

EL PAPEL DE LA DENDROCLIMATOLOGÍA EN EL ESTUDIO DEL CAMBIO CLIMÁTICO ACTUAL

Emilio Manrique Menendez ¹ y Angel Fernández Cancio ²

¹ E.U.I.T. Forestal (Universidad Politécnica de Madrid). Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid.

² CIFOR-INIA. Ctra. Coruña km 7 s/n. 28040 Madrid

RESUMEN

En este trabajo se ha pretendido relacionar la fitoclimatología con la dendrocronología, mediante la obtención de información climática de los anillos de crecimiento de los árboles. En primer lugar se describe la metodología y se muestran varios ejemplos, en los que se realiza la reconstrucción de los subtipos y de los factores climáticos. En segundo lugar, mediante el estudio de los ciclos y otras características de las series, se aplican técnicas Autorregresivas y de Media Móvil (ARMA) para aportar alguna información sobre las sequías y se estudia el mantenimiento de la estructura de las series temporales para poder dar alguna información en el campo de la predicción.

INTRODUCCIÓN: DENDROCRONOLOGÍA Y FITOCLIMATOLOGÍA

De un modo general se puede decir que la fitoclimatología estudia las relaciones entre el clima y la vegetación. En particular, el sistema fitoclimático de J.L. ALLUÉ ANDRADE (1990) permite establecer una serie de correspondencias entre parámetros obtenidos a partir de los datos meteorológicos de una determinada zona y la realidad del mundo vegetal. Esta metodología es la que se ha utilizado a lo largo de todo el trabajo. El sistema utiliza como herramienta fundamental los climodiagramas de Walter-Lieth, de los que se obtienen diversos parámetros asociados a las temperaturas y a las precipi-

taciones. A partir de estos parámetros, utilizando un modelo sobre un espacio multidimensional, se puede cuantificar en sentido fitoclimático la proximidad de una estación meteorológica respecto a las distintas estrategias vegetales de nuestro país. El sistema incorpora múltiples tablas, gráficos y diagramas, que permiten el estudio de las consecuencias de un cambio climático en la vegetación, si éste se presenta (FERNANDEZ MELÉNDEZ, 1993).

La dendroclimatología es la disciplina que trata de obtener información climática a partir del estudio de los anillos de crecimiento anual de los árboles (FRITTS 1976). En primer lugar requiere un laborioso proceso dendrocronológico, en el que las series de anillos sufren diversas elaboraciones estadísticas cuyo objetivo es obtener la señal climática, eliminando en lo posible otras influencias. A partir de las cronologías ya elaboradas se pueden hacer reconstrucciones de parámetros climáticos (Función de transferencia), utilizando técnicas de series temporales. Actualmente se están utilizando procedimientos de recuperación de señales débiles (FERNANDEZ CANCIO *et al.* 1994) ya que a veces un parámetro climático no tiene la calidad suficiente para admitir una reconstrucción fiable. En una escala anual, los estudios dendroclimáticos se han revelado como una de las formas más importantes de reconstrucción climática de los últimos milenios (los árboles vivos más antiguos superan los 3000 años aunque son escasos a nivel

mundial. Tampoco hay que olvidar los estudios en maderas fósiles, de antigüedad muy superior).

El objetivo de este trabajo ha sido encontrar relaciones entre ambas disciplinas, tratando de obtener información fitoclimática a partir de los anillos de crecimiento anual de los árboles. Dada la importancia de este tipo de relación se ha acuñado un nuevo término, «dendrofitoclimatología» (ALLUÉ *et al.* 1993). De toda la información contenida en los anillos se ha utilizado fundamentalmente la que corresponde a su anchura, aunque existen otros parámetros de interés.

MÉTODOS

Métodos Dendrofitoclimáticos

Las pruebas que se realizaron antes de abordar en profundidad el problema de relacionar los anillos de crecimiento y los tipos fitoclimáticos, llevaron a la conclusión de que había que considerar los siguientes aspectos del problema:

- La búsqueda de una relación unívoca entre anillo y subtipo fitoclimático carece de sentido. Los subtipos no siempre dan lugar al mismo crecimiento.
- El problema de relacionar los anillos con los tipos climáticos anuales es la gran variabilidad de los primeros frente al limitado rango de los segundos, por lo que o se amplía el espectro de tipos, subdividiendo estos o se reduce el de los anillos, con la consiguiente pérdida de información. Como se parte de la base de la veracidad de los tipos, se ha optado por la segunda opción, estableciendo intervalos disjuntos de anillos (bandas), cuya unión forma el intervalo total.
- Las bandas de crecimiento permiten manejar proporciones de cada subtipo fitoclimático en el intervalo de calibración. Si se consideran como probabilidades se pueden elaborar modelos que se contrastarán en el intervalo independiente.
- Otro factor a tener en cuenta es la diferencia de primer orden entre dos anillos

consecutivos, e incluso la segunda diferencia (diferencia de diferencias primeras). Teniendo en cuenta que el anillo ya es una diferencia finita, las diferencias antes mencionadas serían como la segunda y la tercera «derivadas». Es obvia la importancia de estos valores en la dinámica de los fenómenos naturales. Desde el punto de vista del árbol, permiten obtener series de dos ó tres anillos (o tipos climáticos), a los que se asocia un número (la diferencia).

- El sistema de generación de bandas se puede aplicar también a las diferencias, estableciéndose proporciones (y probabilidades) de secuencias climáticas.

- Puesto que no existe una relación unívoca entre el anillo y el tipo climático, cabría preguntarse si a pesar de ello los grosores asociados a un clima formarían intervalos de variación disjuntos respecto al resto. La respuesta es también negativa; a pesar de ello se puede definir una «distancia» a cada tipo climático, cuyo valor mínimo debería corresponder al tipo real.

- Los intentos de cuantificar la variable cualitativa «clima», mediante simulación numérica, dan resultados coherentes cuando se eligen adecuadamente los estadígrafos que se deben optimizar en la simulación. Otra cosa es interpretar los resultados obtenidos, lo que parece más difícil (FERNANDEZ CANCIO *et al.* 1993); (MANRIQUE *et al.* 1993).

- Mediante las técnicas clásicas de la dendroclimatología se pueden reconstruir variables climáticas independientes mediante la función de transferencia (FRITTS 1993). Cuando estas reconstrucciones son estadísticamente significativas, el sistema fitoclimático de J.L.ALLUÉ permite obtener los subtipos correspondientes a cada año.

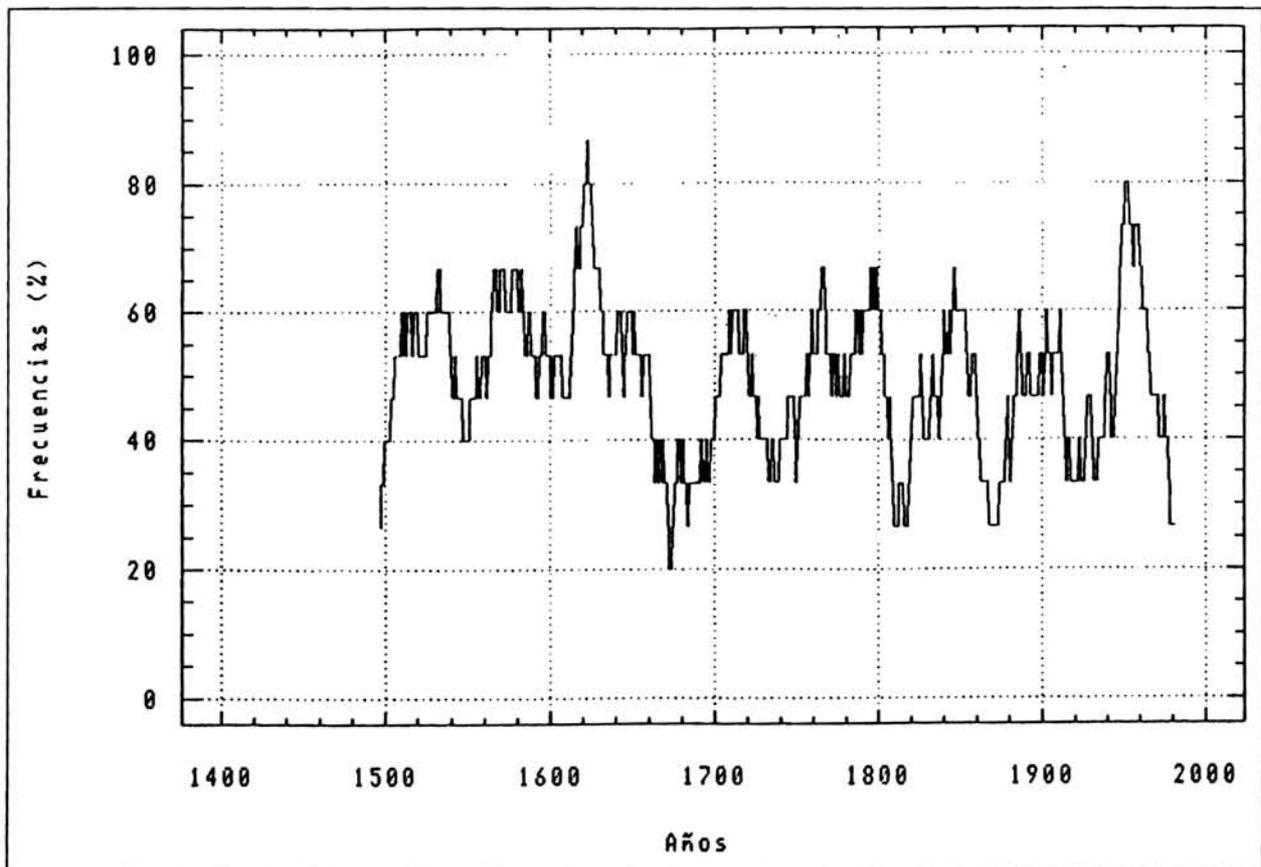
A partir de las anteriores consideraciones se puede observar la diversidad de enfoques que se pueden realizar del problema, casi todos con resultados estadísticamente significativos en la mayor parte de las cronológi-

