

Y VAN CINCO AÑOS SEGUIDOS SIN NUEVA AGUA PROFUNDA EN EL MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL

Jordi SALAT¹, Pere PUIG¹, Mar FLEXAS², Rosa BALBÍN³, Ana SABATÉS¹, Josep PASCUAL⁴

¹*Institut de Ciències del Mar. CSIC.*

²*California Institute of Technology. Pasadena, CA (USA)*

³*Centre Oceanogràfic de Balears. IEO*

⁴*Estació Meteorològica i Oceanogràfica de L'Estartit.*

salat@icm.csic.es

RESUMEN

Desde el invierno de 2013, no se han observado episodios relevantes de formación de aguas profundas en el Mediterráneo Occidental. Ello podría estar relacionado con la suavidad de estos últimos inviernos. No obstante, en 2018 sí ha habido episodios fríos importantes para producir aguas densas, pero no suficientes como para lograr cantidades significativas de nueva agua profunda. En la presente comunicación se plantea la posibilidad de que desde el agotamiento del agua profunda anterior al 2005 en toda la cuenca, en 2015 como más tarde, la formación de nueva agua profunda requiera unas pérdidas de calor latente superiores a las necesarias anteriormente. Este requerimiento, junto a la tendencia global al calentamiento podría causar un debilitamiento de la circulación termohalina mediterránea, con diversas consecuencias a escala regional y global. Entre ellas, una disminución de los intercambios de agua con el Océano y de los niveles de oxígeno en aguas profundas.

Palabras clave: Formación de aguas profundas, inviernos suaves, Mediterráneo Noroccidental, Cambio climático.

ABSTRACT

No relevant episodes of deep water formation have been observed in the Western Mediterranean since winter 2013. This could be related to the mildness of these last winters. In 2018, however, there have been episodes that should be cold enough to produce dense waters but no significant amounts of new deep water was formed. The present communication explores the possibility that, since the basin-wide exhaustion, around 2015, of the deep water produced prior to 2005, the formation of new deep water requires latent heat losses greater than those required previously. This requirement, together with the global trend towards warming, could cause a weakening of the Mediterranean thermohaline circulation, with consequences on a regional and global scale, such as a decrease in water exchanges between the surface ocean and the deep ocean and a decrease of oxygen levels in deep water.

Key words: deep water formation, mild winters, NW Mediterranean, Climate change.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Es conocido que el balance hídrico de la Cuenca Mediterránea es negativo, en el sentido que la evaporación excede a la precipitación y escorrentía, por lo que desde el punto de vista del intercambio de agua con el Océano, actúa como cuenca de concentración. Es decir, es una cuenca que concentra las sales disueltas en el agua, con lo que la salinidad del agua que sale (y su densidad) es superior a la de la que entra. Ello supone que en el Estrecho de Gibraltar, el agua entra al Mediterráneo por superficie y sale por el fondo, por lo que es necesario que en algún momento y en algún punto dentro del Mediterráneo, el agua de superficie gane densidad suficiente para hundirse hasta alcanzar el fondo de la cuenca. Los procesos para conseguir este hundimiento son conocidos como de “formación de agua profunda”, se dan no sólo en las cuencas de concentración sino también en unas pocas zonas del Océano, y son los responsables de la circulación a gran escala, la circulación termohalina. Así pues, en una cuenca de concentración, también se genera una circulación termohalina propia cuyo motor son los procesos internos de formación de agua profunda.

Para que el agua de superficie gane densidad, hace falta que ésta pierda calor, para que su temperatura disminuya. La pérdida de calor latente por evaporación es el mecanismo más efectivo para ello pues, además de provocar enfriamiento, consigue un aumento de salinidad por evaporación de agua, con lo que el aumento de densidad es mayor del que se obtendría simplemente por enfriamiento. Las mejores condiciones para que haya evaporación se dan cuando el agua es más cálida que el aire en contacto con ella y cuando soplan vientos fuertes, fríos y secos. Normalmente estas situaciones se dan en la parte norte de la Cuenca Mediterránea, a partir de otoño y se mantienen a lo largo de todo el periodo invernal. Al ganar densidad la capa de superficie, se va formando por convección, una capa de mezcla homogénea superficial que, progresivamente, va alcanzando mayores profundidades. En zonas de plataforma, la capa de mezcla alcanza fácilmente el fondo, excepto cuando hay episodios de precipitación o interviene agua de escorrentía, ya que en este caso, el agua vuelve a estratificarse en superficie. Más allá de la plataforma, para que la capa de mezcla alcance el fondo hará falta que su densidad supere a la de las capas más profundas.

