

Oceanografía del Mar de Alborán*

Jaime Rodríguez Martínez

Características generales de la Cuenca Mediterránea

El Mar Mediterráneo se encuentra incrustado entre las masas continentales europea y africana, cubriendo una superficie aproximada de 2,5 millones de km² y encerrando un volumen de 3,7 millones de km³. Su profundidad media es de unos 1.500 m claramente inferior a la de los océanos, situándose la profundidad máxima (5.121 m) en la fosa helénica.

Junto a la situación geográfica entre masas continentales de clima seco, la característica morfológica más relevante del Mediterráneo es su limitada comunicación con el océano (Atlántico) a través de un estrecho (el de Gibraltar) de unos 14 km de anchura y unos 350 m de profundidad. La combinación de situación geográfica y morfología van a condicionar prácticamente todas las características importantes, sean físicas, químicas o biológicas, del Mar Mediterráneo. Dado que el Mar de Alborán es la cuenca que conecta al Mediterráneo con el océano abierto, es en ella donde podemos encontrar algunas de las estructuras hidrológicas y comunidades más interesantes dentro del Mediterráneo.

A nivel de cuenca global, la característica más importante es el ser una cuenca de concentración. Esto quiere decir que el balance hídrico es negativo al exceder las pérdidas por evaporación a la suma de aportes fluviales y precipitación.

Por otra parte, al compensarse este déficit con aguas superficiales atlánticas (lo que viene impuesto por el umbral del Estrecho de Gibraltar), el Mediterráneo ha venido a ser un mar caliente en el que no se encuentran temperaturas inferiores a unos 12,5-13 °C en ningún momento del año y en ningún nivel de profundidad. La consecuencia inmediata es la existencia de gradientes muy débiles de densidad en la columna de agua, lo cual facilita los procesos de mezcla vertical y oxigenación de los niveles más profundos. Este es uno de los aspectos que más atraen la atención de los oceanógrafos, pues en un área relativamente pequeña puede encontrarse una gran diversidad de fenómenos hidrológicos que permiten utilizar a este mar como un modelo reducido de océano.

El régimen que se establece a través del Estrecho de Gibraltar tiene otras consecuencias, de las cuales debemos resaltar ya el carácter empobrecido nutritivamente de las

* Este artículo resume un capítulo del libro del mismo autor, *Oceanografía del Mar Mediterráneo*, publicado por Ediciones Pirámide, Madrid, en 1982.

aguas mediterráneas; no hay que olvidar que las aguas atlánticas que compensan el déficit mediterráneo son aguas superficiales y por lo tanto relativamente pobres en nutrientes, ya que es en esos niveles iluminados donde el fitoplancton los incorpora en forma de materia orgánica particulada.

Intercambios a nivel del Estrecho de Gibraltar

Aunque la cuenta mediterránea tiene otras conexiones que le permiten importar agua (el Bósforo con el Mar Negro y el canal de Suez con el Mar Rojo), éstas pueden despreciarse cuando se comparan con los intercambios a través del Estrecho de Gibraltar. Dado que todo lo que ocurre aquí incide directamente sobre la cuenca de Alborán como vestíbulo del Mediterráneo, merece la pena detallarlo algo.

La continúa entrada de agua atlántica para compensar el déficit mediterráneo debería implicar el progresivo aumento de la salinidad de este mar, lo que, por lo menos a escala temporal humana, no parece ocurrir. Ello implica que el mantenimiento de los niveles de salinidad en el Mediterráneo se debe a la existencia de algún mecanismo que exporta una cantidad de sal equivalente a la importada con el agua atlántica.

Esto es un simple problema químico que puede resumirse en la ecuación:

$$p_a V_a S_a = p_m V_m S_m$$

donde p_a y p_m son las densidades respectivas de las aguas atlánticas y mediterráneas, V_a y V_m son los volúmenes intercambiados y S_a y S_m las salinidades respectivas. Los valores de densidad pueden eliminarse dado que difieren aproximadamente en solo 0,002. La medida —con la precisión que se requiere en oceanografía física— de las salinidades a ambos lados del Estrecho da unos valores de

$$S_m = 37,90/_{\infty} \text{ y } S_a = 36,15/_{\infty}$$

Esta diferencia de aproximadamente un 5% entre los valores de salinidad implica que debe haber una diferencia del mismo orden, pero inversa, entre los volúmenes intercambiados. Es decir, tiene que establecerse un flujo entrante de agua atlántica que es aproximadamente un 5% mayor que el flujo de agua mediterránea saliente, pero éste exporta una cantidad de sal aproximadamente un 5% superior a la importada en el agua atlántica. Lógicamente, al ser el agua mediterránea más densa por su mayor salinidad, tiene que verter al Atlántico en forma de una corriente pegada al fondo del Estrecho, esto es, de sentido inverso a la corriente superficial procedente del Atlántico (figura 1).

