

**¿VOLVERÁN LAS LLUVIAS DE PRIMAVERA?
O
CÓMO PUEDE AFECTAR EL CALENTAMIENTO GLOBAL EN EL MAR AL
RÉGIMEN PRIMAVERAL DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA
MEDITERRÁNEA.**

Jordi SALAT y Josep PASCUAL

Institut de Ciències del Mar de Barcelona (CSIC). P. Marítim, 37-49. E-08003 Barcelona.

Resumen

En el clima mediterráneo se observan, en general, dos periodos importantes de precipitación: otoño y primavera, con un 50 y 30% del total anual respectivamente. En esta comunicación se presentan los datos de temperatura del mar y del aire de los últimos 34 años en l'Estartit (Costa Brava) y se discuten las tendencias observadas. La evolución de estos datos muestra una tendencia al calentamiento, tanto del agua del mar como del aire, cuyo máximo se observa en primavera, y es mayor en el aire que en el mar. A raíz de esta diferencia, el periodo durante el cual la superficie del mar está más fría que el aire es cada vez mayor. Ello supone una disminución de la evaporación potencial y, por tanto, de las posibles precipitaciones durante la primavera. La tendencia muestra que cada año en primavera el periodo con la superficie del mar más fría que el aire aumenta en más de un día, lo que podría traducirse desde 1974 en una reducción de un 60% en la evaporación potencial de agua del mar en la región durante esta época del año, y supondría una disminución del orden del 20% del total anual de precipitación.

Palabras clave: Clima, Calentamiento Global, Interacción atmósfera-océano, Mediterráneo Occidental, Precipitación

1. Introducción

1.1 Procesos de calentamiento y enfriamiento del océano

Las primeras evidencias del proceso de cambio climático se han presentado en los registros de temperatura en casi todo el planeta (Jones *et al.*, 2001). Todo parece indicar que esta tendencia de la temperatura al alza se debe al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera debidos a la actividad humana (Stott *et al.*, 2000), en particular, del dióxido de carbono, como consecuencia del uso de combustibles fósiles: carbón mineral y petróleo, para obtener energía. La presencia de estos gases en la atmósfera provoca una disminución de la pérdida de calor por radiación hacia el espacio exterior. Aunque los excesos de emisiones de estos gases estén repartidos de forma irregular, el efecto invernadero se extiende a escala planetaria contribuyendo al calentamiento del aire y todo lo que está en contacto con él, es decir, los océanos y los continentes. En el caso del océano, los intercambios de calor con la atmósfera pueden ser de calor latente o sensible. Cuando la superficie del océano se calienta por radiación o por cesión de calor por parte del aire, la capa superficial afectada pierde densidad y se produce una situación de estratificación muy marcada. Por el contrario, si es el océano quien cede calor al aire, la capa superficial se enfría y su densidad tiende a aumentar, con lo que disminuye su estabilidad y se inician procesos de convección y mezcla vertical. En las zonas templadas del planeta, donde el ciclo estacional es marcado, el océano va estratificándose desde el inicio de la primavera hasta mediados de verano, que es cuando llega a la máxima temperatura superficial del ciclo anual. A partir de este momento el océano empieza a ceder un flujo de calor neto a la atmosfera que irá aumentando a medida que el aire sea más y más frío. Dado que cuanto mayor sea el contraste entre la temperatura de la superficie del mar y la del aire, mayor será el intercambio de calor, si la temperatura mínima del aire en el ciclo estacional aumenta, el calor cedido por el océano será inferior y ello conllevará una tendencia al aumento de temperatura del agua. A diferencia del aire, el océano está estratificado en verano y se inestabiliza en invierno. Si la temperatura

de la superficie del océano es inferior a la del aire en contacto con él, éste tiende a ceder calor al océano y se enfría, con lo que la humedad relativa aumentará y el vapor de agua puede llegar a condensar. Por el contrario si la superficie del océano es más cálida, el aire en contacto con el océano se calentará, disminuirá la humedad relativa y aceptará más vapor de agua disuelto. En estas condiciones, se puede producir evaporación de agua en el mar, de modo que el océano no sólo cederá calor sensible sino también calor latente y agua.

