

# PRINCIPALES TENDENCIAS CLIMATOLÓGICAS EN EL MEDITERRÁNEO NOROCCIDENTAL, A PARTIR DE MÁS DE 30 AÑOS DE OBSERVACIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA COSTA CATALANA

Jordi SALAT y Josep PASCUAL  
Institut de Ciències del Mar de Barcelona (CSIC)

## RESUMEN

En esta comunicación se presentan las tendencias de temperatura del aire y del agua del mar observadas a lo largo de los últimos 32 años en una estación costera situada en el Mediterráneo Occidental, sobre un fondo de 90 m. Asimismo se presenta la evolución de la variación interanual del nivel del mar en los últimos 15 años. Los resultados muestran una tendencia general al aumento de temperatura, especialmente en primavera, lo que supone un avance de las condiciones marinas estivales. Asimismo, la tendencia de subida del nivel del mar puede relacionarse con la tendencia de incremento de calor contenido en toda la masa de agua del Mediterráneo Occidental.

**Palabras clave:** Tendencias climatológicas, Temperatura del agua de mar, nivel del mar, Ciclo estacional, Mediterráneo Occidental.

## ABSTRACT

This text presents the air and sea temperature trends observed along the last 32 years in a coastal station located in the Western Mediterranean, over 90 m depth. The evolution of the interannual variability of the sea level during the last 15 years is also presented. The main results show an increase of temperature, especially during the spring period which implies an advance of the summer conditions at sea. The increasing trend observed in sea level can be related with the general trend of increasing heat content in the whole Western Mediterranean water mass.

**Key words:** Climatological trends, Sea temperature, Sea level, Seasonal cycle, Western Mediterranean.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Situación y características

L'Estartit es una población situada en la Costa Brava, al sur del Golfo de Roses (Fig. 1), cerca de la desembocadura del río Ter. En esta localidad, J. Pascual empezó a efectuar medidas meteorológicas en 1969 y, desde agosto de 1973, hasta el día de hoy, ha muestreado la columna de agua en una estación situada a 2,5 millas de la costa, sobre un fondo de 90 m. Las profundidades de muestreo de temperatura en esta estación son 0, 5, 20, 35, 50, 65 y 80 m, y la periodicidad es aproximadamente semanal (50-60 veces por año). Los datos de temperatura se han complementado con observaciones visuales de transparencia del agua, corriente,

nubosidad, presencia de objetos flotantes, aves, etc. Además, desde 1990 se ha instalado un registrador del nivel del mar en el puerto de l'Estartit.

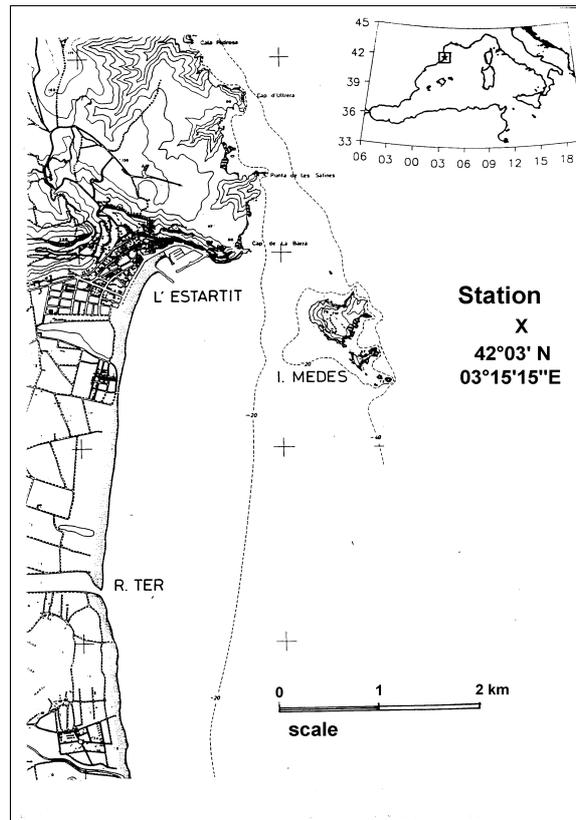


Fig. 1: Mapa de la estación oceanográfica de l'Estartit

La Tabla 1 recoge los parámetros observados, frecuencia de muestreo y fecha de inicio. Toda esta información junto a los datos meteorológicos y descargas del Ter, ha permitido un seguimiento climatológico sin precedentes en toda la región mediterránea. Todos los datos se han recogido de acuerdo con los estándares para datos meteorológicos y oceanográficos, y el mareógrafo está georeferenciado.

