

INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL CRECIMIENTO DE *PINUS SYLVESTRIS* L. Y *PINUS UNGINATA* RAMOND EN ALGUNAS LOCALIDADES DEL NORTE DE ESPAÑA

José CREUS NOVAU* Miguel A. SAZ SÁNCHEZ** Alejandro PÉREZ CUEVAS***

* Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC, Jaca (Huesca)

** Departamento de Geografía – Universidad de Zaragoza

*** Departamento de Geografía – Universidad de Valencia

RESUMEN

Se analizan los cambios de tendencia del crecimiento de *P. sylvestris* L. y *P. uncinata* Ramond durante la segunda mitad del siglo XX en el norte de España, atribuibles al cambio climático. Como fuente de información se utiliza la superficie creada alrededor del tronco por el crecimiento radial de cada año, como alternativa a la estandarización de las series que puede eliminar la tendencia. Los resultados indican una disminución del crecimiento de ambas especies (en algún caso apenas perceptible), con mayor incidencia en las zonas de menor altitud. La excepción corresponde a la población de *P. uncinata* Ramond, de Larra, con aumento del crecimiento en los últimos 50 años. La elevada precipitación de la zona, asociada a un clima oceánico de montaña, puede compensar la progresiva reducción de la precipitación y aumento de la temperatura debidos al cambio global y no ser factores limitantes para el crecimiento.

Palabras clave: Dendrocronología, cambio climático, tendencia del crecimiento, *P. sylvestris* L. y *P. uncinata* Ramond norte de España.

ABSTRACT

The tendency changes of the growth of *P. sylvestris* L. and *P. uncinata* Ramond were analyzed during the second half of the XX century in northern Spain, attributable to the climatic change. The yearly new surface created by the radial growth of the trunk is here proposed as a source of information so that we have an alternative method to the standardization of the series that can hide or eliminate the tendency. The results indicate a decrease of the growth in the two species of tree (in some case hardly perceptible), specially in the population of lower altitude. The only exception corresponds to the population of *P. uncinata* R., of Larra, which is showing an increment of the growth over the last 50 years. The high precipitation of the area, associated to an oceanic mountain climate, could compensate at a local level the progressive reduction of the precipitation and increasing temperature related to the global change and consequently they do not act as restrictive factors for the growth.

Keywords: Dendrocronology, climatic change, tendency of the growth, *P. sylvestris* L. and *P. uncinata* Ramond north of Spain.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la era industrial, la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado de forma exponencial, especialmente en los últimos decenios. La concentración de dióxido de carbono, por ejemplo, ha pasado de 280 ppm en el periodo preindustrial a casi 370 ppm en el año 2000 (KEELING *et al*, 2001). Este incremento es debido, esencialmente, a las actividades humanas porque el 80% de la producción energética mundial proviene de la combustión de energías fósiles (carbón, petróleo y gas) que liberan, entre otros, grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. A estas emisiones de origen industrial se añaden las asociadas a la deforestación por incendios, que implican importantes transferencias hacia la atmósfera del carbono almacenado en la biomasa vegetal (PRENTICE, 2001). Tanto el CO₂ atmosférico como los demás gases del efecto invernadero tienen una gran capacidad para modificar el balance energético global de la Tierra y, en consecuencia, modificar el sistema climático.

La tasa de CO₂ presente en la atmósfera determina la eficiencia de las reacciones fotosintéticas y respiratorias, influyendo en la productividad de la vegetación y en su papel como almacén de carbono, hasta el punto de que su incremento puede estimular fuertemente la producción vegetal bajo determinadas condiciones ambientales. (KIRSCHBAUM *et al*, 1996, HELLER *et al*, 1998). Durante dicho proceso la vegetación atrapa el dióxido de carbono con el que forma compuestos orgánicos e incrementa la biomasa, lo que indica que el desarrollo de la cubierta vegetal está fuertemente influido por el clima y la composición química de la atmósfera (SAUGIER, 1996).

Ello plantea diversas hipótesis acerca de si una atmósfera enriquecida en CO₂, y bajo condiciones ambientales cambiantes, puede favorecer el crecimiento vegetal y en qué medida un cambio climático debido al aumento de este gas puede incrementar la producción de los bosques en ciertas zonas. No hay que olvidar que en este proceso intervienen otros factores muy conexos entre sí y que una mayor tasa de CO₂ no tiene por qué ser la única responsable de un posible incremento de la producción forestal (TOGNETTI *et al*, 2000). Algunos autores incluso afirman que la disponibilidad de agua y nutrientes son potentes moduladores de la respuesta de las plantas al incremento del dióxido de carbono, especialmente en climas mediterráneos donde ambas variables pueden ser muy condicionantes (PEÑUELAS *et al*, 2002).

2. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DENDROCRONOLÓGICOS SOBRE EL CRECIMIENTO FORESTAL

En diversos trabajos se ha descrito la asimilación neta de dióxido de carbono en función de variables como la temperatura y distinta concentración de CO₂ (MOUSSEAU *et al*, 1996; CURTIS *et al*, 1998; BAZZAZ *et al*, 2000; PEÑUELAS *et al*, 2002). En el caso de las plantas C3 (la mayoría de los árboles) la asimilación suele ser negativa para débiles concentraciones de CO₂ y reducida luminosidad, debido a la fotorespiración, y llega a ser casi nula entre 30 y 70 ppm. Por el contrario, su asimilación aumenta a medida que lo hace la concentración del dióxido de carbono, hasta un máximo para valores de 1000 a 1500 ppm. Proceso que a su vez varía en función de la temperatura, ya que cuando aumenta también lo hace la asimilación con un máximo para temperaturas entre 10 y 30 °C, pero disminuye rápidamente cuando son superiores a 35 °C (LAVAL-MARTIN *et al*, 1995).

