

EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN ANUALES DESDE EL AÑO 1400 EN EL SECTOR CENTRAL DE LA DEPRESIÓN DEL EBRO¹

José CREUS NOVAU²

Ángel FERNÁNDEZ CANCIO³

Emilio MANRIQUE MENÉNDEZ⁴

RESUMEN.—En este trabajo se presentan las series dendroclimáticas de precipitación y temperatura de Pallaruelo de Monegros (Huesca, España) desde el año 1400 a 1989. Los resultados del análisis estadístico han permitido estimar los cambios climáticos a largo plazo y observar un incremento de la variabilidad del clima durante las últimas décadas.

ABSTRACT.—The dendroclimatical time series of the rainfall and temperature from the meteorological station of Pallaruelo de Monegros (Huesca, Spain), based on observations since 1400 till 1989, are presented in this study. The results of the statistical analysis enable us to estimate some long-term climatic changes and an increasing variability of the climate over the last few decades.

KEY WORDS.—Dendroclimatology, temperature, rainfall, trends, climatic changes, Ebro valley.

¹ Este trabajo forma parte del proyecto de investigación CLI96-1862, financiado por la CICYT.

² Instituto Pirenaico de Ecología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ap. 64. E-22700 JACA (Huesca).

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura. E-28071 MADRID.

⁴ Escuela de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. E-28071 MADRID.

INTRODUCCIÓN

Uno de los temas más debatidos por los estudiosos del clima en los últimos decenios es la gran variabilidad que muestran los elementos del clima, hasta el punto de que se ha cambiado la consideración que se tenía sobre los conceptos de estabilidad o inestabilidad climática. Fue en la década de los años setenta cuando, ante una serie de acontecimientos que sugerían una conducta climática anómala (sequías en el Sahel, inviernos muy fríos en otros puntos del planeta), empezaron a ponerse en duda las ideas hasta entonces muy vigentes de la normalidad de los periodos climáticos (KERR, 1985). Aún hoy es frecuente en ciertos ámbitos la consideración de que el clima es algo estable o muy estable y todo lo que se aparte de esa normalidad es síntoma inequívoco de un cambio irreversible en su tendencia.

Innumerables pruebas evidencian que el clima ha cambiado en el pasado a escala de centurias y milenios, lo cual permite afirmar que en la actualidad está en proceso de cambio y que seguirá cambiando en el futuro (FRIEDMAN, 1986). Pero determinados acontecimientos presentes en modo alguno deben equipararse con un proceso de cambio irreversible a medio plazo, dado que muchos casos pueden enmarcarse dentro de la «normal variabilidad» del clima, que de por sí varía día a día, año a año, en un contexto de fluctuaciones más o menos cíclicas. Sin embargo, mientras el cambio asociado a la evolución natural es un proceso muy lento, en la actualidad concurren una serie de circunstancias relacionadas con la actividad humana que pueden alterar su evolución normal, acelerando el proceso de cambio y con la posibilidad de generar gradientes clima-tiempo muy fuertes, de gran incidencia sobre cualquier forma de vida. Su persistencia sí cabría interpretarla como un brusco cambio de clima y la tendencia hacia el futuro podría ser irreversible, siempre y cuando sobrepasara los límites de un proceso cíclico y los mecanismos de amortiguación no fueran capaces de frenarlos. En este contexto se plantean grandes retos científicos, cual es el de discernir lo que es evolución natural del clima de lo que es evolución influida por el hombre, y hasta este momento la mayoría de los interrogantes todavía persisten.

El clima es uno de los factores ambientales con mayor influencia sobre los organismos vivos. De ahí las importantes repercusiones que tiene a nivel global cuando durante un corto periodo de tiempo, a veces unas horas o días, sobrepasa los límites de su «normal variabilidad». Todo el territorio

peninsular español sufre las consecuencias de una alternancia de influencias climáticas debido a estar situada en una zona de transición muy cerca de las masas frías subpolares, las cálidas o frías continentales, según la época del año, pero siempre secas, las húmedas de procedencia atlántica, las siempre cálidas y a veces secas subtropicales, etc. Según dominen unas u otras las condiciones climáticas son muy distintas y su alternancia es el hecho más característico de nuestro clima. Todo ello explica que la variabilidad intranual e interanual sea grande y que las propias secuencias de unas u otras características generen pseudociclos más o menos cambiantes, acompañados de acontecimientos a veces excepcionales que también forman parte de la «normalidad de nuestro clima».

La prevención de estos episodios sería importantísima para su normal proyección, de manera que cualquier aportación a este campo de la ciencia es una nueva contribución que debe ayudar a conocer ese sistema tan complejo que es el clima. Un mecanismo de prevención consiste en tener un conocimiento climático de lo que puede ocurrir en un futuro cercano y para ello los estudios de la evolución del clima pasado, en momentos de mínima influencia humana, pueden ser claves para determinar cuál puede ser su patrón de evolución natural y su posible ritmo. Para comprender el sistema presente se requiere una perspectiva que necesariamente debe tener en cuenta lo acontecido y así comprender la magnitud de las fluctuaciones. Para ello es necesario disponer de largos registros de información de alta resolución temporal donde situar el clima presente y que permitan modelizar el futuro.

Para conocer el clima pueden utilizarse diferentes fuentes de información, cada una de las cuales será más o menos adecuada en función de la escala temporal que se pretenda abarcar. Cuando nos referimos al pasado cercano disponemos del dato instrumental, pero apenas cubre los últimos 150 años. Ello dificulta la realización de caracterizaciones estadísticas, sobre todo cuando la solidez de los resultados depende de la secuencia temporal analizada.