En la cuenca del Mediterráneo Occidental, la parte central del Golfo de León es la zona donde se dan mejores condiciones para que haya formación de agua profunda. En las plataformas de esta región, debido a que la capa de mezcla alcanza el fondo más rápidamente que en mar abierto, al seguir perdiendo calor puede enfriarse más que aquélla y desbordar la plataforma hundiéndose por el talud hasta alcanzar una capa de agua de mayor densidad. Por simple semejanza hidrográfica, este mecanismo se denomina “de cascada” (*cascading*) y la superficie de la capa de mayor densidad donde termina la cascada se llama “plataforma virtual”.

1.2. Circulación y masas de agua del Mediterráneo Occidental

El comportamiento del Mediterráneo Occidental y los mecanismos descritos más arriba son conocidos desde los inicios de la ciencia oceanográfica. Son de destacar en este sentido los trabajos de finales de la década de los sesenta y principios de los setenta del siglo pasado, que describieron en detalle los procesos de formación de aguas profundas y su relación con la circulación y masas de agua en la cuenca (véanse

referencias, por ejemplo, en Hopkins, 1978). Con posterioridad y gracias a las mejoras técnicas tanto de observación —incluyendo el uso progresivo de sensores remotos y, últimamente, de medidores autónomos— como en los modelos, se han ido conociendo más detalles de estos procesos y su relación con la circulación, así como de sus impactos en los ecosistemas.

Acrónimo	θ (°C)	S	σ_θ (kg m⁻³)
AW reciente	>13	<37.5	<28.1
AW antigua	>13	37.9-38.2	<28.9
WIW	12.5-13.0	38.1-38.3	28.9-29.0
LIW	13.0-13.6	38.48-38.56	29.06-29.09
WMDW	12.7-12.9	38.43-38.48	29.10-29.12

Tabla 1. Características típicas de las masas de agua del Mediterráneo Noroccidental en invierno, ordenadas de menor a mayor profundidad. Fuente: elaboración propia según información de diversos autores.

La estructura vertical de masas de agua en el Mediterráneo Occidental está formada por cuatro capas (Tabla 1), constituidas, desde la superficie hasta el fondo, por: Agua Atlántica (AW), Agua Intermedia Occidental (WIW), Agua Intermedia Oriental (LIW) y Agua Profunda del Mediterráneo Occidental (WMDW). El agua superficial (AW) es la que entra desde el Océano y se mantiene por encima de los 200 m, que es la profundidad máxima que separa los flujos de entrada y salida en el Estrecho de Gibraltar. Esta masa de agua, que se caracteriza por tener el valor mínimo de salinidad, es la que a lo largo de su recorrido sufre más cambios. En líneas generales, va ganando salinidad a medida que cubre más distancia desde su origen y su temperatura fluctúa de acuerdo con el ciclo estacional. Circula por el Mar de Alborán y la Cuenca Argelina creando vórtices anticiclónicos. Desde allí, una parte fluye hacia el Mar Tirreno por el sur de Cerdeña, y posteriormente va hacia el Mediterráneo Oriental. La otra parte, va penetrando en la mitad norte por los canales entre las Islas Baleares y al este de Menorca, donde se organiza en forma de corriente que describe un circuito ciclónico desde el norte de Baleares hacia Córcega y discurre siguiendo aproximadamente todo el talud de la costa norte, desde el Mar Ligur hasta el Golfo de Valencia (Fig. 1). En todo este tramo, suele denominarse Corriente Norte y está en equilibrio geostrofico con el frente de densidad que separa las aguas de plataforma de las de mar abierto. Dado que las plataformas de esta zona norte son las que mayores aportes de escorrentía reciben, en particular las aguas del Ródano y del Ebro, los valores de salinidad de estas aguas superficiales del lado de la plataforma pueden llegar a disminuir en lugar de aumentar como sucede a lo largo del resto del recorrido de las AW.