A similares conclusiones llegan otros autores experimentando en condiciones controladas, afirmando que se produce un aumento de la biomasa en aires enriquecidos de gas carbónico (OSMOND *et al*, 1980; CEULEMANS, 1998; SPRUGEL *et al*, 1991;). Sin embargo, cuando se intenta reproducir más fielmente los ecosistemas naturales, o se realizan observaciones junto a una fuente natural de dióxido de carbono, los resultados no son tan concluyentes en cuanto al efecto fertilizante del CO₂, debido a que la competencia por la energía solar, la humedad o la mayor disponibilidad de hidrógeno pueden aminorar este aumento. La complejidad del proceso se incrementa cuando en el medio natural ciertas especies reaccionan positivamente a una tasa de CO₂ elevada, mientras que otras no reaccionan o lo hacen de forma negativa sin que se sepan las causas (TOGNETTI *et al*, 2000). Por ello es difícil prever lo que puede pasar a medio plazo en las complejas condiciones reales de los ecosistemas, dado que las respuestas observadas incluso podrían amortiguarse en el tiempo por aclimatación de la fotosíntesis (PEÑUELAS *et al*, 1997). Todo ello en un contexto de cambio climático que todavía no implica un cambio de vocaciones biológicas a gran escala y que sólo en algunos emplazamientos de climas semiáridos pueden estar produciéndose avisos de cambio futuro (ALLUÉ, 1995). Así lo indican la frecuencia de “secas” detectadas en los últimos decenios en nuestro país que están provocando un decaimiento muy acusado de las masas forestales en toda el área mediterránea, especialmente en las estrategias esclerófilas (FERNÁNDEZ *et al*, 2004).

En estos últimos años también se han realizado trabajos (América del Norte, Alemania, Suiza, Francia) de la posible incidencia del cambio climático sobre el crecimiento de frondosas y coníferas estudiando la anchura de los anillos de crecimiento anual, unas veces estandarizados y otras no. Algunos autores señalan que se ha producido una estimulación importante del crecimiento a lo largo del siglo XX (INNES, 1991; BRIFFA, 1992; GRAYBILL *et al*, 1993; BADEAU *et al*, 1996), mientras que otros han observado tendencias nulas o negativas (BERGER *et al*, 2000). Estos últimos opinan que tal estimulación del crecimiento es difícil de explicar por el solo efecto del gas carbónico, dado que únicamente ha aumentado un 21 % después de 1900. La dificultad de encontrar pautas coincidentes les invita a pensar que el aumento de la temperatura debido al dióxido de carbono ha podido contribuir al incremento de la producción en determinadas latitudes y altitudes donde la temperatura fría podía actuar como factor limitante, pero no en otras donde este mismo incremento térmico puede llegar a ser inhibitorio del crecimiento. Lo mismo puede decirse de la reducción de la precipitación, que en ciertas zonas puede limitar el desarrollo y en otras no (BECKER *et al*, 1995). En consecuencia las pautas de crecimiento pueden ser muy diferentes en función de la sensibilidad de cada especie a los elementos del clima, debido a que la mayoría suelen tener una respuesta propia que a su vez puede variar a lo largo de un gradiente según lo hacen las condiciones ambientales regionales (BERGER *et al*, 2000; KÖRNER, 2000).

Por ello es difícil encontrar un patrón regular de respuesta climática, con base ecológica, que explique el efecto del clima sobre el crecimiento forestal en las zonas templadas no secas donde las condiciones son menos limitantes (DITTMAR *et al*, 2003), máxime cuando se trata de un fenómeno todavía bastante sutil en el que se interaccionan muchos factores que tratados de forma conjunta pueden dar resultados muy distintos a si se hace de forma individualizada. Un planteamiento a escala regional puede ser un enfoque de trabajo adecuado, al permitir conocer la verdadera tendencia del crecimiento forestal en un lugar concreto, y no aplicar extrapolaciones desde otras zonas vecinas o distantes.

3. OBJETIVO Y PROPUESTA METODOLÓGICA

El objetivo del trabajo no es analizar si el cambio climático se produce o no, ni en qué cuantía, sino intentar conocer en qué medida las condiciones cambiantes de la atmósfera que interaccionan en este proceso pueden estar modificando la tendencia del crecimiento de dos especies forestales, en dos zonas concretas y durante la segunda mitad del siglo XX.

La variabilidad de una secuencia de anillos a lo largo de la vida de un árbol es un indicador de las condiciones reinantes en la zona y de la capacidad de respuesta del árbol, de manera que los procesos fisiológicos pueden considerarse como el medio a través del cual se expresan los factores ambientales y hereditarios, de manera que los anillos de crecimiento constituyen un registro fidedigno de la actividad del crecimiento (GUTIÉRREZ, 1986). Para analizarla partimos del supuesto de que el crecimiento radial y el crecimiento total del árbol están suficientemente relacionados como para que el conocimiento del primero permita saber las variaciones del crecimiento total de un individuo o una población, especialmente cuando su estructura es regular y se adapta a una determinada forma volumétrica (MAKINEN, 1998). Por ello si a partir de un determinado momento las condiciones climáticas han cambiado lo suficiente como para hacer variar el crecimiento global del árbol, parece evidente que el incremento radial también lo habrá hecho en el mismo sentido, dada la estrecha relación que ambas variables guardan entre sí.

Cuando este crecimiento se representa de forma acumulada se obtiene una curva sigmoide que dibuja un punto de máximo crecimiento anual y una asíntota semihorizontal correspondiente a la reducción del crecimiento con la edad y que es más efectiva en la última fase de la vida del árbol cuando se reduce su capacidad de fotosíntesis y el crecimiento se ralentiza. Dicha asíntota representa el tamaño máximo que tiende a alcanzar el árbol, directamente relacionado con la estabilización de su capacidad fotosintética que a su vez depende de una también estabilizada superficie foliar y cuya biomasa debe extenderse alrededor de un cambium cada vez más grande y crear un anillo de mayor circunferencia (ZEIDE (1993, KIVISTE, 2002).