Una de las técnicas utilizadas para conocer el clima de las últimas centurias es la dendroclimatología, referida a las reconstrucciones climáticas que se obtienen a partir del crecimiento anual que en general experimentan las especies leñosas en nuestras latitudes. A escala mundial se han conseguido reconstrucciones con notable éxito y a modo de ejemplo cabe citar la reconstrucción de las temperaturas de Europa occidental (SCHWEINGRUBER *et al.*, 1991), de los

países escandinavos (BRIFFA *et al.*, 1992), las precipitaciones en América del Norte (GRAMMLICH, 1987), etc., todas ellas durante varias centurias.

FUENTE DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA

La dendroclimatología, como técnica para estudiar el clima pasado, es de muy reciente introducción en España. Los primeros estudios datan de finales de los años setenta (CREUS, 1976) pero hasta los noventa no tuvieron el empuje necesario para sentar las bases de esta nueva técnica: crear un banco de dendrocronologías españolas con las que avanzar en estos estudios (CREUS *et al.*, 1992; GÉNOVA *et al.*, 1993) y que permitieran la realización de trabajos dendroclimáticos (CREUS *et al.*, 1990), fitoclimáticos (FERNÁNDEZ *et al.*, 1993), etc.

La fuente de información utilizada es la muestra que se obtiene de aquellos árboles que, por sus características (sensibilidad climática y longevidad), la hacen adecuada para tal fin. Por medio de una barrena Pressler se extrae un rodillo de 5 mm de diámetro por dos de sus caras equivalente al radio del árbol. Posteriormente se somete a un proceso de preparación en el laboratorio y a un conjunto de pruebas estadísticas para testar su validez. La reconstrucción del clima pasado puede hacerse durante tantos años como edad tengan los árboles utilizados. El desarrollo de la metodología utilizada (procesos de sincronización, estandarización, cálculo de funciones de transferencia, etc.) puede consultarse en la amplia bibliografía existente (COOK *et al.*, 1990; FRITTS, 1991). Dado que todo este proceso dendroclimático pasa por la disponibilidad de un banco de muestras de árboles lo suficientemente numeroso como para recoger la señal climática de alta y baja frecuencia en el espacio y tiempo, tales reconstrucciones no han sido posibles hasta la creación de ese banco formado en la actualidad por más de 1.100 muestras procedentes de todo el territorio peninsular. Ello ha sido posible gracias a las ayudas económicas concedidas a proyectos financiados por organismos públicos, CICYT, Comunidad Europea, etc. En el caso concreto de la reconstrucción de Pallaruelo de Monegros se han utilizado muestras de árboles procedentes en su mayoría de la zona pirenaica, cordillera Ibérica septentrional (soriana) y meridional (turolese), además de otras procedentes del sector central de la cuenca del Ebro.

Este trabajo es el primero de un conjunto de ellos previstos para el territorio español encaminados a reconstruir y analizar el comportamiento del clima en las últimas centurias en varios puntos de nuestra geografía. Los distintos climas peninsulares y su elevada variabilidad temporal requieren que las reconstrucciones sean numerosas a fin de conocer cuáles son las pautas comunes en el espacio atribuibles al comportamiento global del clima que interesa conocer y cuáles obedecen a factores locales, de por sí menos importantes. En este contexto se inscribe el objetivo de este trabajo, encaminado a reconstruir el clima del centro de la depresión del Ebro y más en concreto el observatorio de Pallaruelo de Monegros (Huesca), elegido por ser representativo de dicha zona y disponer de datos fiables tomados instrumentalmente durante los últimos 40 años, necesarios para ajustar las funciones de transferencia de la metodología dendroclimática.

CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS DEL PERIODO 1400-1989

En las figuras 1 y 2 se muestra la gráfica temporal de ambas variables suavizadas por media móvil de cinco años y en las tablas I y II se han recogido los datos estadísticos más significativos del conjunto de la serie (1400-1989) y de cada uno de los periodos de 100 años hasta 1989, además del intervalo 1960-1989 (1960-1989), por ser el más reciente y durante el cual las tendencias muestran un acusado gradiente de cambio.

La precipitación y temperatura media anual se han reconstruido desde el año 1400 hasta 1989, formando dos series de 590 años. Tales secuencias tienen la característica de ser continuas y, por tanto, susceptibles de ser tratadas como series temporales sin lagunas de información. Una primera aproximación a sus características ha consistido en analizar su grado de homogeneidad por medio de los tests de rachas de Thom y el de Newman. Ambos tests coinciden en señalar que las series de temperatura y precipitación muestran estructuras ligeramente distintas: la primera presenta cierta tendencia y como tal cabría calificarla de serie organizada; la segunda es más aleatoria y carente de organización temporal. En el caso de las precipitaciones podemos decir que se trata de un sistema poco autorregresivo en el que cada valor anual es bastante independiente de la cuantía de los años precedentes, mientras que los valores térmicos muestran una muy ligera inercia, aunque estadísticamente no significativa. Los índices que aportan

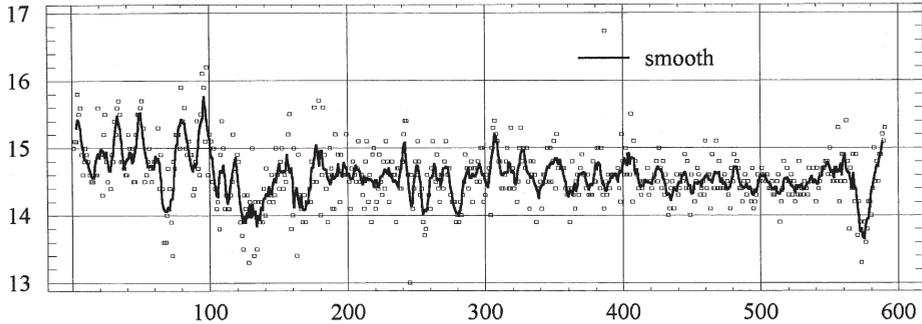


Fig. 1. Suavizado de la temperatura con media móvil de 5 años (0 = año 1400...).

