

EL ESTRECHO DE GIBRALTAR. ZONA DE INTERCAMBIO DE AGUAS ATLÁNTICAS Y MEDITERRÁNEAS

Federico YANGUAS GUERRERO



Introducción



L estrecho de Gibraltar ha sido tratado en numerosas ocasiones bajo muchos puntos de vista, en especial bajo términos estratégicos, geopolíticos, históricos, navales, económicos, turísticos, deportivos, de tráfico marítimo, de emigración, etc. Sin embargo pocas veces bajo un sentido meramente físico. Ante este enfoque nos debemos preguntar ¿qué es lo que ocurre con las masas de agua atlánticas y mediterráneas? ¿Por qué aparecen en la carta 445 del estrecho de Gibraltar diversas zonas de corrientes superficiales y a qué se debe la variación con el tiempo de la intensidad y dirección de estas corrientes?

También, siempre que hemos navegado por el Estrecho (en especial los submarinistas y los que hemos estado en buques con una velocidad máxima no muy elevada) nos hemos encontrado reducción o aumento en la velocidad sobre el fondo de hasta casi cuatro nudos, de forma que en los momentos de corriente en contra se iba mirando más el tráfico que nos alcanzaba que el alcanzado.

Por todo ello, y para comprender el estrecho de Gibraltar en un sentido físico, es necesario un conocimiento de la hidrodinámica de los flujos y las mezclas y otros efectos que en él se producen. Trataremos de describir sencillamente cuál es su orografía, su batimetría y qué flujos de agua principales presenta.

Orografía del estrecho de Gibraltar

Sabemos que en la época de los fenicios, el Estrecho fue conocido como las Columnas de Melkart, por los griegos como Columnas de Heracles y posteriormente con los romanos como las Columnas de Hércules. Sin embargo, su nombre actual procede de la invasión musulmana de la península Ibérica y su significado es la Montaña de Tarik (*Djebel Tarik*), que equivale a Gibraltar.

La orografía del Estrecho está condicionada porque es la zona de comunicación entre las aguas del océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Está formado por dos cadenas montañosas que perfilan toda la costa: el Sistema Penibético, que discurre paralelo al litoral sur de la península Ibérica, y por las estribaciones de la cordillera del Atlas, que se extiende desde Túnez hasta Melilla, continuando en forma de arco hacia el noroeste para configurar las montañas del Rif.

A lo largo de sus 32 millas es la única conexión que tiene el mar Mediterráneo con el océano Atlántico, con dos mitades bien definidas: la parte oriental, angosta y bastante profunda, y la parte occidental, más ancha y menos profunda. Ambas mitades quedan separadas por la sección del umbral de



Fig. 1. Zona correspondiente al estrecho de Gibraltar.
(Carta 445 del Instituto Hidrográfico de la Marina).

Camarinal, que representa el «cuello de botella» del Estrecho. Su boca occidental está comprendida entre los cabos de Trafalgar y de Espartel (con unas 23,7 millas), produciéndose su mínima angostura entre Tarifa y punta Cires (con unas 7,5 millas). Por el este, están el peñón de Gibraltar y punta Almina (12,4 millas).

El estrecho de Gibraltar está conformado por los siguientes accidentes geográficos: el umbral de Espartel o banco Majuán, la cuenca de Tánger u hoya de Poniente, el umbral de Camarinal o bajo de Camarinal, la sección de Tarifa y, por último, las Columnas de Hércules, situadas entre los montes Calpe (Gibraltar) y Musa (figura 1).

Geológicamente su formación está relacionada con procesos geotectónicos entre las placas euroasiática y africana, explicándose por ello la gran variabilidad en la batimetría, con una sucesiva alternancia de zonas profundas y de elevaciones submarinas a lo largo de su eje principal. También sabemos que el Mediterráneo estuvo casi seco hace unos 6.000.000 de años como consecuencia de la colisión de África con Eurasia, y más tarde por la rotura de este, lo que produjo un desbordamiento de agua atlántica que llenó la cuenca mediterránea en unos cientos de años. Todo ello hace que disponga de una difícil morfología que provoca en gran medida su compleja dinámica.