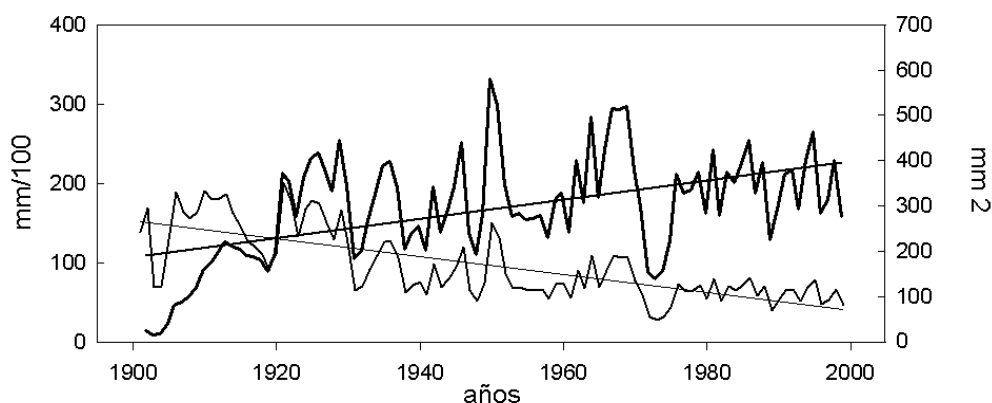


Fig. 2: Ejemplo de incremento radial anual (trazo fino) en centésimas de milímetros y la superficie del anillo circular equivalente (trazo grueso) en mm^2 , de una misma muestra.

Por estos motivos, la reducción del crecimiento radial anual debido a la edad se corrige mediante funciones matemáticas (estandarización de las medidas) que modelizan el

crecimiento e independizan dichas medidas de la edad del árbol. En algunos casos se ajustan funciones de tipo exponencial o polinómico, pero mayormente se utilizan splines cúbicos de determinadas frecuencias dependiendo de que se observen menos o más irregularidades en las series de crecimiento (COOK *et al*, 1990).

Sin embargo, según el tipo de filtro utilizado es posible que se elimine la mayor parte de la señal de baja frecuencia, o tendencia, que tratamos de encontrar y que constituye el objetivo final de este trabajo. Se debe a que para estabilizar la media y hacer homogénea la varianza se relaciona cada valor real con el teórico que aporta el modelo estadístico y así obtener una serie de índices estacionaria en el tiempo.

Los inconvenientes de aplicar determinadas estandarizaciones creemos que pueden ser corregidos si transformamos los incrementos radiales anuales en valores equivalentes a la superficie del anillo circular creado alrededor del fuste, dado que el valor de dicha superficie puede aumentar con los años aunque el valor radial anual muestre una normal tendencia decreciente. Para cada anillo anual hemos calculado el área de una circunferencia cuyo radio es la suma de todos los incrementos radiales anteriores a ese año y le restamos la superficie calculada para el año anterior siguiendo este mismo proceso. Así para todos los años de cada muestra de cada uno de los árboles y siempre siguiendo el orden temporal de su formación, es decir, del interior del tronco a la corteza.

En la figura 1 pueden compararse dos series de datos procedentes de una misma muestra (la número 2 de la localidad Virgen de la Peña). En ella los valores radiales anuales (trazo fino) expresados en centésimas de milímetros dibujan una clara tendencia decreciente, mientras que la superficie equivalente de su anillo circular (trazo grueso) expresada en milímetros cuadrados tiene tendencia creciente. Cabe decir que el decremento del grosor de los anillos anuales a pasado a ser un incremento de la superficie creada alrededor del tronco, en definitiva de su biomasa. Ambas pendientes tienen una significación de $\alpha = 0,01$.

4. LOCALIDADES ESTUDIADAS Y SELECCIÓN DE ÁRBOLES

El trabajo de campo en modo alguno fue aleatorio en cuanto a la edad de la masa forestal. Se eligieron individuos de entre 140 y 160 años para que los crecimientos que iban a ser estudiados correspondieran a la misma fase de la vida del árbol y que esa no fuera próxima al final de su longevidad natural, cuando su potencial de crecimiento más disminuye (Díaz *et al*, 2004)..

Las dos especies elegidas son mucho más longevas que la edad indicada anteriormente y utilizada en este trabajo, ya que *Pinus sylvestris* L. puede vivir más de 500 años (GÉNOVA *et al*, 1993) y *Pinus Uncinata* Ramond superar los 700 años (CREUS *et al*, 1992), de manera que el estadio biológico natural de los árboles seleccionados no era el último de su vida.

En cada una de las poblaciones seleccionadas se buscaron árboles más o menos dominantes y con escasa competencia con otros individuos, evitando la distinta densidad de masa forestal. Tampoco fueron aleatorios en cuanto a la forma externa del tronco, seleccionando aquellos de fuste más regular y parecido a un cilindro que facilitara el cálculo del respectivo anillo circular de cada año, dado que la arquitectura general del fuste se deteriora con la edad y se manifiesta en la forma de los anillos circulares. Por este motivo se rechazaron los árboles muy viejos, de estructura anómala y heridas visibles (roturas naturales, aprovechamientos,

resinados, impacto de rayos, etc) que hubieran alterado el crecimiento en algún momento de su vida y con ello la muestra radial extraída. La figura 3 muestra las distintas localidades, distribuidas entre los Pirineos (localidades A, C, D, E, F y H) y la cordillera Ibérica (localidades B y G). Su altitud, especie y número de muestras finalmente utilizadas figuran en la tabla 1.