### 1.2 Climatología y ciclo anual

La zona costera de l'Estartit, que incluye las Illes Medes, está protegida desde 1990. Su climatología es típicamente mediterránea y se caracteriza por la dominancia de los vientos fuertes de componente N (Tramuntana y Mestral), más frecuentes en invierno. El ciclo anual de temperatura del aire, a nivel del mar, muestra unos valores de temperatura media comprendidos entre 7 y 12°C, en el periodo diciembre-marzo, y entre 20 y 26°C, en junio-septiembre. A lo largo del ciclo estacional (Fig. 2), el mar cede calor a la atmósfera desde mediados de verano a inicios de primavera y el proceso se invierte durante el periodo primaveral. Por otra parte, dentro de la columna de agua las capas más superficiales van cediendo calor a las más profundas, por lo que, en general la columna de agua alcanza el máximo contenido en calor en la época otoñal y el mínimo a finales de invierno, generalmente en febrero. En el mar, pues, aunque la temperatura mínima en superficie suele registrarse en febrero, pero los valores medios de temperatura superficial entre enero y marzo se mantienen

entre 11,5 y 13 °C. Los valores máximos de temperatura de superficie se alcanzan en agosto y las medias entre julio y septiembre están comprendidas en el intervalo de 20 a 24,5°C. En el otro extremo del rango de profundidades muestreado, a 80 m, los valores de temperatura se mantienen a lo largo de todo el año alrededor de 13°C salvo a mediados de otoño, octubre-noviembre, que puede alcanzar unos valores medios de alrededor de 16°C, ya que es en esta época cuando el calor transmitido desde la superficie alcanza estos niveles.

Parámetro	situación	Inicio serie	frecuencia
Precipitación	42°03'N 3°12'E a 0 m	1969	diario
Pres. Atmosférica	42°03'N 3°12'E a 0 m	1970	3/día
Nubosidad relativa	42°03'N 3°12'E a 0 m	1970	diario
Temp. Aire	42°03'N 3°12'E a 0 m	1970	continuo
Temp. Agua del mar	42°03'N 3°15'15''E a: 0, 5, 20, 35, 50, 65 y 80 m de prof.	Agosto 1973	50-60/año (~semanal)
Evaporación potencial	42°03'N 3°12'E a 0 m	1976	diario
Humedad relativa	42°03'N 3°12'E a 0 m	1982	diario
Viento	42°03'35''N 3°11'E a 228 m	1988	continuo
Evaporación potencial	42°03'35''N 3°11'E a 228 m	1988	continuo
Temp. Aire	42°03'35''N 3°11'E a 228 m	1988	continuo
Precipitación	42°03'35''N 3°11'E a 228 m	1988	continuo
Nivel del Mar	42°03'N 3°12'E a 0 m	1990	continuo
Descarga del Ter	a 6 km de la desemboc.	1993	mensual
Temp. agua del Ter	a 6 km de la desemboc.	1993	mensual
Temp. agua varias fuentes	varias posiciones	1993	mensual
perfiles de CTD	varias posiciones (máx a 7 millas del puerto)	1995	mensual