Por dar algunas cifras, los volúmenes estimados en cada uno de estos flujos son

$$\begin{aligned} V_m &= 1,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} \\ V_a &= 1,68 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Estas cifras deben considerarse aproximadas y han de ir mejorándose conforme la oceanografía va haciendo uso de métodos más sofisticados.

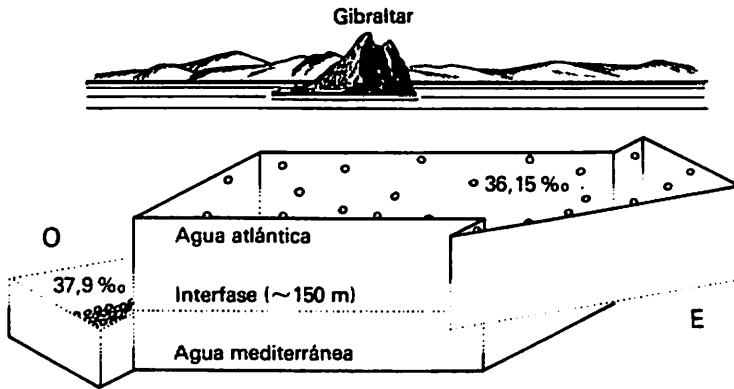


Figura 1.- Intercambio de agua a nivel del Estrecho de Gibraltar. El flujo de agua mediterránea exporta en profundidad, y bajo un volumen menor, una cantidad de sal equivalente a la que importa con el flujo superficial de agua atlántica. Tomada de Rodríguez (1982), "*Oceanografía del Mar Mediterráneo*", Ed. Pirámide, Madrid.

Transformación de las masas de agua

Como se ha explicado, en el Estrecho de Gibraltar se manifiestan dos corrientes superpuestas y de movimiento opuesto, y las masas de agua implicadas muestran características físicas y químicas muy diferentes. Pues bien, la capa inferior, típicamente mediterránea no es más que un producto derivado de las aguas atlánticas que entran en superficie, como por otra parte era lógico esperar.

El proceso de transformación de un tipo de agua en otro tiene lugar gracias a un mecanismo hidrológico propio del Mediterráneo y que está ligado estrechamente al clima. Es por tanto necesario explicar este mecanismo si queremos entender la estructura y dinámica de masas de agua en el Mar de Alborán, ya que es aquí donde coinciden los productos entrantes y salientes en un espacio limitado, generando la gran heterogeneidad espacial característica de dicha cuenca.

Cambios estivales

Durante la estación más cálida, el agua superficial atlántica que penetra en el Mediterráneo se calienta progresivamente y va quedando aislada de las aguas superficiales por una termoclina —esto es, un gradiente pronunciado de temperatura— que se establece entre unos 20-40 metros de profundidad. El incremento de temperatura va acompañado de un incremento de salinidad provocado por la fuerte evaporación, resultante del contacto con una atmósfera cálida y seca. La estabilidad de la columna de agua permanece gracias a que la densidad de la capa superficial está más controlada por la temperatura que por la salinidad; téngase en cuenta que dicha capa superficial puede

presentar valores de más de 25° de temperatura y más de 39,5‰ de salinidad en la parte más oriental de la cuenca mediterránea.

Cambios invernales

El clima invernal tiene dos efectos principales sobre las masas de agua mediterráneas. En primer lugar, se produce una elevada transferencia de calor desde el mar a la atmósfera, ya que al final del verano la temperatura del mar puede superar en 10° a la del aire. En segundo lugar, la incidencia de fuertes vientos fríos y secos, principalmente en la zona septentrional, provoca una fuerte evaporación.