Subtipo	Uña		Vinuesa	
	f real 1923-1985	f estim. 1489-1988	f real 1935-1990	f estim. 1471-1990
IV(VI) ₁	4.76	2.4	—	—
IV(VII)	7.94	8.8	14.3	9.1
VI(IV) ₁	9.52	9.8	16.1	15.4
VI(IV) ₂	23.81	22.6	30.4	40.2
VI(IV) ₄	—	—	3.6	1.4
VI(VII)	7.94	9.0	10.7	6.4
VI	6.35	7.6	5.3	4.4
VIII(VI)	14.29	14.0	19.6	23.3
X(VIII)	1.59	0.6	—	—
X(IX) ₂	23.81	25.2	—	—

Tabla 1. Comparación entre las frecuencias estimadas por los métodos dendrofitoclimáticos y las frecuencias reales, en Uña y Vinuesa.

as. Utilizando los puntos indicados en el párrafo anterior se han desarrollado varios métodos de reconstrucción fitoclimática, que se enumeran a continuación:

Figura 1: Frecuencias en polinomios de 15 años de los climas fríos de Uña: VI(VII), VIII(VI), X(VIII) y X(IX)₂



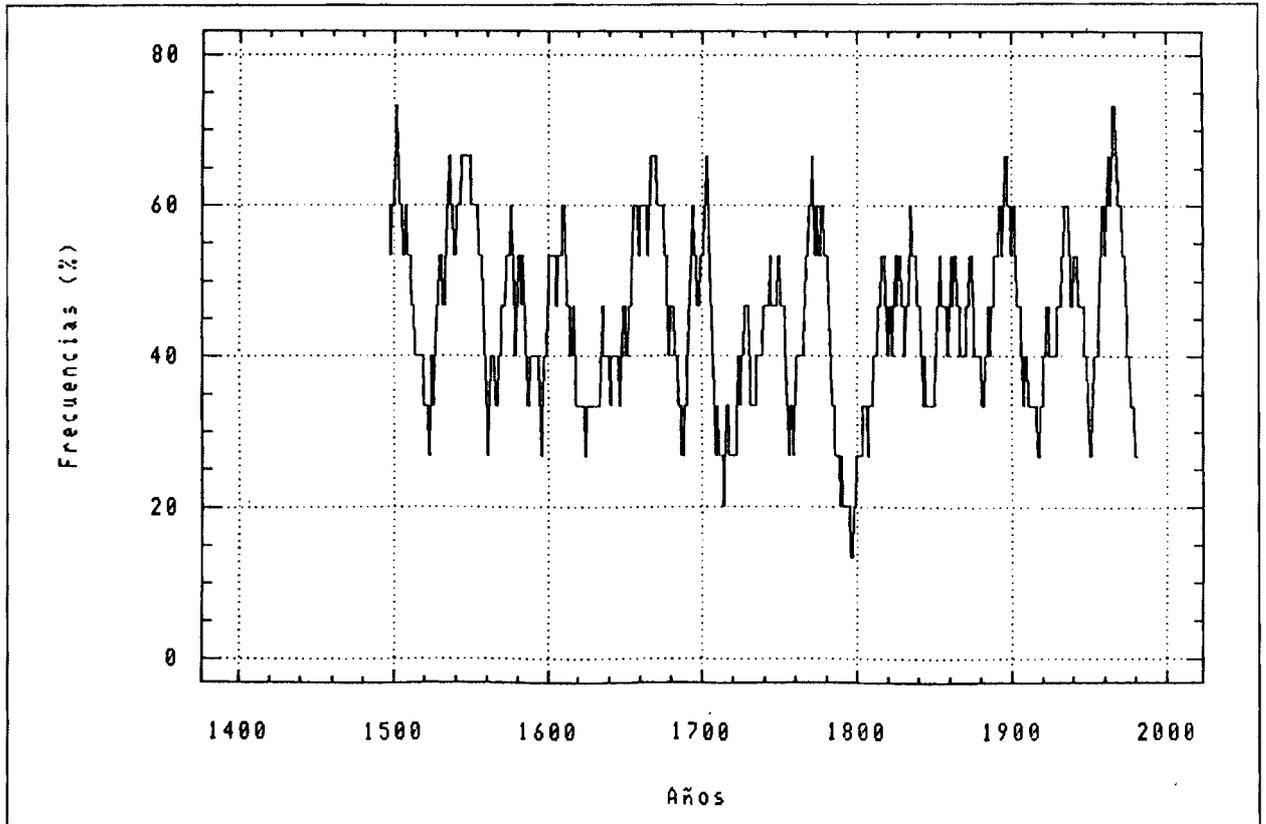
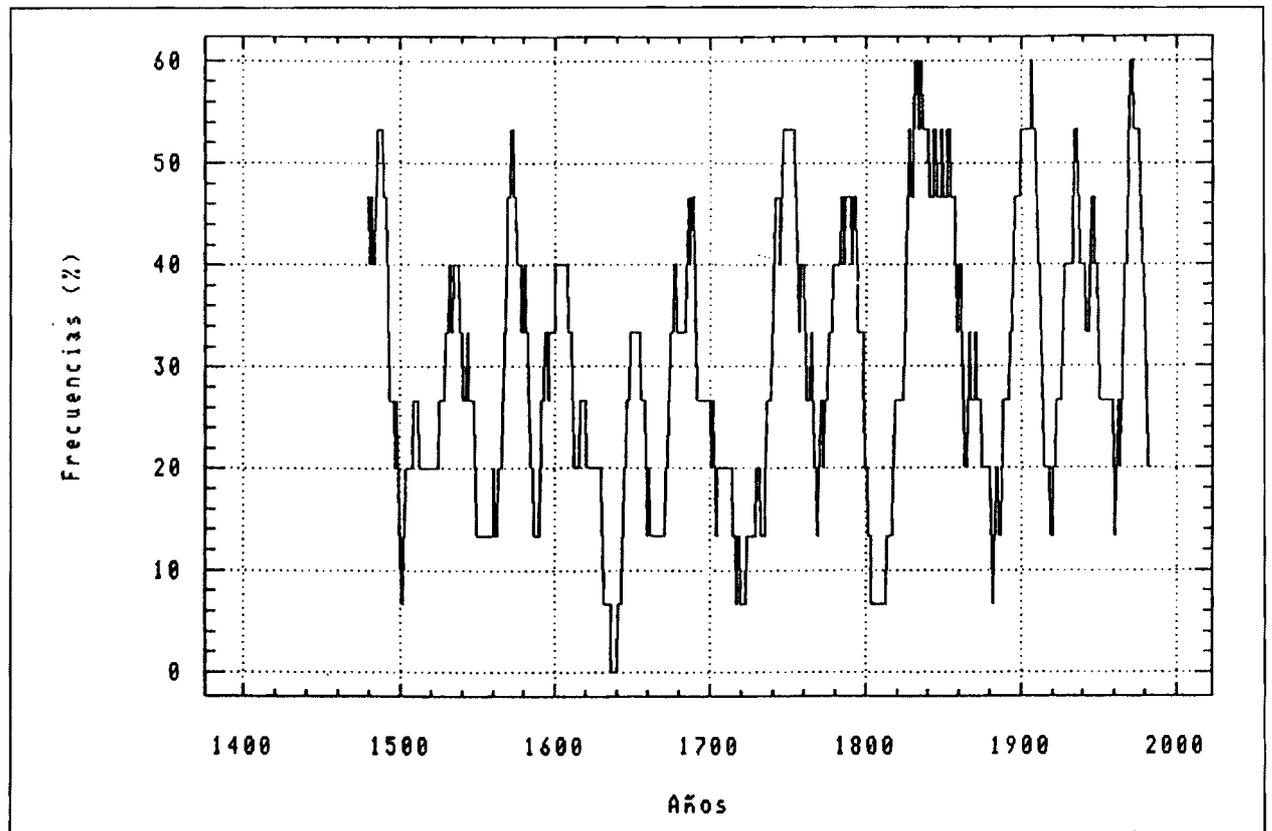


