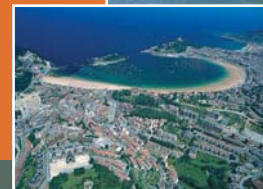




4

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)



González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, Ad., y Ferrer, L., 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.

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 Abril 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 superficial del agua en Donostia-San Sebastián, a partir del estudio de la serie del Aquarium (1946-2007)

Manuel González^{*a}, Julien Mader^a, Almudena Fontán^a, Adolfo Uriarte^a y Luis Ferrer^a

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del análisis de la temperatura superficial del agua del mar, medida en el Aquarium de Donostia-San Sebastián (43° 19' N, 02° 00' W). Esta serie se inició el 2 de julio de 1946 y en este trabajo se han considerado sus datos hasta el 31 de diciembre de 2007, lo cual supone más de 61 años de información. Los datos son diarios, tomados a las 10 de la mañana y el período de tiempo contemplado abarca 22.463 días. La serie presenta importantes ausencias de datos (especialmente en el período comprendido entre 1967 y 1975), de modo que no se dispone de información correspondiente a 5.122 días (el 22,80% de la serie). Con el fin de filtrar eventos de escala inferior al año, se ha obtenido la media anual móvil teniendo en cuenta la ausencia de datos en la serie original y, posteriormente, se ha analizado la tendencia de evolución de la serie mediante el método de regresión lineal y el método de minimización del valor absoluto de la desviación. En el período completo de la serie (1946-2007) la tendencia obtenida es muy débil (un ligero enfriamiento entre 0,0017 y 0,0002 °C·año⁻¹ con un margen de variación igual o superior a la tendencia observada). No obstante, se observa a partir de 1985 un apreciable calentamiento (entre 0,024 y 0,029 °C·año⁻¹ con un margen de variación de un orden de magnitud inferior $\pm 0,006$ °C·año⁻¹).

Introducción

El estudio de las series de datos océano-meteorológicos constituye uno de los elementos fundamentales para poder evaluar y predecir el efecto del cambio climático en el medio ambiente.

Desde finales del siglo XIX la temperatura media de la superficie del mar ha aumentado $0,6 \pm 0,1$ °C, en consonancia con el aumento de la temperatura atmosférica. Además, ningún mar europeo presenta un enfriamiento significativo, observándose en el caso del mar Báltico, el mar del Norte y el Mediterráneo occidental un calentamiento de 0,5 °C en los últimos 15 años (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2006).

La serie de datos del Aquarium, iniciada en julio de 1946, es la de mayor longitud del sudeste del Golfo de Vizcaya y constituye, sin duda, una valiosa fuente de información. Trabajos anteriores sobre esta serie en el período 1947-1997 (Borja *et al.*, 2000), han mostrado un ciclo de unos 20 años en las temperaturas medias, con un progresivo enfriamiento de las aguas desde 1946 hasta finales de la década de los 70, y un posterior incremento. Este resultado concuerda con el análisis de la variación anual de la temperatura de la superficie del mar en el hemisferio norte (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2006).

Se puede observar en la Figura 1 cómo los valores mínimos de la serie son de 9 °C y cómo hasta 1990 no se habían medido

valores superiores a 24 °C, superándose los 25 °C en 1996 y 2006. El máximo de la serie de medidas, superior a 26 °C, se alcanzó en el verano de 2003.

La ubicación del punto de medida en el interior de una bahía, sin aportes de agua continental considerables, y la rutina de la toma de medidas, que se efectúa aproximadamente a las 10 de la mañana (Borja *et al.*, 2000), así como la larga duración del registro (61 años), son factores que inducen confianza en los resultados que se obtienen. No obstante, existen importantes ausencias de datos en la serie (Figura 2), especialmente en las décadas de los 60 y 70, hasta el punto que en ese período son frecuentes los porcentajes de ausencias superiores al 60% por año.

El objetivo de este estudio es analizar la existencia de alguna tendencia en la serie del Aquarium de Donostia-San Sebastián, teniendo en cuenta la práctica totalidad del registro y, evaluar el efecto de la ausencia de datos, especialmente en el período entre 1966 y 1975, sobre esta tendencia.

