Presentación

Carta del director del Instituto Español de Oceanografía

"El IEO se dedica al estudio multidisciplinar del mar y especialmente a los problemas derivados de la explotación de los recursos y de la contaminación. En este sentido, el Instituto procura orientar sus investigaciones de tal forma que sus resultados sirvan de apoyo a la función de asesoramiento, y para dar respuestas concretas a la administración pública con referencia al mar, a su utilización racional y a su protección".

Bajo este compromiso con las ciencias marinas, la administración y la sociedad en general, el Instituto Español de Oceanografía ha de vigilar y monitorizar los océanos, ayudando con sus sistemas de observación, y a través del estudio de la información obtenida, a un mejor entendimiento del funcionamiento de nuestros mares, al conocimiento de su estado de salud y a la vigilancia permanente de cuantos cambios naturales o antropogénicos pudieran acaecer en ellos.

El cambio climático puede suponer una amenaza para los océanos y sus ecosistemas, y el IEO tiene el firme propósito de abordar el análisis de este problema, fomentando la colaboración con otras instituciones. Este estudio debe servir tanto para aumentar nuestro conocimiento científico sobre el mar y su papel en el sistema climático planetario como para el asesoramiento a la administración y, de forma más general, a la divulgación científica en nuestra sociedad.

Con este propósito se presenta este informe sobre el cambio climático en el Mediterráneo, para el que se ha realizado un riguroso análisis científico de la información recogida por el propio IEO a través de sus sistemas de observación marinos desde hace más de seis décadas. Además, se ha contado con la colaboración de otras instituciones como el Instituto de Ciencias del Mar (ICM/CSIC), Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA/CSIC), Instituto Nacional de Meteorología (INM), Puertos del Estado (PE), Universidad de las Islas Baleares (UIB) y Universidad de Málaga (UMA). Estas instituciones han participado tanto aportando información recogida por sus propios sistemas de observación como participando en el análisis de dicha información, y proporcionando material de diversa índole que ha contribuido a completar el presente informe.

Es la intención del IEO seguir avanzando en los distintos aspectos de este problema desde una perspectiva científica y rigurosa y publicando en el futuro próximo otras aportaciones como ésta que sirvan a la gestión de nuestro medio ambiente marino.

Enrique Tortosa Martorell
Director General del Instituto Español de Oceanografía

Principales resultados

El Mediterráneo es una zona particularmente vulnerable a la actividad humana. La concentración de la población en las zonas costeras, la explotación pesquera, los impactos producidos por los sectores agrícola, industrial, turístico y el tráfico marítimo, son algunos ejemplos de las actividades que, potencialmente, pueden influir sobre nuestro medio marino.

Además de estos impactos, el cambio climático supone una amenaza más que puede alterar de forma importante las condiciones físicas y químicas del Mediterráneo, y consecuentemente las condiciones ambientales en las que se desarrollan los seres vivos que lo habitan. Los ecosistemas marinos, los recursos vivos explotables o la misma morfología de nuestra costa pueden sufrir las consecuencias de un cambio global del clima del planeta.

En este informe se analizan datos oceanográficos y atmosféricos desde 1948. A partir de esta fecha se han alternado dos periodos claramente diferenciados. Desde 1948 hasta mediados de los años 70 se produjo un descenso de la temperatura del aire y la temperatura superficial del mar. Desde mediados de los 70 hasta la actualidad ha cambiado esta tendencia con un fuerte ascenso de las temperaturas. El aumento medio de la temperatura superficial del mar para el periodo 1948-2005 varía entre 0,12 ºC y 0,5 ºC a lo largo del litoral mediterráneo.

En profundidades intermedias (200 m a 600 m) la temperatura aumentó desde 1948 hasta 2000 entre 0,05 ºC y 0,2 ºC, y la salinidad se incrementó entre 0,03 y 0,09. En las capas profundas (1000 m a 2000 m) el aumento de temperatura osciló entre 0,03 ºC y 0,1 ºC y el de salinidad entre 0,05 y 0,06.

El aumento de temperatura de las capas intermedias y profundas puede parecer pequeño, pero hay que tener en cuenta el alto calor específico del mar, por lo que incrementos pequeños de temperatura requieren que el mar absorba enormes cantidades de calor. El aumento de salinidad refleja la disminución de las precipitaciones en el Mediterráneo, así como la disminución del aporte de los ríos debido a las obras hidráulicas llevadas a cabo en sus cauces.

El nivel del mar disminuyó en el Mediterráneo desde los años 50 hasta mediados de los 90. Ello fue debido a un anómalo ascenso de la presión atmosférica. El descenso de ésta desde mediados de los años 90 y la aceleración del aumento de las temperaturas en la misma década coinciden con un acusado aumento del nivel del mar de entre 2.5 mm/año y 10 mm/año. Los datos disponibles sugieren que, además del calentamiento de las aguas, otros factores como el aumento de la cantidad de masa de agua pudieran ser responsables de esta aceleración del ritmo de ascenso del nivel del mar.

Resumen ejecutivo para gestores y responsables de políticas medioambientales

La alteración del clima de la Tierra se refleja en el océano global. Pueden producirse cambios importantes (y de hecho ya se aprecian en cierta medida) en el calor almacenado por los mares, en el nivel del mar a escala planetaria, en la intensidad y dirección de los sistemas de circulación oceánica, la intensidad y posición de los principales sistemas de afloramiento, etc. Todos estos elementos relacionados con el mar como componente del sistema climático terrestre han de ser monitorizados por los sistemas de observación globales de los océanos, los cuales, a su vez, han de integrarse en los sistemas de observación global de la Tierra.

