

EPISODIOS SIGNIFICATIVAMENTE CÁLIDOS Y FRÍOS REGISTRADOS EN EL OBSERVATORIO FABRA, BARCELONA

Augusto BURGUEÑO*, Xavier LANA** y Carina SERRA**

**Departament d'Astronomia i Meteorologia. Facultat de Física. Universitat de Barcelona.*

***Departament de Física i Enginyeria Nuclear. ETSEIB. Universitat Politècnica de Catalunya.*

RESUMEN

La serie de temperaturas máxima y mínima diaria del Observatorio Fabra (Barcelona) con datos desde 1917 a 1998, sin interrupciones, permite realizar un estudio detallado de los episodios cálidos y fríos, basado en la teoría del traspaso (*crossing theory*) de un determinado nivel umbral. Esta última nos conduce a obtener distribuciones estadísticas del número de episodios, de la fecha de inicio de cada uno y de sus magnitudes. Se comprueba que dichas distribuciones se cumplen únicamente para valores del nivel umbral suficientemente apartados de las temperaturas extremas medias diarias. Finalmente se completan estos estudios con otros que nos ayudan a comparar el comportamiento de los episodios cálidos con el de los episodios fríos.

Palabras clave: Episodios Significativamente Cálidos y Fríos, Teoría de Traspaso, Observatorio Fabra.

ABSTRACT

A long series of maximum and minimum daily temperatures recorded at Fabra Observatory (Barcelona) from 1917 to 1998, without lags, permits a detailed study of hot and cold spells, which is based on the crossing theory. This theory leads us to obtain statistical distributions quantifying probabilities concerning the number of hot and cold events per year, the starting date and the magnitude of a spell. It should be stressed that the statistical distributions describe well the empirical determinations only for threshold levels significantly distant from mean extreme temperatures values. Finally, other studies are included in order to establish a comparative analysis between hot and cold spells.

Keywords: *Significant Hot and Cold Spells, Crossing Theory, Observatorio Fabra.*

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los episodios cálidos y fríos de un lugar, que se apartan significativamente de los valores medios de temperatura, es importante para estimar el consumo de energía eléctrica de

la población (JURY y PARKER, 1998), para diseñar estrategias de defensa de la producción agrícola o para prevenir la mortalidad de los ancianos (BRYANT, 1997, RASO, 1999 y WAGNER, 1999). Existe una larga lista de referencias relacionadas con la temperatura diaria en todo el mundo pero son pocos los trabajos encontrados que tratan los episodios cálidos y fríos que traspasan un determinado nivel umbral (LEBOUTILLIER y WAYLEN, 1988, DEGAETANO, 1996 y SEN *et al.*, 1998). En este trabajo se utiliza la serie de temperaturas máxima y mínima diaria del Observatorio Fabra para el periodo 1917-1998. La misma base de datos ha sido minuciosamente examinada en SERRA *et al.* (2001), donde se han analizado la homogeneidad, aleatoriedad, tendencias e irregularidad de la serie de temperaturas extremas.

La teoría del traspaso (*crossing theory* o *run theory*) es una útil herramienta para estudiar la probabilidad de los acontecimientos meteorológicos anormales o poco frecuentes (CRAMER y LEADBETTER, 1967). Según aquella, los episodios raros pueden ser modelizados mediante procesos estocásticos adecuados. Uno de los objetivos del presente estudio es la validación de algunas distribuciones estadísticas (LEBOUTILLIER y WAYLEN, 1988) de los episodios cálidos y fríos. Se entiende por episodio cálido (frío) aquel día o grupo de días consecutivos cuya temperatura máxima (mínima) es superior (inferior) a un determinado valor umbral. Para el cumplimiento de dichas distribuciones es condición indispensable que las series de temperatura máxima y mínima sean estacionarias y gaussianas, requisito que poseen ambas series. Tres son las distribuciones consideradas. Primero, la teoría del traspaso establece que el número de episodios cálidos (fríos) por año sigue una distribución de Poisson (CRAMER y LEADBETTER, 1967). Segundo, la distribución de la fecha de inicio de los episodios es gaussiana. Tercero, la magnitud del episodio, entendido como la máxima diferencia (exceso o defecto) entre la temperatura máxima (mínima) y el valor del nivel umbral, está distribuida exponencialmente. Estos análisis son efectuados para diferentes niveles umbral y completados con otros cálculos que pueden ser de interés como por ejemplo las duraciones de los episodios o el número de episodios para cada estación del año. Finalmente, se comentan las diferencias más destacadas entre los dos tipos de episodios y se contrastan con los resultados obtenidos en otros puntos de la Tierra.