Métodos

Los datos empleados en este estudio son las medidas de temperatura superficial del agua del mar realizadas por el Aquarium de Donostia-San Sebastián (43° 19' N, 02° 00' W) desde el 2 de julio de 1946 hasta el 31 de diciembre de 2007.

Con el fin de eliminar las variaciones de la serie debidas a patrones oscilatorios, como por ejemplo, las componentes estacionales, se ha realizado el promediado de los datos utilizando una media móvil centrada.

^a AZTI-Tecnalia, Muelle de Herrera, s/n, Zona Portuaria de Pasaia, 20110-Pasaia, Gipuzkoa. Fax: +34 943004801; Tel: +34 943004800; Correo electrónico: mgonzalez@pas.azti.es

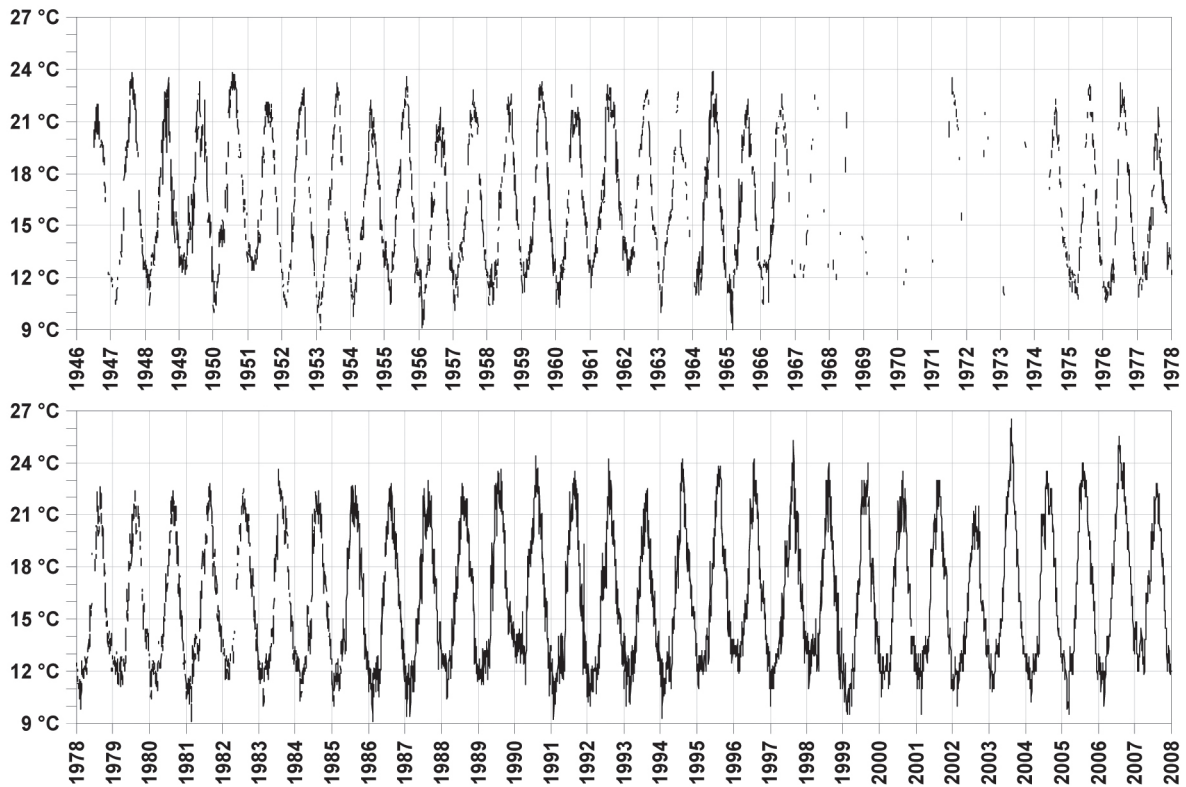


Figura 1. Registro de temperatura superficial del agua del mar en Donostia-San Sebastián desde el 2 de julio de 1946 hasta el 31 de diciembre de 2007.

