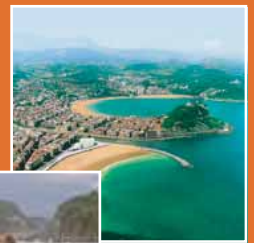




7

Análisis de la tendencia de la temperatura atmosférica en Donostia-San Sebastián (SE del golfo de Vizcaya) a partir del estudio de la serie del Observatorio del Monte Igeldo (1928-2007)



González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, Ad., Del Campo A., Ferrer, L. y Revilla, M., 2008. Análisis de la tendencia de la temperatura atmosférica en Donostia-San Sebastián (SE del golfo de Vizcaya) a partir del estudio de la serie del Observatorio del Monte Igeldo (1928-2007). *'Revista de Investigación Marina'*. 7: 7 pp.

La serie *'Revista de Investigación Marina'*, editada por la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia, cuenta con el siguiente Comité Editorial:

Editor: Dr. Ángel Borja

Adjunta al Editor: Dña. Mercedes Fernández Monge e Irantzu Zubiaur (coordinación de las publicaciones)

Comité Editorial: Dr. Lorenzo Motos
Dr. Adolfo Uriarte
Dr. Michael Collins
Dr. Javier Franco
D. Julien Mader
Dña. Marina Santurtun
D. Victoriano Valencia
Dr. Xabier Irigoien
Dra. Arantza Murillas

La *'Revista de Investigación Marina'* de Tecnalia edita y publica investigaciones y datos originales resultado de la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia. Las propuestas de publicación deben ser enviadas al siguiente correo electrónico aborja@pas.azti.es. Un comité de selección revisará las propuestas y sugerirá los cambios pertinentes antes de su aceptación definitiva.



Edición: 1.^a Septiembre 2008

© AZTI-Tecnalia

ISSN: 1988-818X

Unidad de Investigación Marina

Internet: www.azti.es

Edita: Unidad de Investigación Marina de Tecnalia

Herrera Kaia, Portualdea

20010 Pasaia

Foto portada: © Alex Iturrate

Análisis de la tendencia de la temperatura atmosférica en Donostia-San Sebastián (SE del golfo de Vizcaya) a partir del estudio de la serie del Observatorio del Monte Igeldo (1928-2007)

Manuel González^a, Julien Mader^a, Almudena Fontán^a, Adolfo Uriarte^a, Andrea del Campo^a, Luis Ferrer^a y Marta Revilla^a

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del análisis de la temperatura atmosférica, medida en el Observatorio de Monte Igeldo de Donostia-San Sebastián (43° 18' 27" N, 02° 02' 22" W, y 252 m de altitud), perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología. Se dispone de datos desde el 2 de enero de 1928. En este trabajo se han considerado datos de temperatura máxima y mínima diaria hasta el 31 de diciembre de 2007, lo cual supone 80 años de información (más de 29.000 datos). La serie está prácticamente completa, ya que únicamente no se dispone de información de la temperatura máxima en 116 días y de la temperatura mínima en 13 días. La media de las temperaturas máximas diarias es de 16,21 °C y la media de las mínimas diarias 10,25 °C. Con el fin de filtrar eventos de escala inferior al año, se ha obtenido la media móvil de 1, 2, 4 y 8 años para obtener una estima adecuada de la tendencia a largo plazo de la serie. En el caso de las temperaturas máximas se observa un incremento de 0,11 a 0,12 °C·década⁻¹, superior a la tendencia detectada en las temperaturas mínimas que se estima entre 0,07 y 0,08 °C·década⁻¹ (con una precisión de un orden de magnitud inferior en ambos casos). Se ha constatado que el incremento de la temperatura se ha producido a partir de 1985, y ha sido más notable en temperaturas máximas (entre 0,38 y 0,54 °C·década⁻¹ ± 0,1 °C·década⁻¹) que en las mínimas (entre 0,29 y 0,31 °C·década⁻¹ ± 0,1 °C·década⁻¹).

Introducción

En el período 1906-2005 la temperatura media de la atmósfera del planeta ha aumentado 0,74 ± 0,18 °C (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2006). Según Trenberth *et al.* (2007) en el hemisferio norte el incremento de la temperatura terrestre desde 1901 a 2005 fue de 0,063 a 0,079 °C·década⁻¹ y, de 1979 a 2005 fue mayor, entre 0,294 y 0,344 °C·década⁻¹. En Europa, el calentamiento observado ha sido más importante, con un incremento desde 1900 de 0,95 °C, especialmente en regiones como el noroeste de Rusia y la península Ibérica (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2006).