Figura 2: Frecuencias en polinomios de 15 años de los climas lluviosos de Uña: VI(IV)2, VI, VIII(VI) y X(VIII)

Figura 3: Frecuencias en polinomios de 15 años de los climas fríos de Vinuesa: VI(VII), VIII(VI), X(IX)2



- Bandas de grosor
- Diferencias
- Distancias
- Gradiente fitoclimático
- Reconstrucción estadística de variables fitoclimáticas.

El método que se ha seguido consiste en realizar varias reconstrucciones independientes para cada cronología, siguiendo cada vez alguno de los criterios antes esbozados, con objeto de hacer converger al final los valores obtenidos en un único resultado final. Siempre que sea posible, se han considerado los climas de los años t , $t-1$ y $t-2$, en relación con el anillo del año t . Se ha seguido siempre la metodología de calibración del modelo sobre un intervalo y verificación de los resultados sobre un intervalo independiente (COOK *et al.* 1990).

El estudio de las características actuales del clima puede encontrar un firme apoyo en

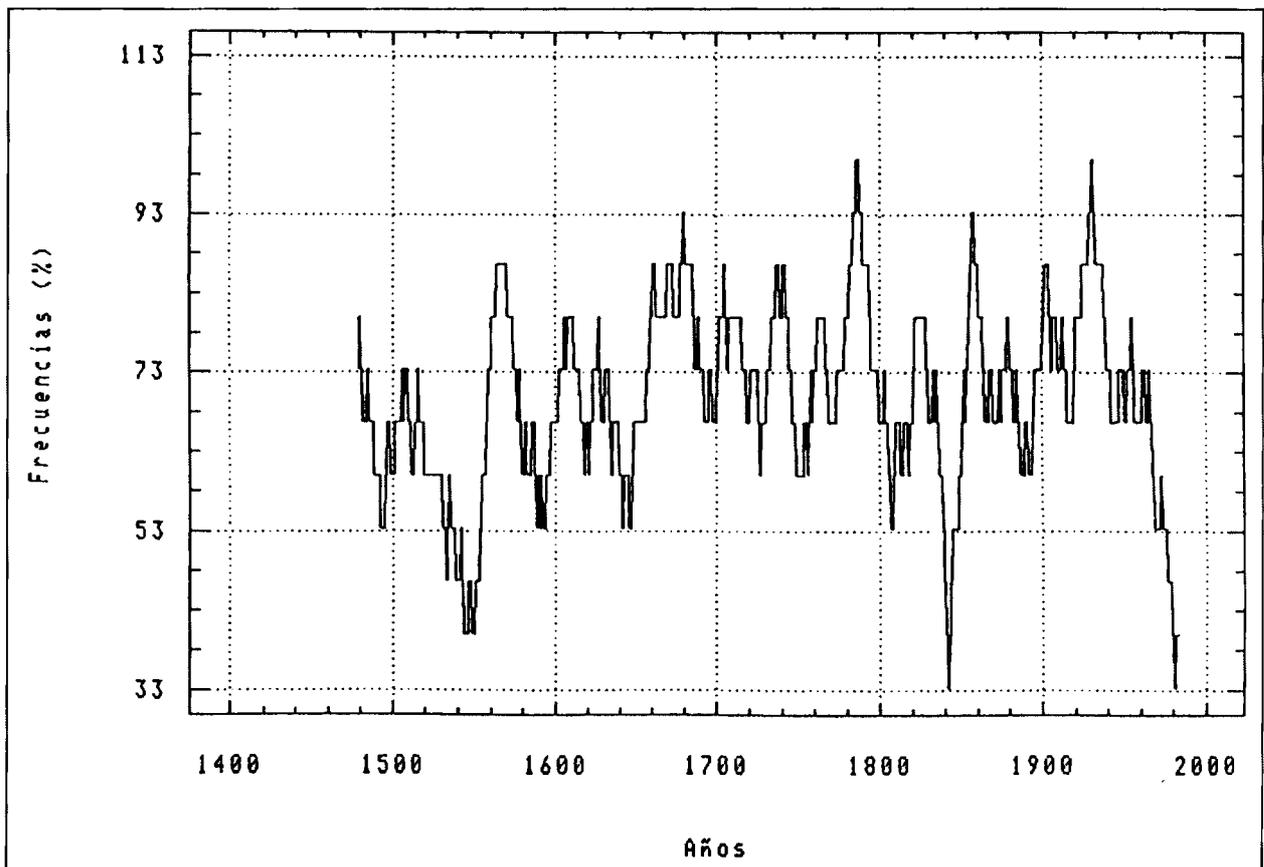
los resultados de estos métodos. Desde este punto de vista, lo importante es analizar las reconstrucciones del clima pasado, comparándolas con el clima actual y estudiando las posibles analogías y diferencias.

Métodos Autorregresivos con Media Móvil (ARMA)

La conveniencia de aplicar estos procedimientos al estudio de la seca se basa en varios puntos; en primer lugar detectar si los sucesos fitoclimáticos actuales son similares a los que hubo en el pasado ya que como en los últimos 1000 años y especialmente en la fase de la Pequeña Edad Glacial se han registrado perturbaciones fitoclimáticas importantes, con secas históricas y mortalidad documentada de vegetación, la analogía con la actualidad es relevante.

En segundo lugar, la reconstrucción de los cursos fitoclimáticos se aproxima mucho más a la apreciación subjetiva de los datos

Figura 4: Frecuencias en polinomios de 15 años de los climas lluviosos de Vinuesa: VI(IV)2, VI(IV)4, VIII(VI)