2. TEORÍA

Antes de aplicar las distribuciones estadísticas que cuantifican las probabilidades de las características de los episodios (número de episodios por año, fecha de inicio, magnitud y duración) es necesario verificar que las series diarias de temperatura máxima y mínima son estacionarias y siguen una distribución normal. De hecho, la distribución normal es una propiedad reconocida de las temperaturas diarias (ESSENWANGER, 1986). Además, de acuerdo con el teorema central del límite (BENJAMIN y CORNELL, 1970), la media mensual, estacional y anual de las temperaturas extremas siguen también una distribución normal. Una cuestión más discutible es la estacionariedad de las series. De acuerdo con CHATFIELD (1985), una serie temporal será estacionaria si no presenta cambios sistemáticos en el valor medio y en la varianza, y si las periodicidades son extrañas. Por otro lado, el efecto de las tendencias en las series debe ser también eliminado calculando para cada día de la base de datos una nueva temperatura máxima y mínima libre de tendencia, T_{ij}^* , como

$$T^*_{i,j} = T_{i,j} - (a_i \cdot j + b_i) + \bar{T}_i \quad (1)$$

donde $T_{i,j}$ representa la temperatura extrema original para el i -ésimo día ($i=1, \dots, 365$) del j -ésimo año ($j=1917, \dots, 1998$), \bar{T}_i la media del i -ésimo día considerando todos los años del periodo, a_i y b_i los coeficientes de la tendencia lineal deducida para cada día del año. El registro del 29 de febrero se ha eliminado en los años bisiestos. Las cuestiones relacionadas con las posibles periodicidades de la serie y los cambios sistemáticos en la media y en la varianza son discutidos en la sección siguiente.

Una vez eliminadas las tendencias y periodicidades se procede a calcular los episodios cálidos y fríos para diferentes niveles umbral. El término episodio cálido (frío) hace referencia a una serie de días consecutivos con temperaturas máximas (mínimas) diarias superiores (inferiores) a un nivel umbral, definido en referencia a el valor medio de la temperatura máxima (mínima) diaria. Es decir, con

$$T_{\max,i} > \bar{T}_{\max,i} + n\sigma_{T_{\max,i}} \quad (2)$$

$$T_{\min,i} > \bar{T}_{\min,i} + n\sigma_{T_{\min,i}} \quad (3)$$

donde $\bar{T}_{\max,i}$ y $\bar{T}_{\min,i}$ son las temperaturas medias máxima y mínima para el i -ésimo día y $\sigma_{T_{\max,i}}$ y $\sigma_{T_{\min,i}}$ las desviaciones estandar correspondientes. Los episodios se calculan para diferentes niveles umbral que se obtienen considerando diferentes factores n de la desviación estandar. La Figura 1 ilustra la definición de episodio cálido y frío mediante un ejemplo simulado.

La probabilidad del número de episodios, x , detectados en un año puede ser modelizado satisfactoriamente por una distribución Poisson

$$p(x;\lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} \quad x = 0, 1, 2, \dots; \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

siendo el parámetro λ la media y la varianza del número de episodios observados en un año. Este modelo es aplicable a acontecimientos meteorológicos raros e independientes tales como días en los que se han producido heladas (RASO *et al.*, 1987), días de tomenta (SNEYERS, 1990), o periodos con sequía (LANA y BURGUEÑO, 1998). Las rachas detectadas para niveles umbral cercanos a los valores medios posiblemente no seguirán el modelo de Poisson ya que en este caso los episodios pueden ser frecuentes. Dicho modelo es verificado para diferentes niveles umbral.