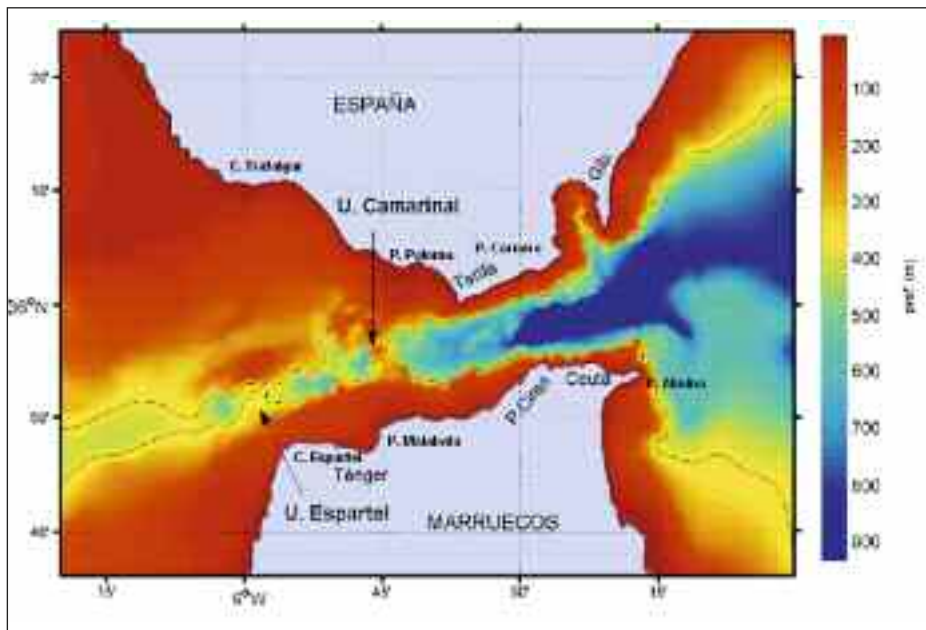


Fig. 2. Mapa batimétrico del estrecho de Gibraltar.
(Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Cádiz, UCA).

Hidrografía

La batimetría del Estrecho hacia el Mediterráneo es muy variable, con una alineación aproximada en la dirección Tarifa-Algeciras. La profundidad en la parte atlántica es superior a los 400 m, con unos 290 m entre punta Paloma y punta Malabata, espacio conocido como el umbral de Camarinal. Hacia el este del Camarinal la profundidad aumenta hasta la sección de Tarifa, permaneciendo a continuación casi constante hasta la sección Gibraltar-Ceuta, superándose los 900 metros de profundidad en la parte oriental cerca de la sección punta Carnero-punta Almina (figura 2).

Flujos de agua

El estrecho de Gibraltar está situado en una encrucijada de vientos y de corrientes que comunica el Atlántico con el mar Mediterráneo. Este último está sometido a un clima de altas temperaturas que provoca una evaporación de forma continua y que en promedio es netamente negativo, con valores que oscilan entre los 0,47 m/año y los 1,31 m/año (Bryden *et al.*, 1994). Es por ello que en esta zona existe un importante intercambio de masas de agua entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo, con valores de corriente entrante (1) por encima de 1.5 m³ (García-Lafuente *et al.*, 2000). El flujo saliente (2) a través de esta sección se mueve con mucha menor velocidad por la gran profundidad. El origen de estos flujos se debe fundamentalmente a la diferente densidad entre las aguas del Atlántico (menos salinas) y del Mediterráneo (más salinas), que a su vez originan una diferencia de nivel este-oeste y a las que hay que superponer el efecto de la marea.

En el Estrecho entonces se distinguen las siguientes masas de agua:

- Atlánticas (hacia el Mediterráneo):
 - Agua Central Noratlántica (*NACW-North Atlantic Central Water*), caracterizada en un diagrama TS (3) por la línea que une los puntos de temperatura y salinidad de $T = 8^{\circ} \text{C}$, y $S = 35,10$, y $T = 19^{\circ} \text{C}$, y $S = 36,70$ (Sverdrup *et al.*, 1942).
 - Agua Atlántica Superficial (*SAW-Surface Atlantic Water*), situada por encima de la NACW, con unos 16° a 20° C de temperatura y

(1) Agua entrante: Agua Atlántica Superficial en dirección hacia el Mediterráneo.

(2) Agua saliente: Agua Mediterránea Profunda en dirección hacia el Atlántico.

(3) Diagrama TS: gráfico que muestra la relación entre la temperatura y la salinidad en la columna de agua.