Junto con los sistemas de observación de gran escala se deben desarrollar sistemas de observación de mayor resolución para conocer los impactos que pudieran producirse sobre las zonas litorales, bien debidos a las alteraciones del clima o bien debidos a otras alteraciones del medio marino derivadas de la actividad humana. Los así llamados sistemas de observación costeros deben tener una mayor resolución espacial así como un carácter multidisciplinar para conocer en todo momento las alteraciones ambientales que pudieran producirse. Estos sistemas costeros deben entenderse de una forma amplia e incluir las zonas de talud continental e incluso mar abierto en algunos casos para contemplar las interacciones entre plataforma y mar abierto. En cuanto a su extensión geográfica deben tomar en consideración las estructuras oceanográficas y los principales sistemas de circulación para poder entender las influencias que unas zonas del mar ejercen sobre otras.

El Mediterráneo es una zona idónea para el estudio de los efectos del cambio climático. Con frecuencia se ha descrito como un laboratorio natural, ya que, a pesar de sus pequeñas dimensiones si se compara con los grandes océanos, en él se desarrollan la mayor parte de los procesos que son propios de la circulación global de los océanos, teniendo una circulación termohalina propia derivada de su déficit hídrico, la pérdida neta de calor y de flotabilidad y los procesos de formación de aguas profundas.

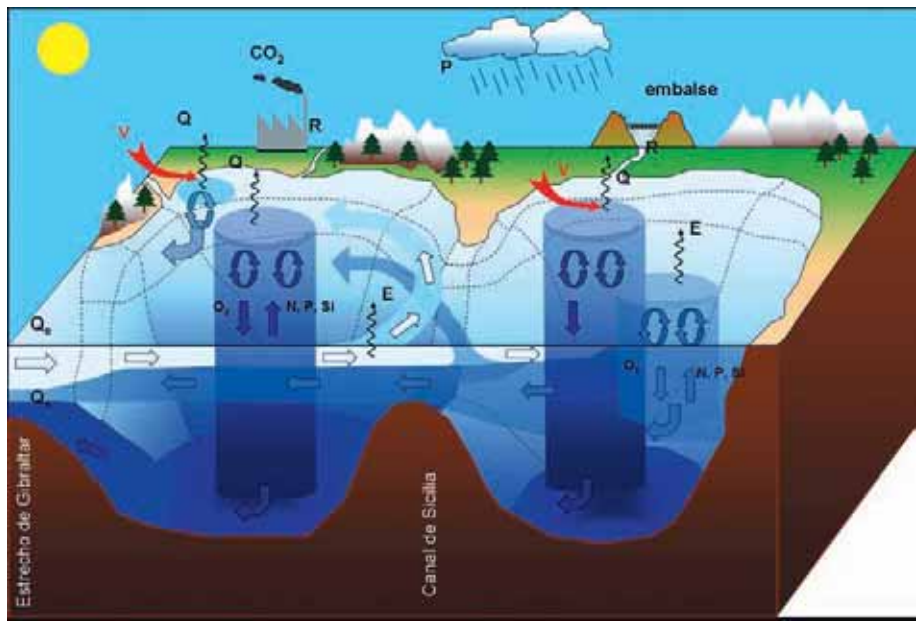

Figura 1. Esquema de funcionamiento del Mediterráneo donde se muestran los principales procesos oceanográficos susceptibles de verse alterados por distintas actuaciones del hombre.

La figura 1 esquematiza algunos rasgos oceanográficos del Mediterráneo que permiten considerarlo como un océano en miniatura y, por tanto, un laboratorio natural para el estudio del cambio climático. Uno de los motores que impiden la circulación del Mediterráneo es la pérdida neta de calor, que se representa en la figura 1 como un flujo de calor "Q" desde el mar hacia la atmósfera. El otro es el déficit hídrico debido a que la evaporación, indicada en la figura como "E", supera a los aportes de ríos "R" y precipitaciones "P".

Las grandes "chimeneas" representadas en la figura 1 tratan de esquematizar los procesos de formación de aguas profundas que suceden de forma anual en el Mediterráneo. La pérdida de calor y la evaporación neta producen aguas frías y muy saladas que, por tanto, tienen mayor densidad que las aguas superficiales. Debido a esto se hunden y extienden por el fondo del Mediterráneo para finalmente salir a través del estrecho de Gibraltar. Consecuentemente, las aguas

superficiales del Atlántico entran a través del estrecho para compensar esta salida de agua del Mediterráneo y el déficit originado por la evaporación neta.

Todos estos elementos podrían ser alterados debido tanto al efecto del cambio climático, que afectaría de forma notable a la región Mediterránea, como por las actividades humanas, como la construcción de embalses y el empleo del agua para usos agrícolas, consumo de las poblaciones, etc.