1.2 Agua nueva y agua reciclada

El agua que cae en forma de lluvia procede del vapor de agua recogido por el aire, que se ha condensado en forma de nubes y finalmente precipita. La humedad del aire puede proceder de aguas continentales: ríos, lagos, zonas húmedas, etc., de la vegetación, por transpiración, o del océano. En el primer caso se trata de aguas en general dulces o poco saladas. De alguna manera podríamos decir que en última instancia proceden de lluvia, más o menos reciente. Es decir, de ciclo corto. Como mucho, algunos pocos años. Por el contrario las aguas del océano son saladas, por lo que el ciclo en este caso ha sido muchísimo más largo (miles de años). Para diferenciar las dos situaciones, diremos que el agua en el primer caso es “agua reciclada” mientras que en el otro se trataría de “agua nueva” que se incorpora al ciclo. Sería algo parecido a la diferencia que hay entre el carbón vegetal y el mineral. Globalmente, en una situación de equilibrio, la cantidad de agua nueva que recibe el continente debería ser igual a la que los ríos desaguan en el océano. Asimismo, la cantidad de agua nueva equivaldrá a la que se habrá evaporado del océano. Si se considera sólo una parte del sistema global, habrá zonas que ganarán agua mientras que otras la perderán.

1.3 La cuenca mediterránea

La cuenca mediterránea comprende el mar Mediterráneo y toda la zona continental que vierte a él. La superficie continental que vierte al Mediterráneo es bastante pequeña, de unas dimensiones parecidas a las del propio mar, si exceptuamos el Nilo, cuya cuenca es enorme pero de ciclo casi cerrado, y la vertiente del mar Negro, que consideraremos aparte. Así pues, parte del agua nueva procedente del Mediterráneo es transportada por la circulación atmosférica hacia otras zonas y precipita en otras vertientes. Es por ello que el Mediterráneo pierde agua. Es decir, por el Bósforo y por el estrecho de Gibraltar entra más agua de la que sale. En las unidades que se usan en pluviometría, el Mediterráneo pierde anualmente unos 750 l/m^2 (ó 750 mm), de un total de 1300 evaporados. Dicho de otra forma, la cuenca mediterránea sólo recupera el 42% del agua nueva que produce, y de ella sólo unos 200 l/m^2 (el 15%) llega a la vertiente continental. El resto es recogido por otras cuencas, la del Atlántico, el mar Negro, el Báltico, etc. Si tenemos en cuenta que la distribución de la precipitación dentro de la cuenca es, a su vez, bastante irregular, nos encontramos con que la vertiente del Mediterráneo noroccidental recibe aproximadamente unos 450 l/m^2 anuales de agua nueva, sobre un total medio de unos 650 l/m^2 . En resumen, a pesar de esta situación deficitaria, la vertiente mediterránea recibe una nada despreciable cantidad de agua nueva procedente del Mediterráneo, y es por ello que resulta interesante estudiar las condiciones bajo las que se favorece la evaporación; y si las tendencias derivadas del cambio climático pueden modificarlas.

2. Observaciones

2.1 La estación Oceanográfico-Meteorológica de l'Estartit (Costa Brava)

L'Estartit es una población costera, situada 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 su 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 (mareógrafo) en el puerto de l'Estartit.

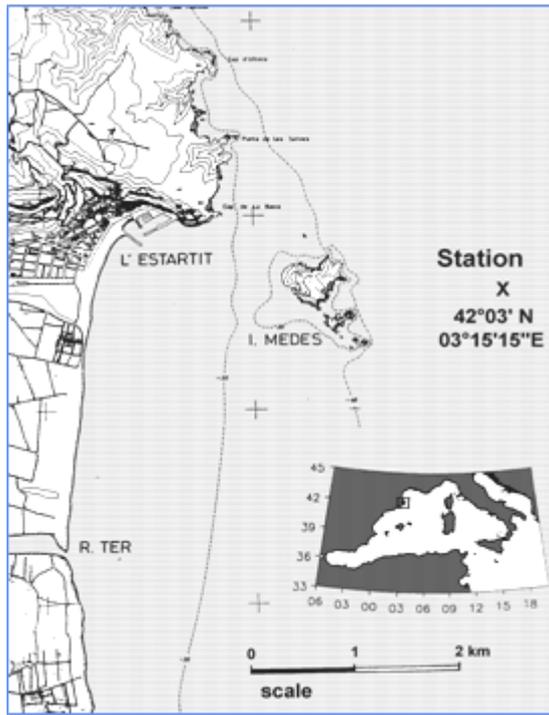


Fig. 1: Mapa de la estación oceanográfica de l'Estartit

Toda esta información junto a los datos meteorológicos y descargas del Ter, ha permitido un seguimiento climatológico sin precedentes en toda la región mediterránea (Salat and Pascual, 2002). Todos los datos se han recogido de acuerdo con los estándares para datos meteorológicos y oceanográficos, y el mareógrafo está georeferenciado.