En el País Vasco se dispone de dos registros de temperatura de especial interés, sobre todo por su duración: el registro de máxima y mínima atmosférica diaria del Monte Igeldo, iniciado en 1928; y el de la superficie del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián (43° 19' N, 02° 00' W) que comenzó a mediados de 1946 y que presenta un incremento de temperatura de aproximadamente 0,3 °C·década⁻¹ a partir de la década de 1990 (González *et al.*, 2008).

En términos generales, el País Vasco se sitúa en las latitudes

medias del Atlántico nor-occidental, su clima está influenciado por la corriente del Golfo y los vientos atmosféricos del oeste en la media y alta troposfera; por ello, la temperatura media anual es superior a 10 °C. Todos los meses de invierno tienen temperaturas medias de más de 3 °C. Cuatro meses al año presentan temperaturas medias superiores a 10 °C y todos los meses presentan medias inferiores a 22 °C. El clima es templado, oceánico, con inviernos moderados y veranos cálidos. En cuanto a las precipitaciones, el clima es lluvioso, con más de 1.500 mm por año. Las precipitaciones ocurren normalmente durante todo el año, y el mes más seco presenta una tercera parte de las precipitaciones del mes más lluvioso (más de 30 mm). Por lo tanto, según la clasificación de Koppen, el área está asociada con un clima de tipo Cfb o marino costero occidental suave (Usabiaga *et al.*, 2004).

El objetivo de este estudio es analizar la variabilidad anual de la temperatura registrada por el observatorio de Monte Igeldo, estudiar el comportamiento plurianual de esta serie y evaluar su tendencia en los últimos 80 años.

La larga duración de la serie (desde 1928 hasta la actualidad) y su integridad (sólo se carece de datos de la temperatura máxima en 116 días y de la temperatura mínima en 13 días), hacen esperar la obtención de tendencias fiables de la temperatura atmosférica, contribuyendo al conocimiento de este elemento característico del clima.

^a AZTI-Tecnalia. Muelle de Herrera, s/n, Zona Portuaria de Pasaia, 20110-Pasaia, Gipuzkoa. Fax: +34 943004801; Tel: +34 943004801; Correo electrónico: mgonzalez@pas.azti.es

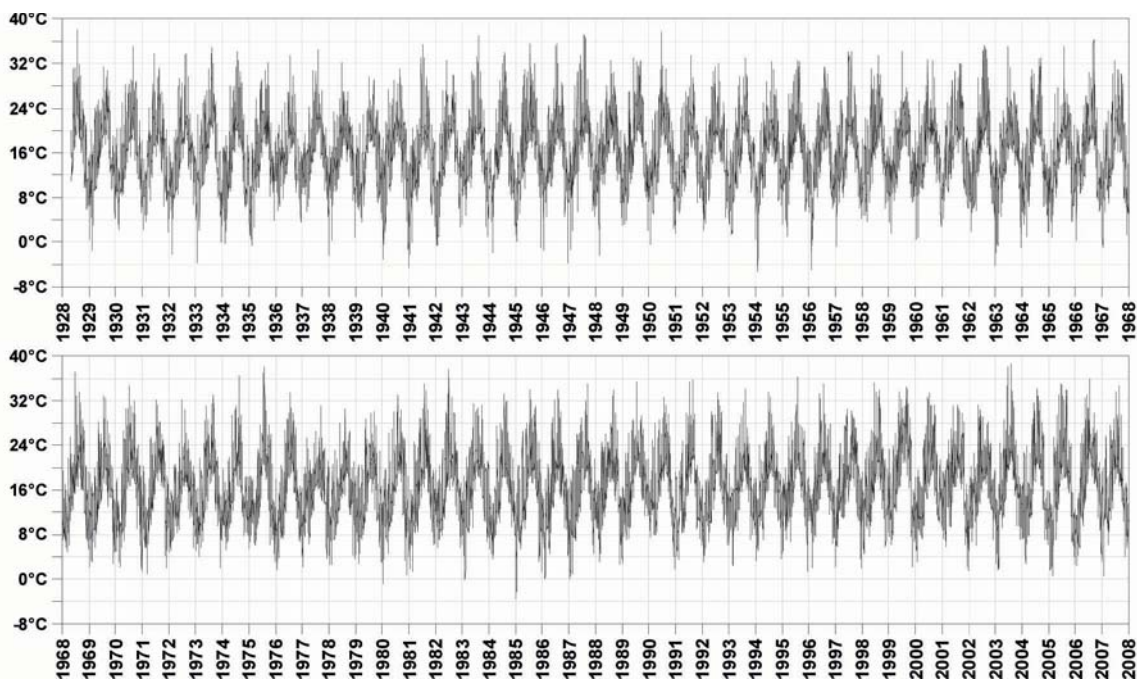


Figura 1. Temperatura máxima diaria en Donostia-San Sebastián desde enero de 1928 hasta diciembre de 2007.