En el Mediterráneo Occidental se pueden distinguir tres grandes capas: La capa superficial, comprendida entre la superficie y los 150 o 200 m de profundidad formada por Agua Atlántica (AA) que entra en el Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar. Las aguas intermedias, entre los 200 y 600 m de profundidad. La mayor parte de esta capa de agua está formada por la llamada Agua Levantina Intermedia (ALI). Estas aguas se forman, es decir, adquieren su temperatura y salinidad características, en el Mediterráneo Oriental, y tras hundirse hasta su profundidad de equilibrio se desplazan hasta el Mediterráneo Occidental para salir finalmente a través del estrecho de Gibraltar. Son las aguas de mayor salinidad que se encuentran en el Mediterráneo Occidental. Un porcentaje menor de esta capa intermedia está formado por el Agua Occidental Intermedia (AOI). Son aguas muy frías pero menos saladas que el ALI, formada durante inviernos severos en la plataforma continental del golfo de León y mar Catalán. Finalmente, las aguas que ocupan el fondo del Mediterráneo Occidental son el Agua Profunda del Mediterráneo Occidental (APMO). Son aguas muy frías y saladas que adquieren su alta densidad primero al mezclarse el AA superficial con el ALI, elevándose así su salinidad. Posteriormente, la acción de los vientos fríos y secos de origen continental que soplan en invierno en el golfo de León enfría las aguas hasta elevar considerablemente su densidad y hundirse hasta el fondo del mar. Esta masa de agua sale junto con el ALI a través del estrecho de Gibraltar.

Las observaciones realizadas desde mediados del siglo XX en el marco de distintos proyectos oceanográficos y recopilados en la base de datos MEDAR/MEDATLAS [2002] permiten estudiar cuál ha sido la evolución de las distintas masas de agua. En la figura 2 se muestra la serie temporal de anomalías de salinidad para dos profundidades correspondientes a la posición que ocupa el ALI, y en la figura 3 se muestran las anomalías de salinidad correspondientes a aguas profundas.

Tanto el ALI como el APMO han aumentado su salinidad desde 1943, e incluso antes si se consideran distintos trabajos publicados anteriormente. Este aumento de salinidad parece ser el resultado de un aumento de la evaporación neta producto de una combinación de fac-

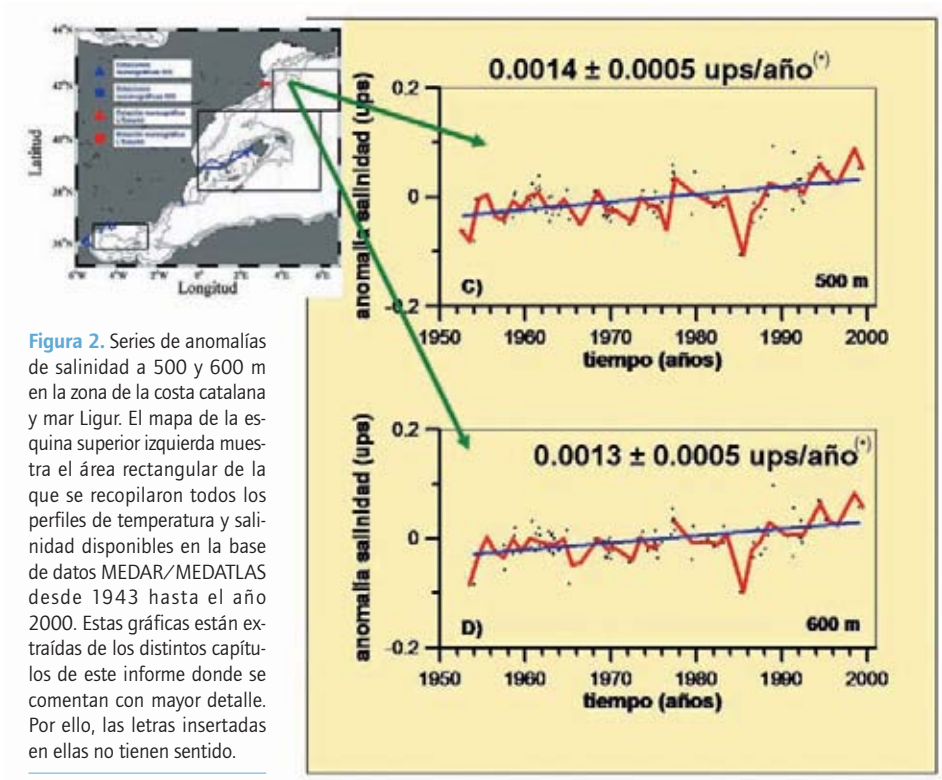

Figura 2. Series de anomalías de salinidad a 500 y 600 m en la zona de la costa catalana y mar Ligur. El mapa de la esquina superior izquierda muestra el área rectangular de la que se recopilaron todos los perfiles de temperatura y salinidad disponibles en la base de datos MEDAR/MEDATLAS desde 1943 hasta el año 2000. Estas gráficas están extraídas de los distintos capítulos de este informe donde se comentan con mayor detalle. Por ello, las letras insertadas en ellas no tienen sentido.

tores. Por una parte un aumento de la evaporación y descenso de las precipitaciones, y por otra, un descenso de los aportes de agua dulce de los ríos que vierten tanto en la cuenca oriental, como es el caso del Nilo o los ríos que desembocan al mar Negro, como en la cuenca occidental, como ha sido el caso del Ebro.

(*) La salinidad se mide en la escala práctica de salinidad, que aproximadamente es equivalente al concepto tradicional de gramos de sales disueltas por mil gramos de disolución. No obstante, en la nueva escala la salinidad se expresa como un cociente de conductividades eléctricas, y como tal cociente es adimensional, no siendo correcto el término ups, aunque lo mantendremos por claridad.