Es en estos momentos cuando cobra especial importancia el hecho de la debilidad de los gradientes verticales en el Mediterráneo y, consecuente, la facilidad con que se dan condiciones de desequilibrio en el seno de las masas de agua. Al enfriarse la capa superficial de alta salinidad presente a finales del verano tiende a aumentar su densidad, lo cual se ve ayudado por la fuerte evaporación y su efecto sobre la salinidad. Las aguas superficiales comienzan a hundirse y a mezclarse con las de niveles inferiores. En inviernos especialmente fríos, este proceso puede alcanzar las máximas profundidades con un efecto fundamental para el mantenimiento de la vida en los fondos, esto es, el aporte de oxígeno disuelto en los niveles más superficiales.

Este fenómeno es especialmente importante en tres sectores mediterráneos que funcionan como zonas pulmón. A partir de ellas, los mecanismos de circulación horizontal y vertical promueven la mezcla de masas de agua que se resume en la figura 2.

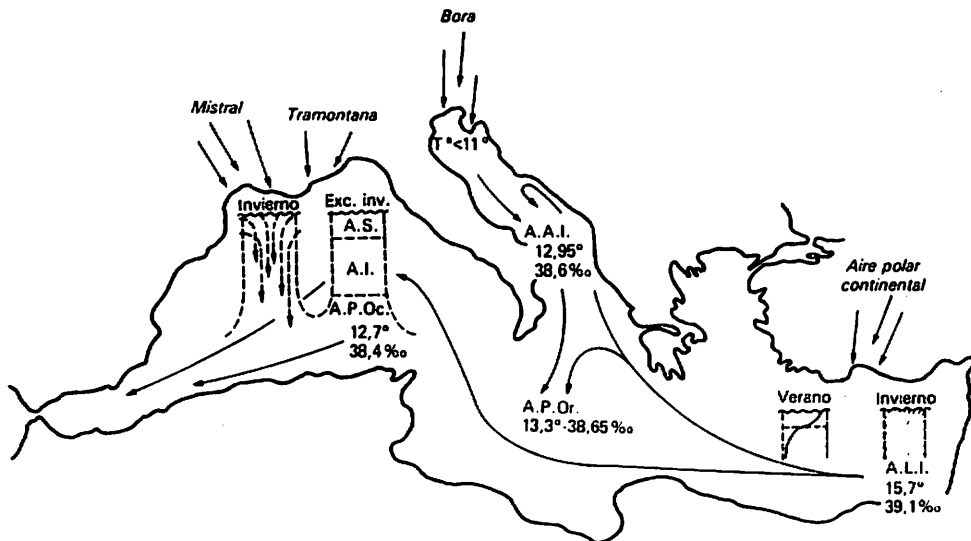


Figura 2.- Esquema de la formación y distribución de las principales masas de agua mediterráneas. Tomada de Rodríguez (*op. cit.*).

Una de las zonas pulmón es el Egeo SE y zona de Chipre. El *Agua Levantina Invernal* (A.L.I.) producida mediante el mecanismo descrito previamente, se extiende más o menos horizontalmente, por toda la cuenca oriental, mezclándose con el *Agua Adriática Invernal* (A.A.I.) cuyo origen tiene lugar en la segunda zona-pulmón mediterránea, el Mar Adriático. La mezcla final resultante es el *Agua Profunda Oriental*, que se desplaza lentamente hacia la cuenca occidental. La tercera zona pulmón se sitúa en la cuenca noroccidental. En cualquier época del año excepto en verano, se encuentra esta zona estructurada en tres capas: *Agua Superficial* (A.S.), marcada por la influencia atlántica; *Agua Intermedia* (A.I.), derivada fundamentalmente del paso del Agua Levantina a la cuenca occidental, y *Agua Profunda Occidental*. En invierno, los vientos secos procedentes de tierra (*mistral*, *tramontana*) generan el proceso de hundimiento y mezcla de las capas superficiales, proceso que puede alcanzar todo el espesor de la capa de agua, unos 2.500 metros, existiendo entonces una masa de agua homogénea que ocupa todo el fondo de la cuenca occidental, desplazándose lentamente hacia el oeste y vertiendo al atlántico en forma de corriente subsuperficial a nivel del Estrecho de Gibraltar.

La circulación de agua en el Mar de Alborán

Como hemos visto, lo fundamental del régimen hidrológico mediterráneo deriva de aspectos relacionados con la temperatura y la salinidad de las aguas bajo el control de la climatología; de aquí el nombre de circulación temohalina aplicado usualmente.