2.2 Ciclo anual

La climatología de la zona 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 a marzo, y entre 20 y 26°C, de junio a 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 (Fig. 3) y el mínimo a finales de invierno, generalmente en febrero. En el mar, pues, aunque la temperatura mínima en superficie suele registrarse en febrero, 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.

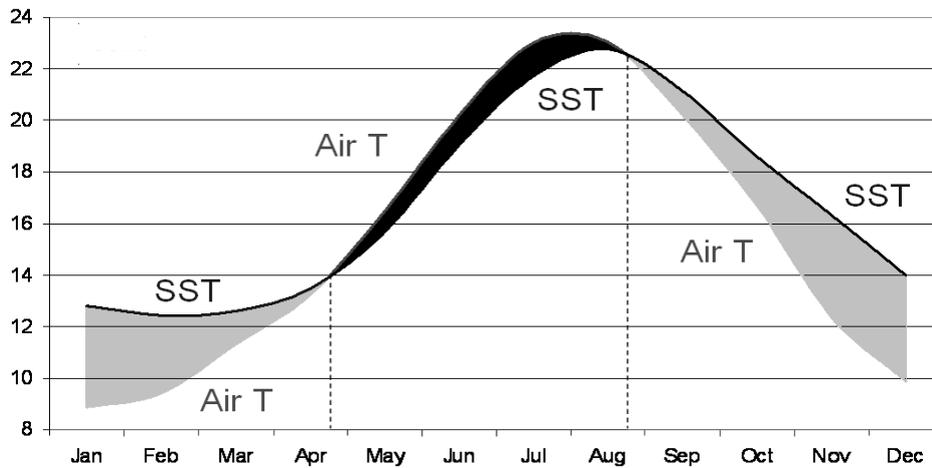


Fig. 2: Ciclo anual medio de temperatura del aire y de superficie. La zona sombreada en negro corresponde al periodo con el agua más fría que el aire.

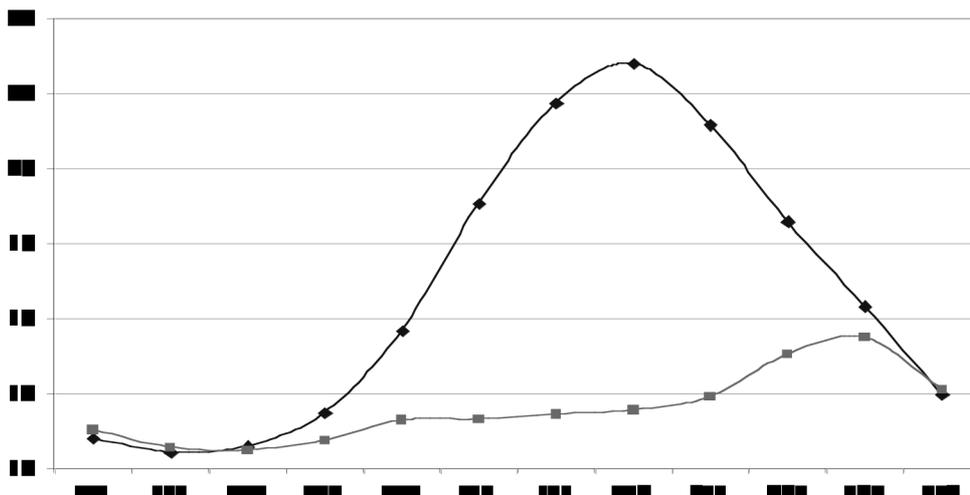


Fig. 3: Ciclo anual medio de temperatura en superficie y a 80 m

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 entre 25 y 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.

2.3 Variabilidad interanual

Durante el periodo de 34 años, 1974-2007, 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 hasta 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.