Tabla 1. CUADRO RESUMEN DE: PARÁMETROS OBSERVADOS, SITUACIÓN, FECHA DE INICIO DE LAS SERIES Y FRECUENCIA

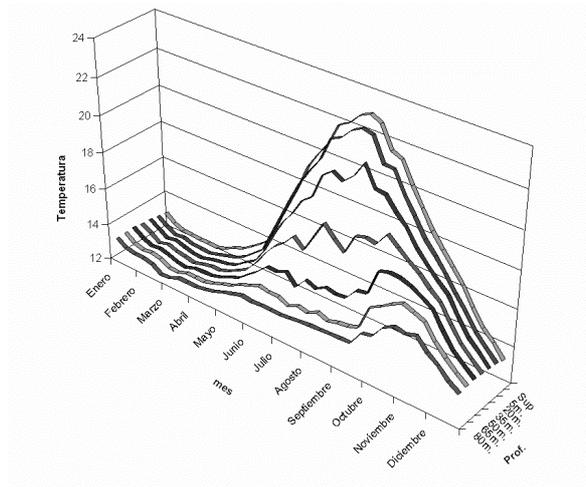


Fig. 2: Ciclo anual medio de temperatura a los distintos niveles de profundidad

A lo largo del ciclo estacional, pues, la columna de agua pasa por dos periodos: uno de homogeneidad térmica (enero-marzo) y otro de estratificación (resto del año) en el que se presenta un gradiente vertical de temperatura que denominamos termoclina. Durante la fase primaveral (abril-junio), dominada por la absorción de calor sensible, el gradiente térmico se hace cada vez más alto y su posición media va hundiéndose hasta alcanzar unos 25-40 m. A partir del verano, el gradiente empieza a debilitarse al tiempo que se hunde, hasta que a finales de diciembre prácticamente ha desaparecido. Durante esta época la capa superficial por encima de la termoclina es muy homogénea debido a los procesos de convección que se dan en ella, al enfriarse la superficie por cesión de calor sensible y latente a la atmósfera. En este sentido, cabe señalar que los temporales de viento intervienen en acelerar el proceso de erosión de la estratificación, y la subsiguiente etapa de mezcla vertical se va introduciendo a saltos.

La densidad del agua de mar depende no sólo de la temperatura sino además de la salinidad. Aunque en la zona no se presentan grandes cambios y se mantiene, en líneas generales alrededor de 38<sup>(1)</sup>, la salinidad del agua superficial puede disminuir por fuertes lluvias, descargas locales de agua dulce, procedentes del cercano río Ter (hasta 30 m<sup>3</sup>/s, en condiciones normales) y por los aportes del Ródano (media anual de 1860 m<sup>3</sup>/s), que desemboca en el otro extremo del Golfo de León. Aunque la desembocadura de este último esté a más de 150 km de distancia en línea recta, su influencia hasta unos 25 m de profundidad (salinidad por debajo de 37,5), se deja notar especialmente a finales de primavera, cuando se registran los máximos anuales de caudal y hay una importante estratificación superficial en el mar. En invierno, la disminución de salinidad superficial tiende a impedir la convección, por lo que, especialmente en esta época favorece inversiones térmicas en superficie. Por otra parte, la salinidad superficial aumenta durante los episodios de vientos fuertes, especialmente los dominantes de componente N, que son muy secos y favorecen la evaporación. En esta situación el aumento de salinidad superficial refuerza la convección y contribuye así a la etapa invernal de homogeneidad vertical.

## 2. EVOLUCIÓN DE TEMPERATURAS A LO LARGO DEL PERIODO 1974-2005

### 2.1 Variabilidad interanual

Durante el periodo de 32 años, 1974-2005, ha habido una importante variabilidad interanual, tanto en la temperatura del aire como en la del mar (Figs. 3, 4 y 5). Así, comparando los valores extremos de las medias mensuales de la temperatura del aire, se observan diferencias de 6°C, tanto en el valor máximo anual como en el mínimo. Estas mismas diferencias en los valores de temperatura de la superficie del mar son de 4 y 2°C, en los valores máximo y mínimo respectivamente, y del mismo orden a 80 m de profundidad. Este último dato de variabilidad resulta especialmente llamativo, teniendo en cuenta que las oscilaciones medias anuales de las temperaturas del aire, en superficie, y a 80 m son respectivamente: 12, 10 y 3°C.

