muestran las posiciones de las estaciones de medida utilizadas alrededor de la isla, indicadas con letras desde la A hasta la H, y la topografía del fondo. Parte de los datos provienen de varias campañas realizadas entre 1986 y 1990 en la costa este de la isla (Tejedor, 1991). En el presente estudio, estos datos se han completado con medidas de niveles del mar en las estaciones D y G, y medidas de corrientes en las estaciones F y H. La *Tabla 1* resume las situaciones, fechas, longitudes de registro y profundidades de los instrumentos. Todos los corrientímetros fue-

TABLA 2

Amplitudes (A) y fases (G) de las componentes diurna K₁ y semidiurna M₂ de los niveles del mar

Mareógrafos	K ₁		M ₂	
	A(cm)	G(°)	A(cm)	G(°)
WLR _A	6,24	40,25	76,65	27,01
WLR _B	5,97	39,94	73,29	26,41
WLR _D	6,35	35,88	67,55	24,35
WLR _E	7,07	34,93	64,31	25,01
WLR _G	6,27	38,18	76,23	28,02

ron instalados entre las batimétricas de 40 y 50 metros y a profundidades que oscilan entre 15 y 40 metros. De las series de corrientes destaca por su duración (6.5 meses) la correspondiente al corrientímetro Ca-1. El resto de las series tienen una duración de entre 12 días y 4 meses. En cuanto a los niveles del mar, la serie más larga se midió en la estación A, con una duración de 17.5 meses, y en el resto de las estaciones sobre 2 meses de duración.

La marea se distingue del resto de los fenómenos oscilatorios de los océanos por su gran regularidad, de forma que el nivel del mar (η) en un punto de la superficie terrestre se puede representar mediante un número limitado de funciones armónicas de frecuencias σ_i conocidas:

$$\eta = \sum_i A_i \cos(\sigma_i t + G_i) \quad (2)$$

El cálculo de las amplitudes (A_i) y las fases (G_i) de estos armónicos se ha realizado mediante métodos estándar de análisis armónico de mareas (Foreman, 1977, Godin, 1988). En el caso de las corrientes, cada componente se caracteriza por que el vector velocidad de la corriente gira a lo largo del tiempo de forma que su extremo describe una elipse al cabo de un período de onda. El análisis en este caso es análogo al de los niveles, sólo que se realiza para cada componente este y oeste de la corriente y luego se expresa en términos de parámetros de elipses: semieje mayor (M), semieje menor (m), orientación del semieje mayor θ , (definida respecto del este en sentido antihorario) y fase (G_i).

TABLA 3
Semiejes mayor (M) y menor (m) en cm/s, orientación respecto del este (θ) y fase (G) de las elipses de corrientes

Correntímetros	K_1				M_2			
	M	m	θ	G	M	m	θ	G
C_A-1	1.40	-0.12	72.9	7.6	5.92	-0.33	74.0	279.0
C_A-2	1.40	-0.09	79.6	353.0	6.05	-0.18	81.5	284.0
C_B-1	1.53	0.04	80.6	53.7	9.34	2.88	53.5	282.8
C_B-2	1.20	0.05	72.8	40.5	9.37	1.97	45.2	283.5
C_C-1	2.38	-0.30	36.9	32.8	41.42	1.75	30.2	13.8
C_E-1	1.98	-0.08	137.1	34.2	2.77	0.07	141.9	122.3
C_F-1	2.37	0.05	76.8	95.2	27.93	4.32	62.9	326.9
C_H-1	1.43	-0.06	4.23	70.3	2.68	-0.15	179.7	139.5

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Los resultados de la estimación armónica para las componentes principal diurna (K_1 , de frecuencia 23 h, 56 min., 4 seg.) y principal semidiurna (M_2) de los registros de niveles del mar, en las diferentes estaciones, figuran en la *Tabla 2*. Los resultados para las fases evidencian que la propagación de las ondas de marea es aproximadamente de sur a norte. La diferencia de fase máxima para la banda semidiurna es de casi 4° entre las estaciones A y D y para la banda diurna, 5° entre las estaciones A y E. Asimismo, los resultados reflejan que las amplitudes de la banda semidiurna coinciden con los valores que muestran las cartas de marea para la región (75-76 cm para la M_2) sólo en la zona norte de la isla (estaciones A y G). En el resto (estaciones B, D y E) las amplitudes disminuyen gradualmente hacia el suroeste. Las amplitudes de las componentes diurnas en cambio, muestran valores parecidos en todas las estaciones con una ligera tendencia a aumentar hacia el suroeste.