La otra masa de agua de origen externo es la LIW. Procede del Mediterráneo Oriental y entra en la cuenca Occidental a través del canal de Sicilia. Se caracteriza por un máximo relativo de temperatura y el máximo de salinidad. Desde su entrada se va desplazando hacia el oeste y el norte, a medida que se mezcla con las aguas que la rodean, de forma que tanto su temperatura como salinidad iniciales van disminuyendo. Normalmente se sitúa entre 250 y 600 m de profundidad.

La WIW y, naturalmente, la WMDW, son aguas densas formadas en la propia cuenca Occidental. Ambas requieren pérdidas importantes de calor latente pero la WIW no llega a alcanzar la densidad de la LIW, normalmente a causa de que la salinidad del agua de partida es relativamente baja, correspondiente al lado de plataforma del frente de densidad mencionado más arriba. Se caracteriza por un mínimo relativo de temperatura y por proximidad a la superficie, no suele durar más de un ciclo anual. Se sitúa debajo de la AW, hasta unos 250 m aunque puede alcanzar ocasionalmente más de 400 m en zonas de talud donde no llega la LIW.

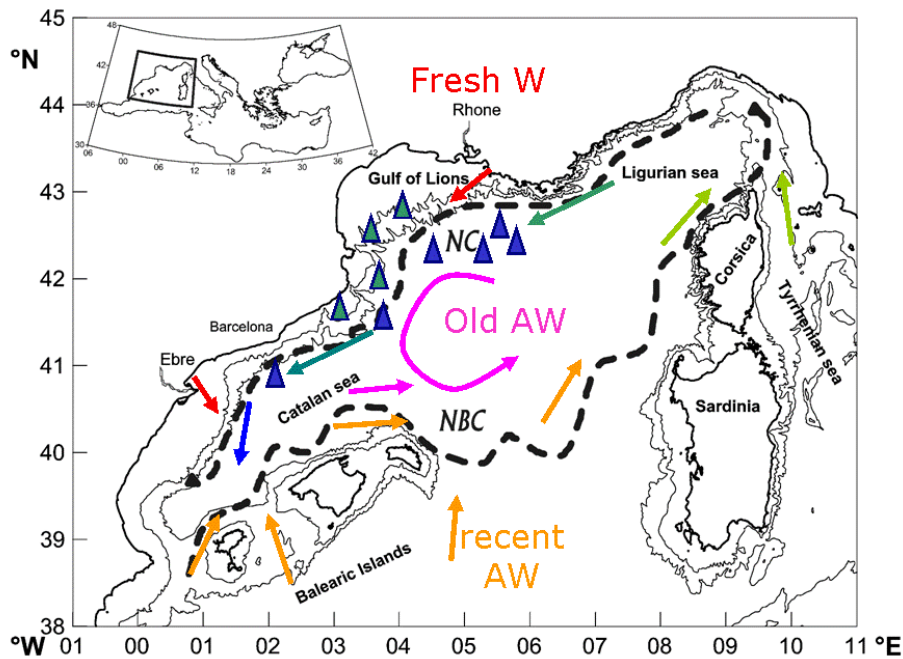


Figura 1. Circulación superficial del Mediterráneo Noroccidental, indicando la transformación de la AW reciente a la AW antigua (colores según el arco iris indican salinidades crecientes). Las líneas discontinuas muestran el recorrido medio de la corriente (NBC: Norbalear y NC Norte). Los triángulos muestran las zonas preferentes de formación de aguas densas: por cascada (verde) ó por convección (azul). Fuente: elaboración propia, según información de diversos autores.