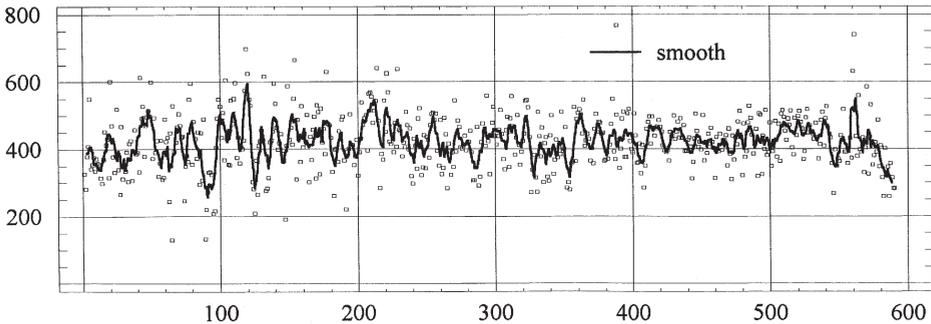


Fig. 2. Suavizado de la precipitación con media móvil de 5 años (0 = año 1400...).

ambos tests están muy próximos a los umbrales de significación que permiten caracterizar ambas series, pero no entran plenamente dentro de los límites exigidos, de manera que dichas características son una aproximación al tipo de datos que forman las series.

Observando las figuras 1 y 2, a lo largo de los 590 años pueden señalarse muchos intervalos de duración más o menos larga en los que el incremento o decremento de los valores térmicos y pluviométricos han sido estadísticamente significativos. El comentario de cada uno de ellos sería largo, pero merece la pena destacar el descenso térmico acaecido a mediados del siglo XV, el todavía más intenso de principios del siglo XVI en plena Pequeña Edad Glacial (PEG), el que tuvo lugar en los años sesenta del presente siglo, muy comparable al último citado en cuanto a intensidad (gradiente) aunque de menor duración, o el reciente incremento desde la década de los sesenta. Igualmente pueden indicarse comportamientos similares

de la precipitación, destacando el ascenso de finales del siglo XV, que dura hasta la segunda década del siglo XVI coincidiendo con un descenso térmico en esos mismos años, o el descenso que tuvo lugar desde los años sesenta hasta la actualidad. A medida que se reduce el intervalo de tiempo los cambios de tendencia son más numerosos e intensos y a medida que se amplía la escala considerada tienden a anularse al compensarse entre sí tendencias de signo distinto, y así ocurre al considerar las dos series en su totalidad. Sin embargo, algunas variaciones persisten a escala de siglo, tal como lo indican los valores de «r» de la tabla I: entre los años 1500 y 1600 la «r» temporal de la temperatura es significativa al 95%, al igual que entre 1700-1800 y 1800-1900, aunque de signo contrario. Con la precipitación ocurre algo similar, con reducciones de lluvia significativas al 99% entre 1600-1700, 1900-1989 y 1960-1989. Este comportamiento de los últimos treinta años es coincidente con el proceso general global, destacado por otros autores para el valle del Ebro (DEL VALLE, 1990) y concretado en las lluvias de verano e invierno como las más responsables de ello (PÉREZ *et al.*, 1994; CREUS, 1996).

Tabla I. Estadísticas de los valores de temperatura en Pallaruelo de Monegros.

	14001989	14001500	15001600	16001700	17001800	18001900	19001989	19601989
Nº > M+s		42	17	12	19	6	5	5
Nº < M-s		5	26	15	7	7	20	10
Nº anóm.		47	43	27	26	13	25	15
Media	14,58	14,22	14,45	14,52	14,60	14,50	14,49	14,40
ISCM	14,62	15,02	14,55	14,59	14,57	14,57	14,57	14,63
IICM	14,45	14,82	14,35	14,44	14,47	14,47	14,41	14,21
Mediana	14,6	14,9	14,4	14,6	14,6	14,5	14,5	14,4
SD	0,43	0,50	0,49	0,39	0,32	0,25	0,37	0,56
SE	0,017	0,05	0,049	0,039	0,032	0,025	0,039	0,10
Cuartil S.	14,8	15,2	14,8	14,8	14,8	14,6	14,7	14,9
Cuartil I.	14,3	14,6	14,1	14,2	14,4	14,4	14,3	13,9
Skewness	2,11	-0,55	0,78	-2,05	1,07	3,05	-1,47	-0,23
Kurtosis	5,78	1,61	0,15	2,94	-1,16	3,20	2,06	-1,06
CV	0,029	0,034	0,034	0,026	0,021	0,017	0,025	0,039
r	0,02	0,018	0,22*	-0,07	-0,21*	-0,18*	0,035	0,255
b	0,00053	0,00031	0,0038	-0,0010	-0,0023	-0,016	0,00049	0,0016
V. máx.	16,2							
Año	1497							
V. mínimo	13							
Año	1644							

Tabla II. Estadísticas de los valores de precipitación en Pallaruelo de Monegros.