Otra característica importante de los episodios de calor y frío es el estudio de la fecha de inicio (y) en que se producen. Esta variable está distribuida normalmente con la función densidad de probabilidad

$$N(y; \mu, s) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(y - \mu)^2}{\sigma^2} \right] ; -\infty < y < \infty \quad (5)$$

donde μ es el valor medio y σ la desviación estandar de las fechas de inicio

Como se demuestra más adelante, los episodios fríos son más frecuentes en invierno, por lo que si utilizamos el calendario juliano la distribución de dichos episodios será bimodal, con picos al prin-

cipio y al final del año. Por este motivo redefinimos el año y escogeremos el 21 de junio como el primer día del nuevo calendario (*heat year*) (LEBOUTILLIER y WAYLEN, 1988). Aunque la distribución de los episodios cálidos no es la misma, también se utilizará el mismo calendario para unificar criterios.

Finalmente, la magnitud, z , de un episodio cálido (frío) es una valiosa información para cuantificar la severidad del episodio. Esta se define como la desviación de la temperatura del episodio con respecto al nivel umbral. Si el episodio tiene una duración superior a un día se toma como temperatura del episodio la más alejada del nivel umbral. Las magnitudes de los episodios están distribuidas exponencialmente, con la función densidad de probabilidad dada por

$$f(z;\beta) = \exp(-\beta \cdot z) ; z > 0, \beta > 0 \quad (6)$$

siendo β la inversa del valor medio de las magnitudes. Como en las dos funciones anteriores en este caso también se comprueba la distribución para diferentes niveles umbrales.

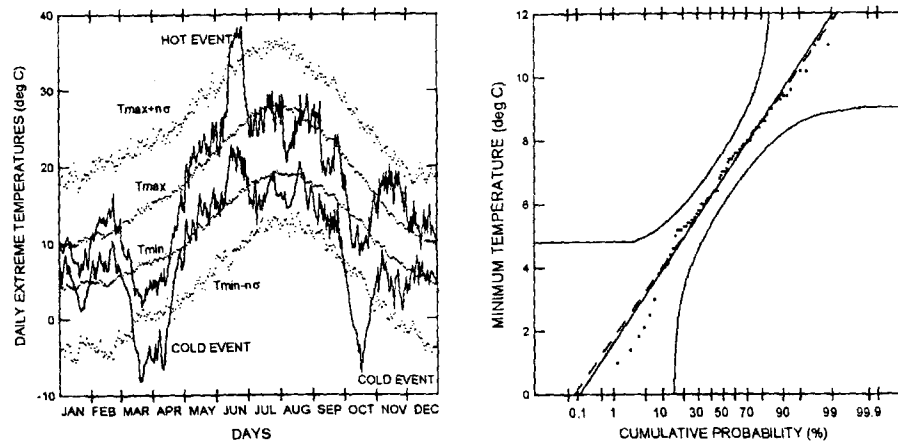


Figura 1. Simulación de un episodio cálido y dos fríos.

Figura 2. Distribución normal de probabilidades de la temperatura mínima del 15 de marzo.

3. APLICACIÓN

3.1 Estacionaridad de las series.

En primer lugar la hipótesis de que las temperaturas extremas diarias siguen una distribución normal ha sido comprobada con el test de Kolmogorov-Smirnov, cumpliéndose en todos los casos con un nivel de significación del 5%. La Figura 2 muestra un ejemplo correspondiente a la temperatura mínima del 15 de marzo. El segundo paso en el tratamiento de las series consiste en eliminar la tendencia de las mismas. Como fue comentado en SERRA *et al.* (2001), las series de temperatura máxima y mínima están afectadas por tendencias de $1,46^{\circ}\text{C}/100$ años y de $0,48^{\circ}\text{C}/100$ años, res-

pectivamente. En un estudio más detallado se detectaron también tendencias significativas para cada día del año (positivas o negativas) que ahora han sido corregidas de acuerdo con la ecuación (1).