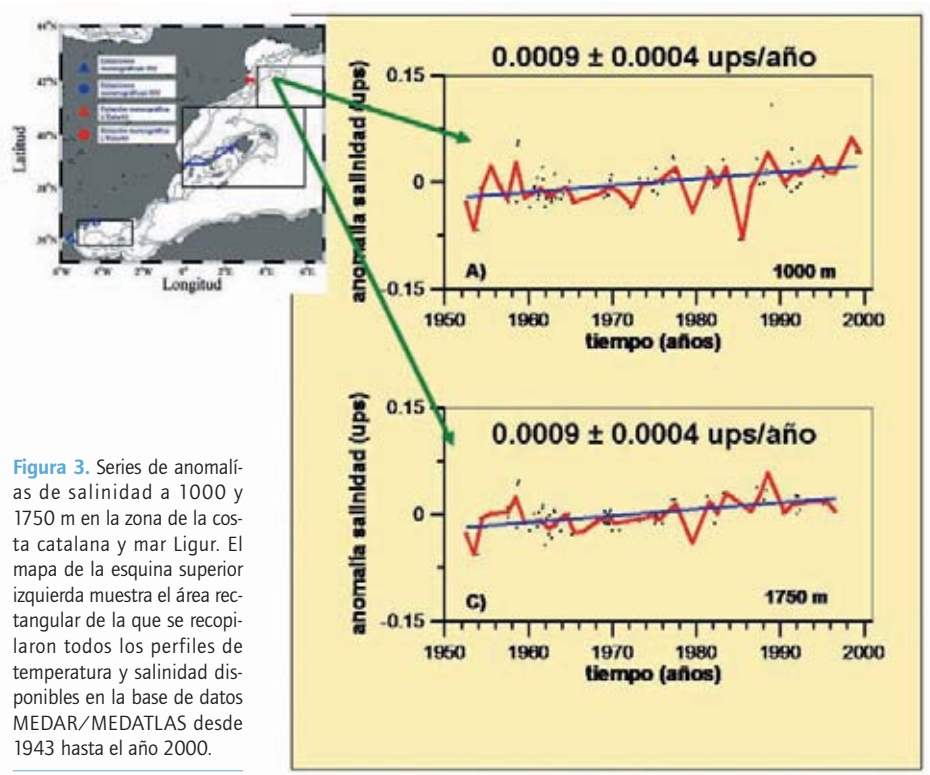

Figura 3. Series de anomalías de salinidad a 1000 y 1750 m en la zona de la costa catalana y mar Ligur. El mapa de la esquina superior izquierda muestra el área rectangular de la que se recopilaron todos los perfiles de temperatura y salinidad disponibles en la base de datos MEDAR/MEDATLAS desde 1943 hasta el año 2000.

Además de aumentar su salinidad, las aguas intermedias y profundas han aumentado su temperatura. Las figuras 4 y 5 muestran el aumento medio de la temperatura y salinidad en profundidades correspondientes a las aguas intermedias y profundas respectivamente en la zona del mar Catalán/mar Ligur.

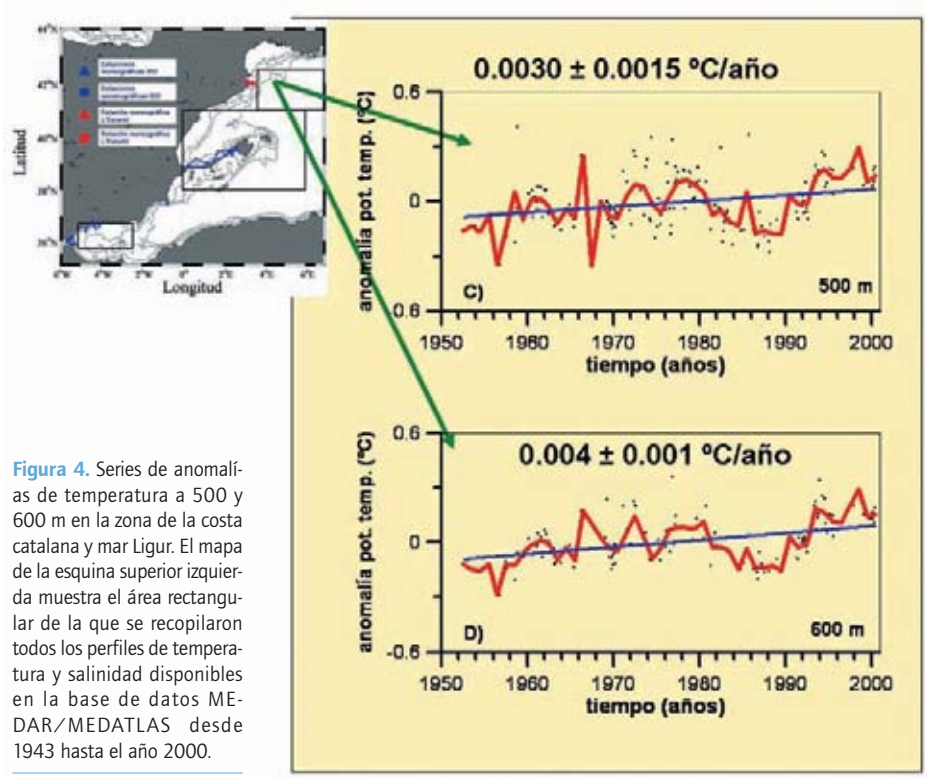

Figura 4. Series de anomalías de temperatura a 500 y 600 m en la zona de la costa catalana y mar Ligur. El mapa de la esquina superior izquierda muestra el área rectangular de la que se recopilaron todos los perfiles de temperatura y salinidad disponibles en la base de datos MEDAR/MEDATLAS desde 1943 hasta el año 2000.