Los resultados del análisis de las corrientes para las componentes K_1 y M_2 se presentan en la *Tabla 3*. La tabla muestra que la corriente oscila principalmente en la dirección paralela a costa. Un aspecto interesante son las diferencias que se obtienen en las amplitudes de la corriente para las componentes semidiurnas. En las estaciones del norte-noreste (H, A y B) y suroeste (E), las amplitudes son relativamente pequeñas. En cambio en el sureste y el oeste (C y F) aumentan considerablemente, alrededor de un orden de magnitud. Así, el valor del semieje mayor de la componente dominante M_2 pasa de 2-3 cm/s al suroeste y norte de la isla, a 40 cm/s en el sureste (estación C) y 28 cm/s al Oeste (estación

F). Las amplitudes diurnas de las corrientes, sin embargo, son similares en todas las estaciones (entre 1.4 y 2.4 cm/s para K_1) aumentando ligeramente en las estaciones C y F.

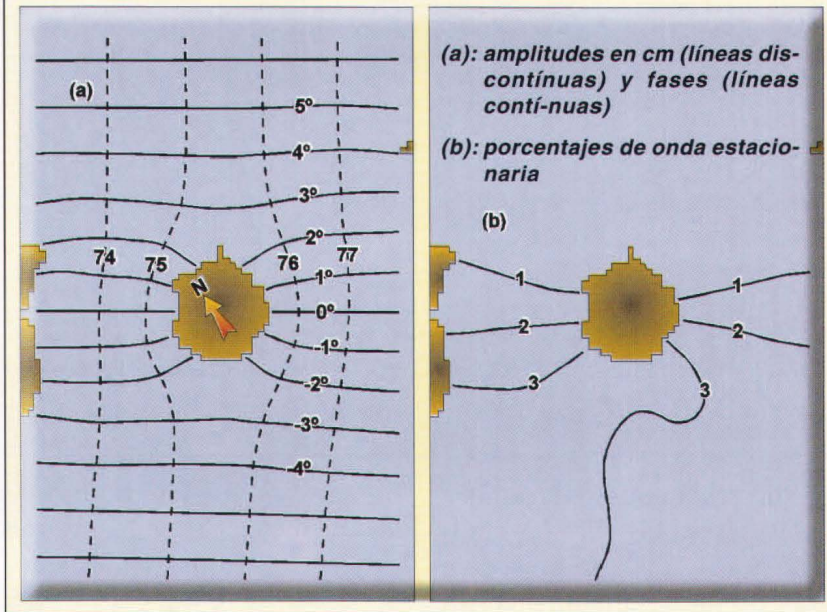
Las fases de las corrientes también presentan variaciones importantes alrededor de la isla. Con la intención de estudiar el origen de estas variaciones, las componentes armónicas de la marea se han descompuesto en ondas progresivas y estacionarias mediante la comparación de las fases de las corrientes con las fases de los niveles. En el caso de onda progresiva, la corriente y la superficie deben oscilar en fase, mientras que en el caso de onda estacionaria deben estar desfasadas 90° . Las

TABLA 4
Amplitudes en cm/s de onda estacionaria (A_s) y onda progresiva (A_p)

Correntímetros	K_1			M_2		
	A_p	A_s	$A_s/(A_s+A_p)$	A_p	A_s	$A_s/(A_s+A_p)$
C_A-1	1.18	0.76	0.39	1.80	5.42	0.75
C_A-2	1.19	1.29	0.52	1.31	5.69	0.81
C_B-1	1.46	0.35	0.19	3.50	8.70	0.71
C_B-2	1.19	0.05	0.04	5.07	7.94	0.61
C_C	2.34	0.42	0.15	38.84	9.29	0.19
C_E	1.90	0.25	0.12	0.28	2.65	0.90
C_F	1.35	1.92	0.59	16.00	22.00	0.58
C_H	1.24	0.69	0.36	1.00	2.39	0.71

FIGURA 2

Resultado numérico para el caso de profundidad uniforme



amplitudes calculadas para las ondas estacionaria y progresiva en las diversas estaciones se muestran en la *Tabla 4*. El modo estacionario de la componente M_2 domina en las estaciones del suroeste y norte-noreste de la isla (estaciones A, B, E y H). El modo progresivo aumenta ostensiblemente en la estación F y domina en la C. Las variaciones del ratio: O.estacionaria/O.progresiva para la componente K_1 es menor que la de la M_2 ; sin embargo se observa un patrón similar: el ratio presenta dos máximos en las estaciones A y F.

DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

Los ordenadores actuales posibilitan el empleo de técnicas numéricas para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas

parciales sin que esto suponga un gasto excesivo de tiempo de computación. En este estudio se han realizado experimentos numéricos que consistieron en resolver las ecuaciones hidrodinámicas que rigen el comportamiento de las ondas largas de marea (Godin, 1988) mediante un esquema en diferencias finitas explícitas, utilizado ya en trabajos previos (Godin y Martínez, 1994). Para ello se utilizó una malla rectangular de 2625 por 2625 km de resolución, con el lado mayor orientado 34° respecto del norte, que es aproximadamente la dirección de la oscilación de las corrientes observadas en el océano abierto (Siedler y Paul, 1991). Estas observaciones indican que las componentes semidiurnas de la marea se comportan de forma similar a las ondas de Kelvin. En consecuencia, hemos realizado experimentos numéricos en los que la marea en los contornos de la malla se comporta como una onda de Kelvin.

Con el objeto de separar los factores que determinan el com-

portamiento de la marea en la plataforma, se han estudiado los siguientes casos.

- (a) Isla de Gran Canaria con profundidad uniforme de 3000 m.
- (b) Isla de Gran Canaria con batimetría real hasta un máximo de 3000 m, cuyos resultados se discuten en la siguiente sección.

RESULTADOS NUMÉRICOS Y COMPARACIÓN CON LAS OBSERVACIONES

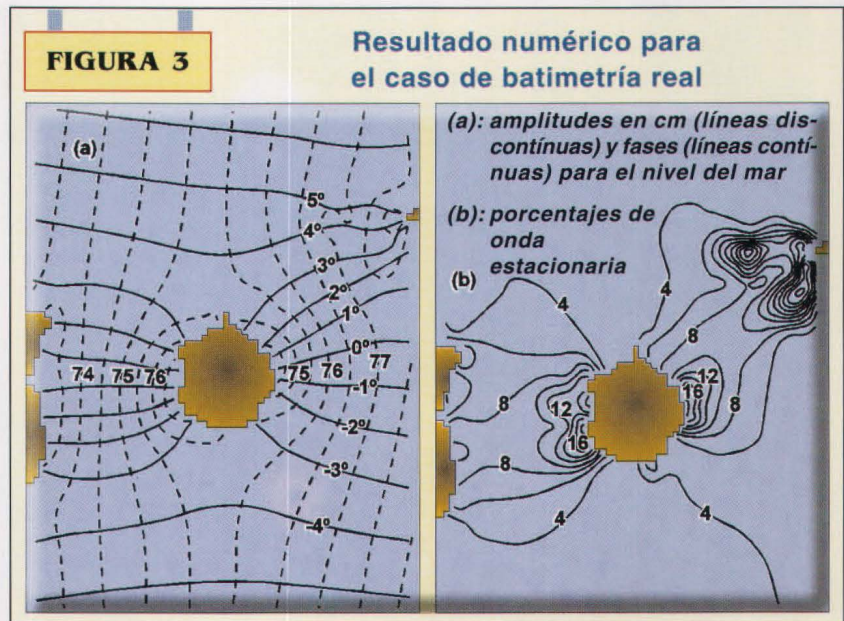
La *Figura 2a* muestra las isoamplitudes e isofases del nivel del mar resultantes del experimento con profundidad uniforme. La gráfica muestra que la difracción producida por la isla es pequeña y mantiene una amplitud constante alrededor de la Isla. Los resultados para las corrientes de marea en el caso de profundidad uniforme indicaron que las elipses carecen de semieje menor. El semieje mayor varía alrededor de la isla de manera que las amplitudes mínimas se obtienen en los extremos de incidencia y salida de la onda y las amplitudes máximas, de 9cm/s, a los lados (sureste y noroeste de la isla). La *Figura 2b* indica que el porcentaje de onda estacionaria (O.est./[O.est.+O.prog.]x100) es muy pequeño (máximo 3%).

Las amplitudes y las fases de η resultantes del experimento con batimetría real se presentan en la *Figura 3a*. La gráfica muestra

que la perturbación de la onda es más importante que en el caso anterior. Por un lado, la presencia de la plataforma insular produce una variación de la fase 2° mayor entre el noreste y suroeste de la Isla. Por otro lado, la plataforma produce un cambio de amplitud alrededor de Gran Canaria. El modelo calcula un mínimo de 74 cm en la parte noreste y un máximo de 77 cm en la parte suroeste.