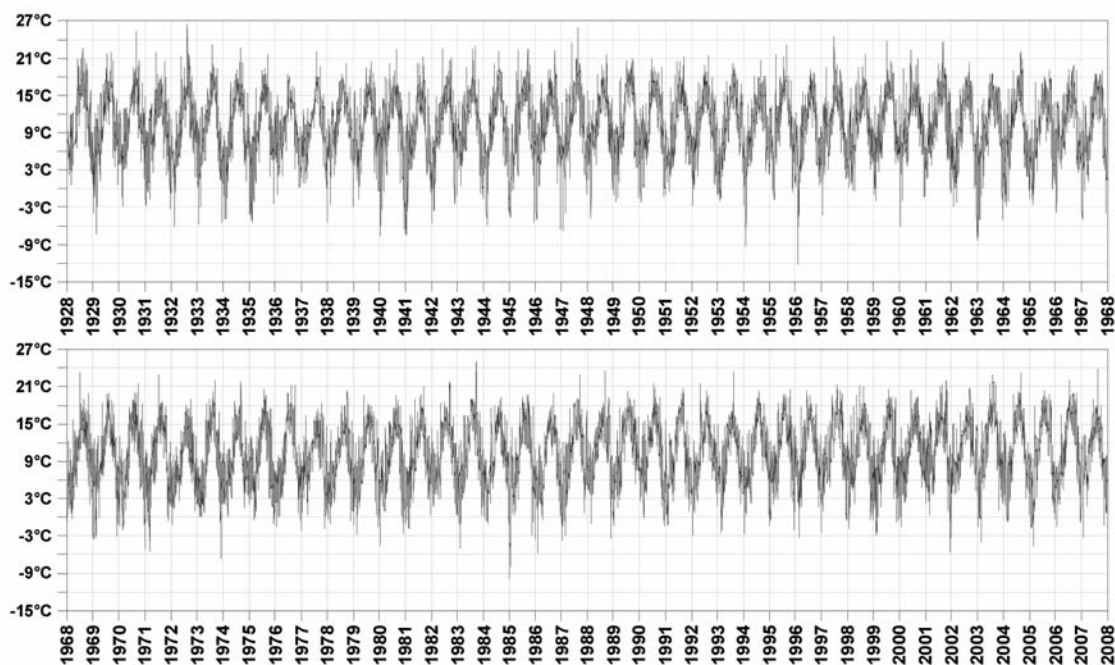


Figura 2. Temperatura mínima diaria en Donostia-San Sebastián desde enero de 1928 hasta diciembre de 2007.

Métodos

Los datos empleados en este estudio son las medidas de temperatura atmosférica realizadas por el observatorio del Monte Igeldo de Donostia-San Sebastián (43° 18' 27" N, 02° 02' 22" W, y 252 m de altitud), perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología. Se han utilizado las temperaturas máxima y mínima

diarias desde el 2 de enero de 1928 hasta el 31 de diciembre de 2007.

Con el objeto de suavizar los valores extremos diarios, se han calculado los parámetros de la distribución de temperaturas a lo largo del año promedio, empleándose para ello los momentos de la distribución de las temperaturas (media y desviación estándar):

$$\bar{T}^d = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j^d$$

$$\sigma^d = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (T_j^d - \bar{T}^d)^2}$$

Siendo:

- $d=1, \dots, 365$; es el orden del día del año, (no se consideran los datos del 29 de febrero de los años bisiestos), de manera que, por ejemplo $d=90$ corresponde al 30 de marzo.
- $T_j^d, j=1, \dots, N$ son las medidas (temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria) de la serie del día d del año.
- N es el número de datos del día d del año existentes en la serie (típicamente $N = 80$).

Con los datos diarios disponibles (temperatura máxima y mínima diaria) se ha calculado la media y la desviación estándar durante el año promedio, tanto de la temperatura máxima como de la temperatura mínima.

Para obtener los valores promedio mensuales de las temperaturas máximas y mínimas diarias del año promedio se ha empleado un método de suavizado, basado en un filtrado de paso bajo mediante una transformada rápida de Fourier (Press *et al.*, 1989). Se ha empleado un ancho de ventana de 30 días.

En el estudio de la tendencia plurianual, con el fin de suavizar las oscilaciones de período anual de la serie de temperaturas, se ha efectuado un promediado mediante medias móviles centradas de período 1, 2, 4 y 8 años calculándose, asimismo, la anomalía de la media móvil centrada (González *et al.*, 2008) y se han estimado las tendencias de las series resultantes mediante el método de regresión lineal (Press, *et al.*, 1989).