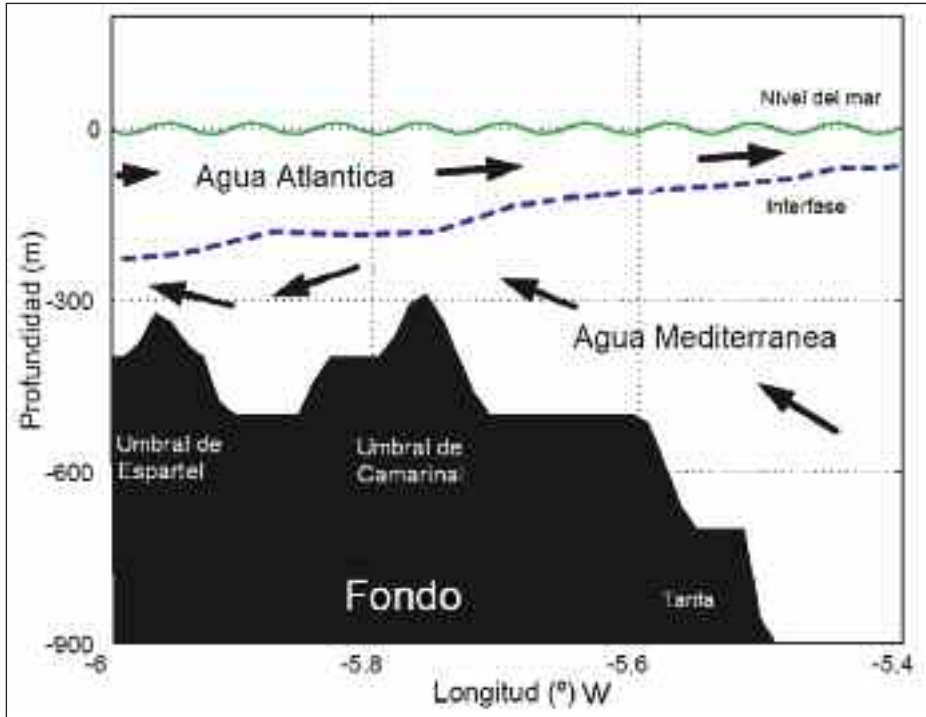


Fig. 3. Sección longitudinal del estrecho de Gibraltar con una distribución de agua atlántica (más superficial) y mediterránea (más profunda).
(Grupo de Oceanografía Física de la UCA).

con una salinidad prácticamente constante de 36,2 (Sverdrup *et al.* 1942).

— Mediterráneas (hacia el Atlántico):

- Agua Levantina Intermedia (*LIW-Levantine Intermediate Water*), con una temperatura de unos 13,2° C y una salinidad de 38,5 (Parrilla *et al.*, 1986).
- Agua Mediterránea Profunda del Mediterráneo Occidental (*WMDW-Western Mediterranean Deep Water*), con temperaturas menores que 12,9° C y salinidades entre 38,2 y 38,4 (Parrilla *et al.*, 1986).

Con estos intercambios de masas, y de forma muy general, se puede decir que el Estrecho posee un esquema de intercambio de agua «bicapa», con una