Es en el mar de Alborán donde confluyen las aguas entrantes y salientes generando unos intensos gradientes de heterogeneidad tanto en la dimensión vertical como horizontal. En la *figura 3* se resumen las principales características de la dinámica de masas de agua en este mar. Como se observa, la corriente atlántica, una vez que penetra en el Mediterráneo, es obligada por la *fuerza de Coriolis* a desplazarse a la derecha formando un gran remolino de carácter anticiclónico en el que se acumulan las aguas superficiales cálidas y oligotróficas; de este remolino se desgaja la corriente que sigue su penetración pegada a las costas norteafricanas. Al mismo tiempo y, gracias a mecanismos cuya descripción se sale de los objetivos de este artículo, entre el remolino anticiclónico y las costas españolas se manifiesta la existencia de pequeños remolinos de carácter ciclónico que favorecen el ascenso de aguas de carácter subsuperficial (interfase entre el agua atlántica y mediterránea) o correspondientes a las masas de aguas intermedias que se dirigen hacia el Estrecho para verter al Atlántico. Sea cual sea su exacto origen, son aguas más frías y ricas en nutrientes, con lo que tienen un efecto fertilizador sobre los niveles superficiales. La existencia de remolinos ciclónicos de carácter más o menos esporádico es más frecuente de lo creído hasta ahora, como ponen de manifiesto las técnicas de teledetección aplicadas a la oceanografía.

El relieve litoral y la morfología submarina parecen mostrar también una clara influencia en la localización de remolinos de este tipo, por lo que cabe especular con la incidencia de una punta como la de Tres Forcas sobre la dinámica de la corriente atlántica que discurre pegada a la costa africana. Si esta punta genera algún tipo de célula de circulación ciclónica en el lado occidental, cabe esperar una serie de diferencias en lo que se refiere a temperatura, nutrientes e incluso riqueza pesquera local a ambos lados

de esta punta. Estas hipótesis podrían contrastarse con una buena serie de observaciones y medidas así como con la recopilación de informes relativos a los usos y costumbres de las pesquerías artesanales de la zona.

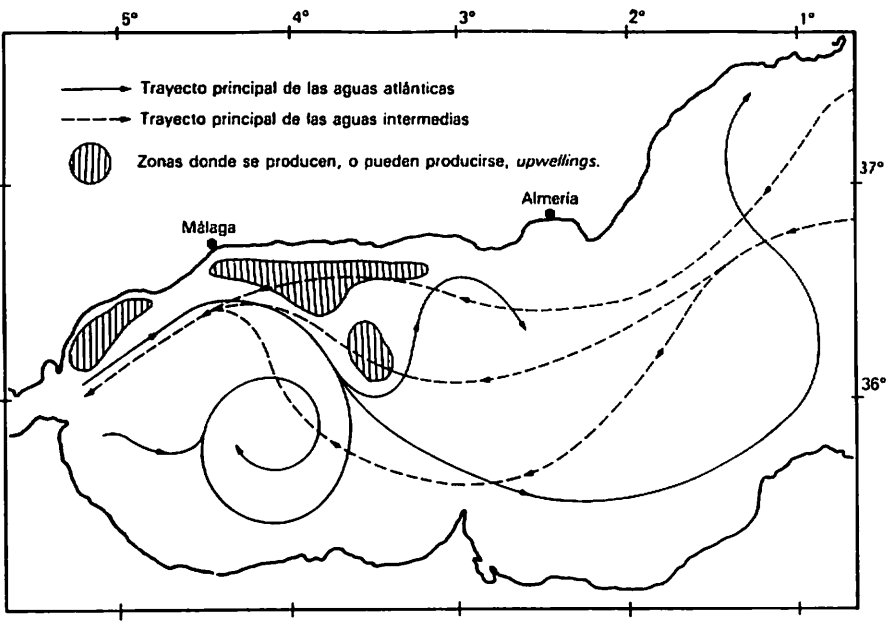


Figura 3.- Principales rasgos hidrográficos del mar de Alborán. Tomada de Rodríguez (*op. cit.*).