Los resultados del análisis de niveles del mar muestran una variación importante de las amplitudes semidiurnas entre las partes norte-noreste y suroeste de la isla. Las amplitudes en el norte coinciden con los valores esperados para la marea oceánica en esta parte del Atlántico, lo que indica que el fenómeno consiste en una disminución de las amplitudes al suroeste de la isla. Los resultados del modelo pueden explicar las menores amplitudes de la estación B respecto a las encontradas en las estaciones A y G, pero están en desacuerdo con la disminución al suroeste. El hecho de que en el suroeste la plataforma se ensanche y se haga más somera parece indicar que la pequeña amplitud observada está provocada por efectos de pequeña escala. Por tanto, sería necesario utilizar un modelo numérico con una resolución muy fina alrededor de la isla para poder investigar este fenómeno.

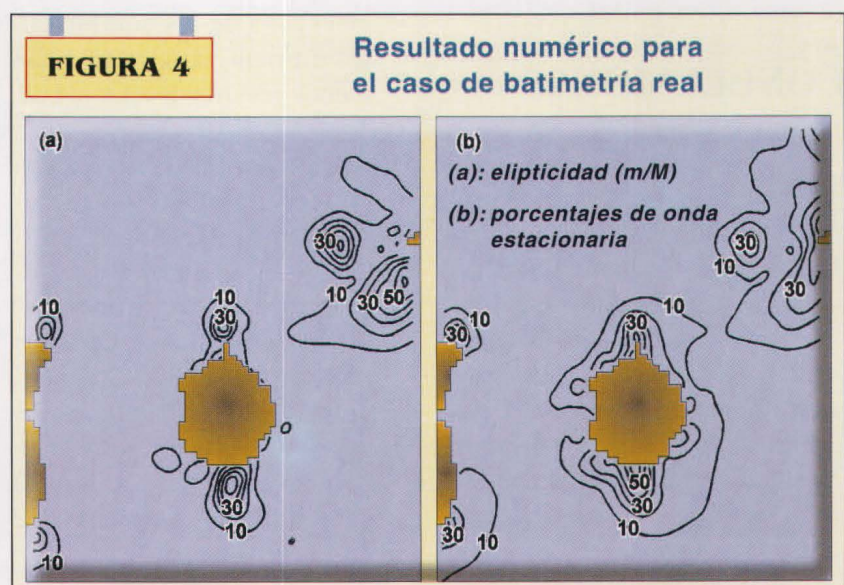
La Figura 3b muestra la variación del semieje mayor alrededor de la Isla. Los máximos están localizados al sureste y noroeste pero sus magnitudes son considerablemente mayores que los obtenidos para el caso de profundidad uniforme debido a la intensificación del flujo que producen las menores profundidades de la plata-



forma. Este resultado explica las variaciones observadas en la sección 3. La aguas someras producen también corrientes importantes al sur de Fuerteventura y en el monte submarino o baja de Amanay.

El cambio de amplitud provoca la aparición de semiejes menores y el modelo adjudica las mayores excentricidades (m/M) al sur de Fuerteventura y en Amanay (Figura 4a). Las mayores excentricidades alrededor de Gran Canaria se encuentran en aquellas zonas del talud donde

la onda atraviesa las batimétricas (noreste y suroeste de la isla). El porcentaje de la onda que se explica mediante una onda estacionaria se presenta en la Figura 4b. La figura ilustra un patrón que consiste en la existencia de dos máximos cercanos al 60%, localizados en las regiones costeras donde la onda incide y se aleja y dos mínimos a los lados (sureste y noroeste). Este resultado reproduce aproximadamente la variación de fase de la corriente observada en la plataforma insular. La combinación de las Figuras 4a





y 4b indican que cerca de la costa las aguas someras amplifican las corrientes cuando fluyen paralelas a costa. En las partes noreste y suroeste de la Isla, este hecho tiene lugar 1/4 de período de la onda antes y después del momento de ocurrencia de la pleamar, mientras que al noroeste y sureste las corrientes máximas ocurren a la vez que las pleamares. Además, los resultados del modelo sugieren que un comportamiento análogo tiene lugar en las islas de Tenerife y Lanzarote.

CONCLUSIONES

El primer objetivo de este estudio ha sido el de realizar, mediante un análisis de los datos de campo, una descripción cuantitativa de los niveles y corrientes de marea alrededor de Gran Canaria. Los resultados muestran las siguientes características:

(a) La propagación de las componentes de marea en los ni-

veles del mar es aproximadamente de sur a norte confirmando lo mostrado por las cartas de marea para esta zona del Atlántico. Las amplitudes y fases semidiurnas en las estaciones situadas al norte y noreste de la isla coinciden con los valores esperados (75-76 cm para la M_2). Sin embargo, las amplitudes sufren una disminución importante en las estaciones del sur (68 cm) y del suroeste (64 cm) donde la marea parece estar afectada por una dinámica local de pequeña escala. Este efecto no se produce en el caso de las componentes diurnas, las cuales están menos perturbadas por la Isla.