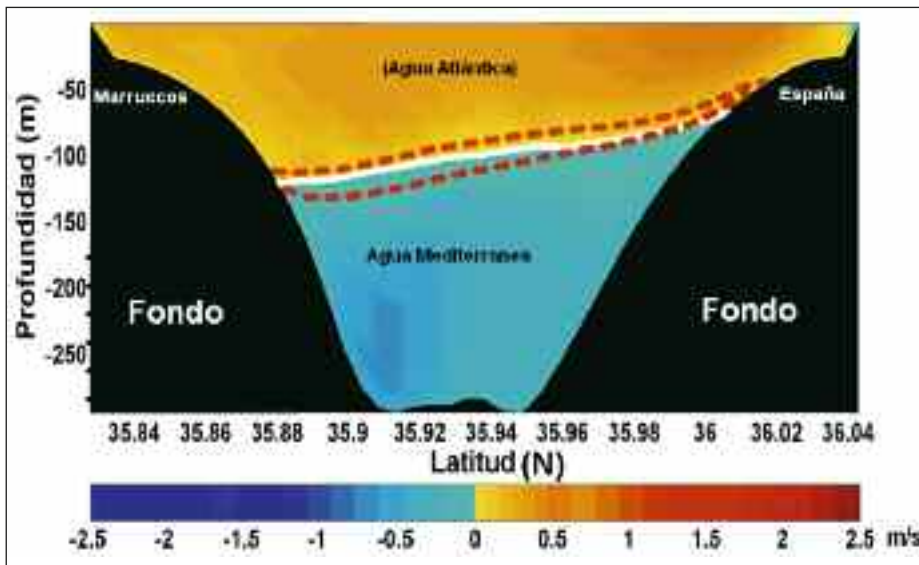


Fig. 4. Estructura de velocidades «medias» en la sección transversal al Estrecho en el umbral de Camarinal. La capa de agua de flujo atlántico es más delgada al norte y más ancha al sur. Los colores azules indican flujo hacia el Atlántico, los rojos hacia el Mediterráneo. La línea gruesa blanca determina la superficie de velocidad nula.
(Grupo de Oceanografía Física de la UCA).

exportación hacia el Atlántico de agua mediterránea a niveles profundos y una entrada de agua superficial atlántica hacia el Mediterráneo. El intercambio de aguas medias en el Estrecho es de aproximadamente un Sverdrup (4), (Lacombe y Richez, 1982) (figura 3).

La zona de separación (o interfaz) de ambas capas se corresponde aproximadamente con la isohalina (5) de 37,5 y se sitúa generalmente entre 100 y 150 m de profundidad, siendo más profunda en el oeste que en el este, (Candela, 1991). Este interfaz posee variaciones estacionales, de mareas, por cambios de dirección e intensidad del viento y por diferencias de presión atmosférica entre la cuenca mediterránea y la atlántica. También en esta zona se generan solitones (6), que se desplazan en sentido este (Bruno *et al.*, 2002).

(4) Sverdrup: denominación del flujo de agua estándar ($Sv = 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{seg.}$).

(5) Isohalina: línea o superficie que une los puntos de igual contenido salino de las aguas subterráneas o superficiales.

(6) Solitones: ondas internas que se generan en fluidos estratificados debido a la interacción de los flujos de marea con la topografía del fondo.

La acción de la rotación terrestre (por acción de la fuerza de Coriolis) (7) establece una pendiente transversal que para un intercambio medio es más delgada en la parte norte del Estrecho y más gruesa en la sur (Garrett *et al.*, 1989; Candela *et al.*, 1990) (figura 4).

La velocidad de la corriente tiende a ser mayor en la región donde la capa es más delgada, lo que unido a la estructura que tiene el flujo a lo largo del Estrecho hacen que los lugares donde se esperan altas velocidades sean en la parte nororiental del Estrecho.

Tipos de flujos

El flujo de agua a través del estrecho de Gibraltar viene condicionado, por *fluctuaciones de muy baja frecuencia* (superior a tres meses, cuasi estacionales, estacionales e interanuales), de *flujos subinerciales* (8) o de *baja frecuencia* (periodos de unos pocos días a varios meses), que están relacionados con variaciones meteorológicas de presión atmosférica y viento, por las *fluctuaciones de flujos mareales* (periodos entre varias horas y un día), que están relacionados con el potencial generador de mareas, por las *fluctuaciones de corto periodo* (periodos de minutos a unas horas) y por último por las *fluctuaciones de ondas internas* (Lacombe y Richez, 1982; Candela, 1991; Vargas y García Lafuente, 2003).

Flujos de baja frecuencia

De escala temporal estacional e interanual, corresponden a un intercambio baroclino (9) bicapa, (Bryden *et al.*, 1990, 1994). Se han detectado señales:

- De componente anual en el flujo de entrada y salida a través del Estrecho.
- De componente semianual en el flujo de salida hacia el golfo de Cádiz en profundidad (García Lafuente *et al.*, 2002b).

(7) La fuerza de Coriolis es una fuerza ficticia que aparece cuando un cuerpo está en movimiento con respecto a un sistema en rotación y se describe su movimiento en ese referencial. Es siempre perpendicular a la dirección del eje de rotación del sistema y a la dirección del movimiento del cuerpo vista desde el sistema en rotación. Su dirección es hacia la derecha en el hemisferio norte y al contrario en el hemisferio sur.

(8) Se denominan subinerciales por tener periodos superiores al de inercia, que para una latitud media de 36° N es de 22,4 horas.

(9) Baroclino: no son paralelas las superficies isobáricas e isopícnicas (línea o superficie de igual o constante densidad).