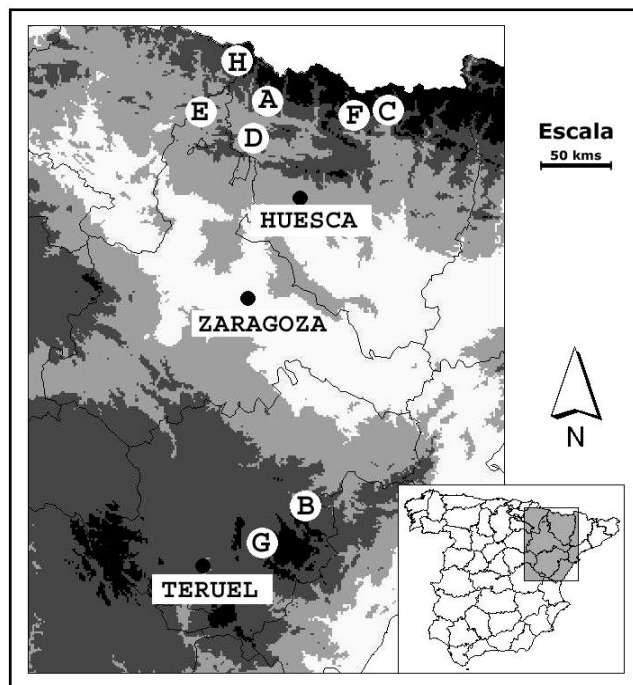


Fig. 3: Situación de las localidades muestreadas en Aragón y Navarra. A: Las Blancas-Cubilar; B: Cuarto Pelado-Gúdar; C: Foratarruego; D: San Juan de la Peña; E: Virgen de la Peña; F: Sierra Acuta-Ordesa; G: Peñarroya-Sierra de Gúdar y H: Larra.

Localidad	Provincia	Altitud	Latitud	Especie	Muestras
Las Blancas-Cubilar	Huesca	1510 mts	42-41-12	<i>P. sylvestris</i> L.	14
Cuarto Pelado-Gúdar	Teruel	1620 mts	40-32-41	<i>P. sylvestris</i> L.	15
Foratarruego	Huesca	1770 mts	42-35-18	<i>P. sylvestris</i> L.	9
San Juan de la Peña	Huesca	1500 mts	42-30-12	<i>P. sylvestris</i> L.	14
Virgen de la Peña	Zaragoza	1280 mts	42-40-31	<i>P. sylvestris</i> L.	8
Sierra Acuta-Ordesa	Huesca	1850 mts	42-36-31	<i>P. uncinata</i> R.	12
Peñarroya-Sierra Gúdar	Teruel	2019 mts	40-23-29	<i>P. uncinata</i> R.	12
Larra	Navarra	1510 mts	42-58-22	<i>P. uncinata</i> R.	9

Tabla 1: DATOS DE LAS LOCALIDADES, INDICANDO SU ALTITUD, LATITUD ESPECIE Y NÚMERO DE MUESTRAS UTILIZADAS

Por medio de una barrena Pressler se extrajeron 2 muestras por árbol a 130 cms del suelo y en el laboratorio se seleccionaron de forma visual aquellas que presentaban una actividad cambial más regular en el tiempo, regida mayoritariamente por la variabilidad climática y sin alteraciones bruscas atribuibles a factores no climáticos. Una vez medidas con precisión de 0,01 mm (medidor Aniol) se sincronizaron las muestras entre sí utilizando el programa Cofecha y se construyó la cronología no estandarizada y representativa de cada localidad siguiendo la metodología tradicional dendrocronológica (COOK *et al*, 1990). Finalmente se

estudiaron los últimos 50 años de cada cronología, coincidentes con la segunda mitad del siglo XX durante la cual el cambio climático ha tenido mayor impacto.

5. VALORES DENDROCRONOLÓGICOS DE SÍNTESIS

Los cálculos para obtener los índices que resumen las características de la cronología de cada localidad (tabla 2) se han realizado sobre las respectivas series de crecimientos brutos (no estandarizados), aunque previamente sincronizados.

Además del crecimiento medio (CM), claramente superior en las poblaciones de *P. sylvestris* L., de cada dendrocronología se obtuvo el coeficiente de variación (CV) y la sensibilidad media (SM) que aportan información acerca de la variabilidad total de la población muestreada frente al clima, por lo que ambos parámetros suelen correlacionarse de forma significativa y directa (SCHWEINGRUBER, 1988). La autocorrelación temporal con un desfase (A-1) resulta un buen estimador de la varianza de baja frecuencia y representa la inercia de la variación del crecimiento para un cierto número de años (CORONA, 1986). Normalmente sólo se utiliza la de primer orden, pues si se incrementa la autocorrelación la varianza disminuye de forma exponencial (FRITTS, 1976).

Localidad	Especie	CM	CV	SM	A-1
Las Blancas-Cubilar	<i>P. sylvestris</i> L.	136,2	0,52	0,16	0,90
Cuarto Pelado-Gúdar	<i>P. sylvestris</i> L.	147,5	0,37	0,20	0,87
Foratarruego	<i>P. sylvestris</i> L.	124,0	0,37	0,18	0,83
San Juan de la Peña	<i>P. sylvestris</i> L.	194,5	0,63	0,22	0,90
Virgen de la Peña	<i>P. sylvestris</i> L.	188,4	0,64	0,19	0,92
Sierra Acuta-Ordesa	<i>P. uncinata</i> R.	105,6	0,73	0,19	0,94
Peñarroya-Sierra de Gúdar	<i>P. uncinata</i> R.	84,9	0,40	0,23	0,86
Larra	<i>P. uncinata</i> R.	86,6	0,32	0,18	0,73

CM = crecimiento medio anual en centésimas de milímetro; CV = coeficiente de variación de las series de crecimiento; SM = sensibilidad media de las muestras; A-1 = autocorrelación de primer orden.

Tabla 2: CARACTERÍSTICAS DE LAS CRONOLOGÍAS DE CRECIMIENTOS RADIALES

Unos y otros índices presentan valores muy próximos a los umbrales citados en la bibliografía, superados en algunos casos, que validan la representatividad del conjunto de cronologías sincronizadas y no estandarizadas.

6. TENDENCIAS DEL CRECIMIENTO. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez validadas las cronologías, los valores radiales anuales se transformaron en valores de superficie (mm^2) equivalentes al anillo circular creado alrededor del tronco. Los resultados aparecen en las figuras 2 y 3, donde están representados los valores anuales de superficie desde el año 1940, para cada localidad y especie. En dichas figuras, además, se ha dibujado la línea de tendencia y el valor de correlación temporal (r) que aparece en la tabla 3.

6.1. *P. sylvestris* L.

