

Estudi dendrocronològic dels efectes de la contaminació sobre les pinedes dels ports de Morella i Villarroya

Núria Serra

Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia. Facultat de Ciències.
Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra (Barcelona).

Key words: annual growth rings, dendrochronology, *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, sulphur dioxide emissions.

Abstract. A dendrochronological study of air pollution effects on pine forests in Ports de Morella and Villarroya (NE Spain). Wood samples were taken from *Pinus halepensis*, *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a large area, 50 km away from the 1200 MW coal-fired power plant of Andorra (Teruel), presumably affected by SO₂ emissions since 1982. The standardized dendrochronological series of annual growth rings during 1936-1985 do not support the hypothesis of decreased tree growth during the last four years, perhaps because this period of sulphur dioxide emission is too short to produce detectable effects at these distances from the power plant.

Resum. Es varen recollir mostres de fusta de tres espècies de pins, *Pinus halepensis*, *Pinus nigra* i *Pinus sylvestris*, d'una ampla zona a uns 50 km de la central tèrmica d'Andorra de Terol, que hom creu afectada per les emissions de SO₂ des de 1982. La mesura dels anells de creixement i l'estandardització de les sèries dendrocronològiques del període 1936-1985, no confirmen la hipòtesi d'una reducció del creixement durant els últims quatre anys a causa de la contaminació, possiblement perquè el període d'emissió és massa curt per a produir efectes detectables en aquestes distàncies de la central.

Introducció

La formació d'anells de creixement en les espècies llenyoses de regions temperades permet d'estudiar les variacions de la producció que es donen any rere any. Aquesta variabilitat depèn de molts factors, però els més importants són la variació climàtica, no solament durant la producció d'un any sinó també en anys anteriors, l'edat de l'arbre i els factors locals com els edàfics o les característiques estructurals de la massa forestal (Fritts 1976).

La contaminació atmosfèrica —i en concret el diòxid de sofre (SO₂)—, pot afectar els ecosistemes forestals (Smith 1981). El SO₂ és absorbit per les fulles a través dels estomes. El diòxid de sofre pot donar ió sulfít (SO₃²⁻) i després, més lentament, ió sulfat (SO₄²⁻). L'ió sulfít és tòxic per a

alguns processos bioquímics; aquesta toxicitat es tradueix en una degradació de la clorofil·la i d'altres alteracions metabòliques i estructurals. L'ió sulfat és menys tòxic (Manning & Feder 1982, Smith 1981).

Si el nivell de SO_2 a l'atmosfera augmenta molt, la vegetació se'n pot veure afectada: hi apareix clorosi i disminueix la taxa de creixement, essent un dels efectes la reducció dels increments radials dels troncs dels arbres de la zona que rep les emissions de SO_2 . Diversos estudis (Baes & McLaughlin 1984, Ferrés 1986, Fox et al. 1986), han posat de manifest reduccions en els anells de creixement dels arbres després d'iniciar-se l'activitat de centrals tèrmiques o altres instal·lacions industrials que constitueixen focus emissors importants. En algun cas (Fox et al. 1986), s'ha demostrat també la recuperació del creixement dels anells després d'entrar en funcionament mesures descontaminats.

La central tèrmica d'Andorra (Terol) té una potència de 1200 MW i crema lignits d'alt contingut de sofre. En funcionament normal, la quantitat de SO_2 emesa per la central és de $6.22 \cdot 10^5 \text{ t any}^{-1}$. El SO_2 i altres contaminants surten d'una xemeneia de més de 300 m d'alçada, i es dispersen seguint els vents dominants del NW en direcció E-SE. La central va entrar en funcionament a plena potència l'any 1982.

Aquest treball s'inicià amb l'objectiu d'estudiar la possible influència de les emissions de SO_2 de la central tèrmica d'Andorra en el creixement dels tres principals tipus de boscos de coníferes de la zona: *Pinus halepensis*, *P. nigra* i *P. sylvestris*. En el present article es pretén d'esbrinar, utilitzant els mètodes de la dendrocronologia, si les emissions de SO_2 han determinat una reducció del creixement dels pins durant el període 1985-1982.