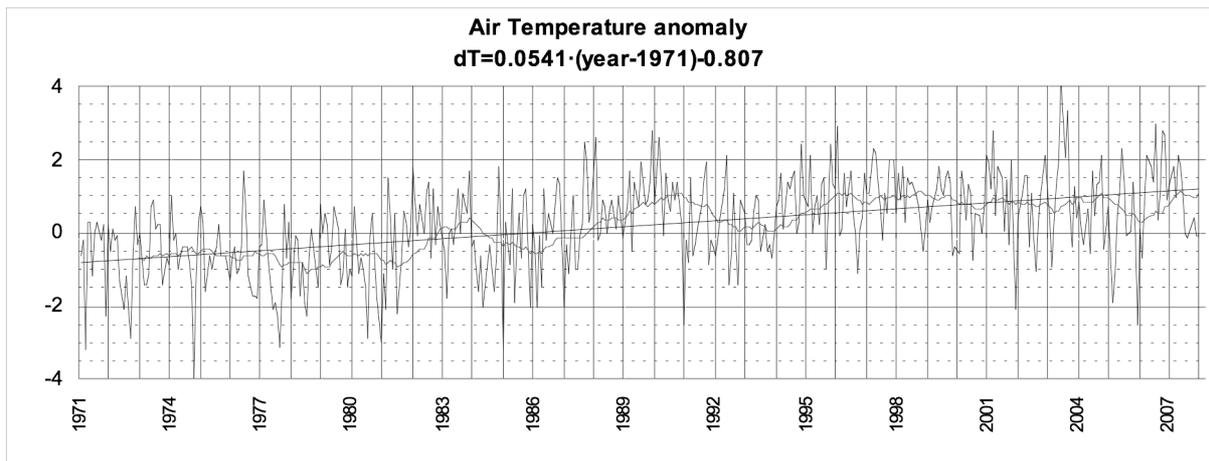


Fig. 3: Evolución de la anomalía de temperatura del aire respecto a la media

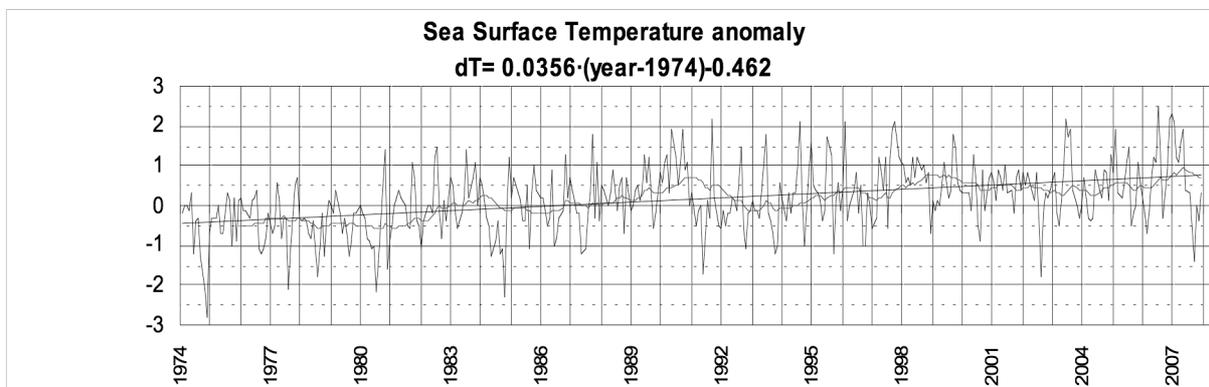


Fig. 4: Idem figura 3 para la temperatura de la superficie del mar

2.4 Tendencias climáticas

A partir de las series de medias mensuales y, a pesar de la alta variabilidad interanual, se puede observar (Figs 3, 4 y 5) que todas ellas muestran una tendencia creciente a lo largo de los últimos 34 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. 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 ($0,011^{\circ}\text{C}/\text{año}$). Esta cifra puede considerarse como el valor mínimo de la tendencia al calentamiento y supone un aumento neto, nada despreciable, de $0,375^{\circ}\text{C}$ en el periodo 1974-2007. 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.