- ALLAIN, CH.; FURNESTIN, M. L., E MAURIN, C. 1986. *Essai de synthèse sur l'océanographie physique et biologique dans la zone d'influence du courant atlantique en Méditerranée du sud et du levant*, CIESMM.
- BENSON, R. H. 1972. *Ostracods as Indicators of Threshold Depth in the Mediterranean during the Pliocene*, en *The Mediterranean Sea: a Natural Sedimentation Laboratory*, ed. Stanley, D. J., Dowden, Hutchinson and Ross, págs. 63-73.
- BETHOUX, J. 1979. *Le régime de la Méditerranée en cours de périodes glaciaires*, «Il Nuovo Cimento», vol. 2 (c), núm. 2: 117-126.
- BETHOUX, J. 1980. *Mean Water Fluxes across Sections in the Mediterranean Sea, Evaluated on the Basis of Water and Salt Budgets and Observed Salinities*, «Oceanologica Acta», 3 (1): 79-88.
- CANO, N. 1977. *Resultados de la campaña «Alborán-73»*, «Boletín del Instituto Español de Oceanografía», vol. I: 103-175.
- GARCIA, A.; RODRIGUEZ J.; CANO, N., & RODRIGUEZ, V. (en prensa). *Hidrografía y zooplancton del sector noroccidental del Mar de Alborán*, «Boletín del Instituto Español de Oceanografía».
- JACOBSEN, J. P. 1912. *The Amount of Oxygen in the Water of the Mediterranean*, «Reports of Danish Oceanographical Expedition 1908-1910», I (II), núm. 5: 207-236.
- LACOMBE, H.; TCHERIA, P.; RICHEZ, C., & GAMBERONI, L. 1964. *Deuxième contribution à l'étude du Déroit de Gibraltar*, «Cahiers Océanographiques», 16 (4): 283-327.
- LACOMBE, H. 1971. *Le Déroit de Gibraltar. Océanographie physique*. «Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc», 222: 111-146.
- LACOMBE, H., & TCHERIA, P. 1972. *Caractères hydrologiques et circulation des eaux en Méditerranée*, en *The Mediterranean Sea: a Natural Sedimentation Laboratory*, ed. Stanley, D. J., Dowden, Hutchinson and Ross, págs. 25-36.
- LANOIX, F. 1974. *Étude hydrologique et dynamique de la Mer d'Alboran*, «Rapport Technique OTAN», núm. 66.
- MALDONADO, A. 1978. *El estancamiento de las aguas del mar Mediterráneo*, «Investigación y Ciencia», agosto, 32-47.
- MINAS, H. J. 1968. *A propos d'une remontée d'eaux profondes dans les parages du Golfe de Marseille. Consequences biologiques*, «Cahiers Océanographiques», 20 (8): 647-674.
- MINAS, H. J.; PANOUSSE, M., & SAUCET, A. 1974. *Nouvelles observations en Méditerranée occidentale sur le maximum d'oxygène subsuperficiel pendant l'été*, «Rapports et Procès-Verbaux de la CIESMM», 22 (8): 115.
- NESTEROFF, W. D. et al. 1972. *Evolution de la sédimentation pendant le Néogène en Méditerranée d'après les forages JOIDES-DSDP*, en *The Mediterranean Sea: a Natural Sedimentation Laboratory*, ed. Stanley, D. J., Dowden, Hutchinson and Ross, págs. 47-62.
- RODRIGUEZ, J.; LUCENA, J., & RODRIGUEZ, V. 1980. *Variación estacional del oxígeno en la Bahía de Málaga. Primeros datos sobre el máximo subsuperficiel estival*, «Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural», 78 (1-2).
- RODRIGUEZ MARTINEZ, J. 1982. *Oceanografía del mar Mediterráneo*. Ediciones Pirámide. Madrid.
- STANLEY, D. J. et al. 1972. *Guidelines for Future Sediment Related Research in the Mediterranean Sea*, en *The Mediterranean Sea: a Natural Sedimentation Laboratory*, ed. Stanley, D. J., Dowden, Hutchinson and Ross, págs. 723-741.
- STOMMEL, H.; VOORHIS, A. & WEBB, D. 1971. *Submarine Clouds in the Deep Ocean*, «American Scientist», 59: 716-722.
- TIXERONT, F. 1970. *Le bilan hydrologique de la Mer Noire et de la Méditerranée*, «cahiers Océanographiques», 22(3): 227-237.
- WUST, G. 1961. *On the Vertical Circulation of the Mediterranean Sea*, «Journal of Geophysical Research», 66 (10): 3261-3271.