	14001989	14001500	15001600	16001700	17001800	18001900	19001989	19601989
Nº > M+s		13	21	18	15	6	13	4
Nº < M-s		30	16	12	12	8	20	9
Nº anóm.		43	37	30	27	14	33	13
Media	421,8	395,6	429,8	434,7	423,4	422,6	424,7	395,7
ISCM	428,0	414,8	449,6	450,4	433,1	433,1	441,5	434,6
IICM	415,0	376,5	410,0	419,0	412,2	412,2	407,8	356,9
Mediana	422,4	389,0	423,6	429,7	425,5	427,9	425,1	384,6
SD	82,12	96,8	99,68	79,03	70,57	52,82	80,36	104,0
SE	3,38	9,63	9,96	7,90	7,06	5,28	8,47	19,0
Cuartil S.	475,4	466,2	491,2	484,2	485,1	460,5	479,7	433,9
Cuartil I.	369,7	331,7	366,3	389,6	370,1	392,2	371,1	325,4
Skewness	0,66	-0,46	0,85	1,08	-0,53	-1,44	2,41	3,30
Kurtosis	3,88	0,384	0,34	-0,15	1,45	-0,51	3,76	3,48
CV	0,19	0,24	0,23	0,18	0,16	0,12	0,19	0,26
r	0,049	-0,0026	-0,15	-0,32**	0,054	0,011	-0,34**	-0,62**
b	0,0237	-0,0085	-0,516	-0,87	0,133	0,006	-1,068	-7,37
V. máx.	741							
Año	1960							
V. mínimo	129							
Año	1464							

LEYENDA: 14001989 = periodo comprendido entre 1400 y 1989... Nº > M+s = nº de años cuyo valor supera la media + una desviación estándar. Nº < M-s = nº de años cuyo valor es inferior a la media - una desviación estándar. ISCM = intervalo superior de confianza de la media. IICM = intervalo inferior de confianza de la media. SD = desviación estándar. SE = error estándar. Cuartil S.= Cuartil superior. Cuartil I.= cuartil inferior. CV = coeficiente de variación. r = coeficiente de correlación variable/tiempo (* = significación al 95%, ** = significación al 99%). b = gradiente anual de la recta. V. máx. = valor máximo del periodo. V. mínimo = valor mínimo del periodo.

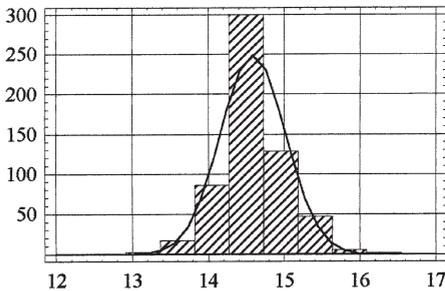


Fig. 3. Histograma de frecuencias de la temperatura.

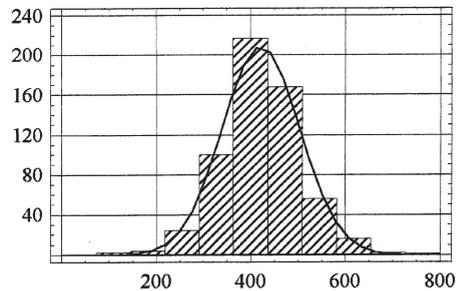


Fig. 4. Histograma de frecuencias de la precipitación.

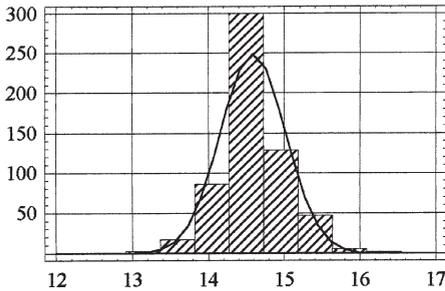


Fig. 5. Correlograma de la temperatura.

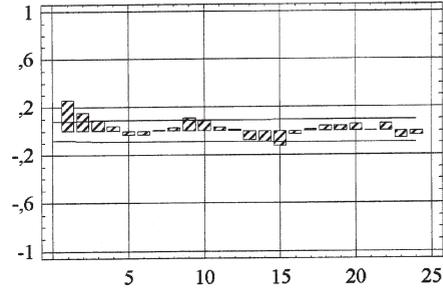


Fig. 6. Correlograma de la precipitación.

NORMALIDAD DE LAS SERIES

La escasa diferencia entre el valor de la media y la mediana, tanto de la serie de temperaturas como de la de precipitaciones, plantea la posibilidad de ajustar cada una de ellas a una distribución normal. En la tabla I se indica el valor de la media y mediana; estos últimos son ligeramente superiores pero no significativamente distintos. La *skewness* sugiere un ligero predominio de los valores algo inferiores a la media en el caso de las temperaturas y muy similares para las precipitaciones, en ambos casos considerando el conjunto de los 590 años. Si las analizamos en tramos de 100 años, obtenemos distribuciones de frecuencias mucho más dispares, lo que indica que los conjuntos de datos de cada siglo difieren bastante entre sí. Tal es el caso de un sesgo muy positivo para el periodo 1800-1900 o muy negativo, como entre los años 1600-1700. Además de ligeramente asimétricas, ambas distribuciones son algo más apuntadas debido a una clase modal muy frecuente, que es a su vez más apuntada en las temperaturas (mayor *hurtosis*) que en las precipitaciones (Figs. 3 y 4). Sin embargo, el pequeño valor de sesgo de ambas variables y el apuntamiento de las precipitaciones inducen a pensar que ambas distribuciones no se alejan mucho de la normal. El test de Kolmogorov nos lo confirma para la serie de precipitaciones, cuyos umbrales de significación no impiden aceptar la bondad de ajuste a una distribución normal con nivel de significación $\alpha = 0,01$ (valor del test = 0,0293, nivel de significación = 0,042), con una media de 421,8 mm y desviación tipo de 82,12, lo que indica que las amplitudes se distribuyen en torno a su valor medio siguiendo una probabilidad de tipo gaussiano. Por el contrario, su aplicación a la serie de temperaturas sólo

alcanza significación para $\alpha = 0,20$, lo que confirma que el mayor sesgo y apuntamiento indicados alejan su distribución real de la teórica normal.