Flujos subinerciales

Los fenómenos subinerciales tienen periodos de algunos días a varias semanas o pocos meses con una amplitud del orden de 0,5 m y constituyen una parte significativa del flujo total (Garrett *et al.*, 1989). Los principales fenómenos que los provocan son los siguientes:

- Atmosféricos de presión: de carácter barotrópico (10), son debidos a la variabilidad del campo de presiones que provoca el efecto de barómetro invertido (11) y que tiene consecuencias directas sobre la pendiente del nivel del mar (García Lafuente *et al.*, 2002).
- Atmosféricos de viento: el viento puede producir sinergias con la presión y tiende a covariar positivamente con el forzamiento de presión, de manera que el chorro atlántico tendrá una mayor propensión a acelerarse cuando exista una mayor presión en la entrada del Estrecho por el lado del golfo de Cádiz y viento de moderado a fuerte procedente de poniente. Sin embargo esta corriente superficial es generalmente frenada por altas presiones en el mar de Alborán unidas a viento de levante (García Lafuente *et al.*, 2002b).
- Ciclos de marea: con variaciones quincenales y mensuales de mareas vivas (12) y mareas muertas (13), que originan fluctuaciones en la corriente (García Lafuente *et al.*, 2000). De carácter baroclino, se observa que durante los procesos de mareas muertas aumenta la cizalla de velocidad instantánea en el umbral de Camarinal, mientras que se ve reducida en periodos de mareas vivas. Esta modulación no parece responder a ningún forzamiento externo y parece ser consecuencia de la variación de la intensidad de las mezclas entre mareas vivas y muertas (Candela *et al.*, 1989).

(10) Barotrópico: contrariamente a la Baroclino, la barotrópica de un fluido es una característica por la cual las líneas de presión constantes (isobara) coinciden con las de densidad constante (isopicna).

(11) Barómetro invertido: efecto de disminución/aumento del nivel del mar por un aumento/disminución de la presión atmosférica. En el Mediterráneo por cada un milibar que aumenta/disminuye la presión atmosférica, desciende/aumenta un centímetro el nivel del mar.

(12) Mareas vivas o mareas sicigias: son las mareas que se producen en las lunas nuevas y llenas.

(13) Mareas muertas o mareas en cuadratura: son las mareas que se producen en los cuartos menguantes y los cuartos crecientes.

Flujos mareales

Las mareas son las fluctuaciones temporales más importantes en el Estrecho —Experimento de Gibraltar (Kinder y Bryden, 1988)—. El volumen de agua transportado en una y otra dirección durante cada ciclo de marea, excede los flujos asociados al intercambio promedio en un factor entre tres a cinco, y que es mayor en periodos de mareas vivas (García Lafuente *et al.*, 2000), siendo suficiente como para invertir la dirección media de los flujos entrante y saliente en el umbral de Camarinal. Existen, pues, en el estrecho de Gibraltar dos regímenes de marea. Uno es el del mar Mediterráneo, con un efecto de marea prácticamente despreciable debido a su relativamente pequeña dimensión. Por otro lado está el del Atlántico, que es bastante mayor que el anterior. Las principales constituyentes armónicas de marea en el estrecho de Gibraltar son la M_2 , S_2 , N_2 , K_1 y la O_1 (14) (Candela, 1991).

De media, el 75 por 100 y el 12 por 100 de la energía cinética medida se encuentran respectivamente en las bandas semidiurnas y diurnas, con una combinación de marea barotrópica, más una componente baroclina, destacando la marea en el este del Estrecho como muy baroclina, con una capa superior con una débil señal de marea y con flujo total que no llega a invertir (Bruno *et al.*, 2002; Sánchez Román *et al.*, 2009). También se evidencia en la zona oriental del Estrecho un comportamiento muy baroclino de las corrientes semidiurnas en la parte superior de la columna de agua, mientras en la parte inferior es más barotrópico (García Lafuente *et al.*, 2000).

Fluctuaciones de corto periodo (periodos de minutos a unas horas)

Son debidas a oscilaciones que se producen en la región del espectro entre los siete y los treinta minutos, con amplitudes que oscilan en el rango de uno a diez centímetros, con episodios más probables entre los meses de abril a octubre.

(14) M_2 , S_2 , N_2 , K_1 y la O_1 son las componentes armónicas más importantes que se dan en el estrecho de Gibraltar (denominación de los astros ficticios de la notación de Lord Kelvin/Darwin).