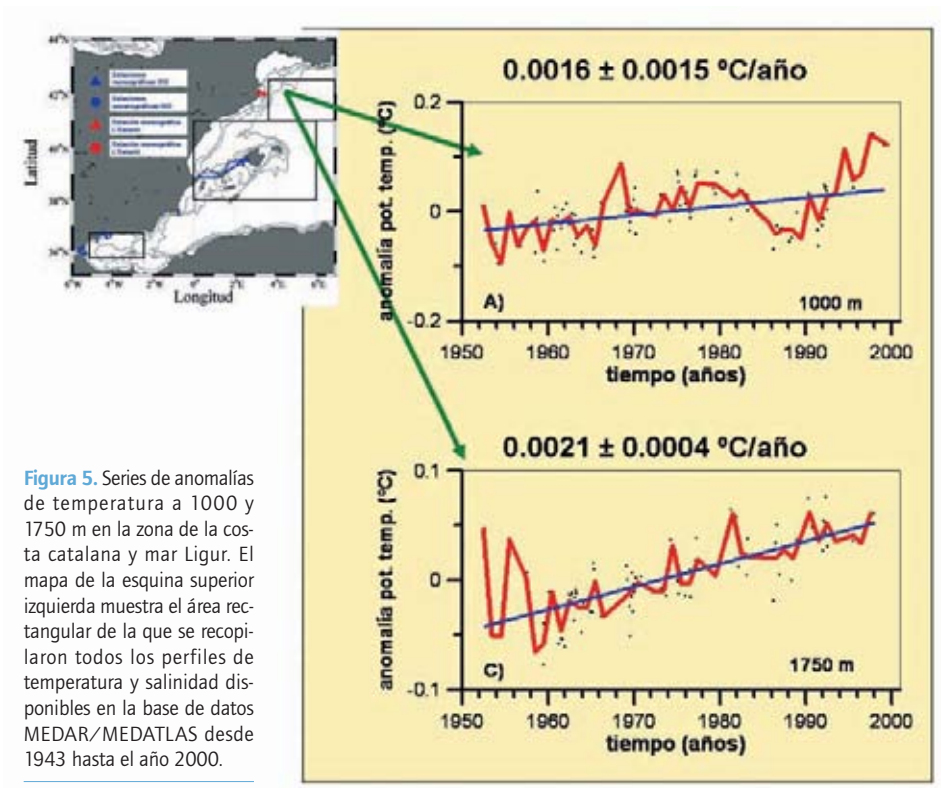

Figura 5. Series de anomalías de temperatura a 1000 y 1750 m en la zona de la costa catalana y mar Ligur. El mapa de la esquina superior izquierda muestra el área rectangular de la que se recopilaron todos los perfiles de temperatura y salinidad disponibles en la base de datos MEDAR/MEDATLAS desde 1943 hasta el año 2000.

Los cambios mostrados en la zona más septentrional de la costa mediterránea española para las aguas intermedias y profundas han sido similares en las otras zonas que cubren el Mediterráneo Occidental. Las figuras 6 y 7 muestran los cambios medios o tendencias de temperatura y salinidad en las zonas más septentrionales y meridionales analizadas en este informe. Aunque no se muestran los resultados en este resumen ejecutivo, hay que señalar qué cambios parecidos se han detectado en la zona del mar Balear y área de levante (capítulo 5 de este informe).

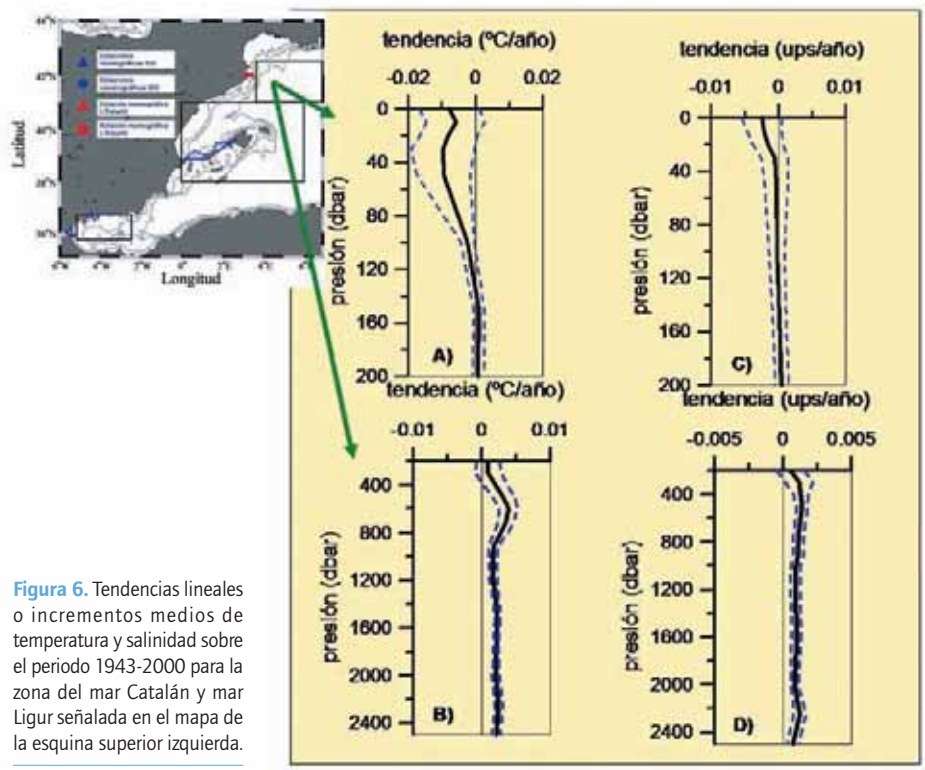

Figura 6. Tendencias lineales o incrementos medios de temperatura y salinidad sobre el periodo 1943-2000 para la zona del mar Catalán y mar Ligur señalada en el mapa de la esquina superior izquierda.