Las Figuras 3(a) y 3(b) representan la desviación estandar diaria de las temperaturas máxima y mínima. Se puede ver en ellas que su comportamiento es irregular a lo largo del año. Mientras que en el caso de las temperaturas mínimas las desviaciones menores se obtienen en la zona central (de marzo a septiembre), en el caso de las máximas el comportamiento es más suave con valores algo más bajos entre septiembre y noviembre. Por otro lado, en ningún caso las desviaciones superan los 4°C. Para acabar de asegurar la estacionaridad de la serie se elimina la periodicidad anual al trabajar con excesos o defectos con respecto a los valores medios de temperatura máxima y mínima diarias, las cuales según SERRA *et al.* (2001) tienen una evolución sinusoidal.

3.2 Estadísticas de los episodios cálidos y fríos.

Los resultados más significativos relacionados con las tres distribuciones estadísticas anteriormente mencionadas se resumen en la Tabla 1. Se ha comprobado que el primer umbral en el que se cumplen las distribuciones con un nivel de significación del 5% es el de $\bar{T}_{\max} + 2.5\sigma_{T_{\max}}$ en el caso de los episodios cálidos y $\bar{T}_{\min} - 2.7\sigma_{T_{\min}}$ en el caso de los fríos. Estos valores demuestran que existe un cierto grado de asimetría entre los dos tipos de episodios.

Tabla 1. PARÁMETROS DE LAS DIFERENTES DISTRIBUCIONES PARA CADA NIVEL UMBRAL: Número de episodios por año (λ), fecha media de inicio (μ), desviación estandar de la fecha media (σ) y magnitud media ($1/\beta$). Además también se incluyen el número de episodios de invierno (I), primavera (P), verano (V) y otoño (O) y número de episodios de 1, 2, 3 y 4 días de duración.

nivel	λ (epis/año)	μ (días)	σ (días)	$1/\beta$ (°C)	n°de episodios				n°de episodios de n días de duración			
					I	P	V	O	1	2	3	4
+3.5	0.073	137.0	78.6	0.66	1	0	2	3	4	2	0	0
+3.4	0.134	146.2	78.3	0.56	1	1	3	6	9	2	0	0
+3.3	0.146	152.6	77.9	0.80	2	1	3	6	10	2	0	0
+3.2	0.207	158.0	96.9	0.81	2	3	6	6	14	3	0	0
+3.1	0.342	168.2	99.9	0.72	4	6	10	8	25	3	0	0
+3.0	0.402	175.3	104.2	0.88	4	8	11	10	28	5	0	0
+2.9	0.610	173.6	107.4	0.82	9	12	16	13	43	6	1	0
+2.8	0.842	178.7	108.9	0.84	13	18	20	18	58	10	1	0
+2.7	1.146	181.5	108.6	0.87	19	25	27	23	77	14	3	0
+2.6	1.365	190.8	106.3	0.99	24	31	26	31	93	13	6	0
+2.5	1.610	191.3	104.5	1.11	32	35	29	36	104	19	9	0
-2.7	1.232	163.0	97.8	0.96	27	16	31	27	66	25	5	5
-2.8	0.902	163.2	95.0	1.00	22	10	24	18	44	23	3	4
-2.9	0.719	168.8	94.6	0.95	20	7	19	13	37	17	1	4
-3.0	0.561	174.1	90.2	0.90	18	4	13	11	29	12	1	4
-3.1	0.415	191.3	90.7	0.90	16	4	7	7	21	8	2	3
-3.2	0.293	193.8	86.0	0.97	10	3	4	7	16	5	2	1
-3.3	0.232	185.8	82.6	0.94	7	2	3	7	13	3	3	0
-3.4	0.183	181.0	72.4	0.86	5	1	2	7	9	3	3	0
-3.5	0.122	171.1	55.9	0.93	4	0	1	5	7	0	3	0
-3.6	0.098	176.3	58.0	0.85	4	0	1	3	5	0	3	0
-3.7	0.073	178.2	58.8	0.81	3	0	1	2	3	0	3	0