La variabilidad interanual en la temperatura del aire depende en gran medida de la circulación atmosférica general, de ciclos a gran escala como por ejemplo, la NAO, y de las características propias del clima mediterráneo. Análisis armónicos efectuados sobre esta serie muestran periodos medios típicos de 3 años y, como máximo de hasta 5 años (VARGAS-YÁÑEZ *et al.*, 2005). La variabilidad en la temperatura de superficie se puede explicar en buena medida por los intercambios océano-atmósfera, por lo que en general, sigue la misma pauta y está bien correlacionada con la atmosférica. La variabilidad a 80 m de profundidad

depende más que de los valores alcanzados en superficie, de la actuación de los mecanismos de penetración del calor dentro del agua, especialmente los temporales de otoño e invierno.

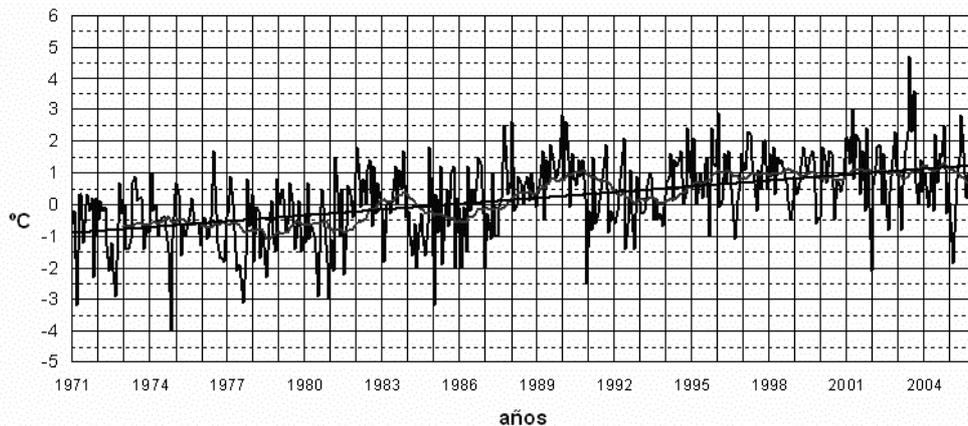


Fig. 3: Evolución de la anomalía de temperatura del aire respecto a la media

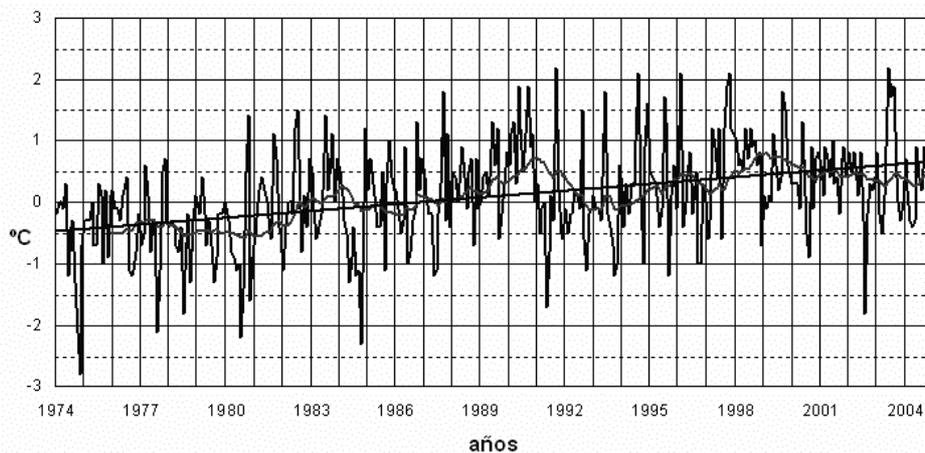


Fig. 4: Idem figura 3 para la temperatura de la superficie del mar

## 2.2 Tendencias climáticas

A partir de las series de medias mensuales y, a pesar de la variabilidad interanual, se puede observar (Figs 3, 4 y 5) que todas ellas muestran una tendencia creciente a lo largo de los últimos 32 años. Dado que la longitud de las series queda muy por encima de los periodos típicos de oscilación antes mencionados, las tendencias mostradas pueden considerarse bastante fiables. No obstante, la tendencia al aumento de temperatura no es igual en todas las épocas del año. Para ello hemos dividido el ciclo anual en 4 estaciones: Primavera, Verano, Otoño e Invierno, que, de acuerdo con el ciclo de temperaturas en el mar, corresponderían respectivamente a los periodos: abril-junio, julio-septiembre, octubre-diciembre y enero-marzo. De esta forma obtenemos los resultados expresados en la Tabla 2. En la tabla, además, se han añadido las tendencias de la temperatura media entre superficie y 80 m de profundidad

(construída a partir de los datos obtenidos en todos los niveles muestreados) como indicador del contenido en calor de la columna de agua.