ESTUDIO DE PERIODICIDADES

A pesar de la cierta estabilidad temporal que denotan las condiciones medias anuales al no mostrar tendencia significativa, es posible que tales series de temperatura y precipitación contengan cambios de tendencia repetitivos que den lugar a periodicidades significativas. Su conocimiento sin duda contribuiría a dar una cierta previsión de su evolución a corto plazo. Su detección no es fácil y para ello se aplican complejos cálculos a las series de datos. Una primera aproximación puede hacerse mediante el cálculo de los coeficientes de autocorrelación con sucesivos desfases de tiempo, ya que nos aporta una primera información sobre la organización interna de los datos al hacer referencia al grado de asociación que presenta una serie consigo misma al ser desfasada en intervalos temporales (DAVIS, 1986).

Para cada intervalo se computa su coeficiente de correlación, que, al disponerse en orden sucesivo, constituye el correlograma donde inferir posibles periodicidades. Los correlogramas presentados en las figuras 5 y 6 muestran los límites de confianza al 95% de cada uno de los casos representados (1 a 24 desfases), de manera que al indicar aquellos desfases que alcanzan significación se muestran los comportamientos periódicos significativos. En el caso de la temperatura media anual son significativos los seis primeros desfases y vuelve a serlo el desfase 21. Todos ellos son de difícil explicación: los desfases de 1 y 2 términos pueden corresponder a fuertes procesos autorregresivos y el desfase 2-3 años suele asociarse a la QBO (Quasi Biennial Oscillation), que a su vez daría lugar a múltiplos de hasta 6 desfases (MAHERAS *et al.*, 1990). El desfase significativo de 21 años suele interpretarse como un múltiplo del ciclo solar de 11 años. Ninguna otra autocorrelación es significativa en los 120 desfases siguientes.

Mucho menos significativos son los desfases calculados para la precipitación. Destacan únicamente los de 1, 9 y 15 años que sí alcanzan significación estadística, y tan sólo la rozan los desfases de 13 y 14 años, que junto con el de 15 presentan signo negativo. En los siguientes 120 desfases algunos se acercan ligeramente al umbral de significación, como ocurre con

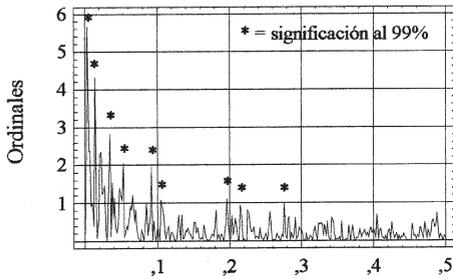


Fig. 7. Periodograma de las temperaturas.

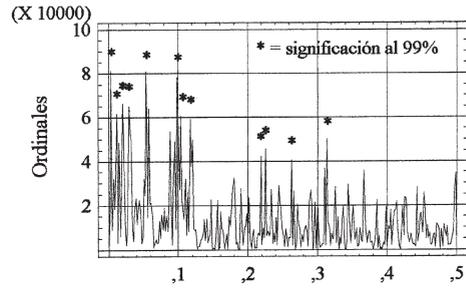


Fig. 8. Periodograma de las precipitaciones.

el desfase 47, con signo negativo, que muy bien podría relacionarse con el desfase 15 negativo como múltiplo de éste. Algo similar ocurre con el desfase 68 y su posible relación con el desfase 9, del mismo signo.

Dado que ambas series parecen contener ciertas periodicidades y que la autocorrelación con desfases no es capaz de alcanzar mayor precisión, se ha efectuado un análisis espectral con el fin de conocer mejor la estructura de los datos. Por medio de un análisis espectral se han calculado los periodogramas de las figuras 6 y 7, donde se resume la importancia de cada posible ciclo al distribuir entre ellos la varianza de la serie. De esta forma es posible buscar un modelo de comportamiento al analizar los efectos periódicos no aleatorios que puede haber en cada serie. Una vez estimado el espectro de frecuencia es posible descomponer la varianza de los datos en un rango continuo de frecuencias, representando la serie como un conjunto de sinusoides. La amplitud de cada frecuencia se ha calculado con transformadas de Fourier que descomponen la serie de datos en frecuencias fundamentales periódicas. De esta forma es posible extraer los posibles efectos periódicos contenidos en ambas series temporales, con mucha más fiabilidad y precisión que utilizando las autocorrelaciones.

Las frecuencias se han testado por medio del test de Fisher (DAVIS, 1986) cuyo índice:

$$g = s^2 \max / 2s^2$$

(donde $s^2 \max$ es la varianza asociada al pico que se desea testar y s^2 es la varianza de toda la serie) debe sobrepasar el valor crítico:

$$g_c = 1 - e^{-(1 - p)^{1/n} m / (m - 1)}$$

donde $\ln p$ es el logaritmo neperiano del nivel de probabilidad elegido y $m = n/2$ para series con un número de elementos (n) mayor de 30.

En los periodogramas de cada variable se ha indicado qué frecuencias son significativas para $\alpha = 0,05$ por medio de un asterisco. En el siguiente cuadro se resumen las equivalencias en años de cada uno de los ciclos significativos (sig.) al nivel indicado:

	Longitud de los ciclos en años													
	295	73	49	34,6	29	19	18	10,9	9,8	8,5	5	4,6	3,1	2,8
Temperat.	sig.	sig.			sig.	sig.		sig.	sig.		sig.	sig.	sig.	
Precipitac.	sig.		sig.	sig.			sig.	sig.	sig.	sig.		sig.	sig.	sig.

La interpretación de los ciclos en general presenta gran dificultad, dada la incertidumbre que existe sobre muchos de ellos al desconocerse las bases físicas que los expliquen; es más, los propios procesos estocásticos pueden generar ciclos falsos, armónicos de otros e incluso obtener distintos ciclos según el método matemático utilizado para calcularlos. En la bibliografía especializada se citan muchas periodicidades que en gran medida se atribuyen a ciclos de origen astronómico no del todo contrastados y otras referidas a trabajos cuyos resultados no se han comprobado en otras zonas. Su consulta, además de los trabajos individualizados sobre cada uno de ellos, puede hacerse en las síntesis realizadas por LAMB (1972) y LARRAS (1976).