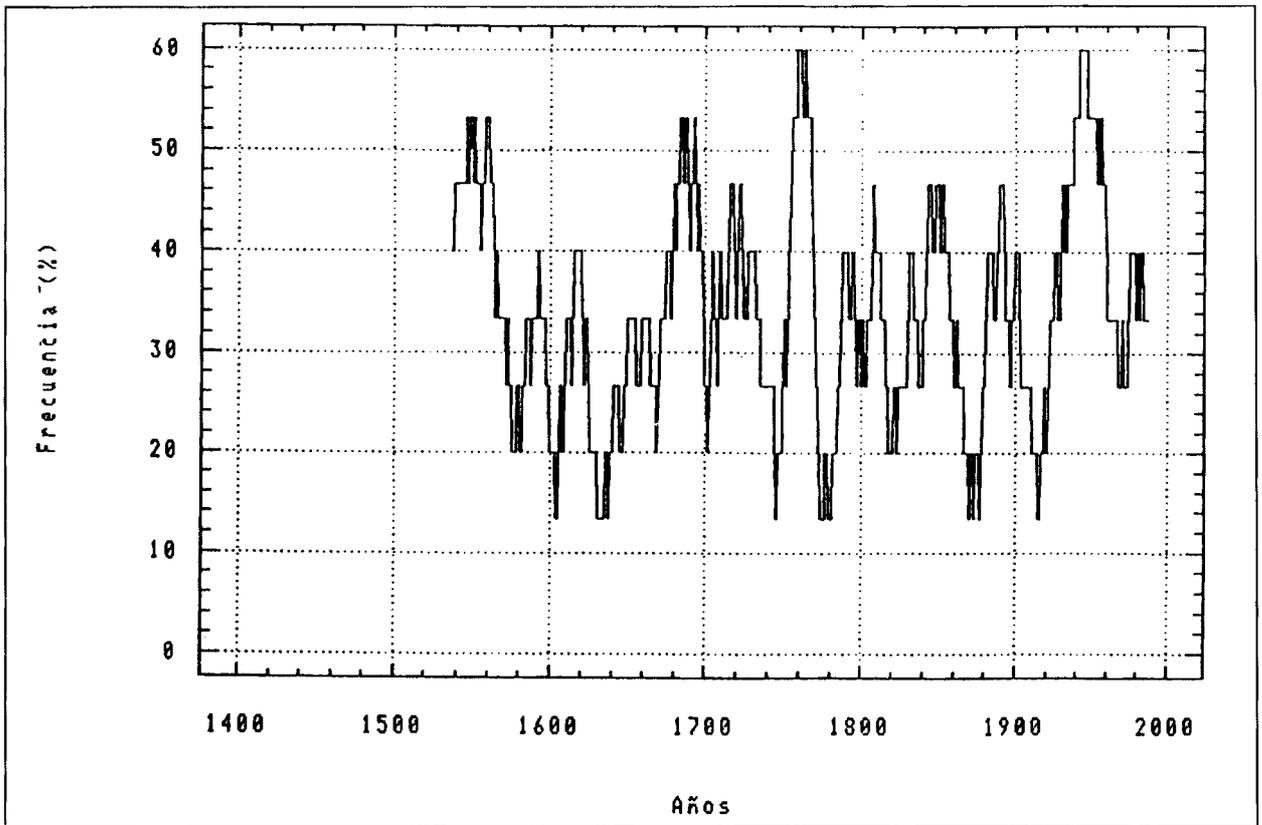
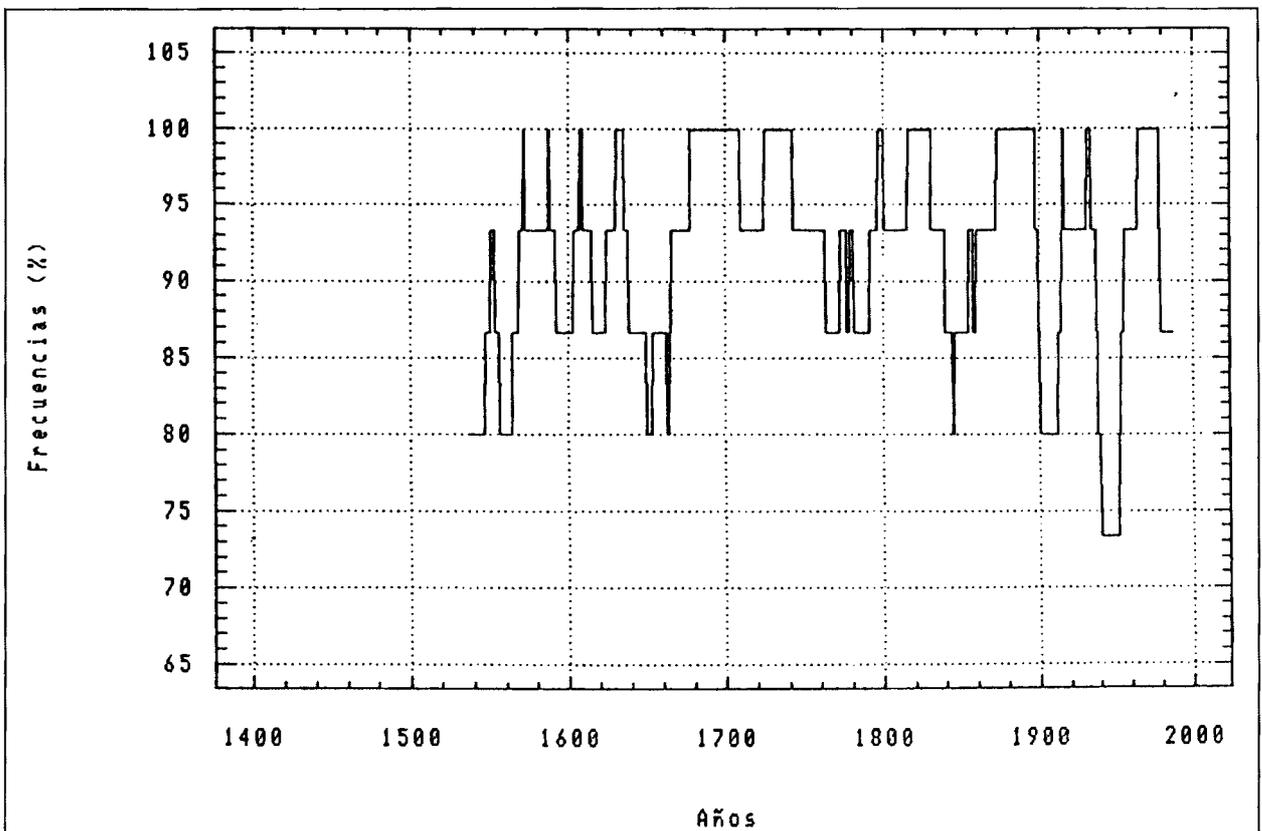


Figura 5: Frecuencias en polinomios de 15 años de los climas fríos de Navacerrada: VI(VII), VIII(VI), X(IX)2

Figura 6: Frecuencias en polinomios de 15 años de los climas lluviosos de Navacerrada: VI(IV)2, VIII(VI)