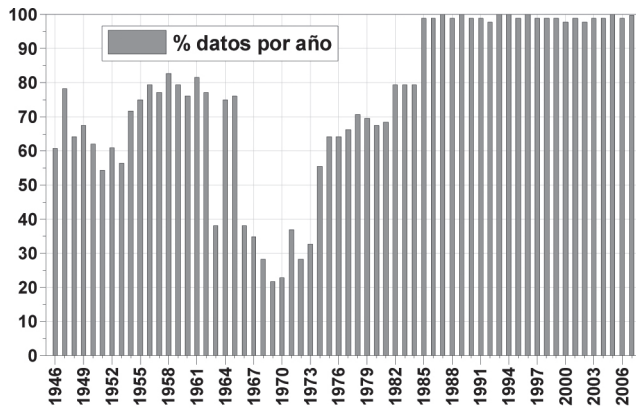


Figura 2. Distribución de huecos en la serie de temperatura superficial del mar en Donostia-San Sebastián desde el 2 de julio de 1946 hasta el 31 de diciembre de 2007.

Siendo $f(t)$ la función variable en el tiempo, se define $\varphi_T(t)$ la media móvil centrada como:

$$\varphi_T(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} f(\zeta) d\zeta$$

Si suponemos que la función puede describirse como una arte estacionaria más una parte oscilatoria:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N (A_k \cos(\omega_k t) + B_k \sin(\omega_k t))$$

La media móvil centrada es, en este caso:

$$\varphi_T(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} \left[A_0 + \sum_{k=1}^N (A_k \cos(\omega_k \zeta) + B_k \sin(\omega_k \zeta)) \right] d\zeta$$

$$\varphi_T(t) = A_0 + \frac{1}{2T} \sum_{K=1}^N \left[A_k \int_{t-T}^{t+T} \cos(\omega_k \zeta) d\zeta + B_k \int_{t-T}^{t+T} \sin(\omega_k \zeta) d\zeta \right]$$

$$\varphi_T(t) = A_0 + \frac{1}{2T} \sum_{K=1}^N \left[\frac{A_k}{\omega_k} [\sin(\omega_k \zeta)]_{t-T}^{t+T} - \frac{B_k}{\omega_k} [\cos(\omega_k \zeta)]_{t-T}^{t+T} \right]$$

$$\varphi_T(t) = A_0 + \frac{1}{T} \sum_{K=1}^N \left[\frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} [A_k \cos(\omega_k t) - B_k \sin(\omega_k t)] \right]$$

Si consideramos la expresión de frecuencia angular en función del periodo:

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}$$

Entonces:

$$\sigma_n^p = \sqrt{\frac{2p}{q} \sum_{k=-p}^{k=p} (t_{n+k} - \varphi_n^p)^2}$$

Siendo:

$$\bar{A}_k = \frac{T_k}{T} \frac{\sin(\omega_k T)}{2\pi} A_k$$

$$\bar{B}_k = -\frac{T_k}{T} \frac{\sin(\omega_k T)}{2\pi} B_k$$

Es decir, la media móvil centrada es una función que tiene la misma componente estacionaria que la función original y que oscila con sus mismas frecuencias. Si se considera el semiperíodo de promediado de modo que:

$$T \geq \max(T_1, T_2, \dots, T_{N-1}, T_N)$$

Entonces, la media móvil centrada tiene una amplitud de oscilación inferior a la original, siendo por lo tanto un método de suavizado.

En el caso de que las frecuencias de oscilación de la función $f(t)$ sean múltiplos del semiperíodo T :

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T} k$$

$$\sin(\omega_k T) = \sin\left(\frac{2\pi}{T} k T\right) = \sin(2\pi k) = 0$$

Y entonces:

$$\varphi_T(t) = A_0$$

Es decir, obtenemos en este caso la componente estacionaria de la serie original.