Las series de superficie circular de esta especie muestran los típicos dientes de sierra atribuibles a la normal variabilidad interanual del clima, sin que puedan descartarse otros factores que hayan podido dejar su huella en el crecimiento y que ya se trató de minimizarlos en la fase de selección de muestras en el campo y laboratorio. En cualquier caso serían factores que han podido influir en algunos años concretos, pero que en modo alguno son anomalías persistentes en el tiempo capaces de crear o cambiar una tendencia.

	<i>P. sylvestris</i> L.				<i>P. uncinata</i> Ramond			
	Blancas	Cuarto Pelado	Foratarruego	S. J. Peña	Virgen Peña	Acuta	Peñarroya	Larra
r	-0,51 **	-0,47 **	-0,30 *		-0,36 **	-0,67 **	-0,36 **	+0,92 **
(a) pendiente	-7,9	-7,4	-8,1		-15,6	-24,7	-3,9	+6,7
** $\alpha \geq 0,01$ * $\alpha \geq 0,05$ Sin dato: tendencia no significativa En gris = tendencia positiva								

Tabla 3: VALORES DE CORRELACIÓN TEMPORAL DEL CRECIMIENTO RADIAL ANUAL TRANSFORMADO EN SUPERFICIE EQUIVALENTE DEL ANILLO CIRCULAR. VALORES CORRESPONDIENTES AL PERIODO 1940 Y 2002

Las secuencias de superficies circulares calculadas para cada localidad, salvo una, tienen tendencia negativa con significación superior a $\alpha=0,05$ (seis de ellas superan $\alpha=0,01$), lo cual indica que durante la segunda mitad del siglo XX dichas poblaciones de *P. sylvestris* L han experimentado una continuada disminución de su crecimiento. La excepción corresponde a la localidad de San Juan de la Peña, que por tener $\alpha < 0,25$ hemos considerado que su tendencia no es significativa, aunque sea de signo ligeramente positivo.

La mayor tendencia decreciente se observa en la localidad de la Virgen de la Peña, situada al norte de la provincia de Zaragoza. La pendiente de su ecuación (-15,6 mm²/año) es casi el doble que la calculada para las demás localidades de *P. sylvestris* L. cuyos valores oscilan entre -7,4 y -8,1 mm²/año (ver tabla 3). Al tratarse de la localidad de menor altitud, y por tanto más cálida y seca, cabe plantear la hipótesis de si dicha población puede verse más afectada por el incremento global de la temperatura y disminución de la precipitación. De ser así, la reducción de producción vegetal podría ser un proceso tanto más acusado en las zonas de menor altitud del valle del Ebro, donde la mayor temperatura y menor precipitación dan lugar a una aridez es cada vez más intensa (CREUS, 1978). Así lo apuntan algunos autores al afirmar que en aquellas zonas, o condiciones, donde el agua resulta ser factor limitante, o próximo a él, es esperable una reducción de la producción anual (GRACIA *et al*, 2005), incluso una muerte brusca del árbol cuando la sequía impacta fuertemente como ocurrió durante las “secas” habidas recientemente en algunos puntos del sur y este de España (FERNÁNDEZ *et al*, 2004).

6.2. *P. uncinata* Ramond.

Ocupa el piso subalpino y en algunos casos forma el límite superior del bosque, si bien por la acción humana y ganadera vive en cotas inferiores a las naturales. En otros casos ocupa el último tramo de algunos sistemas orográficos y tampoco representa el límite natural del

bosque, simplemente que su menor altitud limita su progresión. En cualquier caso siempre se sitúa por encima del piso montano ocupado por el *P. sylvestris* L. antes comentado.