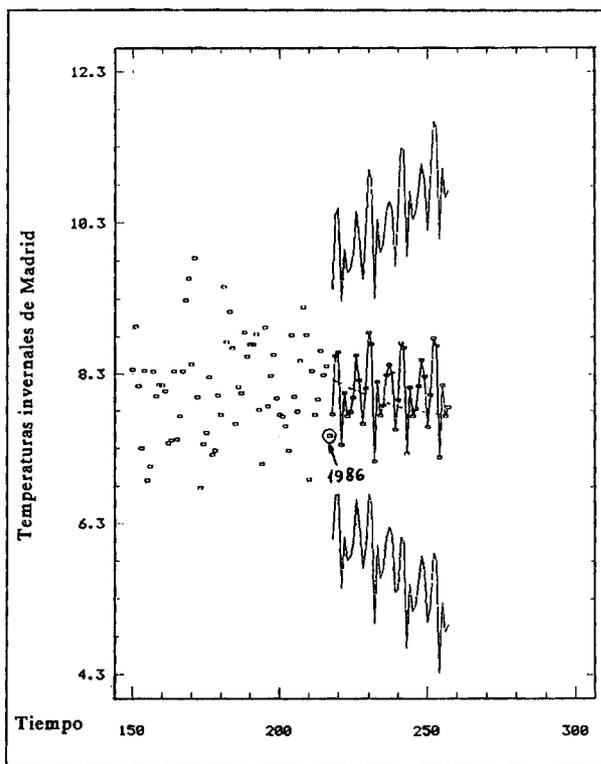


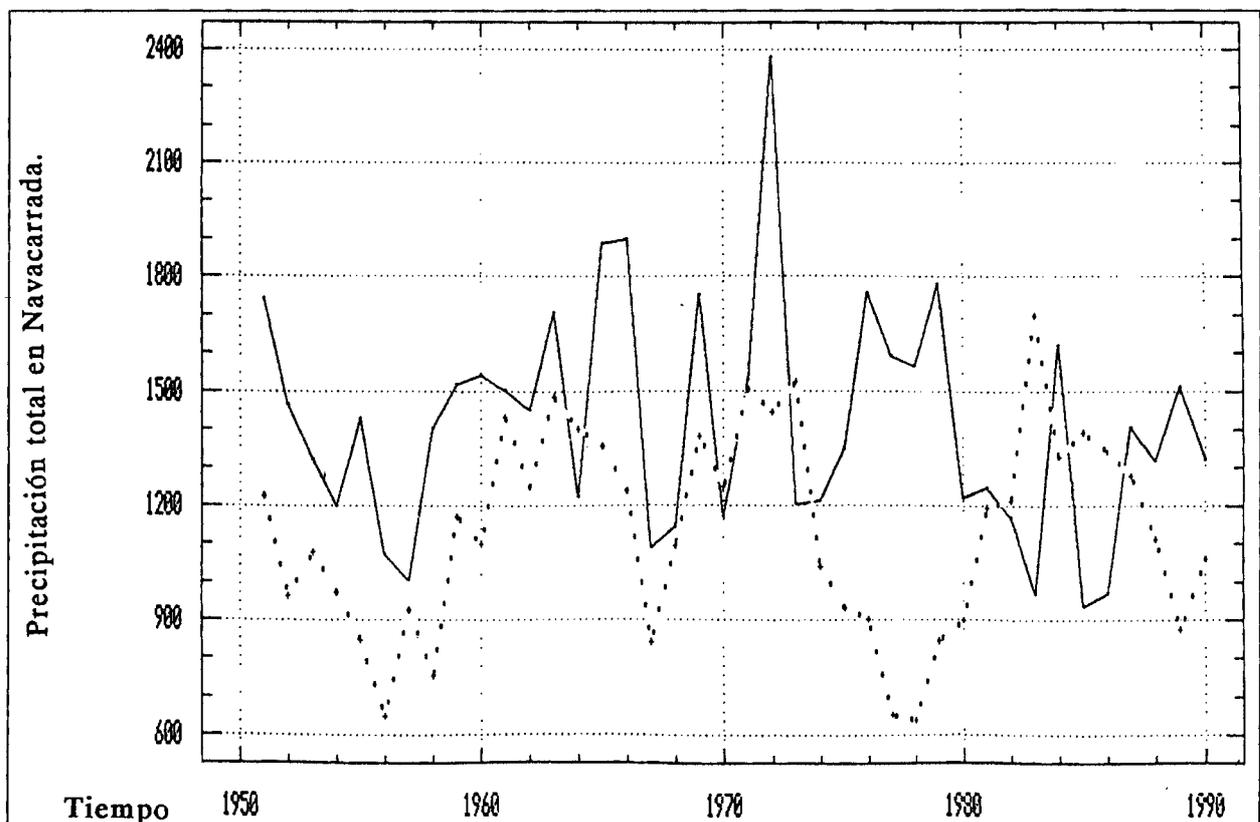
Figura 7: Predicción de temperaturas invernales en Madrid con ARMA(1,0), estacional con periodicidad de 11 años.

históricos que la obtenida a partir de datos meteorológicos reconstruidos y es, por tanto, mucho más contrastable.

En tercer lugar y como consecuencia muy importante de estas reconstrucciones está el hecho de que los factores fitoclimáticos pueden ser tratados como series temporales dentro de un esquema de procesos estocásticos que permiten un cierto grado de predicción. Esta predicción depende de ciertos factores que permiten mantener una serie en condiciones de ser predictiva:

- La estructura de autocorrelación de las series.
- Las componentes pseudoperiódicas que están en las mismas y que responden a señales exteriores cíclicas, como por ejemplo, los ciclos de las manchas solares y otros procesos.
- Las intervenciones detectadas en las series que pueden provenir de sucesos aleatorios como la presencia de fenómenos volcánicos.

Figura 8: Comparación entre los valores reales y estimados por ARMA(1,0) de la precipitación total en Navacerrada con correlación significativa hasta 1972 (PR > 0.99)



En un sistema dinámico climático tan complejo y caótico, las componentes del mismo permanecen, sin embargo, acotadas dentro de un recinto finito manteniéndose ahí con características similares hasta que un nuevo atractor climático desplaza el equilibrio hacia otro estado estacionario.

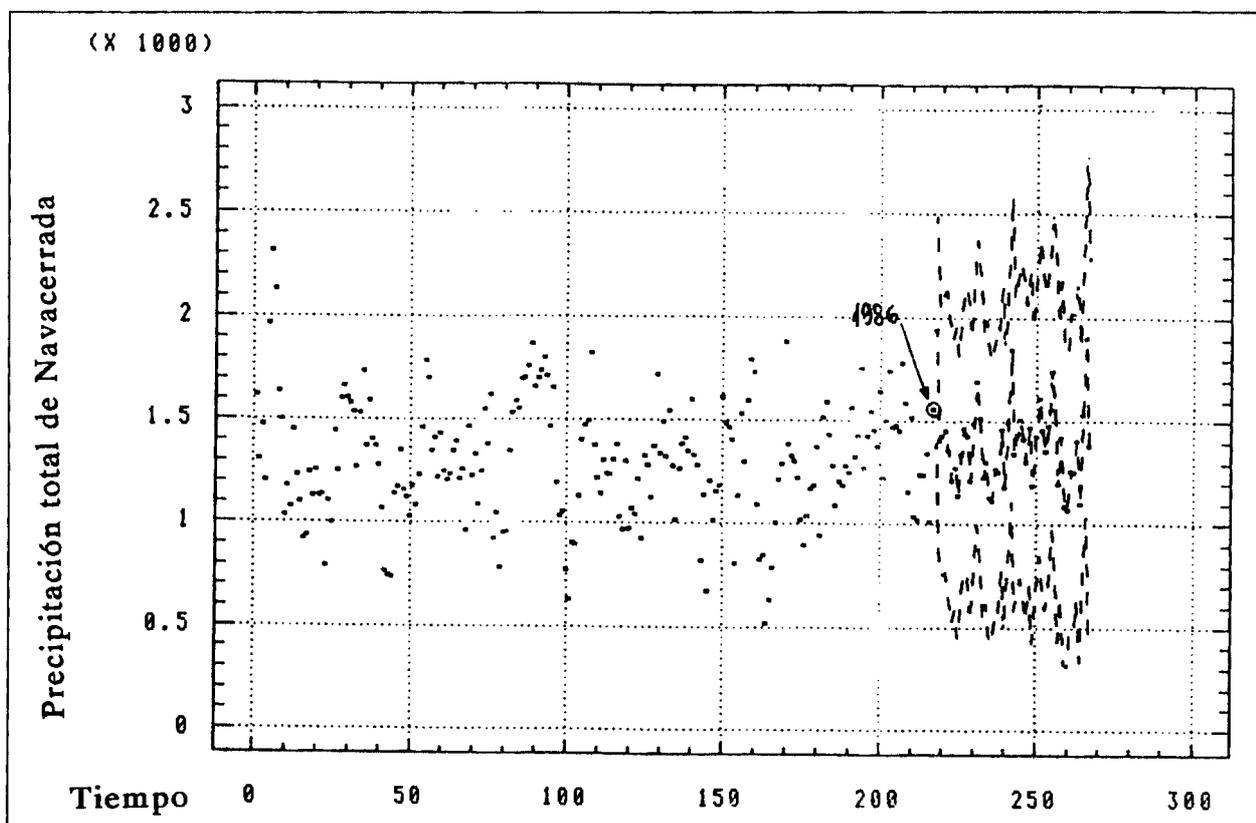
Por tanto mientras las series temporales que representan a los factores fitoclimáticos no estén tan alteradas que su estructura interna se haya roto a causa de cambios climáticos profundos se puede establecer un cierto grado de predicción si el modelo está bien identificado y el ajuste es bueno. Si, por el contrario, la estructura de la serie se hubiese roto y tuviésemos datos suficientes podrían analizarse las series en sus distintas fases.

En este trabajo se van a estudiar predicciones en base al comportamiento de las precipitaciones totales en Navacerrada y Uña (GÉNOVA 1994), así como algunas temperaturas como las de Madrid y Navacerrada (GÉNOVA 1994); se verá como las precipita-

ciones mantienen algo la estructura de los últimos 200/300 años mientras que las temperaturas parecen en general perderlas en las últimas décadas.

Los métodos empleados son procesos ARMA(p,q) sobre series estacionarias diferenciadas con estacionalidad introducida según determinan los periodogramas de la transformada rápida de Fourier. El método elegido, después de la identificación del modelo con las funciones ACF y PACF es considerar modelos estacionales ARMA(1,0) y aumentar los índices p y q hasta llegar a una sobreparametrización del modelo. La elección termina cuando el ajuste global del modelo es muy significativo, las ACF y PACF no detectan componentes significativos importantes, el periodograma de los residuos no señala frecuencias muy destacadas, los errores estándar de los parámetros son bajos y la distribución de residuos es aproximadamente normal con una suma de cuadrados medios residuales minimizada (WEI 1990); (BOX & JENKINS 1976).

Figura 9: Predicción de la precipitación total en Navacerrada entre 1986 y 2036, con ARMA(1,0) estacional de periodicidad 24 años.