- M_2 : componente lunar principal semidiurna (periodo de la constante de marea 12,42 horas).
- S_2 : componente solar principal, semidiurna (periodo de la constante de marea 12 horas).
- N_2 : componente lunar elíptica mayor semidiurna (periodo de la constante de marea 12,66 horas).
- K_1 : componente diurna lunisolar de declinación (periodo de la constante de marea 23,94 horas).
- O_1 : componente lunar de declinación diurna (periodo de la constante de marea 25,83 horas).

Ondas internas

Las ondas internas o solitones se generan en fluidos estratificados debido a la interacción de los flujos de marea con la topografía del fondo. En nuestro caso, el principal relieve responsable de la generación de las ondas internas en el estrecho de Gibraltar lo constituye el umbral de Camarinal. Las ondas internas generadas en este umbral pueden dividirse en dos grandes grupos: de marea interna lineal y de más corto periodo y gran amplitud. En el siglo XIX ya se recogían en uno de los derroteros de las costas españolas (Tofiño, 1832), las impresiones de marineros y pescadores de la zona sobre estas corrientes y señales superficiales que las acompañaban, popularmente denominadas «hervideros» o «hileros de corriente»:

«...estas aparecen instantáneamente sin señales previas. De repente, una rugosidad en la superficie del mar aparece, como cuando el agua está hirviendo, y un mar caótico se establece. Como si los vientos indujeran fuerzas contrarias, las corrientes son peligrosas, no solo para pequeños barcos sino para los grandes también...»

Estudios oceanográficos posteriores (Lacombe y Richez, 1982) han puesto de manifiesto que estos hervideros están producidos por ondas internas de gran amplitud (figuras 5 y 6).



Fig. 5. Estrecho de Gibraltar que muestra una imagen satelital (espectro visible), donde se observa la evolución de las ondas internas, desde su generación en el umbral de Camarinal hasta su llegada al mar de Alborán. (Grupo de Oceanografía Física de la UCA).



Fig. 6. Imagen en el estrecho de Gibraltar donde se muestran los «hervideros» por la generación de ondas internas y su efecto en superficie.

(Grupo de Oceanografía Física de la UCA).

Aspectos meteorológicos

La variabilidad de los agentes meteorológicos, en especial el viento y la presión atmosférica, producen una variación en los flujos de agua al forzar hacia abajo el nivel del mar cuando la presión está por encima de la media en el mar Mediterráneo, obligando a un aumento en la evacuación de agua hacia el Atlántico (Candela *et al.*, 1989; García Lafuente *et al.*, 2002b). Caso contrario ocurre cuando esta presión disminuye por debajo de esa media. Sin embargo, la variación de vientos locales de poniente/levante, reforzados por el efecto del Tubo de Venturi, tiende a covariar positivamente con el forzamiento de la presión atmosférica, de forma que si existe una alta presión sobre la cuenca occidental mediterránea se acompaña usualmente con viento de levante (García Lafuente *et al.*, 2002a). Ocurre lo contrario cuando existe una baja presión en la cuenca occidental mediterránea. Estas variaciones generan una influencia en el campo de velocidades, y por tanto en los flujos de energía, y vienen asociados principalmente a señales subinerciales.

Conclusiones

El estrecho de Gibraltar es una zona geográfica que posee una hidrodinámica muy compleja, con un trasvase de agua entre las cuencas mediterránea y atlántica debido a una continua evaporación del agua mediterránea, lo que genera una aportación de agua atlántica superficial hacia el Mediterráneo y un aporte de agua mediterránea más profunda hacia el Atlántico, todo ello condicionado por elementos atmosféricos, de viento, presión y de flujos de muy baja frecuencia, subinerciales, mareales, efectos de corto periodo y de generación de ondas internas, lo que muestra la complejidad de este enclave marítimo.