Los casos con valores umbral superiores a $\bar{T}_{\max} + 3.5\sigma_{T_{\max}}$ e inferiores a $\bar{T}_{\min} - 3.7\sigma_{T_{\min}}$ no se han considerado ya que incluían un número de episodios insuficiente para que los resultados fueran significativos. Inspeccionando el número de episodios por año, correspondientes a los niveles umbral estudiados, se observa que oscilan entre 0.07 y 1.61, y que sistemáticamente es ligeramente mayor el número de episodios fríos que el de los cálidos. Las figuras 4(a) y 4(b) ilustra las distribuciones empírica y teórica de Poisson para $\bar{T}_{\max} + 3.0\sigma_{T_{\max}}$ y $\bar{T}_{\min} - 3.0\sigma_{T_{\min}}$. De acuerdo con estas figuras la probabilidad de que en un año se produzca al menos un caso cálido es aproximadamente del 30%, y del 40% en el caso de los episodios fríos.

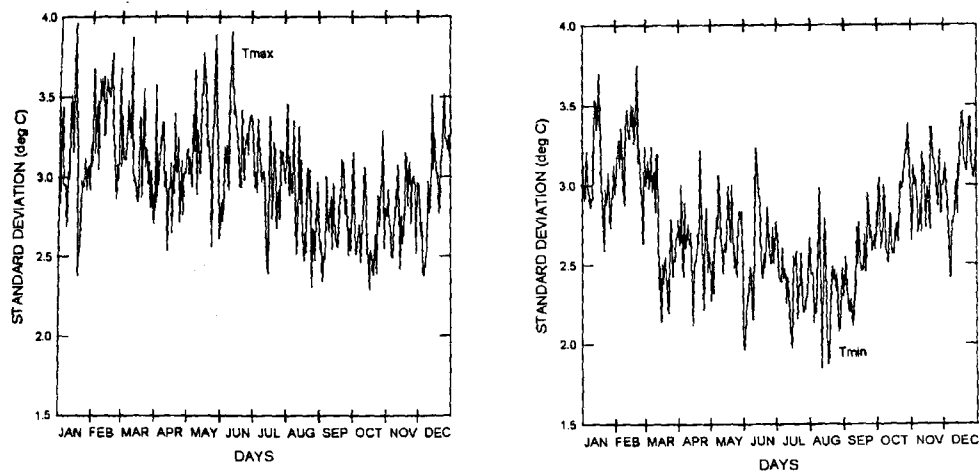


Figura 3. Desviaciones estándar de temperatura máxima (a) y mínima (b) a lo largo del año.

Los cálculos relacionados con la distribución gaussiana reflejan que, cuanto menor es el nivel umbral para los episodios cálidos, más cercana está la fecha media de inicio del episodio del solsticio de invierno. Más concretamente, la fecha media del comienzo de un episodio cálido oscila entre el 4 de noviembre y el 28 de diciembre (teniendo en cuenta que se ha tomado el origen de tiempo en el 21 de junio). Los casos fríos tienen un comportamiento diferente, ya que la fecha media de comienzo del episodio queda sistemáticamente más desplazada hacia el 21 de diciembre, oscilando entre el 30 de noviembre y el 30 de diciembre.