Resultados

En la *Figura 1* se puede ver el registro de la temperatura máxima diaria atmosférica en Igeldo desde el 2 de enero de 1928 hasta el 31 de diciembre de 2007 y, en la *Figura 2* el registro de la temperatura mínima diaria en el mismo período.

Se han registrado en 4 ocasiones temperaturas iguales o superiores a 38 °C (38,6 °C el 4 de agosto de 2003, 38,2 °C el 26 de julio de 1928 y 38 °C el 21 de julio de 2003 y el 31 de julio de 1975). Las temperaturas máximas más bajas se produjeron el 1 de febrero de 1954 (-5,4 °C), el 3 de febrero de 1954 y el 11 de febrero de 1956 (-5 °C).

Las mínimas más altas tuvieron lugar el 19 de agosto de 1932 y 1947 con 26,4 °C y 26 °C, respectivamente. Por debajo de -10 °C se registraron temperaturas únicamente el 3 de febrero (-12,1 °C), 10 de febrero (-10,4 °C) y 12 de febrero (-10 °C) del año 1956 y el 6 de noviembre de 1985 (-10 °C).

En la *Figura 3* se muestran las distribuciones de frecuencias obtenidas a partir de los registros de temperatura máxima y temperatura mínima diaria. La media de las temperaturas máximas diarias es de 16,21 °C y su desviación estándar 5,84 °C; en el caso de las temperaturas mínimas, la media de las observaciones es de 10,25 °C con una desviación estándar de 4,89 °C.

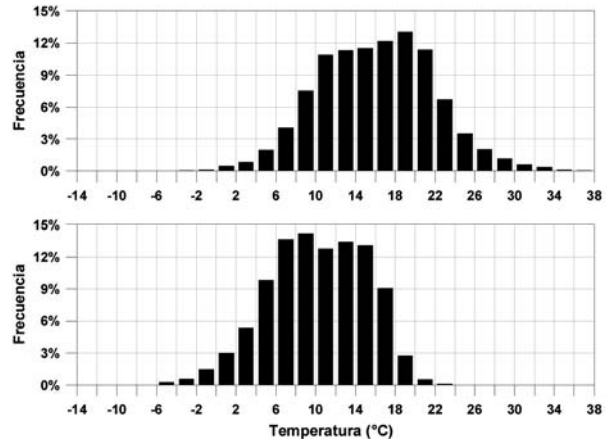


Figura 3. Distribución de frecuencias de las temperaturas máximas (imagen superior) y de las temperaturas mínimas (imagen inferior) registradas en Monte Igeldo desde enero de 1928 hasta diciembre de 2007.

La frecuencia de temperaturas máximas diarias superiores a 26 °C es de menos del 4,5% y entre 10 y 22 °C se encuentra el 70% de las medidas de la temperatura máxima diaria (*Figura 3*). Como puede verse en la *Figura 4*, la temperatura máxima diaria en el promedio anual está por encima de 10 °C a lo largo de todo el año, siendo inferior a 12 °C sólo en diciembre, enero y febrero.

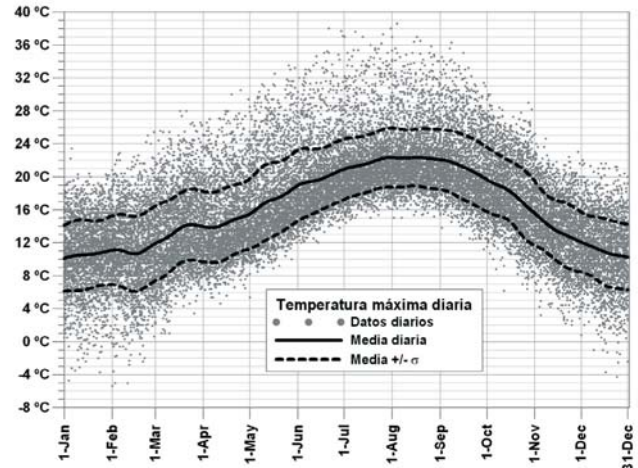


Figura 4. Evolución media a lo largo del año de la temperatura atmosférica máxima diaria obtenida a partir del registro del Observatorio de Monte Igeldo, desde enero de 1928 hasta diciembre de 2007.

Se puede observar que menos del 2,5% de las medidas de la temperatura mínima diaria se encuentran por debajo de 0 °C y el 67% de las medidas está entre 6 y 16 °C (*Figura 3*). Los valores inferiores a 6 °C se producen típicamente en los meses de invierno (de mediados de diciembre a mediados de marzo) tal y como puede verse en la *Figura 5*, fluctuando las temperaturas mínimas estivales entre 14 y 18 °C. La variabilidad de las temperaturas mínimas es prácticamente el doble en invierno que en verano.