Estos resultados deben interpretarse en base al acoplamiento atmósfera-océano ya descrito. Así pues, lo más destacado del proceso de calentamiento observado es la ganancia neta de calor, que viene representada por el mínimo anual en la tendencia al calentamiento de la superficie (0,011°C/año). Esta cifra puede considerarse como el valor mínimo de la tendencia al calentamiento y supone un aumento neto, nada despreciable, de 0,35°C en el periodo 1974-2005. Esta tendencia coincide exactamente con la observada desde 1996 a 2004 por LÓPEZ-JURADO *et al.* (2005) en aguas de más de 600 m en la zona de Baleares.

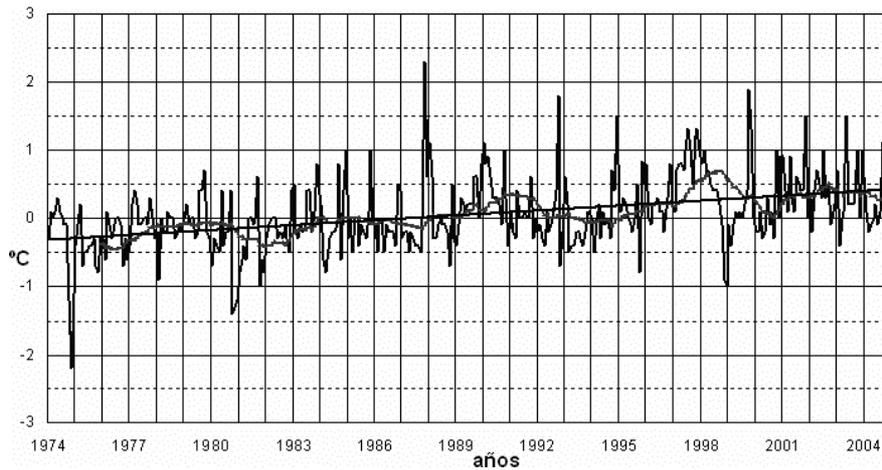


Fig. 5: Idem figura 3 para la temperatura del mar a 80 m de profundidad

La siguiente característica destacable es que las tendencias más exageradas se presentan en primavera, y suponen que al final de esta estación, la temperatura ha sufrido un aumento neto 1,38°C en superficie a lo largo de los 32 años. Este resultado tiene especial relevancia en varios contextos, especialmente en los ciclos biológicos de muchas especies marinas ya que, al acelerar el proceso de estratificación y calentamiento, provoca un adelanto en lo que podríamos llamar el inicio de la época estival. En este sentido, se puede utilizar como indicador la fecha en que la temperatura de superficie alcanza los 16°C, y se comprueba que ésta se ha adelantado a razón de 0,4 días/año, es decir casi 13 días en el periodo 1974-2005. Esta tendencia es aún superior (0,56 días/año) si consideramos cuando se alcanzan los 15,5°C a 20 m de profundidad.