Un breve comentario de cada uno de ellos y su posible relación con otros ciclos puede ser el siguiente:

- El de 295 años podría considerarse un múltiplo del ciclo de 90-100 años observado en algunas series climáticas europeas. Dado lo infrecuente de series climáticas con la longitud de las que se presentan en este trabajo, habrá que comprobar en futuras reconstrucciones su carácter de múltiplo que le atribuimos o si, por el contrario, aparece también en otras series con igual o mayor potencia.
- El ciclo de 73 años también cabe interpretarlo como un múltiplo del ciclo de 35 años que con gran frecuencia es observado en series climáticas instrumentales de más corta duración. Su frecuente aparición en este tipo de series le confiere cierta solidez.

- El de 34,6 años tiene una total correspondencia con el citado anteriormente de 35 años y por consiguiente refuerza los argumentos a su favor.
- Con longitud superior a los dos últimos citados, también se ha obtenido el ciclo de 49 años, de incierta relación con otros conocidos.
- El ciclo de 29 años parece tener buena relación con la evolución de las temperaturas estivales, como lo demuestran los resultados obtenidos a partir de series procedentes de latitudes septentrionales del hemisferio norte.
- Los ciclos de 18-19 años suelen relacionarse tanto con el desplazamiento de los grandes centros anticiclónicos subtropicales como con los fenómenos de mareas atmosféricas asociadas a la rotación del actual polo terrestre.
- Los de 9,8 y 10,9 suelen ser los más aceptados de entre los de corta longitud de onda. Se relacionan con ciclos de actividad solar medidos por el número de manchas solares, a las que responsabilizan de muchas anomalías de la circulación general atmosférica. Recientemente se han relacionado inversamente con la actividad tormentosa del hemisferio norte.
- El ciclo de 4,6-5 años se considera un armónico del ciclo de 11 y 22 años.
- Finalmente también se ha detectado el ciclo de 2-3 años, muy frecuente en las series de los observatorios meteorológicos. Es el periodo de la «Oscilación Sur» (QBO) identificada con la circulación marina a gran escala en el hemisferio sur, a su vez influida por una circulación general muy relacionada con las variaciones de la energía solar.

Una rápida interpretación permite afirmar que la evolución natural de la temperatura y la precipitación es muy compleja de modelizar, dado que la realidad climática a cualquier escala está formada por la superposición de un conjunto de comportamientos más o menos cíclicos que dificultan enormemente cualquier proyección a corto y medio plazo. Sin embargo, de sus posibles periodicidades podemos indicar que los espectros de la temperatu-

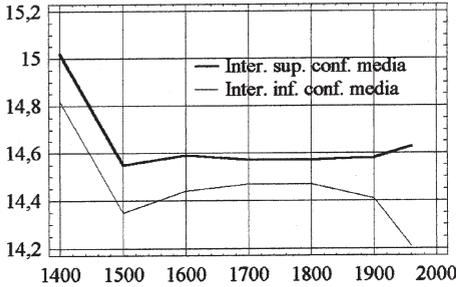


Fig. 9. Intervalos de confianza de la temperatura.

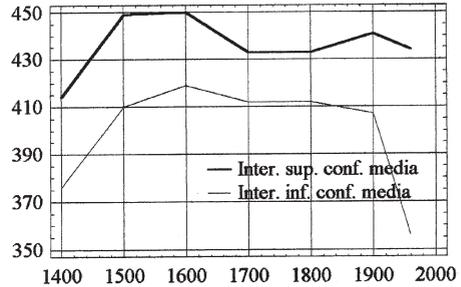


Fig. 10. Intervalos de confianza de la precipitación.

ra presentan mayor potencia en la baja frecuencia y que paulatinamente van reduciéndose a medida que lo hace la amplitud del ciclo. Por el contrario, el comportamiento de la precipitación aparece todavía más complejo dado que la frecuencia observada es más equitativa en cada uno de los ciclos, de manera que incluso los de alta frecuencia tienen un importante peso específico en su configuración.

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

La posibilidad de disponer de una serie temporal larga permite analizar con más certeza la normalidad o anormalidad de los valores de la serie de datos que la conforman. Tal aspecto lo consideramos de gran interés, dado que en la actualidad constituye un tema muy debatido debido a la frecuencia de acontecimientos climáticos calificados de excepcionales. Es difícil que unas series de datos climáticos obtenidos a partir del crecimiento anual de los árboles contengan fenómenos extremos de gran magnitud, entre otras razones porque los valores reconstruidos son valores anuales medios y como tales esconden cualquier valor absoluto o instantáneo. Así ocurre siempre que se tratan valores medios, aunque éstos procedan de datos tomados instrumentalmente en un observatorio actual. Las series dendroclimáticas reconstruidas aportan valores medios anuales y, aunque en modo alguno alcanzan la magnitud de los extremos diarios, son indicadores de la variabilidad que van tomando a lo largo de los siglos.

En las tablas I y II figuran los valores extremos (V. máx. y V. mínimo) de la temperatura y precipitación anuales, tanto para serie en su conjunto como para cada uno de los intervalos de 100 años ya indicados, además de los valores de los intervalos superior (ISCM) e inferior (IICM), que marcan los límites de confianza de la media. Igualmente figura el número de veces que ambas variables han sobrepasado el valor constituido por la media más una desviación ($N^\circ > M+s$) o no han alcanzado la media menos una desviación ($N^\circ < M-s$) con el fin de conocer la frecuencia de valores fuera del rango marcado por los dos anteriores límites. También figuran los coeficientes de variación (CV) para el conjunto de los 590 años y cada una de las centurias que se indican.