En el caso de datos discretos la media móvil centrada puede estimarse como:

$$\varphi_n^p = \frac{1}{2p+1} \sum_{k=-p}^{k=p} f_{n+k}$$

Se ha considerado la realización de la media móvil centrada con un valor de T igual a 182 días (como en este caso los datos son diarios $p=182$), con el fin de calcular de este modo la media móvil centrada anual. Adicionalmente, se ha impuesto que en el intervalo de promediado haya al menos cierto número de datos, tal y como puede verse en la Figura 3. Así, se ha utilizado el criterio de que al menos 360, 300, 250, 200, 150 y 100 días tengan dato de temperatura en el intervalo de promediado. En los casos en que el número de datos no sea suficiente se ha dejado un hueco en la serie.

La expresión empleada para el cálculo de la media móvil es:

$$\varphi_n^p = \frac{1}{2p+1} \sum_{k=-p}^{k=p} t_{n+k}$$

Como estimador de la incertidumbre de la media móvil centrada se ha empleado la siguiente expresión:

$$\sigma_n^p = \sqrt{\frac{2p}{q} \sum_{k=-p}^{k=p} (t_{n+k} - \varphi_n^p)^2}$$

Siendo q el número de datos válidos en el intervalo en que se realiza la media móvil centrada.

Para el análisis de la tendencia de la serie se han empleado dos métodos basados en la minimización funcional.

El primero de los métodos, denominado regresión lineal (Press *et al.*, 1989), minimiza la función:

$$\chi^2(a, b) = \sum_{k=1}^N \left(\frac{y_k - a - bx_k}{\sigma_k} \right)^2$$

Siendo:

- (x_i, y_i) ; $i=1, \dots, N$ un conjunto de pares de datos, que en este caso corresponden a los pares día, media móvil anual centrada.
- σ_i un estimador de la incertidumbre del valor y_i
- a y b los coeficientes de la recta de regresión $y=a+bx$

El segundo método de análisis de la tendencia de la serie ha sido un método de los denominados robustos, el de minimización del valor absoluto de la desviación (Press *et al.*, 1989), en el que la función a minimizar es:

$$\Phi(a, b) = \sum_{k=1}^N |y_k - a - bx_k|$$

En el caso de la regresión lineal, la formulación permite el uso o no del valor de la incertidumbre σ , habiéndose realizado los cálculos en ambos casos.

Resultados

En la Figura 3 se representa la media móvil centrada (MMC) anual (línea de color negro) y el valor del estimador de la incertidumbre σ (línea de color gris).

En la Figura 3 se puede observar la ausencia de datos, comprobando cómo únicamente a partir de 1986 la serie está prácticamente íntegra (imagen superior) y quedando claramente reflejado el espacio entre 1966 y 1975 en que faltan entre el 60% y el 75% de las medidas en los valores y que corresponde a los valores más altos del parámetro σ .

El promediado mediante la media móvil anual permite detectar los picos correspondientes a años cálidos y fríos en su conjunto, que no son fácilmente observables en el registro íntegro. De este modo, se ponen de manifiesto los picos de años cálidos, con 17,5 °C en 1950 y 1962, en la primera parte del registro, y el pico del año 2006 de 17,8 °C. En cuanto a los valores más fríos se observa el valor de 15,3 °C que se alcanzó en 1956, 1999 y 2002 y el mínimo de 15,0 °C de finales del año 1972.

El cálculo de la media móvil anual permite estimar la amplitud de la oscilación máxima entre años fríos y cálidos, en el periodo 1946-2007, en un valor de 2,7 °C.