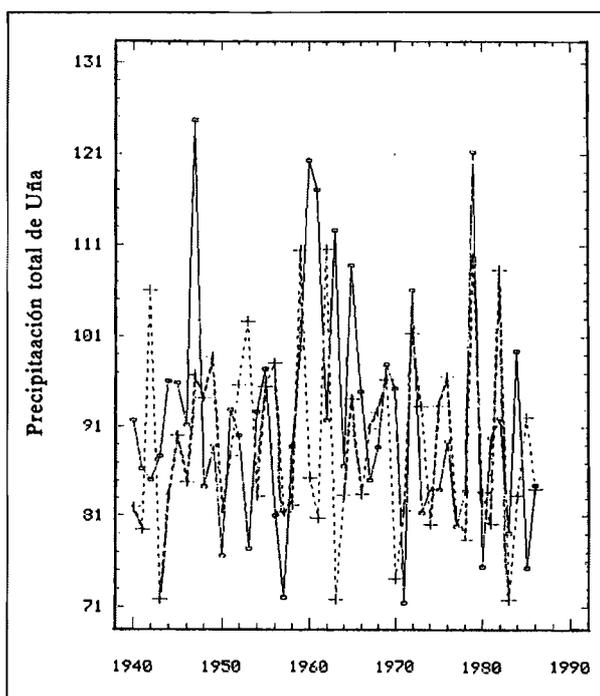


Figura 10: Comparación entre la precipitación total de Uña real y estimada, con probabilidad del 90%.

Una vez identificado y calibrado el modelo se procede a elegir un subconjunto amplio o la totalidad del intervalo conocido de valores con el fin de verificar el modelo sobre datos independientes. Si sale significativo se procede a la predicción con una banda de error del 95% sobre un intervalo temporal entre 25 y 50 años. Aunque esta última cifra parezca exagerada, como el orden de periodicidad detectado está entre 11 y 25 años, conviene preservar la predicción durante un par de ciclos para ver la consistencia de los resultados.

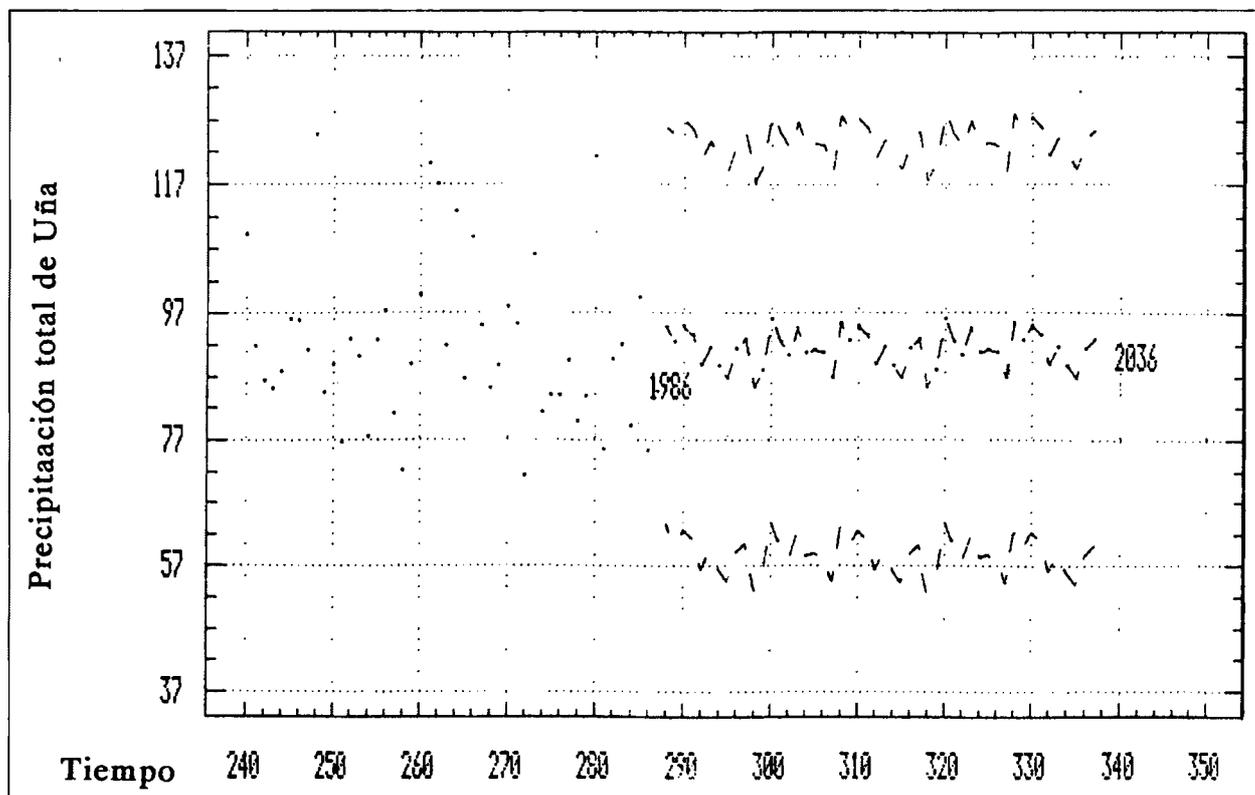
Así en procesos como la seca pueden estimarse las fases en las que las series indican caídas o aumentos de precipitación, aunque no es tan fácil, por ahora, analizar su intensidad lo cual será el objeto de próximos trabajos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio Fitoclimático

Para la realización del presente trabajo se han utilizado cronologías próximas a las

Figura 11: Predicción de la precipitación de Uña entre 1986 y 2036 con ARMA(1,0) y estacionalidad con periodo de 20 años.



estaciones de Navacerrada (Madrid), Uña (Cuenca) y Vinuesa (Soria). Para obtener la determinación fitoclimática cualitativa de estas estaciones se ha utilizado el sistema de J.L.Allué Andrade. Los años de los que se dispone de información fitoclimática en cada una de las estaciones son los siguientes:

- Uña, 1923-1985. Algunos años incompletos se han determinado mediante el sistema de doble envolvente de temperaturas, incorporado a los programas CLIMOAL (Manrique 1993). En los que no ha sido posible, se han realizado regresiones lineales de temperaturas y precipitaciones mensuales con las estaciones de Cuenca, Pantano de la Toba y Segovia. A partir de estos valores se han construido los correspondientes diagramas fitoclimáticos y se ha obtenido su determinación. En total aparecen nueve tipos fitoclimáticos distintos, cuyas frecuencias, en forma de polinomio son las siguientes:

$$4.8 \text{ IV(VI)1} + 7.9 \text{ IV(VII)} + 9.5 \text{ VI(IV)1} + 23.8 \text{ VI(IV)2} + 7.9 \text{ VI(VII)} + 6.3 \text{ VI} + 14.3 \text{ VIII(VI)} + 1.6 \text{ X(VIII)} + 23.8 \text{ X(IX)2}$$

- Navacerrada, 1941-1989. Los pocos años incompletos se han podido determinar mediante algún procedimiento (método de las envolventes de temperatura). Se observan cinco tipos fitoclimáticos, cuyas frecuencias son:

$$4.1 \text{ IV(VII)} + 53.1 \text{ VI(IV)2} + 2.0 \text{ VI(VII)} + 32.7 \text{ VIII(VI)} + 6.1 \text{ X(IX)2}$$

- Vinuesa, 1935-1993. Los datos faltantes se han completado con los de las estaciones próximas de Covalada, Puerto de Sta. Inés y Pantano Cuerda del Pozo. Se han empleado también datos de Soria. Aparecen seis subtipos fitoclimáticos asociados a los cursos anuales, con las siguientes frecuencias:

$$14.29 \text{ IV(VII)} + 16.07 \text{ VI(IV)1} + 30.36 \text{ VI(IV)2} + 3.57 \text{ VI(IV)4} + 10.71 \text{ VI(VII)} + 5.36 \text{ VI} + 19.64 \text{ VIII(VI)}$$

Cronologías

En este estudio se han utilizado varias cronologías, elaboradas por M. GÉNOVA

FUSTER (E.U.I.T. Forestal), A. FERNANDEZ CANCIO (CIFOR-INIA) y J. CREUS NOVAU (CSIC). Las cronologías son las siguientes:

a) Uña (Cuenca): Todas las cronologías están realizadas con *Pinus nigra*.