El valor máximo de la temperatura media anual registrado desde 1400 fue de 16,2°C en el año 1497, 2,2°C superior a la media de los 590 años. Tres años antes (1494) se registró una media anual muy similar (16,4°C) y ambos valores anuales extremos tienen lugar en uno de los momentos de máxima variabilidad climática, como son los siglos XV y XVI (CREUS, 1996). Sin embargo, los 13°C que constituyen el valor mínimo del periodo ocurren en el año 1644, durante la fase de declive de la PEG. Por consiguiente, la amplitud máxima media anual desde el año 1400 es de 3,2°C.

Un simple recuento del número de veces que los valores anuales de temperatura han sido muy elevados ($> M+s$) o muy pequeños ($< M-s$) como indicativos de la variabilidad interanual permite destacar las peculiares características de los siglos XV y XVI. Durante el primero se han contabilizado 47 años en que el valor anual quedaba fuera del rango marcado por la $M\pm s$ y durante el segundo, 43. Ambas centurias presentan un número de valores anuales extremos muy por encima de los registrados durante los demás siglos, incluso superiores a los habidos durante el «variable siglo XX». El número de casos de los últimos 30 años (1960-1989) sí supone un incremento importante dado que casi el 50% de estos años ha tenido valores extremos y este porcentaje es muy similar al de los citados siglos XV y XVI pero ligeramente inferior. Ello permite afirmar que el número de las anomalías térmicas registradas durante el siglo XX en modo alguno alcanza las habidas durante los siglos de mayor irregularidad de la PEG, pero desde hace unos 30 años el incremento de la variabilidad ha sido notable y los porcentajes tienden a equipararse.

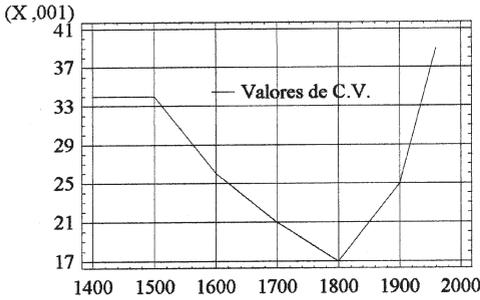


Fig. 11. Coeficiente de variación de la temperatura.

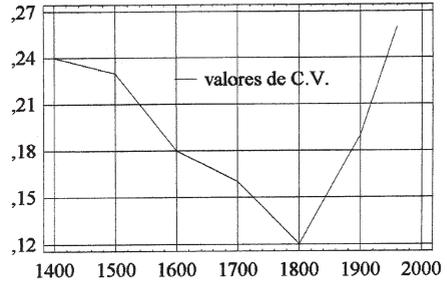


Fig. 12. Coeficiente de variación de la precipitación.

Las precipitaciones también muestran una máxima de irregularidad en los siglos XV y XVI, seguida de una disminución gradual hasta llegar al siglo XX, en que vuelve a incrementarse, muy especialmente durante el tercer trentenio, cuyo porcentaje de años fuera de rango (superior al 40%) es sólo ligeramente inferior al habido durante el siglo XV (43%). Sin embargo sus valores extremos no se centran en aquellos siglos, como ocurría con las temperaturas, sino que mientras el valor mínimo llovido durante un año (129 mm) ocurre en 1464 el máximo (741 mm) tiene lugar en el año 1960.

En las figuras 9-10 y 11-12 se ha representado el valor de los intervalos de confianza de la media (\pm el error estándar \times el intervalo de confianza según la distribución de Student) y del coeficiente de variación de las temperaturas y precipitaciones en intervalos de 100 años. Ambos son conceptos estadísticos sencillos cuyos valores pueden ser perfectamente interpretados como indicadores de la variabilidad temporal de ambas variables. En las figuras 9-10 se puede apreciar cómo la amplitud del intervalo de confianza de la media es máxima durante el siglo XVI y luego se estabiliza durante los siglos siguientes hasta llegar al siglo XX, en que se incrementa ligeramente, hasta un máximo muy significativo a partir de 1960. Proceso casi idéntico es el que se observa en la evolución de las precipitaciones, con un máximo nuevamente en el siglo XVI, reducción del intervalo y estabilidad del mismo durante las siguientes centurias y de nuevo gran incremento de su amplitud a partir de 1a década de los sesenta. El descenso que muestra el gráfico de la temperatura entre el siglo XV y el XVI se debe a que la temperatura media de este último es inferior a la del anterior, mien-

tras que con las precipitaciones ocurre todo lo contrario: el siglo XVI fue más lluvioso que el XV.

Analizando la evolución temporal del coeficiente de variación (Figs. 11 y 12) llegamos a la misma conclusión en cuanto a los cambios que experimenta el clima a lo largo de estos siglos. Este coeficiente es grande y se mantiene más o menos estabilizado durante los siglos XV y XVI, posteriormente va disminuyendo de forma paulatina hasta el siglo XIX para de nuevo tomar un fuerte incremento durante el siglo XX y muy especialmente a partir de 1960.

Ambos estadísticos coinciden en poner de manifiesto la elevada irregularidad detectada entre 1400 y mediados del siglo XVII, lo cual permite caracterizar a estos siglos como los de mayor influencia de la Pequeña Edad Glacial (CREUS *et al.*, 1996), independientemente de que el clima de su comienzo fuera más o menos irregular que el definido para estos siglos que comentamos, faceta nada resuelta, tanto lo referente a su duración como a sus comienzos, que algunos autores sitúan más de un siglo antes (PHISTER, 1992). A medida que la PEG finaliza, la irregularidad climática disminuye y así se mantiene hasta comienzos del siglo XX, en que se incrementa significativamente, muy en especial a partir de los años sesenta. Ello no supone que las condiciones actuales forzosamente devengan a más calor o frío, sino que la alternancia de años o periodos secos y húmedos con otros fríos y cálidos presenta una frecuencia tan sólo comparable a la ocurrida hasta mediados del siglo XVII.