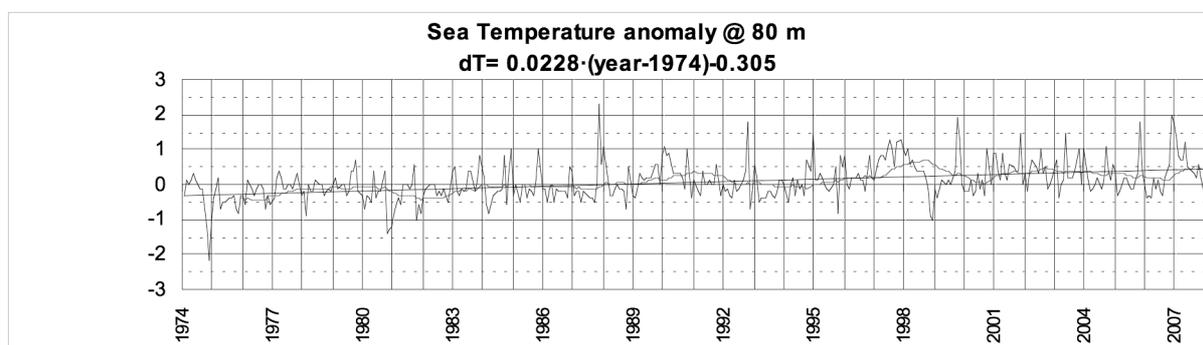


Fig. 5: Idem figura 3 para la temperatura del mar a 80 m de profundidad

2.5 Tendencias por estaciones

En la actualidad, la tendencia al aumento de temperatura, como consecuencia del cambio climático, es muy conocida pues se ha observado de modo general en diversas partes del océano. Lo que quizás resulte menos conocido es que la tendencia no es uniforme en todas las estaciones del año. Si dividimos el ciclo anual de nuestras observaciones en las 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, obtenemos los resultados expresados en la Tabla 1.

En la tabla, además, se han añadido las tendencias de la temperatura media entre superficie y 80 m de profundidad (construida a partir de los datos obtenidos en todos los niveles muestreados), como indicador del contenido en calor de la columna de agua, y las de la diferencia entre la temperatura del aire y la del agua, como indicador de la evaporación potencial.

	Anual	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
T. aire	0,054	0,045	0,082	0,062	0,053
T. superficie	0,036	0,020 0,011 (mín.)	0,043 0,060 (máx.)	0,034 0,049 (máx.)	0,034 0,025 (mín.)
T. 80 m	0,023	0,016	0,019	0,015	0,040
T. media (0-80 m)	0,032	0,019	0,032	0,040	0,040
T. aire - T. sup.	0,031	0,024	0,053	0,024	0,021

Tabla 1. Resumen de tendencias relevantes, en $^{\circ}\text{C}/\text{año}$, en los últimos 34 años (1974-2007)

3. Posibles repercusiones

3.1 Alargamiento de las condiciones estivales

Una de las características más destacables de las tendencias observadas (Tabla 1) es que éstas son más exageradas en primavera y presentan un mínimo en invierno, tanto las del aire como las de la superficie del mar. Estos valores suponen que en los 34 años precedentes, al final de la primavera, la temperatura ha sufrido un nada despreciable aumento total de 1,47°C, frente a menos de 0,7°C en invierno. En cuanto al contenido neto de calor entre 0 y 80 m de profundidad, la máxima tendencia se presenta en verano y otoño, y coincide con la tendencia observada a 80 m en otoño. Estos resultados tienen especial relevancia en varios contextos, especialmente en los ciclos biológicos de muchas especies marinas ya que suponen un alargamiento de las condiciones de verano: altas temperaturas y estratificación. En este sentido, se puede utilizar como indicador el periodo en que la temperatura a 20 m de profundidad supera los 17°C (Fig. 6). Se trata de un valor de temperatura que a esta profundidad ya es difícilmente reversible cuando se alcanza en primavera y se mantiene hasta que se rompe la estratificación en otoño. En la figura se observa que en los últimos 34 años, el inicio del periodo se ha adelantado en 26 días, a razón de 0,77 días/año, mientras que el final del periodo se ha retrasado en 23 días, a razón de 0,67 días/año. En total, pues, el periodo estival se habría prolongado en 49 días desde 1974. No obstante, si tenemos en cuenta la variabilidad interanual, que es más alta en la fecha del final del periodo estival que en la del inicio, sólo resulta significativa, en términos estadísticos, la tendencia en la fecha de inicio de las condiciones estivales. Aún así, con unas estimaciones más conservadoras, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la variabilidad interanual, nos quedaría una tendencia mínima de 24 días de prolongación de las condiciones estivales, con un adelanto en 15 días de la fecha de inicio.