(b) Las corrientes de marea son pequeñas en aquellas regiones donde las ondas inciden y salen (noreste y suroeste) pero son importantes en las regiones laterales (sureste y noroeste). Además, en las primeras regiones las componentes semidiurnas tienen un carácter cercano al estacionario mientras que en las últimas se asemejan a ondas progresivas.

Las simulaciones numéricas para el caso de Isla con profundidad uniforme muestran que las distorsiones de las componentes semidiurnas son pequeñas. Sin embargo, los resultados obtenidos en el caso de batimetría real indican que la plataforma insular produce perturbaciones significativas de los armónicos. Este resultado junto con las variaciones observadas de las amplitudes semidiurnas alrededor de la Isla patentizan que es necesario tener en cuenta las plataformas insulares a la hora de estimar la *representatividad* de las medidas tomadas en islas.

El modelo numérico reproduce las variaciones de las propiedades de las corrientes semidiurnas observadas en la plataforma de Gran Canaria. Sus resultados muestran la amplificación de las corrientes de marea al sureste y noroeste de la isla producida por las aguas someras de la plataforma. Además, la plataforma amplifica el carácter estacionario al suroeste y noreste de la isla, lo que explica las importantes variaciones de fase observadas alrededor de la isla.

BIBLIOGRAFÍA

- **Andersen, O.B., P.L. Woodworth y R.A. Flather, 1995:** Intercomparison of recent ocean tide models, *J. Geophys. Res.*, **100**, 25261-25282.
- **Dick, G. and G. Siedler, 1985:** Barotropic tides in the north-east Atlantic inferred from moored current meter data, *Dtsch. Hydrogr. Z.*, **38**, 7-22.
- **Foreman, M.G.G., 1977:** *Manual for tidal heights analysis and prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10. Inst. of Ocean Sciences, Patricia Bay.
- **Godin G., 1988:** *Tides*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada Baja California. Méjico, 290pp.
- **Godin, G. y A. Martínez, 1994:** On the possibility of Kelvin-type motion in actual seas. *Continent. Shelf Res.*, **14**, 707-721.
- **Huthnance, J.M. and P.G. Baines, 1982:** Tidal currents in the northwest African upwelling region. *Deep-Sea Res.*, **20**, 285-306.
- **Kagan, B.A., and G.A. Kivman, 1995:** A necessary condition for the representativeness of island tidal measurements, *J. Geophys. Res.*, **100**, 11047-11051.
- **Larsen, J.C., 1977:** Cotidal charts for the Pacific Ocean near awaii using f-plane solutions. *J. Phys. Oceanogr.* **7**, 100-109.
- **Le Provost, C., 1992:** On the use of sea level gauge data for satellite altimetry validation: A review, *Oceanol. Acta*, **15**, 431-440.
- **Schwiderski, E.W., 1980:** On charting global ocean tides. *Rev. Geophys.*, **18**, 243-268.
- **Siedler, G. and U. Paul, 1991:** Barotropic and baroclinic tidal currents in the eastern basins of the north Atlantic, *J. Geophys. Res.*, **96**, 22259-22271.
- **Tejedor, B., 1991:** *Fenómenos dinámicos de interacción atmósfera-oceano*. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 289pp.

BIOGRAFÍA

Antonio Martínez Marrero

Nació en Las Palmas de Gran Canaria el 18 de Febrero de 1964. Licenciado en Ciencias del Mar en 1987 por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Después de un año como Becario de Formación de Personal Investigador del Ministerio de Educación y Ciencia, es contratado por la ULPGC para impartir Física en la Escuela Universitaria Politécnica, y posteriormente Mareas y Ondas Largas en la Facultad de Ciencias del Mar, donde actualmente desarrolla su labor docente e investigadora.

Doctor en Física desde 1995, ha publicado varios artículos en revistas especializadas de impacto, además de haber participado en congresos tanto nacionales como internacionales.

Dirección:
Departamento de Física.
Edificio de Ciencias Básicas.
Campus Universitario de Tafira.
35017 Las Palmas de Gran Canaria.
Tfno:(928) 45 29 00 - Fax: (928) 45 29 22
E-mail: antonio.martinez@fisica.ulpgc.es

Este trabajo ha sido patrocinado por:
ASTILLEROS CANARIOS, S.A. (ASTICAN)