La WMDW, objeto de esta presentación, se suele formar por convección en mar abierto frente al Golfo de León, más o menos en el centro del circuito ciclónico mencionado. Requiere fuertes pérdidas de calor latente repetidas, de forma que la convección exponga a la acción de la evaporación, una mezcla de agua superficial y LIW, consiguiendo una agua algo más fría, menos salada y más densa que la LIW. La descripción clásica del proceso de formación de aguas profundas (e.g. Medoc Group, 1970) involucra tres fases: (i) acondicionamiento, (ii) mezcla violenta y (iii) dispersión del agua formada. En la fase de acondicionamiento, se debilita la estratificación de la columna de agua hasta que casi no hay diferencia de densidades. En los puntos donde se dan estas condiciones, un nuevo episodio de forzamiento será

suficiente para desencadenar la segunda fase. En ella, el agua de superficie se hunde violentamente, en áreas relativamente pequeñas, alcanzando velocidades verticales de varios cm/s, más propias de la circulación marina horizontal. En contrapartida, se genera un movimiento ascendente cuyas velocidades son muy inferiores y, por tanto, involucra unas áreas mucho más extensas. Es mediante este movimiento que la LIW se va mezclando con la AW de superficie.

La WMDW también puede formarse en las plataformas de la zona norte, cuando hay evaporación muy intensa y poca presencia de aguas continentales o lluvia. En estas condiciones, el mecanismo de cascada puede llevar el agua el mismo fondo. Es lo que se denomina “cascada profunda”.

2. EPISODIOS DE FORMACIÓN DE AGUAS PROFUNDAS

2.1. Hasta 2004

Desde finales de los años sesenta se ha mantenido un seguimiento más o menos regular de la formación de aguas profundas en el Mediterráneo Occidental. Las observaciones *in situ* no siempre son posibles, debido a las condiciones meteorológicas que suelen darse, pero hay registros suficientes para corroborar los mecanismos y afinar en las descripciones (*e.g.* Leaman and Schott, 1991). Hasta finales del 2004 se han venido observando episodios anuales de formación en mar abierto, con mayor o menor intensidad y alguna excepción (1990). Las características de estas aguas profundas a lo largo de este periodo mostraban, por lo general, una ligera tendencia de aumento de salinidad y temperatura (Rixen *et al.*, 2005). En la Tabla 2 figuran los registros de los últimos 20 años, tanto de convección como cascadas profundas que, en general son de menor frecuencia, aunque a menudo se han dado en años seguidos. Finalmente, cabe señalar que en algunas ocasiones se observó una capa de agua cerca del fondo, de no más de 300 m de grosor, más salada y más cálida, cuyo origen no estaba claro. Lacombe *et al.* (1985) la denominaron Agua de Fondo (BW) y propusieron que se originaba cuando la LIW llegaba a la zona de formación por un camino más corto del habitual, de forma que sus propiedades eran más cercanas a las de origen, es decir, más saladas y cálidas.

2.2. Entre 2005 y 2013

En invierno de 2005 se produjo una situación que modificó la estructura de la masa de agua profunda cuya signatura en el diagrama TS tenía forma de “gancho”, por debajo del agua profunda previamente existente (agua O, Fig 2). Se trataba de una potente capa profunda, que mostraba un aumento de temperatura y salinidad a partir de unos 1000 m, seguido de una disminución de ambas propiedades, más abajo. La presencia de esta masa de agua modificó las tendencias observadas en los últimos 20 años, con un salto abrupto (López Jurado *et al.*, 2005). Salat *et al.* (2006) atribuyeron las características de esta nueva masa a la combinación de un fuerte episodio de convección profunda (agua N, Fig. 2) y, al mismo tiempo, una potente cascada profunda a lo largo del talud (agua C, Fig 2). La pregunta que quedaba en el aire era por qué estas nuevas aguas era tan diferentes de las que se habían formado anteriormente. La respuesta no fue unánime: por un lado Font *et al.* (2007) lo atribuían a un forzamiento extremo de pérdida de calor en la región, que habría provocado una

extraordinaria cantidad de agua profunda, por lo que su zona de formación habría sido mucho más extensa. Además, la nueva WMDW formada habría involucrado una proporción de LIW mayor de lo habitual y ésta habría alcanzado la zona de formación de agua profunda de manera más directa. Es decir, se postulaba una situación parecida a la que propusieron Lacombe *et al.* (1985). La otra alternativa, defendida por Schroeder *et al.*, (2006), con un magnífico juego de datos, pretendía que era debido a los cambios ocurridos durante la década anterior en el Mediterráneo Oriental bajo el denominado Transitorio del Mediterráneo Oriental (EMT; Theocharis *et al.*, 2002) cuya señal habría llegado a la Cuenca Occidental en forma de aguas más saladas y algo más cálidas. Ésta última alternativa es la que, por lo menos en los últimos años, ha tenido mayor aceptación (Schroeder *et al.*, 2016). En todo caso, el cambio fue de tal envergadura que se le dio el nombre de Transitorio del Mediterráneo Occidental (WMT) a semejanza del que hubo en la Cuenca Oriental (CIESM, 2009).