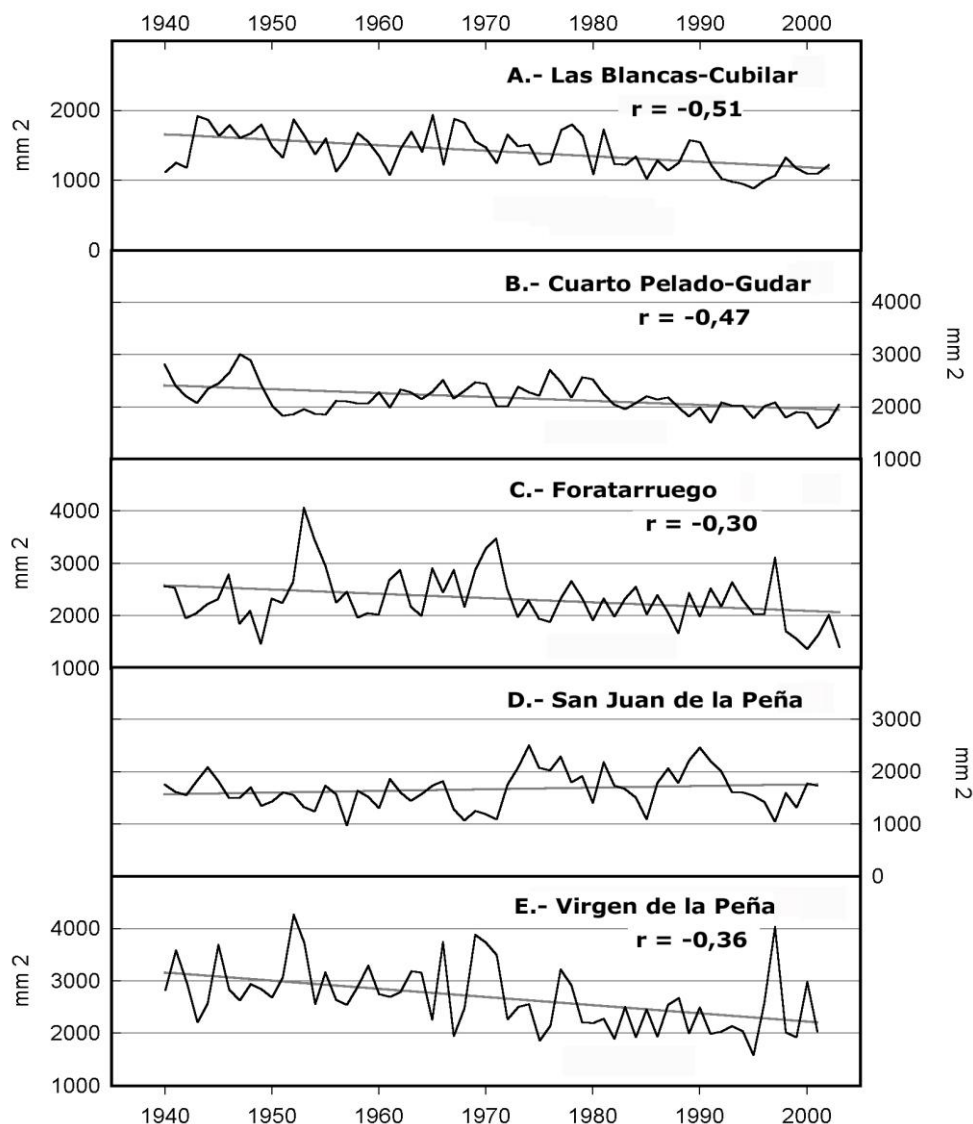


Fig. 2: Valores de la superficie del anillo circular anual (mm²), su pendiente y el valor de correlación (“r”) en las cinco localidades de *P. sylvestris* L. En la localidad de San Juan de la Peña no se dibuja la pendiente debido a que el valor de “r” tiene una significación inferior a $\alpha=0,20$.

Los valores de superficie del anillo circular creado alrededor del tronco (figura 3) muestran una persistente y significativa tendencia desde mediados del siglo XX, negativas unas y positiva otra. En Sierra Acuta y Peñarroya-Sierra de Gúdar la tendencia es decreciente y coincide con que ambas están situadas en ambientes climáticos similares. Tanto la zona surpirenaica-central de la provincia de Huesca (Sierra Acuta) como los sistemas montañosos de la provincia de Teruel (Peñarroya-Sierra de Gúdar) se caracterizan por tener un clima muy continentalizado. Los veranos calurosos incrementan el estrés estival y dificultan el desarrollo del árbol durante su periodo vegetativo al tener que aumentar el gasto energético (CREUS *et al*, 2001). En estas condiciones, un aumento de la temperatura asociado al cambio global

podría acrecentar la capacidad limitante de la temperatura estival y ello contribuir a una reducción de la producción anual. Los *P. uncinata* Ramond de la zona de Peñarroya-Sierra de Gúdar representan, además, el límite meridional de la especie en España, lo cual puede hacerles muy sensibles a cualquier cambio ambiental al encontrarse en su límite de distribución. Por consiguiente, un incremento térmico puede tener un gran efecto negativo, hasta el punto de hacer peligrar su supervivencia a medio plazo al no ser posible un ascenso altitudinal de la población por ocupar el último tramo orográfico donde vive (GRACIA *et al*, 2005), en las inmediaciones del pico de Peñarroya, en la sierra de Gúdar (Teruel).

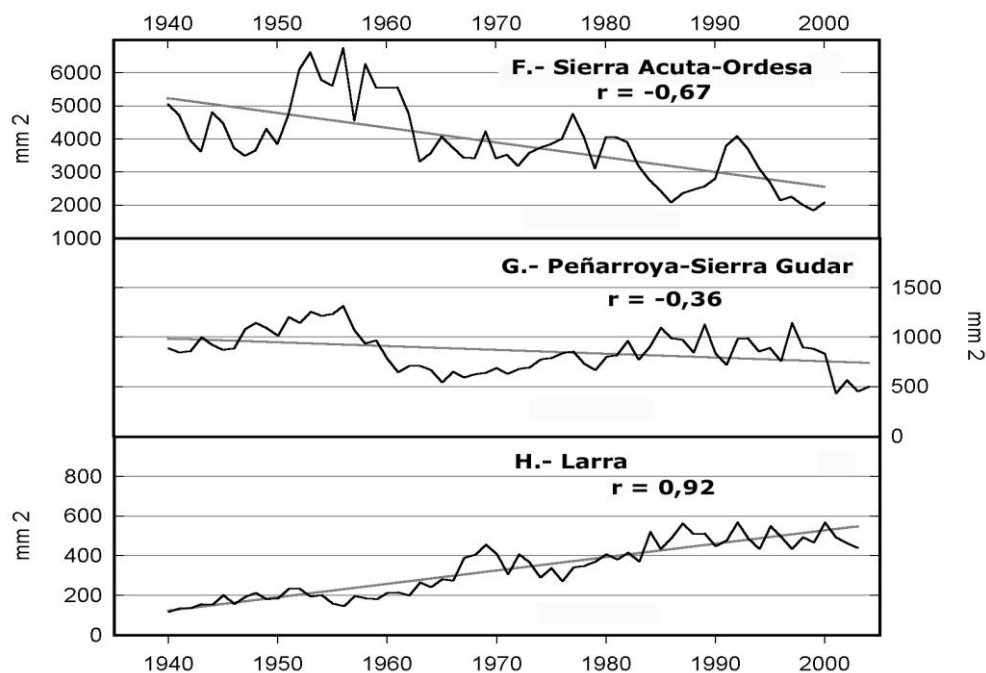


Fig. 3: Valores de la superficie del anillo circular anual (mm²), su pendiente y el valor de correlación (“r”) en las tres localidades de *P. uncinata* Ramond.