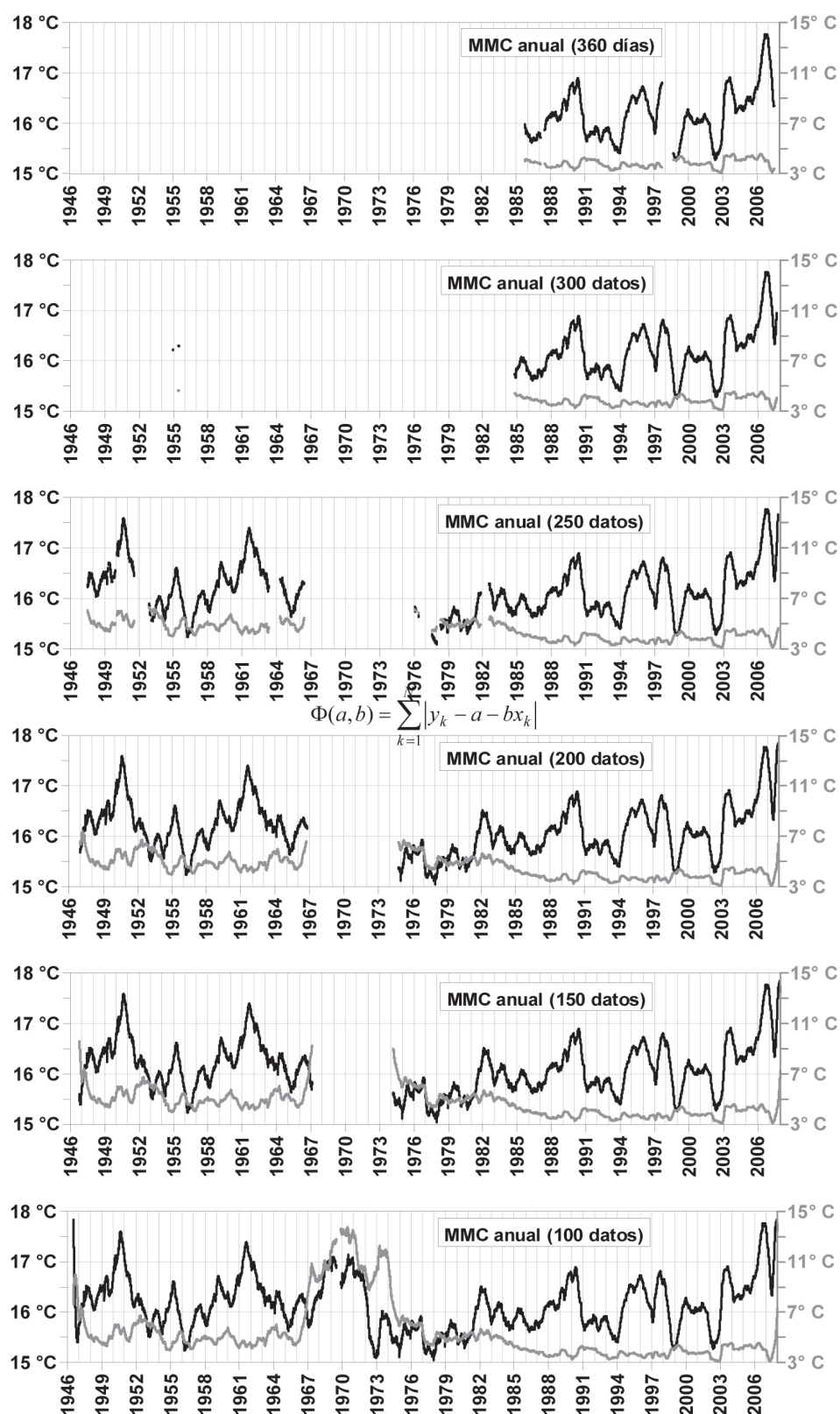


Figura 3. Media móvil centrada (MMC) anual (línea de color negro) de la serie de temperatura del Aquarium de Donostia-San Sebastián desde el 2 de julio de 1946 al 31 de diciembre de 2007 y valor del estimador de la incertidumbre σ (línea de color gris). En la leyenda de cada una de las gráficas se muestra el número de datos mínimo impuesto para el cálculo de la media móvil centrada anual: 360, 300, 250, 200, 150 y 100 días, respectivamente.

Con el fin de estimar las tendencias de la serie se han empleado los dos métodos descritos anteriormente. En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos en el cálculo de las tendencias de la serie. Ambos métodos permiten estimar los valores de los parámetros a y b de la recta de regresión. En el caso del uso del método de regresión lineal, tanto si se emplea el estimador de la incertidumbre de las medidas (σ) como si se considera nulo, se obtienen también los rangos de variación de los parámetros a y b , en todos los casos la relación obtenida es significativa.