- Torretón (TO), 1489-1988 (500 años)
- Boquerón (BO), 1692-1988 (297 años)
- Tierra Muerta (TI), 1621-1988 (368 años)
- Media Tajo (MT) 1612-1988 (377 años)

b) Navacerrada (Madrid): Con *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*

- Siete Picos (SP), 1530-1988 (459 años)
- Peñahorcada (PH), 1668-1988 (321 años)
- Riscopól (RP), 1535-1988 (454 años)
- Pedriza (PD), 1717-1988 (272 años)

c) Vinuesa (Soria). La primera es de *Pinus uncinata* y el resto de *Pinus sylvestris*

- Vinuesa (VI), 1471-1992 (522 años)
- Neila (NE), 1588-1992 (405 años)
- Covalada (CO), 1611-1992 (382 años)
- Barranco de la Herida (HE), 1566-1993 (428 años)

Para la realización de las cronologías se ha seguido el esquema universalmente aceptado, que consta de los siguientes pasos:

1) Toma de muestras con barrena Pressler (mínimo de 2 por árbol). Cada cronología debe tener al menos 10 árboles distintos, para su aceptación en el ITRDB (International Tree-Ring Data Bank).

2) Lectura de los anillos de crecimiento, mediante técnicas semi-automáticas.

3) Sincronización: Es el estudio de las semejanzas en las tendencias de crecimiento de las series para el establecimiento correcto de la posición en el tiempo de los anillos (datación).

4) Estandarización: Procedimiento para extraer la señal puramente climática,

eliminando otro tipo de influencias en el grosor: edad, etc...

5) Agrupamiento de muestras para obtener las cronologías, mediante procesos de series temporales autorregresivas.

Reconstrucción Fitoclimática

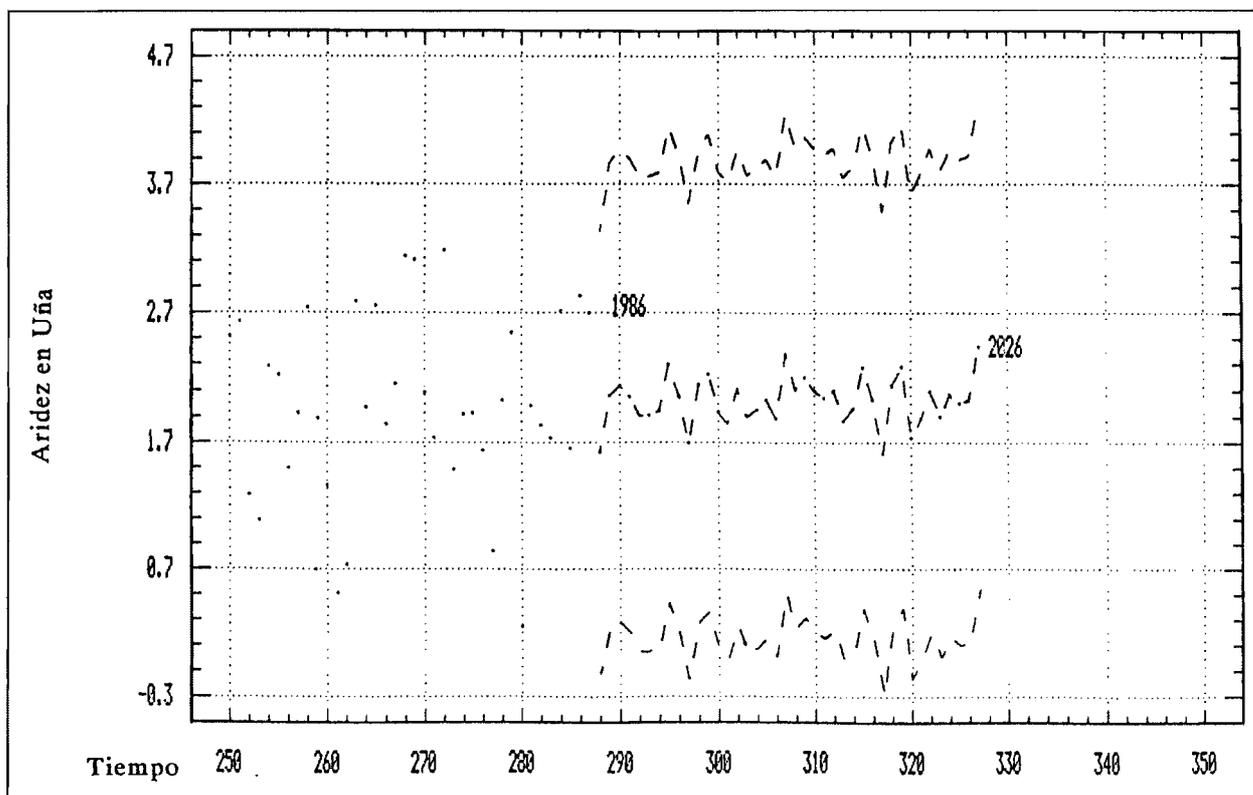
Utilizando los datos dendrocronológicos y fitoclimáticos de los que se dispone se ha procedido a la reconstrucción fitoclimática de las estaciones. Los valores reconstruidos son los fitoclimas anuales y los polinomios de frecuencias en intervalos de varios años. Es aquí donde está la información más importante, pues desde el punto de vista de la vegetación natural está claro que el clima de un solo año no tiene influencia decisiva en el tipo de estrategia de vida. Otra herramienta importante del sistema fitoclimático, los espectros, también han sido reconstruidos con resultados aparentemente satisfactorios, si se comparan con reconstrucciones de factores aislados (GÉNOVA 1994) o incluso con noticias históricas (FONT TULLOT 1988).

Sin embargo, existen aquí dificultades metodológicas considerables. La integración climática de muchos años, cuando sólo se dispone de un número muy limitado de datos, dificulta los procesos de calibración y verificación exigibles en cualquier teoría de esta naturaleza. Por ello la reconstrucción se ha basado en frecuencias (%) sobre polinomios de 15 años.

En lo referente a las frecuencias anuales los resultados son bastante buenos en Uña y Vinuesa, donde en los años de climas conocidos, la reconstrucción coincide exactamente con los climas reales. En Navacerrada, las concordancias son del 79%, aunque con la integración de nuevas reconstrucciones todavía en desarrollo (función de transferencia) cabe esperar una mejoría. Las frecuencias estimadas en todo el intervalo de años, comparadas con la frecuencias reales en los años de clima conocido se muestran en la tabla 1, para Uña y Vinuesa.

Para estudiar los polinomios se han representado gráficos de evolución temporal de

Figura 12: Predicción de la aridez en Uña entre 1986 y 2026 con ARMA(2,2) estacional con periodo de 20 años.



frecuencias. Con objeto de presentar una información resumida, se han considerado los tipos climáticos fríos y los lluviosos, sumando las frecuencias en cada grupo. Los resultados se muestran en las figuras 1 y 2 (Uña), 3 y 4 (Vinuesa) y 5 y 6 (Navacerrada). Estos valores son bastante coherentes con los datos históricos sobre el clima, teniendo en cuenta siempre que se está hablando de los aspectos fitológicos del mismo y no de los meteorológicos. Así, las curvas reproducen con mayor o menor grado de acierto sequías, períodos fríos (Pequeña Edad Glacial), noticias de mortandad de árboles, y otros hechos.

Por ejemplo, la mortandad en la vegetación de 1565, recogida en la documentación histórica (FONT TULLOT, 1988), queda reflejada en Uña, Vinuesa y Navacerrada por la alta frecuencia de tipos fríos y secos, siendo probablemente este episodio y la fase actual los más críticos en los últimos 1000 años. La sequía de 1840 también queda reflejada en los gráficos, aunque no fue tan grave como la anterior. Actualmente se observa un incremento brusco de subtipos fitoclimáticos cálidos y secos, circunstancia que probablemente no ha ocurrido en los últimos 2000 años, de acuerdo con las referencias históricas y dendroclimáticas.

Predicción Basada en el Método ARMA

Hasta el momento los datos obtenidos en las predicciones sobre Navacerrada, Madrid y Uña (Cuenca) señalan lo siguiente:

Las predicciones sobre Madrid (Retiro) sobre datos reales de las temperaturas medias desde 1860 hasta la actualidad indican que las tendencias de la serie modelizada por un $ARMA(1,0) \times (1,0)^{11}$ es de disminución de temperaturas en los próximos años, cosa que evidencia una ruptura de la tendencia de la misma ya que desde 1970 las temperaturas suben por encima de las predicciones del modelo.

Para confirmar la ruptura del modelo se ha recurrido al estudio de las temperaturas invernales de Madrid estimadas desde 1770

hasta 1986 (217 años), empleando también el modelo $ARMA(1,0) \times (1,0)^{11}$ (Fig. 7). Lo cual sucede como en el caso anterior, aunque en este caso los datos reales superan las bandas de confianza del modelo.