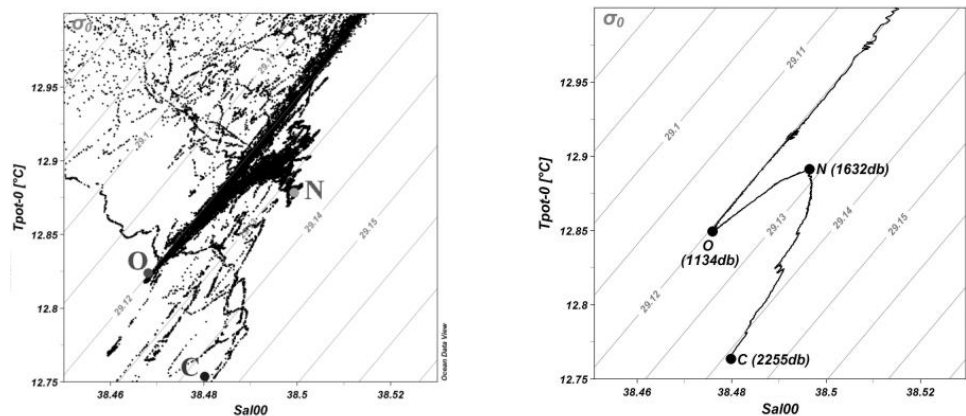


Figura 2. Diagramas θS de aguas profundas en 2005 en el Mediterráneo Noroccidental: izq: marzo, der: julio. Los puntos O, N y C indican los distintos orígenes de la masa de agua. Fuente: Salat *et al.*, (2006)

El forzamiento extraordinario de invierno del 2005 afectó no sólo el Mediterráneo Occidental sino toda la región del Océano Atlántico Nororiental, donde se observaron capas de mezcla superficiales alcanzando profundidades sin precedentes (*e.g.* Somavilla *et al.*, 2009). En el Mediterráneo Occidental, durante los años posteriores, la capa profunda se mantuvo y las nuevas WMDW producidas iban modificando progresivamente las características de esta capa. Al mismo tiempo, las WMDW anteriores al 2005, desplazadas hacia arriba por las nuevas, fueron saliendo progresivamente por el fondo del Estrecho de Gibraltar de forma que, durante esos años, las características del agua que salía del Mediterráneo eran menos saladas y más frías que en los años precedentes (Naranjo *et al.*, 2017). Tal como se muestra en la Tabla 2, entre 2005 y 2013 hubo algunos años con muy poca o ninguna producción de WMDW (2007 y 2008) y cascada profunda en 2012 (además de 2005 y 2006). La tendencia general en estos años fue de claro aumento en salinidad en las WMDW (Houpert *et al.*, 2016).

2.3. A partir de 2014

Desde el invierno de 2014 hasta 2017 no se ha detectado ningún episodio de formación de agua profunda en la Cuenca Occidental (Fig. 3). En principio, esta falta de episodios de formación podría estar relacionada con la suavidad de esos inviernos, que habrían evitado pérdidas de calor latente en la superficie del mar (Schroeder *et al.*, 2016; Salat and Sabatés, 2017). Al mismo tiempo, desde 2014 se ha observado un fuerte incremento en la salinidad del agua que sale del Mediterráneo (MOW), que podría explicarse por el agotamiento de la WMDW anterior a 2005 (Naranjo *et al.*, 2017). A lo largo de este periodo, además, la salinidad y temperatura de la LIW en la Cuenca Occidental ha seguido aumentando, de manera que los valores actuales en la zona del Golfo de León son parecidos a los que se registraban en el Canal de Sicilia a finales de los 90.