Para facilitar la interpretación de los resultados, en la Tabla 1 se muestra, además del valor del parámetro b que representa la pendiente de la recta de regresión, el valor medio de la variable y (la media móvil centrada anual en este caso) en el período en que hay datos. Este valor se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{T} = a + \frac{b}{2}(x_{\min} - x_{\max})$$

Siendo $x_{\min}$ y $x_{\max}$ los extremos del eje de abscisas del intervalo en que disponemos de datos.

Tabla 1. Estima de los parámetros de la tendencia de la media móvil central anual de la serie del Aquarium mediante el método de la regresión lineal (sin el uso de la incertidumbre en la media y teniéndolo en cuenta) y con el método de la minimización del valor absoluto de la desviación.

Número de días	Método	Temperatura Media (°C)	b (°C·año ⁻¹)
100	Regr. lineal (sin σ)	16,140 ± 0,013	-0,0007 ± 0,0002
	Regr. lineal (con σ)	16,132 ± 0,122	-0,0002 ± 0,0017
	Min. Desv. Abs.	16,106	-0,0017
150	Regr. lineal (sin σ)	16,144 ± 0,013	-0,0002 ± 0,0002
	Regr. lineal (con σ)	16,128 ± 0,122	-0,0004 ± 0,0017
	Min. Desv. Abs.	16,088	-0,0012
200	Regr. lineal (sin σ)	16,124 ± 0,013	-0,0002 ± 0,0002
	Regr. lineal (con σ)	16,132 ± 0,122	-0,0002 ± 0,0017
	Min. Desv. Abs.	16,096	-0,0014
250	Regr. lineal (sin σ)	16,153 ± 0,014	-0,0009 ± 0,0002
	Regr. lineal (con σ)	16,152 ± 0,158	-0,0003 ± 0,0018
	Min. Desv. Abs.	16,105	-0,0012
300	Regr. lineal (sin σ)	16,171 ± 0,018	0,0292 ± 0,0007
	Regr. lineal (con σ)	16,160 ± 0,157	0,0248 ± 0,0064
	Min. Desv. Abs.	16,123	0,0276
360	Regr. lineal (sin σ)	16,179 ± 0,020	0,0291 ± 0,0009
	Regr. lineal (con σ)	16,165 ± 0,165	0,0237 ± 0,0071
	Min. Desv. Abs.	16,112	0,0291

En la Figura 4 se ha representado la media móvil centrada anual cuando el número mínimo de datos para su cálculo sea de 300, y la recta de tendencia de la serie obtenida mediante el método de la regresión lineal teniendo en cuenta el valor de la incertidumbre σ . En este caso el período para el que se dispone

de datos abarca desde el 23 de octubre de 1984 hasta el 4 de septiembre de 2007.

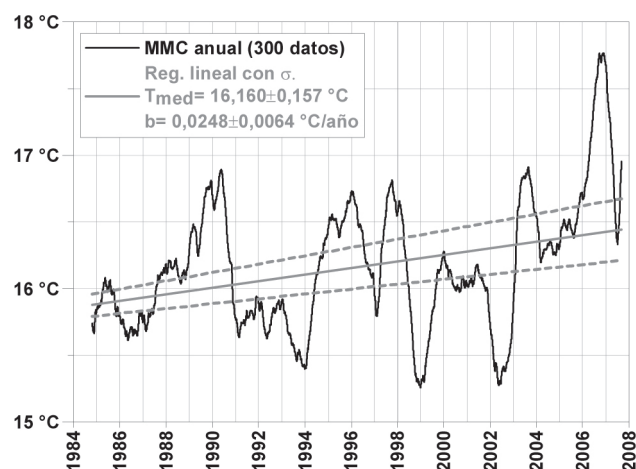


Figura 4. Media móvil centrada (MMC) anual de la serie de temperatura del Aquarium de Donostia-San Sebastián imponiendo un mínimo de 300 datos para el cálculo de la media móvil (línea continua de color negro).