	Anual	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>T. aire</b>	0,060	0,048	0,082	0,063	0,053
<b>T. superficie (°)</b>	0,034	0,020 0,011 (mín)	0,043 0,060 (máx)	0,033 0,049 (máx)	0,034 0,025 (mín)
<b>T. 80 m</b>	0,022	0,016	0,019	0,015	0,040
<b>T. media (0-80 m)</b>	0,032	0,019	0,032	0,040	0,040
<b>T. aire - T. sup</b>	0,031	0,024	0,053	0,024	0,021

Tabla 2. RESUMEN DE TENDENCIAS RELEVANTES, EN °C/AÑO, EN LOS ÚLTIMOS 32 AÑOS (1974-2005)

Otra consecuencia de esta aceleración en el ciclo primaveral es la tendencia al aumento en la diferencia entre la temperatura del aire y la de superficie del mar (Tabla 2). En particular, la temperatura media del aire en los meses de abril y mayo supera la del agua a partir de 1990. Ello supone una disminución de la evaporación y, en consecuencia, de los temporales y lluvias de primavera (~30% del total anual), pasando parte de éstas al periodo estival. Esta última tendencia se muestra en los datos de precipitación, que ha disminuído en media un 20% durante el periodo primaveral. Asimismo los vientos muestran una disminución en intensidad y frecuencia durante este periodo.

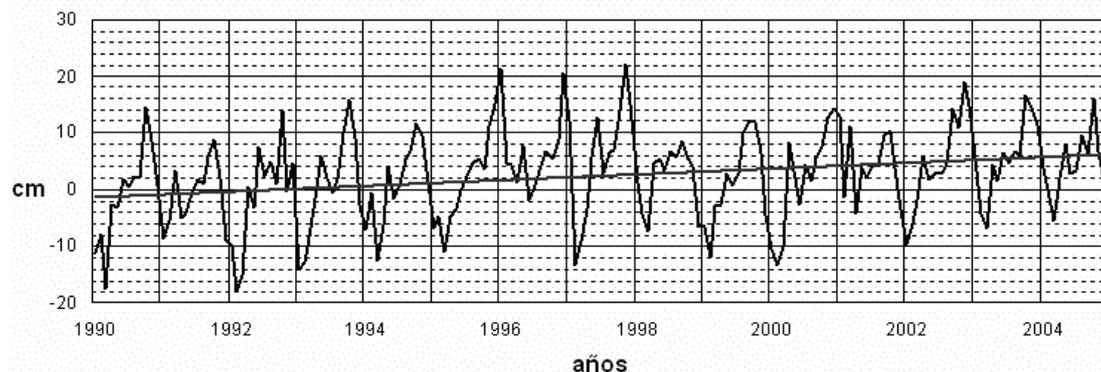


Fig. 6: Evolución del nivel del mar (datos medios mensuales)

### 3. EVOLUCIÓN DEL NIVEL DEL MAR

La serie de medidas del nivel del mar en el puerto de l'Estartit no es tan larga (16 años) como la de temperatura y, por tanto, la tendencia lineal observada (un aumento de 0,50 cm/año) no será tan significativa como las derivadas de las observaciones de temperatura (Fig. 6). No obstante se puede estimar la variabilidad interanual del nivel del mar (15 años), una vez extraída la marea astronómica y compensado el efecto de respuesta a la presión atmosférica (Fig. 7), de manera que la variabilidad resultante sólo dependerá del comportamiento del agua. De esta forma la tendencia a la subida del nivel del mar resulta ser bastante más baja (0,28 cm/año), aunque sigue siendo considerable, ya que en 15 años supone una elevación acumulada de 4,2 cm. Si tenemos en cuenta únicamente la dilatación por el aumento de la temperatura media, sabemos que en la capa de 0 a 80 m, a lo largo de un periodo de 15 años, ha sido de 0,50°C (Tabla 2). Ello supone que el incremento de altura debido a dilatación de esta capa sería cercano a 1 cm (0,76 cm). El resto, pues podría atribuirse al calentamiento de niveles más profundos. Si asumimos que la profundidad media del Mediterráneo Occidental es de unos 2000 m, el aumento de temperatura media requerido, durante un periodo de 15 años, sería del orden de 0,1°C, es decir, 0,0067°C/año. Este valor es muy parecido a la evolución de la temperatura potencial del agua profunda del Mediterráneo Occidental observada en los últimos 20 años (0,12°C; 0,006°C/año) según se puede observar comparando los datos de mediados de los 80 con los actuales en la base de datos MedAtlas. Esta tendencia asimismo resulta algo inferior a las estimaciones de 0,01°C/año de incremento para aguas de 200 m en otras estaciones del Mediterráneo Occidental (VARGAS-YÁÑEZ *et al.*, 2005). Por otra parte, en la evolución que muestra la figura 7 se observan unos periodos de 6-7 años durante los cuales hay una tendencia más alta, seguidos de una bajada rápida, de un año al siguiente. Aparentemente estos ciclos no se correlacionan con otras informaciones registradas en la estación de l'Estartit, pero pueden tener relación con fenómenos de mayor escala, como