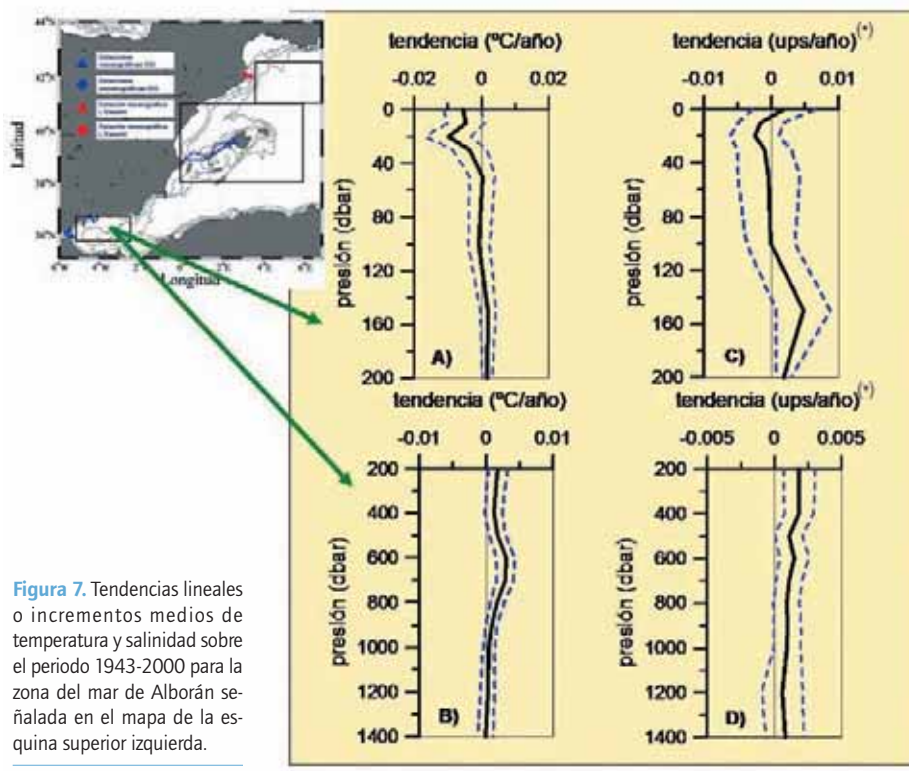

Figura 7. Tendencias lineales o incrementos medios de temperatura y salinidad sobre el periodo 1943-2000 para la zona del mar de Alborán señalada en el mapa de la esquina superior izquierda.

Las aguas mediterráneas que vierten por Gibraltar se extienden por el Atlántico Norte a una profundidad de entre 1000 y 1200 m. Se ha detectado un aumento de la salinidad y temperatura de las aguas que ocupan esta profundidad en el Atlántico Nororiental, e incluso en las aguas del golfo de Vizcaya, donde este aumento ha sido de 0,023 ºC/año y 0,005 ups/año(*) durante la década de los 90 e inicios del siglo XXI. Estos valores son similares a los cambios experimentados por las aguas del mar Mediterráneo. Las aguas mediterráneas se mezclan con las

(*) Ver nota en la página 17.

aguas atlánticas en su progresión hacia el norte, de tal forma que estos cambios corresponden a aguas con un porcentaje muy bajo del agua original que salió a través del estrecho de Gibraltar. Por ello, es de esperar que cambios similares se hayan producido en las aguas atlánticas que se han mezclado con las mediterráneas hasta ser detectadas en el golfo de Vizcaya.

Las capas superficiales del mar Mediterráneo han tenido desde 1948, fecha desde la que se han recopilado los datos meteorológicos y oceanográficos del "Nacional Centre for Environmental Prediction (NCEP)", dos periodos claramente diferenciados. Un primer periodo de descenso de temperaturas superficiales del mar, hasta mediados o finales de los años 70, y un segundo periodo de ascenso rápido de las temperaturas (figura 8). Este comportamiento de las temperaturas superficiales es similar al experimentado por la temperatura del aire, y refleja simplemente el comportamiento a escala planetaria de las temperaturas superficiales tanto del mar como del aire. La evolución a nivel global de estas variables muestra un incremento de 0,071 ± 0,029 ºC/década para la temperatura del mar entre 1901 y 2005 [Trenberth et al., 2007], si bien los principales aumentos de temperatura se han producido entre el inicio del siglo y 1945, y desde finales de los 70 al 2005.

Si se exceptúan las estaciones mareográficas y la estación oceanográfica de L'Estartit, la mayor parte de los sistemas españoles de monitorización del Mediterráneo se han iniciado en la década de los 90. Todos ellos han iniciado sus registros dentro de este periodo de fuerte ascenso global de las temperaturas.

Las tendencias calculadas sobre periodos cortos de tiempo muestran incrementos o decrementos de la temperatura y salinidad muy acusados. Las tendencias sobre periodos largos como los mostrados en la figura 8 para Baleares y mar Ligur muestran que el ascenso de las temperaturas compensa y aún supera el descenso previo, dando un aumento medio de la temperatura superficial del mediterráneo entre 0,002 y 0,009 ºC/año.