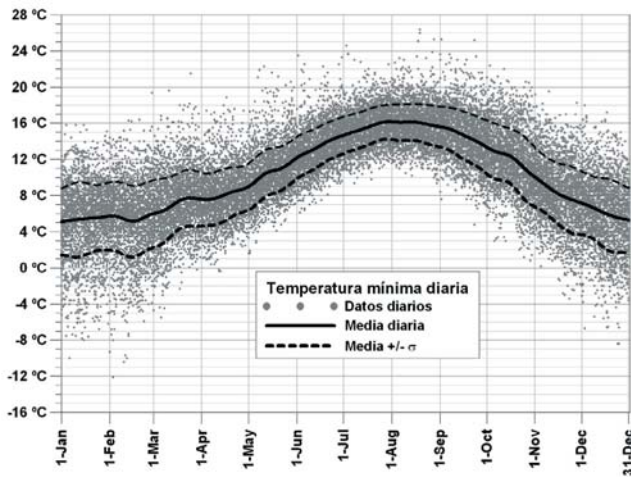


Figura 5. Evolución media a lo largo del año de la temperatura atmosférica mínima diaria obtenida a partir del registro del Observatorio de Monte Igeldo, desde enero de 1928 hasta diciembre de 2007.

En la *Tabla 1* pueden verse los valores promedio mensuales de la temperatura máxima y mínima (\pm desviación estándar) obtenidos a partir de los datos del observatorio de Igeldo.

Tabla 1. Evolución mensual media de las temperaturas mínimas y máximas ($\pm \sigma$) a lo largo del año, obtenida a partir de los datos del observatorio de Igeldo desde 1928 hasta 2007.

Mes	Tª Máx. (°C)			Tª Mín. (°C)		
	$\bar{T} - \sigma$	\bar{T}	$\bar{T} + \sigma$	$\bar{T} - \sigma$	\bar{T}	$\bar{T} + \sigma$
Enero	6,47	10,57	14,67	1,55	5,41	9,27
Febrero	6,58	11,03	15,48	1,64	5,49	9,35
Marzo	8,99	13,35	17,72	3,75	7,04	10,33
Abril	10,19	14,43	18,68	5,30	8,09	10,88
Mayo	12,80	17,20	21,59	8,06	10,58	13,10
Junio	15,94	19,81	23,68	11,28	13,45	15,62
Julio	18,13	21,65	25,18	13,54	15,5	17,46
Agosto	18,73	22,25	25,76	13,92	16,00	18,07
Septiembre	17,27	21,14	25,00	12,11	14,68	17,25
Octubre	14,12	17,98	21,83	8,89	12,06	15,22
Noviembre	9,89	13,61	17,32	5,03	8,42	11,81
Diciembre	7,13	11,01	14,89	2,44	6,13	9,82

En la *Figura 6* se ha representado la media móvil centrada cada 1, 2, 4 y 8 años de la temperatura máxima diaria. En la *Figura 7* se presenta la media móvil centrada cada 1, 2, 4 y 8 años de la temperatura mínima diaria.

El comportamiento de las series de la temperatura máxima y mínima no muestra diferencias cualitativas significativas. Se observa en ambos casos una alternancia de períodos fríos y cálidos hasta finales de la década de 1980, a partir de la cual se han producido los

valores extremos de las temperaturas medias anuales.

Los dos años más cálidos fueron 1998 y 1989, seguidos por los años 2003 y 2006 (*Figuras 6 y 7*). Desde mediados de la década de los 80 hasta 2007, todos los años salvo 1991 y 1992, tanto en temperatura máximas, como en las mínimas, se sitúan por encima de la media. Los años más fríos fueron 1956, 1963 y 1965.

A una escala decadal el registro puede considerarse agrupado en cuatro períodos:

- Desde 1928 hasta 1945 es un período frío, tanto en las temperaturas mínimas como en las máximas.
- Entre 1946 y 1962 las temperaturas máximas se situaron entorno a la media, mientras que, las mínimas fueron ligeramente más cálidas que la media.
- De 1963 hasta 1985 se produjo un período frío, especialmente en los valores mínimos.
- A partir de 1986 se observa un período notablemente cálido, que en temperaturas máximas se acrecienta a partir de mediados de mediados de los 90.

El resumen de los resultados de la tendencia de las temperaturas máximas y mínimas, estimadas mediante el método de regresión lineal, se muestra en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Estima de los parámetros de la tendencia de la media móvil central anual de la serie del Observatorio de Igeldo, mediante el método de la regresión lineal en el período 1928-2007.