CONCLUSIONES

Analizando los 590 años en su conjunto se concluye que tanto las temperaturas como las precipitaciones carecen de tendencia significativa, aunque la de la temperatura es ligeramente más elevada que la de la precipitación.

Sin embargo, la presencia de periodos más o menos largos en los que se suceden condiciones más secas o húmedas, frías o cálidas, hace que algunos de ellos presenten gradientes de incremento o disminución significativos, tendencias que no por tener gradientes más fuertes o hacerse más persistentes dejan de ser reversibles.

Los métodos autorregresivos con desfases de hasta 120 años apenas detectan periodicidades y las escasas que aparecen lo son en la alta frecuencia: máximo de 21 en la temperatura y 15 en las precipitaciones.

La mayor potencia del análisis espectral consigue extraer mayor número de ciclos estadísticamente significativos, que van desde amplitudes de muy baja frecuencia (295 años) a otros de tan alta como la bianual (2-3 años).

Tanto la serie de temperatura como de precipitación muestran periodos de gran variabilidad climática, muy especialmente durante los siglos XV, XVI y primera mitad del XVII, coincidiendo con los siglos de la PEG, que contrastan con otros periodos mucho más estables (segunda mitad del siglo XVI, XVIII y XIX).

Sin embargo, durante el siglo XX de nuevo se incrementa dicha variabilidad y muy especialmente desde 1960. Desde principios del siglo actual todos los parámetros utilizados para medir la variabilidad climática (años fuera de rango, intervalos de confianza de la media, coeficiente de variación) retoman valores que recuerdan, aunque no alcanzan, los habidos durante los siglos XV y XVI.

BIBLIOGRAFÍA

- BRIFFA, K.; JONES, P.; BARTHOLIN, T.; ECKSTEIN, D.; SCHWEINGRUBER, F.; KARLEN, W. y ZETTERBERG, P., 1992. Fenoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales. *Climatic Dynamics*, 7: 111-119.
- COOK, E., 1990. *Methods of dendrochronology*. COOK *et al.*, eds., Kluwer Academic Publishers, Londres.
- CREUS, J. y PUIGDEFÁBREGAS, J., 1976. Climatología histórica y dendroclimatología de *Pinus uncinata* R. *Cuadernos de Investigación*, 2 (2): 17-30.
- CREUS, J.; GÉNOVA, M.; FERNÁNDEZ, A. y PÉREZ, A., 1992. New dendrochronologies for Spanish Mediterranean zone. In: BARTHOLIN *et al.*, eds. *Lunqua*, 34: 76-78. Lund.
- CREUS, J.; MONTSERRAT, J.; FERNÁNDEZ, A. *et al.*, 1990. *Evolución ecológica durante el Holoceno y climática del último milenio en el área mediterránea española*. Lucdeme-Icna.
- CREUS, J., 1996. Variaciones en la disponibilidad hídrica mensual en el valle del Ebro. MARZOL *et al.*, eds. *Clima y Agua*. Universidad de La Laguna, 79-86.

- CREUS, J., 1996. Dendrocronología y clima del último milenio en España. *In: IBÁÑEZ et al.*, eds. *Erosión y desertificación en ambientes mediterráneos*. En prensa.
- DAVIS, J., 1986. *Statistics and data analysis in geology*. J. Willey-Sons, 646 pp.
- DEL VALLE, J., 1990. Tendencias climáticas en la zona central de la provincia de Huesca durante los últimos 30 años. *Geographicalia*, 27: 225-240.
- FERNÁNDEZ, A.; GÉNOVA, M. y CREUS, J., 1993. Estudio fitoclimático de la serranía de Cuenca durante los últimos 300 años. *Y Congreso Forestal Español*, tomo Y, 93-98.
- FRITTS, H., 1991. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. University of Arizona Press, 420 pp.
- FRIEDMAN, H., 1986. *Sun and Earth*. Scientific American Library, Nueva York, 251 pp.
- GÉNOVA, M.; FERNÁNDEZ, A. y CREUS, J., 1993. Diez series de anillos de crecimiento anual. *Invest. Agrar.*, 2 (2): 151-172.
- GRAMMLICH, L. J., 1987. Reconstructing variation in the Pacific Northwest (1675-1975) as reconstructed from tree-ring. *Annals of the Associat. American Geograph.*, 77 (1): 19-22.
- KERR, R. A., 1985. Fifteen years of African Drought. *Science*, 227: 1453-1454.
- LARRAS, J., 1976. Hydrométéorologie. Pseudo périodicité des moyennes annuelles de débit. *La Météorologie*, 13: 20-41.
- MAHERAS, P. y VAFIADIS, M., 1990. Analyse spectrale des series chronologiques de précipitation en Méditerranée occidentale. *Pub. Aso. Int. Climal*, 3: 421-429.
- PÉREZ, J. y CREUS, J., 1994. Tendencia secular de la precipitación en Zaragoza (1865-1984). PITA *et al.*, eds. *Cambios y variaciones climáticas en España*. Universidad de Sevilla, 169-182.
- PHISTER, C., 1992. Five centuries of Little Ice Age climate in western Europe. *In: Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age climate*. MIKAMI, eds., Tokyo Metropolitan University, 208-212.
- SCHWEINGRUBER, F.; BRIFFA, K. y JONES, P., 1991. Yearly maps of summers temperatures in western Europe from A. D. 1750 to 1975 and Western North America from 1600 to 1982. *Vegetatio*, 92: 5-71.