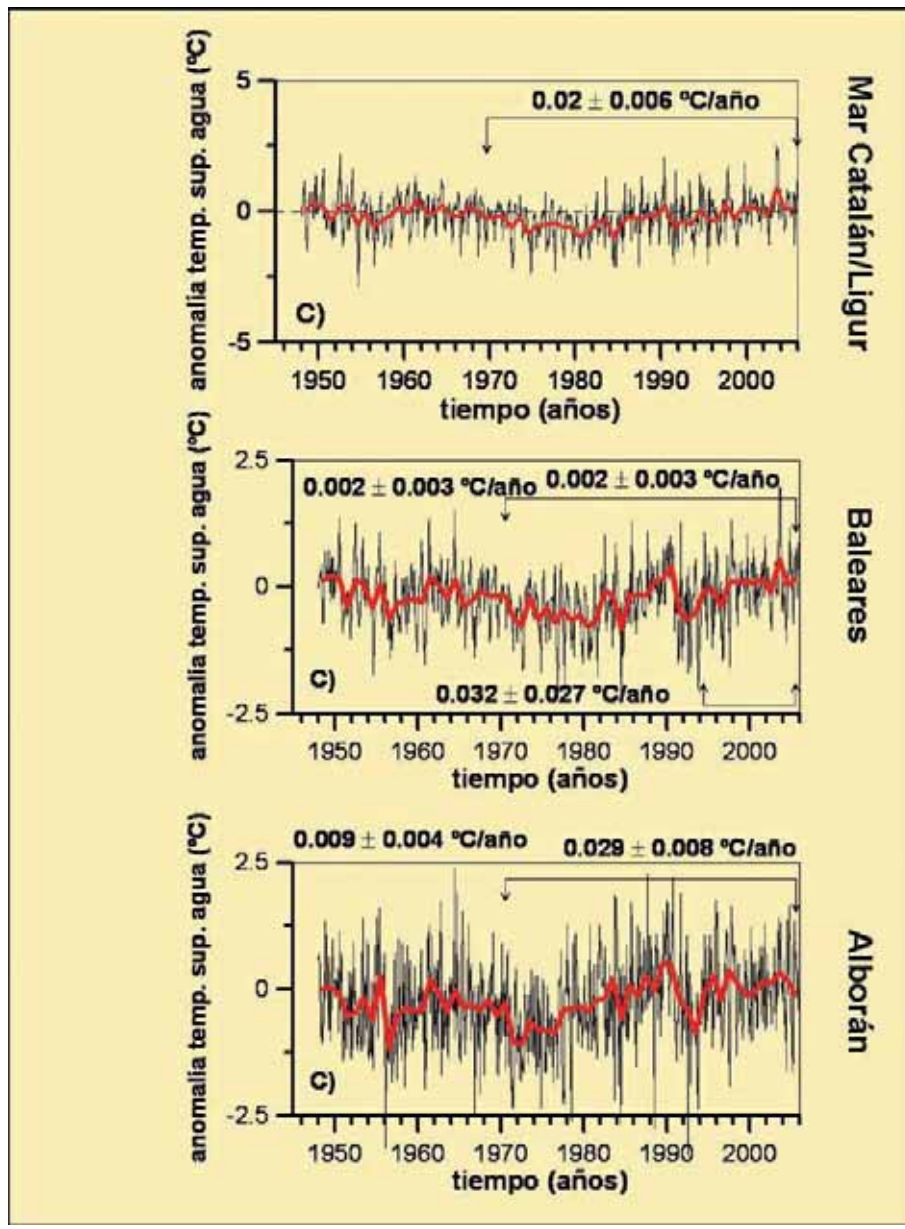

Figura 8. Anomalías de temperatura superficial del agua en mar Catalán/Ligur, Baleares/levante y Alborán. Datos del NCEP.

En la estación oceanográfica de L'Estartit se ha producido un aumento de la temperatura del agua de unos 0,025 ºC/año. Este valor coincide con el observado a partir de los datos del Reanálisis del NCEP, y por tanto reflejan el periodo de fuerte ascenso de las temperaturas que a escala global se ha registrado desde mediados de los años 70. En la plataforma continental del mar de Alborán (proyecto Ecomálaga) se han observado las mismas tendencias hasta el año 1998, lo que indica que desde 1992 a 1998 se han registrado temperaturas crecientes asociadas también a este periodo de calentamiento (figura 9). Sin embargo no está aún claro si esta fase de calentamiento va a continuar al mismo ritmo, pues desde 1998 se observa un descenso de las temperaturas y del calor absorbido por la columna de agua. A pesar de que los años 1998 y 2005 se encuentran entre los más cálidos a escala global desde 1850, se han observado fuertes oscilaciones en las propiedades oceanográficas del Mediterráneo, pues en el invierno 2004/2005 se produjo una anomalía fría en el Mediterráneo Noroccidental tan intensa que se registraron temperaturas de las aguas profundas similares a las obtenidas a principios de siglo XX, antes de que el efecto del cambio climático sobre las aguas profundas del Mediterráneo hubiese sido detectado. No está claro aún qué papel pueden tener estos eventos extremos en las tendencias generales del Mediterráneo.

El nivel del mar no varió en las costas de Málaga desde 1943 hasta principios de los años 90. En otras localizaciones del Mediterráneo se produjo incluso un descenso del nivel del mar. Esto ha sido debido a un aumento de la presión atmosférica, ligado a una fase creciente de la Oscilación Noratlántica. El aumento de salinidad de la aguas intermedias y profundas produjo un aumento de la densidad y por tanto un descenso del nivel estérico del mar, es decir, aquel que está asociado a cambios del volumen del agua. Este factor junto con el mencionado aumento de la presión atmosférica fueron los responsables del anómalo comportamiento del nivel del mar en comparación con el océano global.