Las figuras 5(a) y 5(b) muestran dos ejemplos en los que se ajustan bien los valores empíricos con el modelo gaussiano. Las desviaciones estándar que se muestran en la Tabla 1 indican que la fecha de inicio de un episodio tiene una incertidumbre no despreciable. Esta varía entre 1.9 y 3.6 meses siendo generalmente mayor en el caso de los episodios cálidos que en el de los fríos. En la Tabla 1 se detalla el número de episodios para cada una de las estaciones del año. Mientras que el número de episodios cálidos es menor en invierno y mayor en verano, los fríos se presentan en menor medida en primavera. Cabe destacar que el otoño es una estación en la que el número de episo-

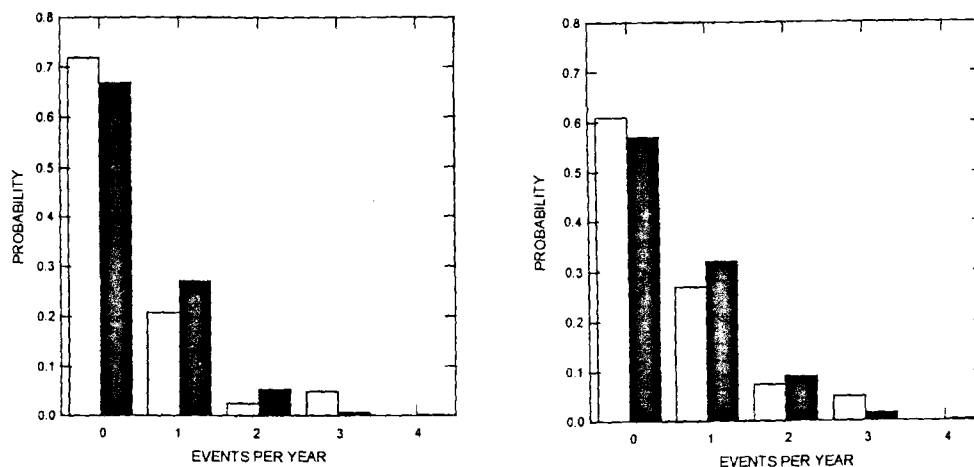


Figura 4. Distribución de Poisson del número de episodios cálidos (a) y fríos (b) por año (columnas negras) en comparación con el número de observaciones (columnas huecas), para el nivel umbral $\bar{T} \pm 3.0 \sigma_T$.

dios, tanto fríos como cálidos, aumenta cuanto más exigente es el nivel umbral, llegando a ser comparable o incluso superior al de las otras estaciones del año.

Los valores medios de las magnitudes de los episodios no superan los 1.11°C , siendo generalmente superiores las magnitudes de los episodios fríos que las de los cálidos. Estos valores confirman el carácter templado del clima de Barcelona, sobre todo cuando se comparan con las magnitudes obtenidas en otras regiones del planeta con niveles umbral mucho más exigentes (LEBOUILLIER y WAYLEN, 1988). Un ejemplo del buen ajuste entre las magnitudes empíricas y las teóricas dadas por la distribución exponencial se muestra en las figuras 6(a) y 6(b).

Otro aspecto interesante es la distribución de las duraciones de los episodios. La Tabla 1 resume el número de episodios de 1, 2, ...n días consecutivos. Las duraciones más largas encontradas son de 4 días en el caso de los episodios fríos y de 3 en el de los cálidos. Se trata de un número insuficiente para poder comprobar a qué función de distribución se ajusta mejor. En este caso se debería seguir el sistema propuesto por MACCHIATO *et al.* (1993) quienes utilizan un proceso markoviano y realizan simulaciones numéricas que les permiten extrapolar probabilidades para duraciones mayores debido a que las probabilidades estimadas se basan en series temporales largas de residuos de temperaturas extremas.

5. CONCLUSIONES

Como ya se esperaba, las series de temperaturas extremas siguen una distribución gaussiana, lo cual es uno de los requisitos para la utilización de la teoría de traspaso. La segunda condición, la