BIBLIOGRAFÍA

- BRUNO, M.; ALONSO, J. J.; CÓZAR, A.; VIDAL, J.; ECHEVARRÍA, F.: *The boiling-water phenomena at Camarinal Sill, the strait of Gibraltar*, 2002. DSR, pp. 409–411.
- BRYDEN, H. L.; PILLSBURY, R. D.: «Measurement of flow through the Strait of Gibraltar», 1990. *Advances in Water Resources*, 12, (2), 6 pp. 4-69.
- BRYDEN, H. L.; CANDELA, J.; KINDER, T. H.: «Exchange through the Strait of Gibraltar», 1994. *Progress in Oceanography*, 33, pp. 201-248.
- CANDELA, J.; WINANT, C. D.; BRYDEN, H. L.: «Meteorologically forced subinertial flows through the Strait of Gibraltar». *Journal of Geophysical Research*, 94, 1989, pp. 12.667-12.674.
- CANDELA, J.; WINANT, C.; RUIZ, A.: «Tides in the Strait of Gibraltar», 1990). *Journal of Geophysical Research*, 95, pp. 7.313-7.335.
- CANDELA, J.: «The Gibraltar Strait and its role in the dynamics of the Mediterranean Sea», 1991). *Dynamic Atmosphere Oceans*, 15, (3-5), pp. 7.313-7.335.
- GARCÍA LAFUENTE; VARGAS, J. M.: «Tide at the eastern section of the Strait of Gibraltar», 2000. *Journal of Geophysical Research*, 105 (C6), pp. 14.197-14.213.
- GARCÍA LAFUENTE; DELGADO, J.; VARGAS, J. M.; PLAZA, M.; SARHAN, F. T.: «Low frequency variability of the exchanged flows through the Strait of Gibraltar during CANIGO», 2002. *Deep-Sea Research*, II 49 (19), pp. 4.051-4.067.
- GARCÍA LAFUENTE, J.; ÁLVAREZ FANJUL, E.; VARGAS, J. M., y RATSIMANDRESY, A. W., 2002a: «Subinertial variability in the flow through the Strait of Gibraltar». *Journal of Geophysical Research*, 107 (C10), 3168, doi:10.1029/2001JC001104.
- GARCÍA LAFUENTE, J.; DELGADO, J., y CRIADO, F., 2002b: «Inflow interruption by meteorological forcing in the Strait of Gibraltar». *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19), 1914, doi:10.1029/2002GL015446.
- GARRETT, C. J. R.; AKERLEY, J. Y.; THOMPSON, K. R.: «Low-frequency fluctuations in the Strait of Gibraltar from MEDALPEX sea level data», 1989. *J. Physics Oceanography*, 19, pp. 1.682-1.696.
- KINDER, T. H., y BRYDEN, H. L.: «Gibraltar Experiment: summary of the field program and initial results of the Gibraltar Experiment», 1988. WHOI-88-30, *Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report*.
- LACOMBE, H., y RICHEZ: «The regime of the Strait of Gibraltar», 1982. *Hydrodynamics of Semi-enclosed Seas*, J. C. J. Nihoul, Elsevier Oceanography. Ser. p. 13.
- PARRILLA, G.; KINDER, T. H., y PRELLER, R.: «Deep and Intermediate Mediterranean Water in the western Alborán Sea», 1986. *Deep Sea Res.*, 33 (1), pp. 55-88, doi:10.1016/0198-0149(86) 90108-1.
- SÁNCHEZ GARRIDO, J. C.; GARCÍA LAFUENTE, J.; CRIADO-ALDEANUEVA, F.; BAQUERIZO, A., y SANNINO, G.: «Time-spatial variability observed in velocity of propagation of the Strait of Gibraltar», 2008. *Journal Geophysics Research*, 113, C07034, doi: 10.1029/2007JC004624.
- SÁNCHEZ-ROMÁN, A.; SANNINO, G.; GARCÍA LAFUENTE, J.; CARRILLO, A., y CRIADO-ALDEANUEVA, G.: «Transport estimates at the western section of the Strait of Gibraltar: A combined experimental and numerical modeling study», 2009. *Journal of Geophysical Research*, 114, C06002, doi:10.1029/2008JC005023.
- SVERDRUP, H. U.; JOHNSON, M. W., y FLEMING R. H.: «The Oceans: Their physics, chemistry and general Biology», 1942. Pentice-Hall englewood Cliffs, NJ, p. 1.087.
- TOFIÑO DE SAN MIGUEL, Vicente: *Derrotero de las costas de España en el Mediterráneo y su correspondiente de África*, 1832. Imprenta Nacional.
- VARGAS, J. M.; GARCÍA LAFUENTE; DELGADO, J., y CRIADO, F.: «Seasonal and wind induced variability of sea surface temperature patterns in the Gulf of Cadiz», 2003. *Journal of Marine Sys.*, 38, pp. 205-2, 19.