Frente a esta continuada disminución del crecimiento, la población de *P. uncinata* Ramond de la zona de Larra (NE de Navarra) tiene una evolución de signo contrario, con un aumento continuado de su producción durante toda la segunda mitad del siglo XX y con pequeñas variaciones interanuales seguramente relacionadas con la elevada regularidad termopluviométrica del clima de la zona. Se trata de un pinar que vive en un clima oceánico de montaña, con precipitaciones superiores a los 1700 mm anuales, prolongada innivación y frecuentes nieblas en cualquier época del año que le proporcionan humedad suficiente para desarrollarse sin dificultad, a pesar de asentarse sobre relieve fuertemente karstificado con fuerte escorrentía y escaso suelo. Mayores tasas de CO₂, y bajo condiciones de clima muy húmedo, podrían estimular su crecimiento, dado que una reducción de la precipitación asociada al cambio climático no sería limitante para su desarrollo debido a los elevados excedentes de humedad de la zona. En casos como este, donde el incremento térmico puede ser positivo y la disminución de la precipitación no llega a ser limitante, la vegetación puede verse favorecida aumentando la productividad y el carbono almacenado en el sistema (GRACIA *et al*, 2005). Similares resultados han obtenido otros autores que estudiaron los bosques de *Fagus sylvatica* L. en la zona de Irati (Navarra), situados unos 30 kms al oeste de los *P. uncinata* Ramond de Larra, donde las precipitaciones todavía son algo mayores. Han

podido constatar que dicha especie también ha tenido un notable incremento de sus crecimientos radiales anuales durante todo el siglo XX y de forma más evidente desde 1950 (BOURGUIN-MIGNOT *et al*, 2001).

7. CONCLUSIONES

La metodología propuesta pretende sustituir el uso de funciones de estandarización del grosor de los anillos de crecimiento de los árboles como forma de corregir su decrecimiento según aumenta su edad. Tal tendencia biológica debe ser eliminada para que no distorsione los valores reales de crecimiento, pero no hasta el punto de suavizar los datos y dejar las series sin tendencia si se ajustan determinadas funciones. Esta tendencia decreciente proponemos sustituirla por el valor de la superficie del anillo circular incluido entre dos crecimientos anuales consecutivos, que tiende a incrementarse (y por tanto a compensar el decrecimiento biológico) a medida que aumenta la circunferencia del tronco.

De los resultados obtenidos puede concluirse que las poblaciones de *P. sylvestris* L. estudiadas, situadas a cotas superiores a 1300 mts, muestran una continuada disminución de su crecimiento durante toda la segunda mitad del siglo XX, tanto más acusada en las zonas de menor altitud (localidad de Virgen de la Peña) donde las temperaturas más benignas quizás están más afectadas por el incremento térmico asociado al cambio climático y, por consiguiente, limitar más el crecimiento. Por el contrario, en la localidad de San Juan de la Peña no se detecta tendencia alguna y el sostenido crecimiento anual de sus *P. sylvestris* L bien podría ser resultado de un equilibrio de influencias entre los dos ambientes climáticos que confluyen en la zona, de manera que no reducen su producción como ocurre en las otras localidades de *P. sylvestris* L. que viven en ambientes continentalizados más secos situados hacia el sur y este de la zona, pero tampoco la incrementan como las poblaciones *P. uncinata* Ramond y *Fagus sylvatica* L. que situadas más al norte bajo clima oceánico de montaña de elevada precipitación y donde el moderado incremento térmico asociado al cambio climático puede ser positivo para su crecimiento.

Los diferencias climáticas regionales también pueden explicar la diferente tendencia de crecimiento observada en las distintas poblaciones de *P. uncinata* Ramond, que pasa de ser progresivamente creciente en la montaña oceánica del NE de Navarra, a claramente decreciente en los ambientes más secos de la vertiente meridional del Pirineo central (sierra Acuta-Ordesa) y de la cordillera Ibérica turolense (Peñarroya-sierra de Gúdar) donde las precipitaciones son inferiores a 650 mm anuales en cotas próximas a 1600 mts. Además, en esta zona turolense la población estudiada ocupa el límite meridional de la especie en España y por tanto cabe esperar que sean más sensibles a cualquier cambio ambiental que modifique su actual régimen hídrico y térmico que ya de por sí limita su distribución.

Los resultados obtenidos constituyen un ejemplo de las distintas tendencias de crecimiento que pueden observarse según especies y lugares que, sin duda, dificultan la obtención de conclusiones generales. Las respuestas son variadas, porque lo es la eficiencia fotosintética y las tasas de respiración, que a su vez dependen de unos recursos edáficos, parámetros atmosféricos, superficie foliar, etc, muy cambiantes en el espacio y tiempo.

8. REFERENCIAS

- ALLUÉ, J. 1995. El cambio climático y los montes españoles. *Cuadernos de la SECF*, Madrid, nº 2, 35-64.
- BADEAU, V., BECKER, M., BERT, D., DUPOUEY, L., LEOBOURGEOIS, F. AND PICARD, J. 1996. Long-term growth trends of trees. Ten years of dendrochronological studies in France. In: *Growth Trends in European Forest* (ed: Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. and Skovsgaard, J.), European Forest Institute Research, Springer-Verlag, Berlin, p. 167-181.
- BAZZAZ, F. ET FAJER, E. 2000. Le dioxyde de carbone et la croissance. *Pour la science*. Dossier hors-série de janvier 2000, Marseille, p. 90-92
- BECKER, M., BERT, G., BOUCHON, J., DUPOUEY, J., PICARD, J. AND ULRICH, E. 1995. Long-term Changes in Forest Productivity in Northeastern France. The dendroecological approach. In: *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains* (ed: Landmann, G. and Bonneau, M.), Springer-verlag, Berlín, p. 143-156.
- BOURGUIN-MIGNOT, C., GIRARDCLOS, O. 2001. Construction d'une longue chronologie de hêtre au Pays Basque. Le Forêt d'Iraty et le Petit Age Glaciaire. In : Galop, D. (éd). *Paléoenvironnement et dynamique de l'anthropisation de la montagne basque*. Université de Franche-Comté. 7-21.
- BRIFFA, K. 1992. Increasing productivity of « normal growth” conifers in Europe over the last century. In: *Tree rings and environment* (ed: Bartholin, T., Berglund., Eckstein, D. and Schweingruber, F.) Ystad, Sweden, p. 64-71.
- CEULEMANS, R. 1998. Large open-top chambers for fast-growing poplars. In: *European Forest and Global Change. The Likely Impacts of Rising CO₂ and Temperature*.(Ed: Jarvis, P.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 12-13.
- COOK, E., BRIFFA, K., SHIYATOV, S. AND MAZEPA, V. 1990. Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In: *Methods of dendrochronology*. Cook, E and Kairiukstis, L. (eds.). Kluwer Academic Publishers, London, pp 104-122.
- COOK, E. AND BRIFFA, K. 1990. Data analysis. In: *Methods of dendrochronology*. Cook, E and Kairiukstis, L. (eds.). Kluwer Academic Publishers, London, pp 97-153.
- CREUS, J. 1978. La transición climática altoaragonesa. *Estudios Geográficos*, 39:495-518
- CREUS, J., GENOVA, M., FERNANDEZ, A. AND PEREZ, A. 1992. New dendrochronologies for Spanish mediterranean zone, *Lundqua*, 34, 76-78.
- CREUS, J Y SAZ, M. 2001. Influencia de la precipitación y la temperatura en el crecimiento radial de *Pinus uncinata Ramond* y *Pinus nigra Arnold* subsp. *salmannii* en la provincia de Teruel. *Pirineos*, 156:3-26.
- CURTIS, P. AND WANG, X. 1998. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form and physiology. *Oecologia* 113, p. 299-313.
- DÍAZ, L. Y ROMERO, E. 2004. *La captura del carbono y la gestión forestal*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid, 79 p.
- DITTMAR, C., ZECH, W. AND ELLING, W. 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe. Dendroecological study. *For. Ecol. Manage*, 173:63-78.
- FERNÁNDEZ, A., MANRIQUE, E., NAVARRO, R. Y FERNÁNDEZ, R. 2004. La seca como problema. Enfoque climático. In: *La seca*. J. Tuset y G. Sánchez Edts. Ministerio de Medio Ambiente, p 153-169.
- FRITTS, H. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London, 567 p.