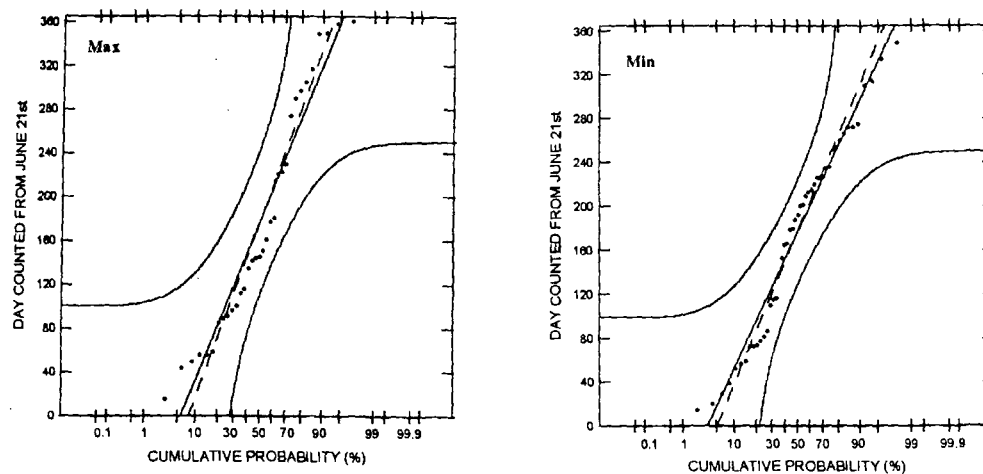


Figura 5. Comportamiento gaussiano de la probabilidad de la fecha de inicio de los (a) episodios cálidos y (b) episodios fríos para el nivel umbral de $T_{\pm} 3.0 \sigma_T$.

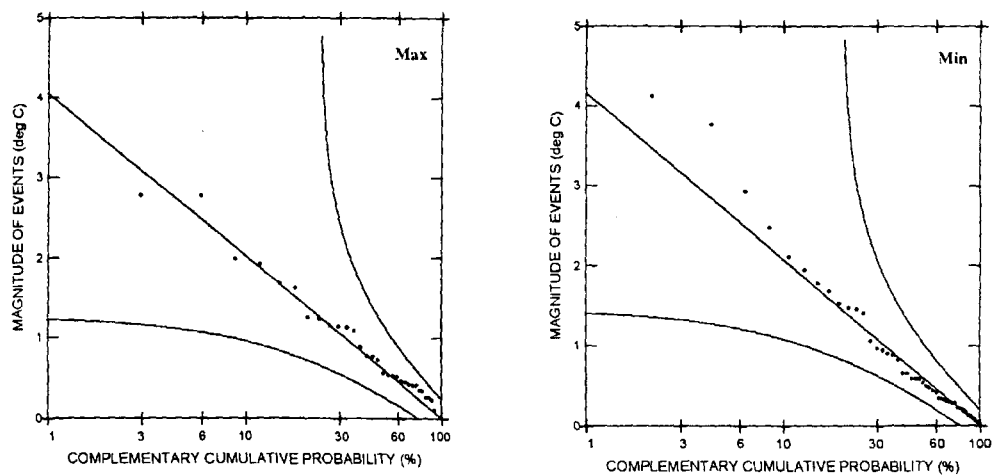


Figura 6. Comportamiento exponencial de la magnitud de los (a) episodios cálidos y (b) episodios fríos para el nivel umbral de $\bar{T}_{\pm} 3.0 \sigma_T$.