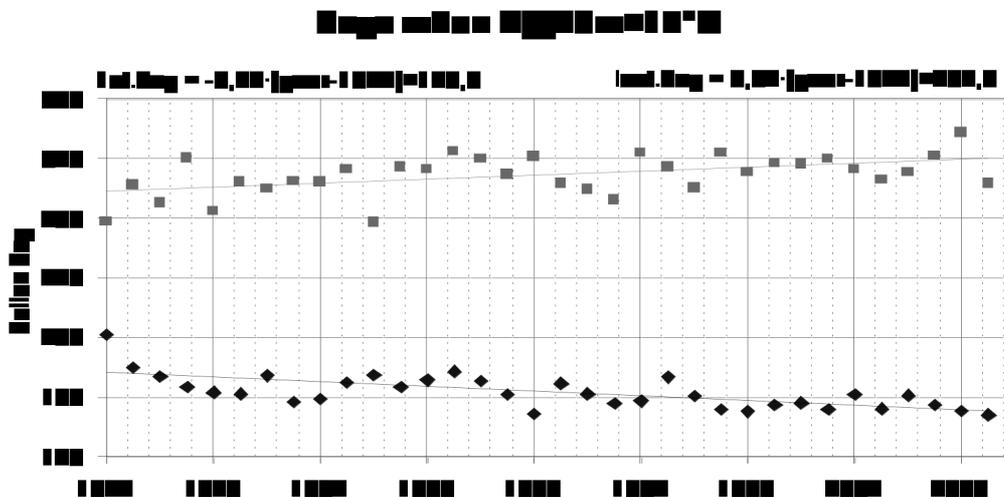


Fig. 6. Evolución de las fechas inicial y final del periodo con temperaturas superiores a 17°C a 20 m de profundidad.

3.2 Contenido en calor

La tendencia al aumento de temperatura media de los 80 primeros metros de la columna de agua sugiere que el mar no llega a devolver el incremento de calor recibido. Esta observación está en la línea de los aumentos de temperatura medidos en aguas profundas no sólo en el Mediterráneo sino en el resto del océano (Levitus *et al.*, 2005) y es coherente con una elevación del nivel del mar, corregida por el efecto de la presión atmosférica, observada localmente. Así pues, esta información, junto al aumento neto de la temperatura en superficie,

nos permite suponer que la probabilidad de precipitaciones torrenciales irá en aumento, ya que cuando se presenten irrupciones de aire frío conseguirán un volumen superior de agua evaporada por episodio, al disponer de más calor acumulado en el mar. De hecho, los modelos que han servido de base para las predicciones de las consecuencias del cambio climático, tienen en cuenta que el incremento en el calor acumulado por el mar provocará un aumento en frecuencia e intensidad de episodios de precipitaciones torrenciales (IPCC, 2007).

3.2 Evaporación potencial

Otra consecuencia relevante 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 1). En la distribución estacional de estas tendencias también se observa que la más exagerada corresponde al periodo primaveral, mientras que se mantiene en valores parecidos, del orden de la mitad, en el resto del año. En particular, se observa que a partir de 1990 la temperatura media del aire en los meses de abril y mayo supera sistemáticamente a la de la superficie del mar (Fig. 7). Si, como en el caso anterior, estudiamos la evolución del periodo en que el aire está más caliente que la superficie del mar (Fig. 8) observamos que se ha alargado en 70 días desde 1974. Aunque estas tendencias sean menos significativas que las anteriores, se observa que el adelanto del inicio del periodo es más rápido que el retraso del final. Si aplicamos un criterio conservador a las estimaciones, todavía queda un aumento mínimo de 38 días, centrado en primavera, lo que supone una reducción mínima de más de un mes del periodo favorable a la evaporación, cuya consecuencia podría ser la disminución de las precipitaciones en primavera.

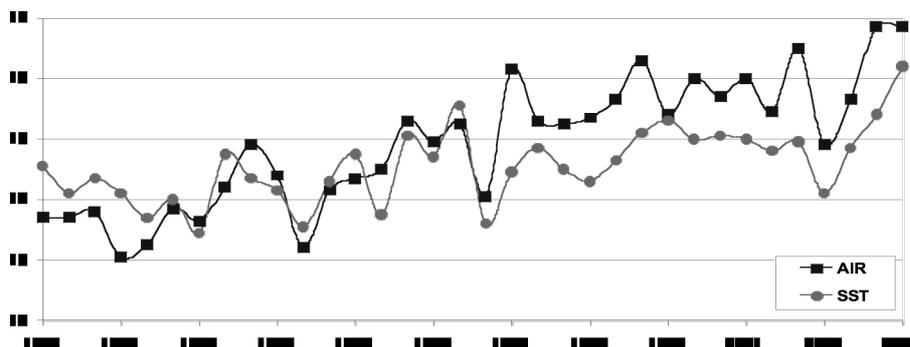


Fig. 7. Evolución de la temperatura media del aire y de la superficie en abril y mayo