- GÉNOVA, M., FERNÁNDEZ, A. Y CREUS, J. 1993. Diez series medias de anillos de crecimiento en los sistemas Carpetano e Ibérico. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, Vol. 2(2):151:172.
- GRACIA, C., GIL, L. Y MONTERO, G. 2005. Impactos en el sector forestal. In: *Evolución preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. José Manuel Moreno. (Coordinador), Ministerio de Medio Ambiente, 822 p.
- GRAYBILL, D. AND IDSO, S. 1993. Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree ring chronologies. *Global Biogeochemical Cycles* 7(1), p. 81-95.
- GUTIÉRREZ, E., 1986. *Dendrocronología de Fagus sylvatica, Pinus uncinata y Pinus sylvestris en Catalunya*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, Facultad de Biología, 280p.
- HELLER, R., ESNAULT, R. ET LANCE, C. 1998. *Physiologie végétale I. Nutrition*. Dunod, París, 323p.
- INNES, J. 1991. High-altitude and high-latitude tree growth in relation to past, present and future global climate change. *The Holocene* 1(2), p. 168-173.
- JUPIN, H. ET LAMANT, A. 1997. *La Photosynthèse*. Masson, Paris, 268 p.
- KEELING, C.D. AND WHORF, T.P. 2001. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: *Trends, A compendium of data on global change*. Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, U.S.A.
- KIRSCHBAUM, M.U. AND FISCHLIN, A. 1996. Climate change impacts on forest. In: *Climate Change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses* (ed: Watson R., Zinyowera, M., Moss, R. & Dokken, D.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 95-130.
- KIVISTE, A., ÁVAREZ JG., ROJO, A.; RUÍZ, A. 2002. *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*, INIA, Série Forestal, nº 4, Madrid, 190 p.
- KÖRNER, C. 2000. Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecological Applications*, 10:1590-1619
- LAVAL-MARTIN, D. ET MAZLIAK, P. 1995. *Physiologie végétale I. Nutrition et métabolisme*. Hermann, París, 539 p.
- MAKINEN, H. 1998. The suitability of height and radial increment variation in *Pinus Sylvestris* L. for expressing environmental signals. *Forest Ecology and Management*, 112:191-197
- MOUSSEAU, M., DUFENE, EL KOHEN, A., EPRON, D., GODARD, D., LIOZON, R., PONTAILLER, AND SAUGIER, B. 1996. Growth strategy and tree response to elevated CO₂: a comparison of beech (*Fagus sylvatica*) and sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.). *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*. Academic Press, p. 71-86
- MOUSSEAU, M. 1998. Is dark respiration rate changed? In: *European Forest and Global Change* (ed: Jarvis, P.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 79-93.
- OSMOND, C., BJÖRKMAN, O. AND ANDERSON, D. 1980. Physiological Process in Plant Ecology. *Ecological Studies* 36, Springer-Verlag, Berlin.
- PEÑUELAS, J., IDSO, B., RIBAS, A. AND KIMBALL, B. 1997. Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the mineral concentration of citrus aurantium leaves. *New Phytologist*, 135:439-444.
- PENUELAS, J., CASTELLS, E., JOFFRE, R. AND TOGNETTI, R. 2002. Carbon-based secondary and structural compounds in Mediterranean shrubs growing near a natural CO₂ spring. *Global Change Biology*, 8:281-288.
- PRENTICE, I.C. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate Change 2001: The scientific basis* (ed: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 183-237.

- PUHE, J. AND ULRICH, B. 2001. *Global Climate Change and Human Impacts on Forest Ecosystems Postglacial Development. Present situation and future trends in central Europe*. Ecological Studies 143, Springer-Verlag, Berlín, 592 p.
- TOGNETTI, R., CHERUBINI, P. AND INNES, J. 2000. Comparative stem growth rates of mediterranean trees under background and naturally enhanced ambient CO₂ concentrations. *New Phytologist* 146, p. 59-74.
- SAUGIER, B. 1996. Végétation et atmosphère. *Dominios 107*, Flammarion, 127 p.
- SCHWEINGRUBER, F. 1988. *Tree rings. Basic and application of dendrochronology*. Reidel Publishing Company, Dordrech, 276 p.
- SPRUGEL, M., AND SMILEY, T. 1968. *An introduction to tree ring dating*. University of Chicago Press, Chicago, 73 p.
- ZEIDE, B. 1993. *Analysis of growth equations*. Forestal Science, nº 39, pp 594-616.