estacionaridad, se cumple dado que las periodicidades más relevantes han sido eliminadas y la desviación estandar a lo largo del año no presenta variaciones abruptas. Además, las tendencias diarias han sido también corregidas. Con respecto a la coherencia de la teoría del traspaso, hay que destacar que las tres distribuciones estadísticas verificadas se ajustan bien a los datos empíricos tanto para los episodios cálidos como para los fríos. Sin embargo, se ha detectado una cierta asimetría cuando comparamos los niveles umbral de los dos tipos de episodios. También existen pequeñas diferencias entre las características de los episodios cálidos y fríos. Estos últimos tienen una mayor frecuencia, magnitud y duración que los primeros aunque en los dos casos estas cantidades son muy moderadas si las comparamos con las obtenidas en otras áreas de la Tierra. Por ejemplo, mientras la teoría de traspaso es válida en una región templada como la nuestra para valores comprendidos entre $\bar{T}_{\min} - 2.7\sigma_{T_{\min}}$ y $\bar{T}_{\min} - 3.7\sigma_{T_{\min}}$, LEBOUTILLIER y WAYLEN (1988) trabajan con las temperaturas de un área mucho más fría (Canadá) con temperaturas entre 15 y 27°C por debajo de los valores medios lo que equivale a niveles umbral que varían entre $\bar{T}_{\min} - 5\sigma_{T_{\min}}$ y $\bar{T}_{\min} - 9\sigma_{T_{\min}}$. Con respecto a la fecha de inicio de los episodios fríos, su desviación estándar es mucho menor en el caso de Canadá, inferior a 2 meses, que en el trabajo que aquí se presenta donde las desviaciones estandar son superiores a los 3 meses en muchos de los niveles analizados. Todo ello sugiere que la teoría de traspaso es aplicable, con muy distintos niveles umbrales, a áreas climáticas bien diferenciadas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los datos utilizados en este trabajo han sido proporcionados por el Observatorio Fabra.

7. REFERENCIAS

- BENJAMIN, J.R. y CORNELL, C.A. (1970): "*Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil*". McGraw-Hill Latinoamericana, Bogotá, 685 pp.
- BRYANT, E. (1997): "*Climate process and change*". Cambridge University Press, Cambridge, 209 pp.
- CHATFIELD, C. (1985): "*The analysis of time series: An introduction*". Chapman and Hall, London, 286 pp.
- CRAMER, H. y LEADBETTER, M.R. (1967): "*Stationary and related stochastic processes*". Wiley, New York, 349 pp.
- DEGAETANO, A.T. (1996): "Recent trends in maximum and minimum temperature threshold exceedances in the Northeastern United States". *Journal of Climate*, Vol. 9, 1646-1660.
- ESSENWANGER, O.M. (1986): "Elements of statistical analysis". En "*World Survey of Climatology*", Vol. 1B, Elsevier, Amsterdam, 424 pp.
- JURY, M.R. y PARKER, B. (1998): "Cold winters over the South-African Highveld. Pattern-recognition and preliminary models". *South Afr. J. Science*, 94 (10), 473-481.

- LANA, X. y BURGUEÑO, A. (1998): "Probabilities of repeated long dry episodes based on the Poisson distribution. An example for Catalonia (NE Spain)". *Theor. Appl. Climatol.*, 60, 111-120.
- LEBOUTILLIER, D.W. y WAYLEN, P.R. (1988): "Stochastic analysis of cold events". *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 27, 67-76.
- MACCHIATO, M.; SERIO, C.; LAPENNA, V. y LA ROTONDA, L. (1993): "Parametric time series analysis of cold and hot spells in daily temperature: An application in Southern Italy". *J. Appl. Meteor.*, 32, 1270-1281.
- RASO, J.M. (1999): "Temperaturas extremas y mortalidad en Barcelona". *Proceedings of I Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Barcelona, 459-468.
- RASO, J.M.; MARTÍN VID,E J. y CLAVERO, P. (1987): "Estadística básica para ciencias sociales", Ed. Ariel Geografía, Barcelona, 285 pp.
- SEN, Z.; KADIOU-LU, M. y KOÇAK, K. (1998): "Comments on 'Recent trends in maximum and minimum temperature threshold exceedances in the Northeastern United States' ". *J. of Climate*, Vol. 11, 2147-2149.
- SERRA, C.; BURGUEÑO, A. y LANA, X.(2001): "Analysis of maximum and minimum daily temperatures of Fabra Observatory at Barcelona (NE Spain) from 1917 to 1998". *Int. J. Climatol.*, (En prensa).
- SNEYERS, R. (1990): "On the statistical analysis of series of observations". World Meteorological Organization, Technical Note n. 143, Geneva, 192 pp.
- WAGNER, D. (1999): "Assesment of the probability of extreme weather events and their potential effects in large conurbations". *Atmosph. Environ.*, 33 (24-25), 4151-4155.