Estima de la tendencia de la serie mediante la regresión lineal con el valor de la incertidumbre, la línea continua de color gris es la tendencia promedio y las líneas discontinuas de color gris son los valores extremos de la línea de tendencia.

En la Figura 5 se muestra la media móvil centrada anual cuando el número mínimo de datos para su cálculo sea de 100 y las rectas de tendencia de la serie empleando el método de la regresión lineal empleando el valor de la incertidumbre σ . En este caso el período para el cual se dispone de datos de la MMC anual abarca desde julio de 1946 hasta diciembre de 2007.

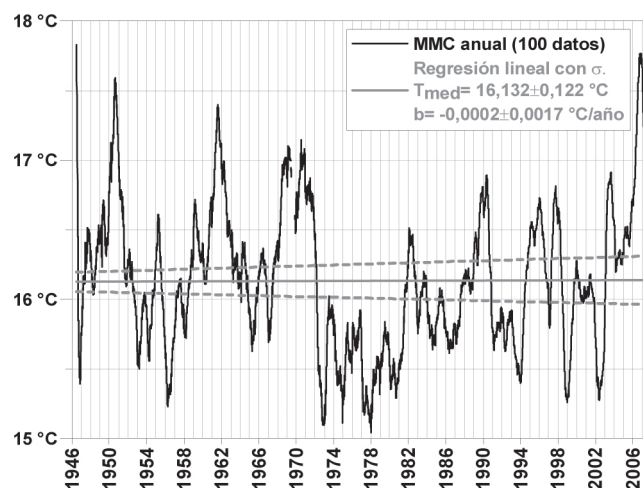


Figura 5. Media móvil centrada (MMC) anual de la serie de temperatura del Aquarium de Donostia-San Sebastián imponiendo un mínimo de 100 datos para el cálculo de la media móvil (línea de color negro). Estima de la tendencia de la serie mediante la regresión lineal con el valor de la incertidumbre, la línea continua de color gris es la tendencia promedio y las líneas discontinuas de color gris son los valores extremos de la línea de tendencia.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el análisis de la tendencia de la serie de temperaturas superficiales del Aquarium muestran una tendencia general en el periodo 1946-2007 poco definida, con un enfriamiento muy débil, de entre 0,0017 y 0,0002 °C·año⁻¹.

La ausencia de datos en la serie, sobre todo en el período entre 1967 y 1975, causa que el nivel de precisión obtenido mediante el método de regresión lineal empleado en este trabajo, para la estima de la tendencia de la serie, sea igual, o incluso superior, a la tendencia detectada.

En el período posterior a 1985, a partir del cual la serie dispone de más de 300 días con dato por año, se ha observado una clara tendencia de calentamiento, con un incremento de la temperatura de entre 0,024 y 0,029 °C·año⁻¹, con un margen de variación de este parámetro de un orden de magnitud inferior $\pm 0,006$ °C·año⁻¹.

Futuras líneas de investigación

La falta de datos en la serie del período 1967-1975 podría ser la causa de la incertidumbre detectada en la tendencia de la serie del Aquarium. No obstante, para comprobar esta hipótesis debería explorarse la posibilidad del empleo de técnicas de reconstrucción de la serie mediante modelado o bien mediante correlaciones con otras series de temperatura atmosférica de la zona que se encuentran disponibles.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente a la Sociedad Oceanográfica de San Sebastián el esfuerzo dedicado para la recogida de esta valiosísima información, así como su amable cesión a los autores de este trabajo a través del Dr. Ángel Borja. Esta es la contribución número 400 de AZTI-Tecnalia (Unidad de Investigación Marina).

Referencias

- Agencia Europea de Medio Ambiente. 2006. *Impactos del cambio climático en Europa*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Borja, A., J. Egaña, V. Valencia, J. Franco y R. Castro, 2000. 1947-1997, estudio y validación de una serie de datos diarios de temperatura del agua del mar en San Sebastián, procedente de su Aquarium. *Oceanografika*, 3: 139-151.
- Press, H. W., Flannery, B. P., Teulosky, S. A. y W. T., Vetterling. 1989. *Numerical Recipes*. Cambridge University Press.