Media móvil	Variable	$\bar{T} \pm \sigma_T$ (°C)	$b \pm \sigma_b$ (°C·década ⁻¹)
Anual	Temp. máxima	$16,19 \pm 0,11$	$0,11 \pm 0,01$
	Temp. mínima	$10,26 \pm 0,09$	$0,08 \pm 0,01$
Bienal	Temp. máxima	$16,18 \pm 0,11$	$0,12 \pm 0,01$
	Temp. mínima	$10,24 \pm 0,09$	$0,08 \pm 0,01$
4 años	Temp. máxima	$16,17 \pm 0,12$	$0,12 \pm 0,02$
	Temp. mínima	$10,23 \pm 0,10$	$0,08 \pm 0,01$
8 años	Temp. máxima	$16,16 \pm 0,12$	$0,12 \pm 0,02$
	Temp. mínima	$10,21 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$

En la imagen de la *Figura 8* pueden verse superpuestas las gráficas de la anomalía de la media móvil centrada, de período 8 años, de la temperatura máxima diaria y de la temperatura mínima diaria. Se observa claramente el cambio de tendencia producido a partir del año 1986 con un incremento en las medias de entre 0,4 y 0,5 °C.

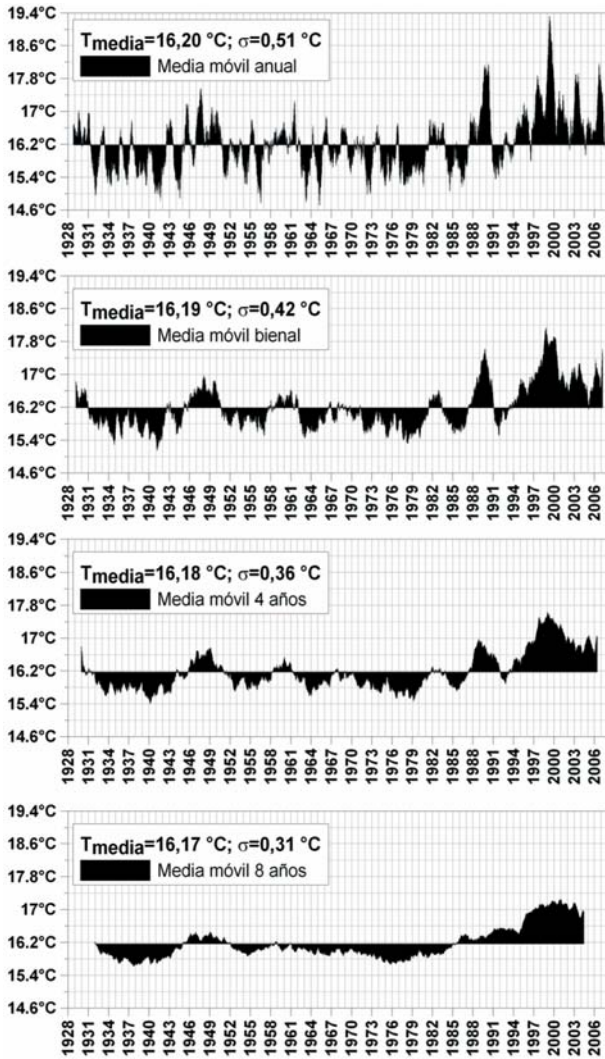


Figura 6. Media móvil centrada cada 1, 2, 4 y 8 años de la temperatura máxima diaria registrada en el Observatorio de Igeldo, desde el 2 de enero de 1928 hasta el 31 de diciembre de 2007.