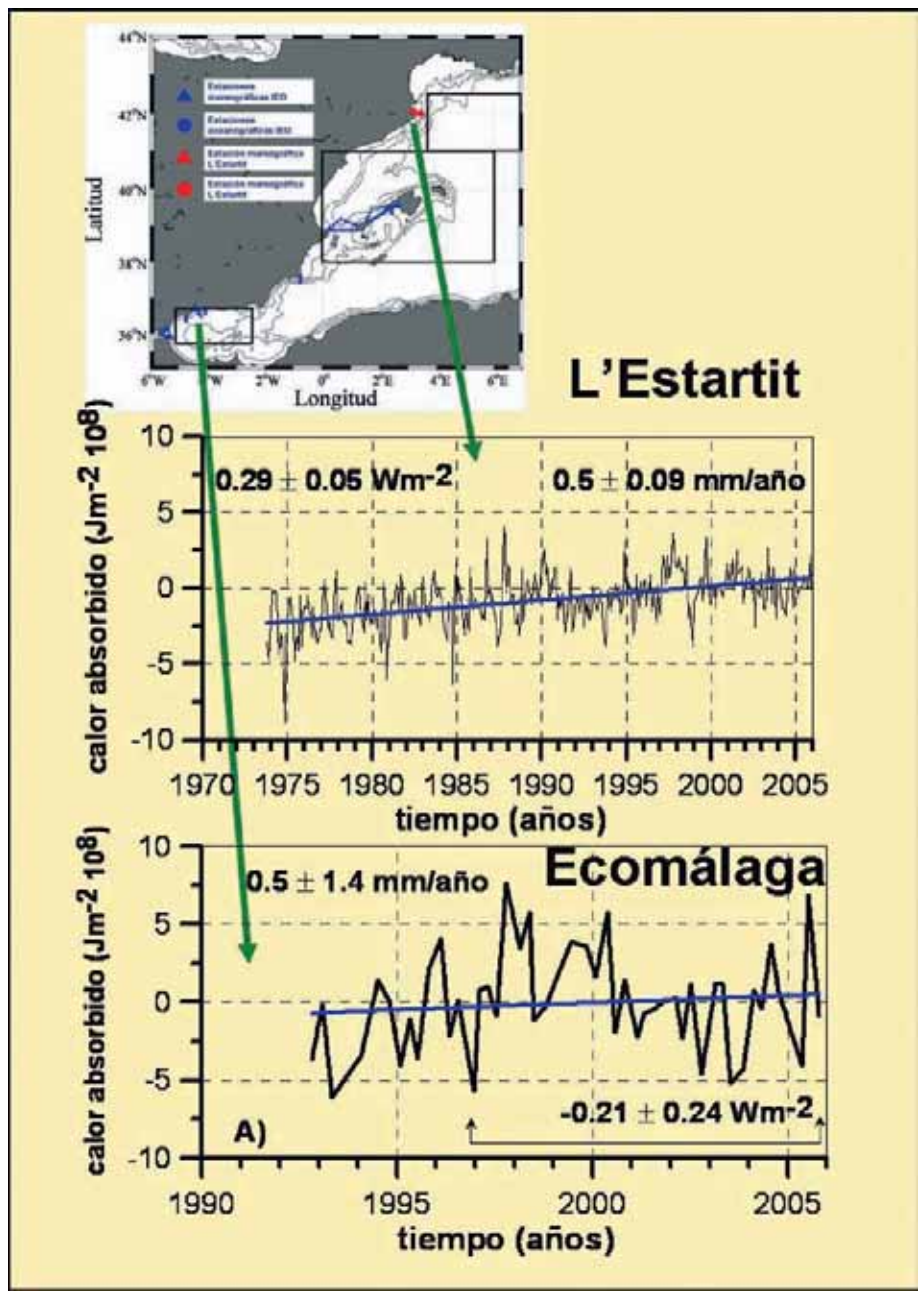

Figura 9. Calor absorbido en L'Estartit desde 1973 a 2005. Se ha incluido el aumento correspondiente del nivel termostérico, es decir, por dilatación térmica de la columna de agua de 0 a 80 m. La figura inferior es igual pero para el caso de Ecomálaga, en el mar de Alborán. No se ha incluido la tendencia del calor absorbido para todo el periodo 1992-2005 por no ser significativa. Sí se ha hecho para el periodo 1997-2005 en el que se aprecia un descenso del calor almacenado en la columna de agua. A pesar de no ser significativo, se incluye la variación del nivel termostérico sobre el periodo total.

Desde principios de los 90 ha habido un fuerte incremento de las temperaturas y un cambio de sentido en el forzamiento atmosférico. El nivel del mar tanto en Málaga como en L'Estartit mostraron un fuerte ascenso que no es explicado por los dos factores antes citados. No está aún claro el papel que han podido tener en este aumento del nivel del mar otros factores como el aumento de la masa total de agua, presumiblemente causada por el deshielo de glaciares y capas de hielo, y cambios en la circulación del Mediterráneo.

Tras el máximo de calor absorbido alcanzado en 1998 se aprecia, como ya se ha comentado, un descenso de las temperaturas. En el caso de Baleares, este descenso, así como un aumento de la salinidad originaron un fuerte descenso del nivel del mar.

La disponibilidad de observaciones rutinarias procedentes de los sistemas de observación permanentes permiten detectar estos cambios en la temperatura, salinidad, nivel del mar, etc. de las aguas que bañan nuestras costas, pudiéndose apreciar anomalías o comportamientos diferenciados respecto del comportamiento global estimado a partir de sistemas de observación globales de más baja resolución espacial.