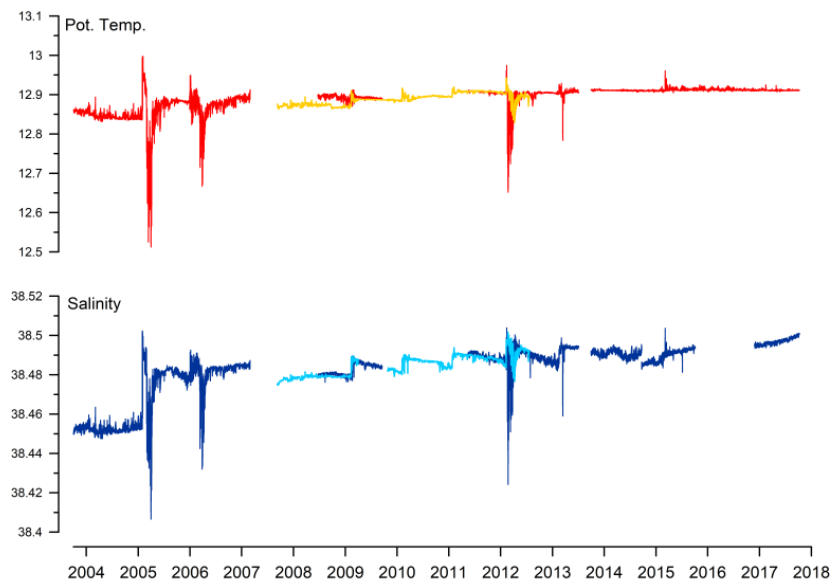


Figura 3. Serie temporal de θ y S , de 2004 a 2017 en un punto ($41^{\circ}28'N$, $3^{\circ}40.4'E$) a 1890 m de profundidad en el talud continental del norte de Cataluña (oscuro) y en mar abierto ($42^{\circ}02.3'N$, $4^{\circ}48.3'E$) al sur del Golfo de León (claro). Fuente: elaboración propia.

En invierno de 2018, las condiciones meteorológicas volvían a ser más típicas de la estación: bajas temperaturas, vientos fuertes de componente norte y escasa lluvia. Asimismo, los datos de la estación costera de L'Estartit (Fig. 4), muestran que había pérdidas de calor acumulado en la columna de agua parecidas a las de años que contaron con episodios claros de formación de aguas profundas (Tabla 2). Todo ello hacía prever que volverían a registrarse episodios de formación de aguas profundas en la región. Los datos provisionales más recientes de que disponemos, sin embargo, no muestran ninguno, sólo episodios de cascada puntuales a principios de marzo pero no hay datos que muestren que llegaran a alcanzar el fondo. Marginier *et al.* (2018) presentaron recientemente unas observaciones de capa de mezcla profunda mediados de febrero que, según comunicación personal de los autores, tampoco alcanzó más

allá de los 2000 m. A partir de mediados de marzo, a pesar de algunos episodios tardíos de frío intenso, el aumento de precipitaciones ligado a lo avanzado de la estación ya descartaba posibilidades de nueva formación, con lo que sigue la racha de inviernos sin formación de WMDW.