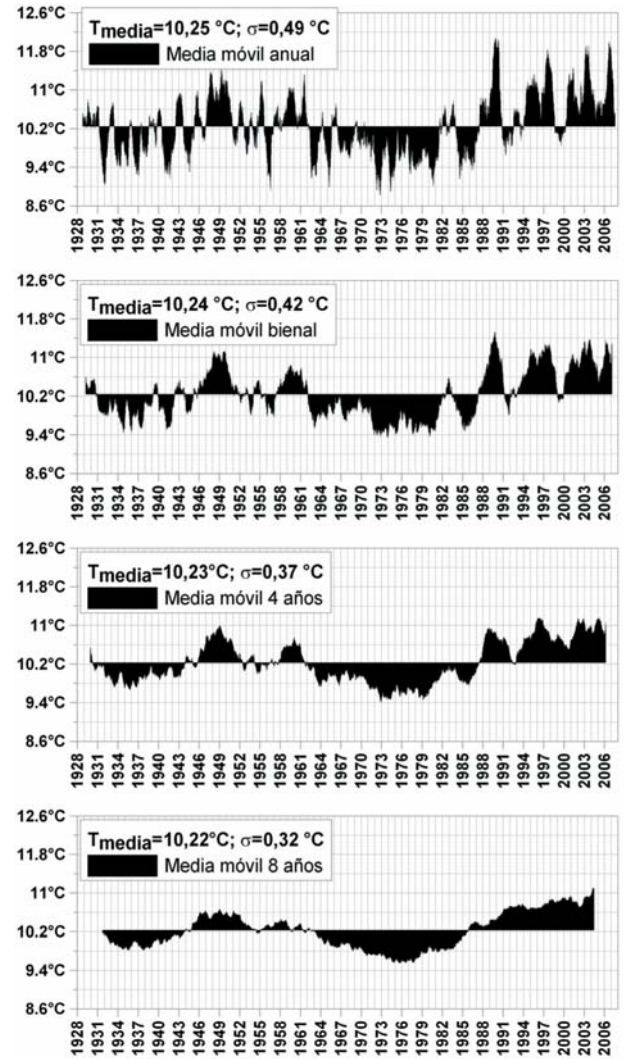


Figura 7. Media móvil centrada cada 1, 2, 4 y 8 años de la temperatura mínima diaria registrada en el Observatorio de Igeldo, desde el 2 de enero de 1928 hasta el 31 de diciembre de 2007.

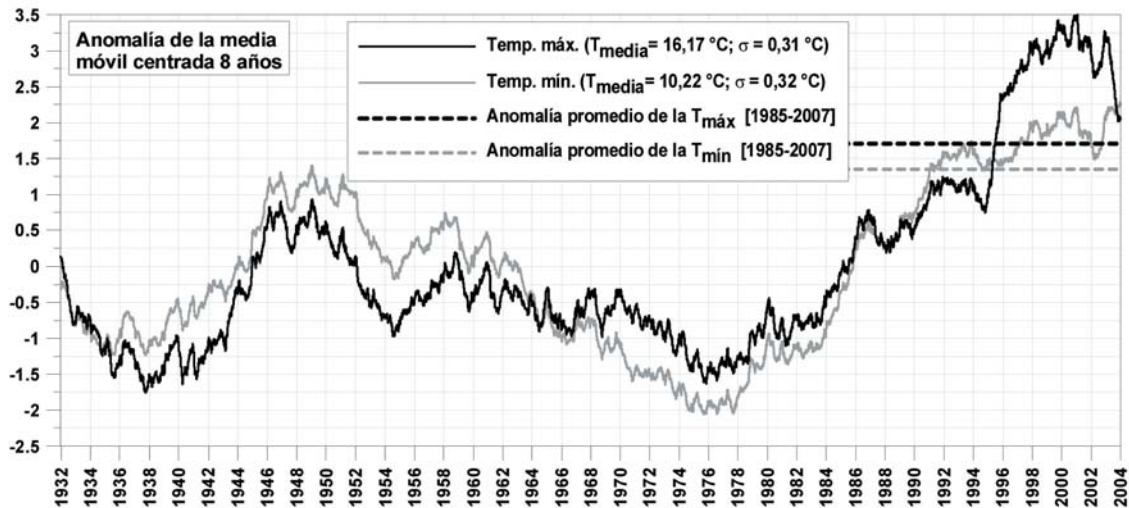


Figura 8. Anomalia de la media móvil centrada de 8 años de la temperatura máxima y mínima, obtenida a partir del registro del Observatorio de Igeldo, desde el 2 de enero de 1928 hasta el 31 de diciembre de 2007.

Tabla 3. Estima de los parámetros de la tendencia de la media móvil central anual de la serie del Observatorio de Monte Igeldo, mediante el método de la regresión lineal en el período 1928-1985.

Media móvil	Variable	$\bar{T} \pm \sigma_{\bar{T}} (^{\circ}\text{C})$	$b \pm \sigma_b (^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1})$
Anual	Temp. máxima	$15,99 \pm 0,15$	$-0,03 \pm 0,02$
	Temp. mínima	$10,07 \pm 0,12$	$-0,08 \pm 0,02$
Bienal	Temp. máxima	$15,98 \pm 0,16$	$-0,02 \pm 0,02$
	Temp. mínima	$10,06 \pm 0,13$	$-0,08 \pm 0,02$
4 años	Temp. máxima	$15,97 \pm 0,15$	$-0,00 \pm 0,02$
	Temp. mínima	$10,05 \pm 0,13$	$-0,08 \pm 0,02$
8 años	Temp. máxima	$15,97 \pm 0,16$	$-0,00 \pm 0,03$
	Temp. mínima	$10,05 \pm 0,14$	$-0,08 \pm 0,02$

En la *Tabla 3* se muestran las tendencias de la serie entre 1928 y 1985, y en la *Tabla 4* los resultados entre 1986 y 2007. Se observa que hasta 1985 la tendencia obtenida fue, en general, de un débil enfriamiento mientras que, a partir de 1986 el calentamiento ha sido importante. Asimismo, la diferencia entre las temperaturas medias en el período 1986-2007 y el período 1928-1985 es de aproximadamente $0,7^{\circ}\text{C}$.