la formación de agua profunda ya que episodios de abundante formación de agua profunda implican un aumento de densidad de una masa importante de agua, lo que justificaría una disminución del nivel del mar. Así, los datos de formación de agua profunda en 2005 apuntan a que éste fue un año excepcional, tanto en abundancia de agua formada como por la extensión del fenómeno (SALAT *et al.*, 2006). En 1999 también hubo abundante formación de agua profunda, sin llegar a los extremos de 2005, y 1991 fue un invierno frío y ventoso pero no tenemos datos relevantes de formación de agua profunda.

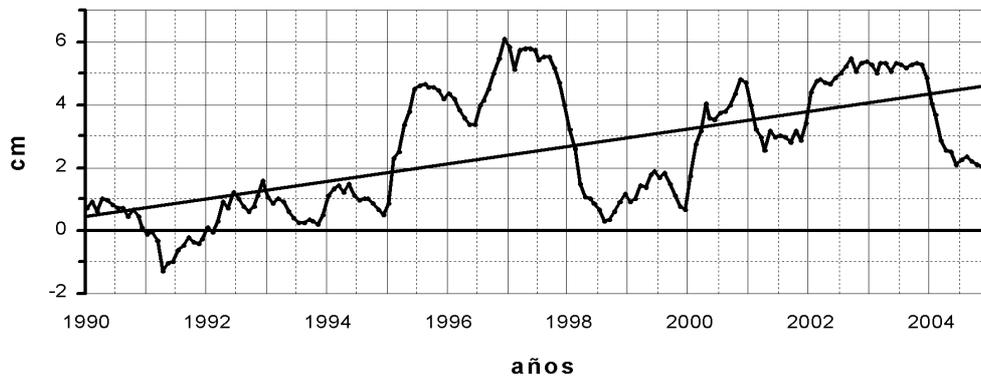


Fig. 7: Variación interanual del nivel del mar, corregida del efecto de la presión atmosférica.

### 3. NOTAS

<sup>1</sup> En oceanografía se utiliza una escala de salinidad, llamada Salinidad Práctica, que consiste en la razón de conductividad eléctrica entre la muestra y una solución de KCl, de referencia, a 15°C. Es por ello que el número aparece sin unidades. El valor que se obtiene, no obstante, es muy parecido al contenido de sales disueltas, expresado en kg/m<sup>3</sup> (ó en partes por 1000).

<sup>2</sup> Además de la tendencia de la media de los meses correspondientes a cada estación, se incluye la tendencia que corresponde a los meses que muestran el valor mínimo (diciembre y febrero) para la época de enfriamiento, y máximo (junio y agosto) para la época de calentamiento.

### 4. REFERENCIAS

- SALAT J., M. EMELIANOV y J.L. LÓPEZ-JURADO (2006). Proceso extraordinario de formación de agua profunda en el Mediterráneo Occidental durante el invierno de 2005. *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla, 2006 (en prensa).
- VARGAS-YÁÑEZ, M., SALAT, J., M.L. FERNÁNDEZ DE PUELLES, J.L. LÓPEZ-JURADO, J. PASCUAL, T. RAMÍREZ, D. CORTÉS y I. FRANCO (2005). Trends and time variability in the northern continental shelf of the western Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 110, C10019, doi: 10.129/2004JC002799.
- LÓPEZ-JURADO, J.L., C. GONZÁLEZ.POLA y P. VÉLEZ-BELCHI (2005). Observation of an abrupt disruption of the longterm warming trend at the Balearic Sea, western Mediterranean, in summer 2005. *Geophysical Research Letters*, 32, L24606, doi: 10.129/2005GL024430.