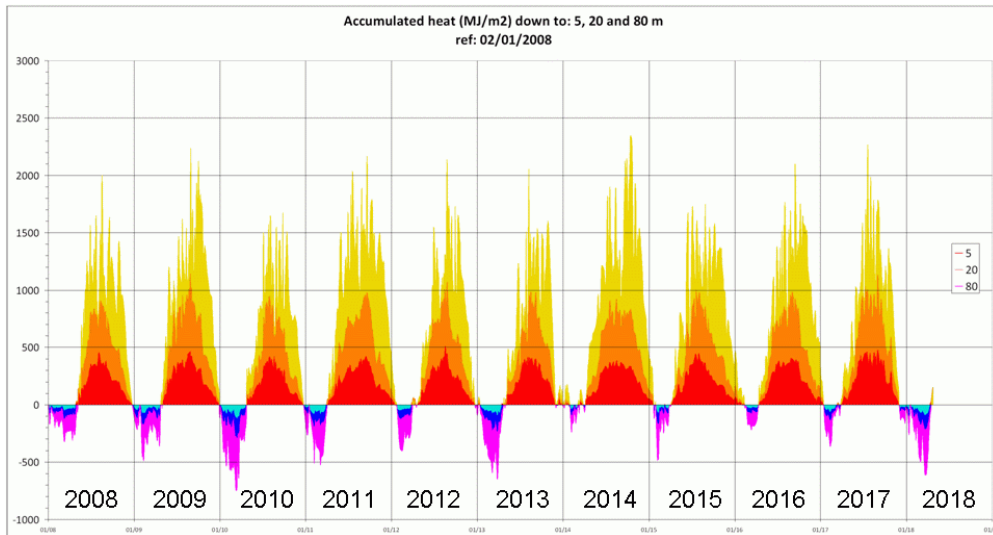


Figura 4. Calor acumulado entre 0 y 80 m ($42^{\circ}03'N$, $3^{\circ}15.3'E$), cerca de L'Estartit (Costa Brava), desde enero de 2008 hasta abril de 2018. Fuente: elaboración propia

Año	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Cas	si	<1000	-	500	500	-	si	si	<500	<500
Con	si	si	si	si	si	si	si	si	400	700
BW	300	no	no	no	no	no	1600	>1500	>120	>1200

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Cas	-	<1000	-	si	<2000	no	no	no	<500	1900
Con	si	si	si	si	si	<1000	1200	<800	<300	1800
BW	1500	1200	900	1500	1000	600	600	400	500	800

Tabla 2. Formación de aguas profundas en los últimos 20 años: por cascada (**Cas**) y convección (**Con**). Si no hubo, en algunos casos se muestran estimaciones de la $P_{m\acute{a}x}$ de la plataforma virtual o de la capa de mezcla superficial respectivamente. También se indica la presencia de **BW** y una estimación de su posible grosor. Fuente: elaboración propia.

3. DISCUSIÓN

La información meteorológica disponible muestra que desde mediados de diciembre de 2017 hasta mediados de marzo de 2018, tanto la temperatura como los vientos estuvieron en los niveles típicos de la estación, por lo que el invierno podría

considerarse como típico o incluso algo frío. Así pues, en principio, la situación de los forzamientos atmosféricos debería haber sido suficiente para producir una cantidad significativa de WMDW. No obstante, a día de hoy no tenemos ningún dato oceanográfico que lo demuestre. Es decir, no hay ningún rastro de nueva WMDW en el fondo de la Cuenca Occidental.

En el periodo 2005-2013, la capa más profunda del Mediterráneo Occidental ha mostrado un incremento neto de densidad potencial respecto a la situación anterior a 2005, del orden de casi 0.02 kg/m^3 (Houperet *et al.*, 2016) y por otro lado tenemos que tanto el agua de superficie como la LIW han aumentado su temperatura media (Vargas-Yáñez *et al.*, 2017). A pesar de que la LIW también ha sufrido un incremento de salinidad, su densidad potencial prácticamente no ha variado debido a que la temperatura ha aumentado en paralelo a la salinidad. Así pues, a pesar de la fuerte variabilidad interanual, los “ingredientes” básicos para la formación de la WMDW habrían perdido algo de densidad en este periodo —o, como mucho, se habría mantenido— mientras que la capa más profunda sí que ha aumentado su densidad. En estas condiciones, el incremento de densidad necesario para hundir el agua hasta el fondo sería netamente mayor que antes de 2005. Ello supondría la necesidad de un mayor forzamiento para conseguir el mismo efecto.

En invierno de 2018, se ha podido observar que los valores de densidad potencial (29.117) alcanzados en los episodios de hundimiento parcial (Tabla 2) hubieran sido más que suficientes para alcanzar el fondo antes de 2005 pero no en las circunstancias actuales (>29.131). A falta de una mejor cuantificación de las posibles pérdidas de calor latente que haya podido sufrir la superficie del Mediterráneo Noroccidental durante el invierno de 2018 y una mayor perspectiva para confirmar las tendencias de estos últimos años, se podría conjeturar que los episodios de formación de aguas profundas van a ser más escasos en el futuro. Entre las posibles consecuencias de esta nueva situación en la cuenca, tendríamos la ralentización de la circulación termohalina y una disminución de la ventilación de las capas más profundas.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se basa parcialmente en datos obtenidos a través de los proyectos: WinFish (CTM2015-68543-R) y Athapoc (CTM2014-54374-R) financiados por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Retos de la Sociedad.