Conclusiones

Los resultados del análisis de la tendencia de la serie de temperaturas completa (1928-2007) muestran un incremento neto, tanto en máximas (entre $0,11$ y $0,12 \pm 0,01^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1}$), como en las mínimas (entre $0,07$ y $0,08 \pm 0,01^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1}$).

La serie no presenta una variación neta de la temperatura media desde 1928 hasta 1985, llegando a presentar incluso una ligera tendencia negativa. Es, sin embargo, a partir de 1986 cuando se detecta un incremento de las temperaturas. Este incremento es más notable en temperaturas máximas (entre $0,38$ y $0,54^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1}$) que en temperaturas mínimas (entre $0,29$ y $0,31^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1}$) y supone un incremento en la temperatura media de, aproximadamente, $0,5^{\circ}\text{C}$.

La tendencia de las temperaturas mínimas en el período 1928-2007 es coincidente con la observada globalmente en el hemisferio norte desde 1901 a 2005 (entre $0,063$ y $0,079^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1}$), mientras que, la de las máximas es ligeramente superior. En el período 1986-2007 la tendencia de las temperaturas mínimas también se encuentra dentro del rango observado por Trenberth et al. (2007) en el hemisferio norte (entre $0,294$ y $0,344^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1}$) mientras que, en cuanto a las máximas la tendencia de la serie de Igeldo es superior.

Futuras líneas de investigación

Los datos de temperatura del aeropuerto de Hondarribi ($43^{\circ} 21' 24'' \text{N}$, $01^{\circ} 47' 25'' \text{W}$ y 8 m de altitud) si bien tienen una duración menor ya que están disponibles desde 1971, son una información de gran interés puesto que podrían confirmar el cambio de tendencia detectado en Igeldo a partir de 1985.

Tabla 4. Estima de los parámetros de la tendencia de la media móvil central anual de la serie del Observatorio de Igeldo, mediante el método de la regresión lineal en el período 1986-2007.

Media móvil	Variable	$\bar{T} \pm \sigma_{\bar{T}} (^{\circ}\text{C})$	$b \pm \sigma_b (^{\circ}\text{C}\cdot\text{década}^{-1})$
Anual	Temp. máxima	$16,76 \pm 1,02$	$0,38 \pm 0,10$
	Temp. mínima	$10,77 \pm 0,85$	$0,29 \pm 0,09$
Bienal	Temp. máxima	$16,75 \pm 1,07$	$0,38 \pm 0,11$
	Temp. mínima	$10,74 \pm 0,89$	$0,29 \pm 0,09$
4 años	Temp. máxima	$16,74 \pm 1,13$	$0,44 \pm 0,12$
	Temp. mínima	$10,71 \pm 0,95$	$0,30 \pm 0,10$
8 años	Temp. máxima	$16,71 \pm 1,28$	$0,54 \pm 0,13$
	Temp. mínima	$10,67 \pm 1,07$	$0,31 \pm 0,11$

Asimismo, la coincidencia de la serie de temperaturas del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián (1946-2007) con la de temperaturas atmosféricas de Igeldo (1928-2007) sugiere una posible vía para el estudio de la interacción térmica entre el océano y la atmósfera en la zona.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Estatal de Meteorología y, especialmente, a Don José Manuel Rodríguez Toimil de la Delegación Territorial en el País Vasco la cesión de la información del observatorio de Igeldo.

Esta es la contribución número 417 de AZTI-Tecnalia (Unidad de Investigación Marina).

Referencias

- Agencia Europea de Medio Ambiente. 2006. *Impactos del cambio climático en Europa*. Ministerio de Medio Ambiente. 99 pp.
- González, M., J., Mader, A., Fontán, Ad., Uriarte, L. Ferrer, 2008. Análisis de la tendencia de la temperatura superficial del agua del mar en Donostia-San Sebastián a partir del estudio de la serie del Aquarium (1946-2007). *Revista de Investigación Marina* 4: 7 pp.
- Press, H. W., Flannery, B. P., Teulosky, S. A. y W. T., Vetterling. 1989. *Numerical Recipes*. Cambridge University Press.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Usabiaga, J.I., J. Sáenz, V. Valencia, Á. Borja, 2004. *Climate and Meteorology: variability and its influence on the Ocean*. Borja, Á. and Collins, M. (Eds.). *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*, Elsevier Oceanography Series, 70: 75-9.