Las temperaturas de verano en Navacerrada indican, sin embargo, una tendencia suave al alza hasta la primera década del próximo siglo lo que concuerda bastante con el comportamiento de las temperaturas medias del mes más cálido desde finales de la década de los 70. No obstante el análisis de regresión entre los valores reales y estimados no sale significativo aunque el modelo $ARMA(1,0) \times (1,0)^{16}$ se ajusta muy bien a la serie total indicando, de nuevo, una ruptura de tendencia interanual con un aparente mantenimiento de la tendencia a largo plazo.

Para estimar el momento en que se manifiesta de forma patente la ruptura de tendencia es especialmente significativa la comparación entre la precipitación total de Navacerrada estimada por un modelo con buen ajuste global $ARMA(1,0) \times (1,0)^{24}$ y los datos reales ya que se obtiene un ajuste significativo, comparando con los datos reales, que supera el nivel de probabilidad del 99% entre 1950 y 1972 y que, sin embargo, no es significativo en el intervalo 1950-1990, por lo que parece que el umbral del entorno de 1972 podría ser el punto de «pérdida de memoria» de la serie (Fig. 8). Lo que no se puede discernir con tan pocos datos es cual es la nueva estructura de la serie o si este episodio es solamente una fase transitoria ya que los datos parecen querer recuperar su primitiva tendencia hacia el final de la misma. Una predicción sobre esta incierta base señala una recuperación de las precipitaciones hacia 1996 con una fase transitoria buena hasta casi el final de siglo. Posteriormente podría recrudescerse la sequía y en el entorno del 2007 se establecería una recuperación mucho más duradera (Fig. 9).

Estudiando un área de mayor influencia mediterránea como es la de Uña en Cuenca se observa que la precipitación total puede modelizarse con un $ARMA(1,0) \times (1,0)^{20}$

muy significativo. En este caso la comparación con los datos reales es significativa al 90% (Fig. 10). Otros modelos ajustan algo mejor los datos; así un modelo $ARMA(1,0)x(0,1)^{20}$, tiene una probabilidad de más del 99% de ser correcto. En ambos casos aparece un mínimo de precipitaciones en torno a 1997 y después una mejoría que duraría hasta el 2010 aproximadamente con otra fase de unos 10 años de sequía para recuperarse de nuevo después hasta el 2036 (Fig. 11).

Finalmente la modelización de la aridez en Uña es de difícil identificación y dependiendo del modelo escogido $ARMA(2,1)x(2,0)^{10}$ y $ARMA(2,2)x(2,2)^{10}$ se obtienen unas tendencias a la disminución de la aridez hasta el 2010, mientras que $ARMA(2,2)x(2,2)^{20}$ señala una tendencia a la estabilización o un suave aumento hasta el 2026 (Fig. 12).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista dendrofitoclimático se presentan unas reconstrucciones de fitoclimas en los últimos 465-520 años en base a los anillos de los árboles, en los sistemas Ibérico y Central (Uña, Vinuesa y Navacerrada). Esta metodología, desarrollada por nuestro grupo de trabajo, es completamente original y es la primera vez que se obtienen subtipos fitoclimáticos anuales a partir de la estructura temporal de series dendrocronológicas.

Utilizando polinomios de frecuencias de 15 años (Figuras 1 a 6) se pueden obtener interesantes conclusiones sobre la historia fitoclimática, como los hechos ocurridos en la Pequeña Edad Glacial. La mortandad en la vegetación de 1565, recogida en la documentación histórica, queda reflejada en Uña, por la alta frecuencia de tipos fríos y secos. Similares conclusiones pueden obtenerse del estudio de Vinuesa y Navacerrada, siendo probablemente este episodio el más crítico en los últimos 1000 años, junto con la fase climática presente.

En épocas más próximas a la actual no se tienen datos de otras sequías tan graves para la vegetación, pues la acontecida en torno a

1840 no fue tan importante como la anterior. En la actualidad se observa una caída brusca hacia tipos cálidos y secos, muy persistente y aparentemente inédita en los últimos 2000 años, de acuerdo con las referencias históricas y dendroclimáticas.

Probablemente las variaciones sostenidas de las frecuencias de los tipos pueden dar lugar a modificaciones en el clima supra-anual, lo que originaría un cambio climático transitorio pero suficientemente intenso como para ser letal para una parte de la vegetación. Ejemplo de esto sería lo ocurrido en 1565.

Respecto a las predicciones basadas en métodos de series temporales, la mayor parte de los indicadores pluviométricos estudiados señalan una tendencia a la recuperación, donde en unos casos se mantiene el ajuste significativo en el período de verificación y en otros no. Uña parece poseer mejores expectativas de predicción que Navacerrada indicando un probable fin de la sequía hacia 1997 ya que actúa además en concordancia con Vinuesa (Soria) donde también el mínimo de precipitación ronda el intervalo 1997-98, mientras que Navacerrada parece indicar un final próximo a 1995. Las temperaturas han roto la estructura de la serie y no son significativas en el período de verificación. Los datos reales aumentan por encima de la tendencia de la serie tanto en Madrid como en Navacerrada indicando una cierta imposibilidad de predecir. Por otra parte el umbral en el que comienzan a causarse estos cambios de estructura es en el entorno de 1972.

Esta fase predictiva de las series debe tomarse con muchas precauciones puesto que la identificación de modelos es difícil y no se tiene mucha experiencia todavía. En un futuro próximo se aplicarán estas técnicas con mayor precisión a un número mayor de variables y estaciones confiando que entonces se puedan establecer conclusiones más firmes.

A la vista de las series y de las predicciones, se sospecha un serio cambio climático que puede afectar gravemente a la vegetación. Sin embargo, ninguno de los datos de

que se dispone (reconstrucciones fitoclimáticas del pasado y tendencias futuras basadas en el estudio de las series temporales) permite afirmar que el proceso sea irreversible por el momento.

BIBLIOGRAFÍA

ALLUÉ ANDRADE, J.L. (1990) *Atlas Fitoclimático de España Taxonomías*. Madrid. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (MAPA): 221 p.

ALLUÉ ANDRADE, J.L. Y FERNANDEZ CANCIO, A. (1993) *Estado actual y expectativas de la fitoclimatología forestal. Aspectos fitológicos y dendrológicos*. Actas del Congreso Forestal Español Lourizan-1993 (Tomo I): 71-85.

BOX, G.E.P. AND JENKINS, G.M. (1976) *Time Series Analysis*. Forecasting and Control. Holday-Pay. San Francisco.

COOK, E.R. AND KAIRIUKSTIS, L.A. (1990) *Methods on Dendrochronology*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers: 399 p.

FERNANDEZ CANCIO, A., MANRIQUE E., GÉNOVA M. Y CREUS, J. (1993) *Estudio fitoclimático de la Serranía de Cuenca en los últimos 300 años*. Actas del Congreso Forestal Español Lourizan-1993 (Tomo I): 93-98.

FERNANDEZ CANCIO, A., GÉNOVA M., CREUS, J., GUTIÉRREZ, E. (1994) *Dendroclimatological investigation for the last 200 to 400 years in Central Spain*. Aceptado para su publicación en Radiocarbón

FERNANDEZ MELÉNDEZ, J.A. (1993) *Cambios fitoclimáticos y seca de Quercus en La Mancha y Extremadura*. Trabajo Fin de Carrera. E.U.I.T. Forestal (U.P.M.). Madrid: 438 p.

FONT TULLOT, I. (1988) *Historia del Clima en España*. Madrid. Instituto Nacional de Meteorología: 297 p.

FRITTS, H.C. (1976) *Tree-Rings and Climate*. London. Academic Press: 567 p.

FRITTS, H.C. (1993) PRECONK.DOC precon file for user manual «Quick help for PRECON now called PRECONCK, Version 3.0»

GÉNOVA FUSTER, M. (1994) *Dendroecología de Pinus nigra Arnold. subsp. salzmanii (Dunal) Franco y Pinus sylvestris L. en el Sistema Central y en la Serranía de Cuenca (España)*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid: 351 p.

MANRIQUE MENÉNDEZ, E. (1993) *Informatizaciones Climoal*. Madrid. Fundación Conde del Valle de Salazar: 97 p.

MANRIQUE, E., FERNANDEZ CANCIO, A. Y GÉNOVA M. (1993) *Identificación de Cursos Fitoclimáticos Mediante Técnicas Dendrocronológicas en Navacerrada (Sistema Central)*. Actas del Congreso Forestal Español Lourizan-1993 (Tomo I): 105-110.

WEI, W.W.S. (1990) *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods*. Addison Wesley: 471.