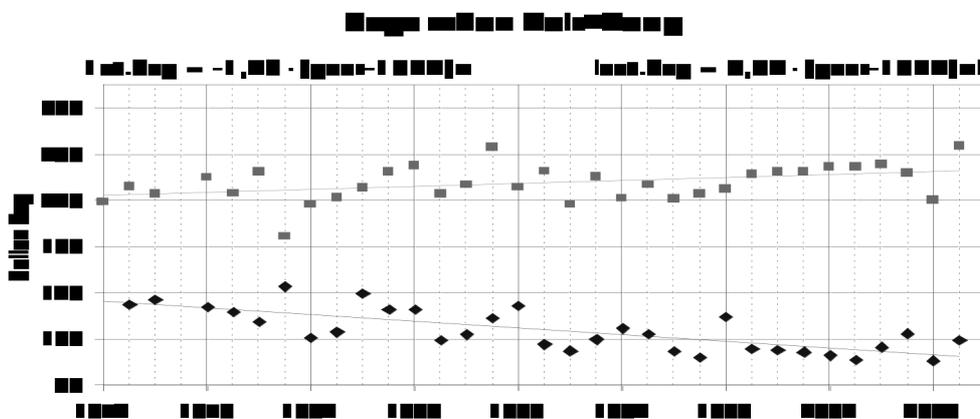


Fig. 8. Evolución de las fechas inicial y final del periodo con temperatura del aire superior a la de la superficie del mar 17°C a 20 m de profundidad

Los datos de precipitación locales, a pesar de tener una enorme variabilidad y no resultar significativos, presentan un reflejo de esta última tendencia, con una disminución media de un 20% durante el periodo primaveral en los últimos 34 años. Asimismo los vientos, que también contribuyen a la evaporación, muestran una disminución en intensidad y frecuencia durante el periodo primaveral.

4. Conclusiones

Las series de datos obtenidos en la estación de l'Estartit en los últimos 34 años muestra una tendencia clara al aumento de temperatura tanto del aire como del mar. Según las predicciones de los modelos de cambio climático, ello supone una disminución las precipitaciones anuales y mayor probabilidad de episodios de lluvias torrenciales. Esta tendencia al incremento de temperaturas no es uniforme a lo largo del año sino que resulta mucho más acusada en primavera, y conlleva una prolongación de las condiciones estivales (estratificación) en el mar. Al mismo tiempo, la diferencia entre las tendencias entre el aire y el mar, muestra que el ritmo de calentamiento de éste es inferior respecto a aquél, lo que comporta un alargamiento del periodo en el que la temperatura del aire supera la del mar. Este hecho, particularmente evidente en la época primaveral, supone una disminución del potencial de evaporación que supondría que la disminución de las precipitaciones se centraría en primavera, que en la climatología mediterránea suponen alrededor del 30% del total de lluvias anuales. Así pues, el análisis de tendencias permite prever que habrá un aumento en la torrencialidad en otoño y una disminución neta de las precipitaciones primaverales en la cuenca mediterránea.

5. Referencias

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 996 pp.

Jones, P.D., T.J. Osborn and K.R. Briffa, 2001. The Evolution of Climate Over the Last Millennium. *Science*,. 292: 662 - 667

Levitus, S., J.I. Antonov, and T.P. Boyer, 2005. Warming of the World Ocean, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.

López-Jurado, J.L., C. González Pola and P. Vélez-Belchi, 2005. Observation of an abrupt disruption of the longterm warming trend at the Balearic Sea, western Mediterranean, in summer 2005. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24606, doi: 10.129/2005GL024430.

Salat J., J. Pascual (2002).The oceanographic and meteorological station at l'Estartit (NW Mediterranean).*CIESM Workshop Series*, 16:29-32.

Stott, P.A., S.F.B. Tett, G.S. Jones, M.R. Allen, J.F.B. Mitchell, and G.J. Jenkins, 2000. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290: 2133–2137.

Vargas-Yáñez, M., Salat, J., M.L. Fernández de Puellas, J.L. López-Jurado, J. Pascual, T. Ramírez, D. Cortés and 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.