REFERENCIAS

- CIESM, 2009. Dynamics of Mediterranean deep waters. *Nº 38 in CIESM Workshop Monographs* [F. Briand, Ed.], 132 pages, Monaco.
- Font J., P. Puig, J. Salat, A. Palanques and M. Emelianov (2007). Sequence of hydrographic changes in NW Mediterranean deep water due to the exceptional winter of 2005. *Sci. Mar.*, 71(2): 339-346
- Hopkins, T.S. (1978). Physical processes in the Mediterranean basins. In: Kjerfve, B. (Ed.), *Estuarine transport processes*. Univ. of South Carolina Press, pp. 269–310.

- Houpert, L., *et al.* (2016), Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007-2013 Period, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 8139–8171. doi:10.1002/2016JC011857.
- Lacombe H., Tchernia P. and Gamberoni L. (1985). Variable bottom water in the Western Mediterranean basin. *Progr. Oceanogr.*, 14: 319-338.
- Leaman, K. D. and Schott, F. (1991). Hydrographic structure of the convection regime in the Gulf of Lions, winter 1987, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 575–598.
- López-Jurado J.L., González-Pola C. and Vélez-Belchí P. (2005). Observation of an abrupt disruption of the long-term warming trend at the Balearic Sea, Western Mediterranean sea, in summer 2005. *Geophys. Res. Lett.*, 32(6): L24606, doi: 10.1029/2005GL024430.
- Marginier *et al.* (2018) Warming and salting of the Mediterranean, from yearly data sets to monthly monitoring. *50th International Liège Colloquium On Ocean Dynamics*, Liège, Bélgica.
- Medoc Group (1970). Observations of formation of deep water in the Mediterranean Sea. 1969. *Nature*, 227: 1037-1040.
- Naranjo, C., J. García-Lafuente, S. Sammartino, J. C. Sánchez-Garrido, R. Sánchez-Leal, and M. Jesús Bellanco (2017). Recent changes (2004–2016) of temperature and salinity in the Mediterranean outflow, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5665–5672, doi:10.1002/2017GL072615.
- Rixen, M., *et al.* (2005), The Western Mediterranean Deep Water: A proxy for climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12608. doi:10.1029/2005GL022702.
- Salat, J., M. Emelianov and J.L. López-Jurado (2006). Unusual extension of Western Mediterranean deep water formation during winter 2005. *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla.
- Salat, J and A. Sabatés (2017). Winter 2017 in the NW mediterranean. Was it just mild or clearly anomalous? *10th HyMeX Workshop*. Barcelona.
- Schroeder K., Gasparini G.P., Tangherlini M. and Astraldi M. (2006). Deep and intermediate water in the western Mediterranean under the influence of the Eastern Mediterranean Transient. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L21607. doi: 10.1029/2006GL027121.
- Schroeder, K. *et al.* (2016). Abrupt climate shift in the Western Mediterranean Sea. *Sci. Rep.*, 6, 23009. doi: 10.1038/srep23009.
- Somavilla, R., C. González-Pola, C. Rodriguez, S.A. Josey, R.F. Sánchez, and A. Lavín (2009), Large changes in the hydrographic structure of the Bay of Biscay after the extreme mixing of winter 2005, *J. Geophys. Res.*, 114, C01001.
- Theocharis A., Klein B., Nittis K. and Roether W. (2002). Evolution and Status of the Eastern Mediterranean Transient (1997-1999). *J. Marine Syst.*, 33-34: 91-116.
- Vargas-Yáñez M., M.C. García-Martínez, F. Moya, R. Balbin, J.L. López-Jurado, M. Serra, P. Zunino, J. Pascual, J. Salat (2017). Updating temperature and salinity mean values and trends in the Western Mediterranean: RADMED project. *Progress in Oceanography*, 157, 27-46.