Àrea d'estudi

La zona de mostreig cobreix un arc ample al SE de la central tèrmica, a una distància entre 50 i 60 km d'aquesta (Fig. 1). Aquest arc va des de Villarroya de los Pinares (al sud de la central), fins a Vall-de-roures (a l'est de la central). De tota la zona, es varen escollir 9 estacions, tenint en compte principalment l'aspecte exterior del bosc i l'accessibilitat, i es van fer dues recollides de mostres durant el 1985, una al juny i la segona al novembre. Aquesta última, a més d'incrementar el nombre de mostres, ens permet de saber l'increment radial corresponent a l'any en curs, ja que per les espècies estudiades es pot considerar que pel novembre ha acabat el període de creixement.

Material i mètodes

En cada estació de mostreig s'agafaren, com a mínim, 10 mostres de fusta, 2 per cada arbre mostrejat, amb la barrina Pressler i a 1.3 m del terra. Un cop les mostres seques, es tallà una de les superfícies perpendiculars als

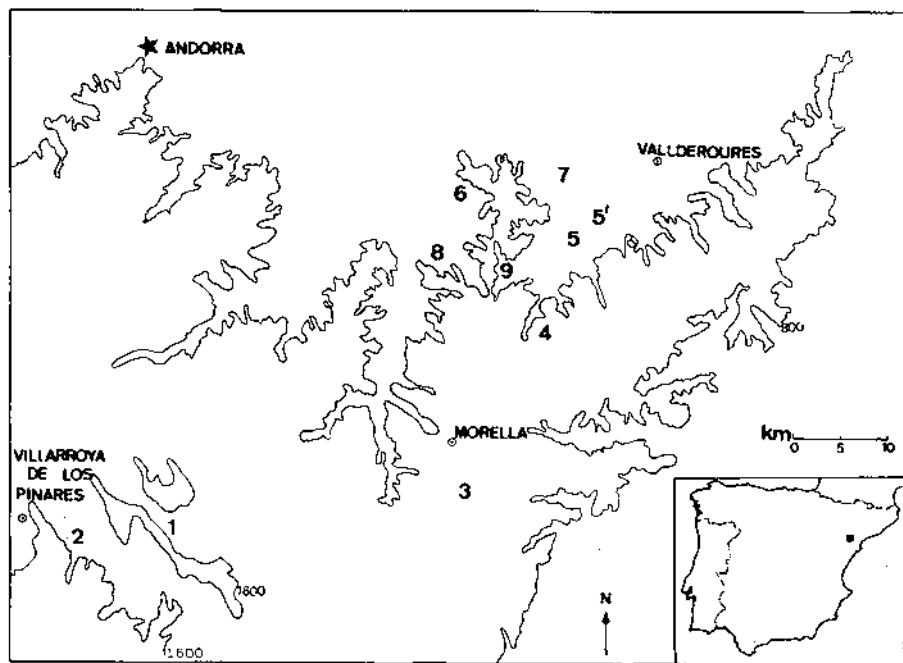


Figura 1. Situació geogràfica de la central tèrmica i dels punts de mostreig.

vasos per poder estudiar la grandària, forma i densitat de les cèl·lules, i així distingir la producció de fusta primerenca de la tardana.

La datació absoluta dels anells de creixement no es pot fer directament, donat que és possible l'existència d'anells dobles o que hi manqui l'anell d'un any en particular. Per detectar aquestes anomalies es fa servir la tècnica d'interdatació (*cross dating*). Es tracta de localitzar les seqüències d'anells semblants en les diferents mostres i utilitzar-les com a punt de referència per a descobrir possibles anomalies. La mesura dels anells es fa semiautomàticament amb una lupa binocular subjectada a un aparell tipus Eklund, amb una precisió de 0.01 mm. L'aparell consta d'una plataforma on es posa la mostra, articulada amb un eix. Es fa girar l'eix per poder desplaçar la plataforma tant com l'amplada de l'anell de creixement que s'està mesurant ho requereix. L'eix està connectat a un comptador electrònic que mesura els desplaçaments, cadascun des de zero, i aquest està connectat a un microordinador que enregistra cada una de les mesures en el banc de dades del programa CATRAS (*Computed Aided Tree Ring Analysis System*) elaborat per Aniol (1983).

Amb les sèries d'increments radials que s'obtenen, i utilitzant el mateix programa, es fan proves de sincronització basades en correlacions entre sèries i percentatges de coincidència de les variacions dels increments. La

representació dels increments radials anuals en funció del temps ens donarà la gràfica de cada sèrie dendrocronològica. La comparació visual d'aquestes gràfiques serveix per sincronitzar i datar sèries i permet d'esbrinar si la causa d'una sincronització dolenta és deguda a la presència de falsos anells, a anells absents o a una lectura errònia, i d'aquesta manera corregir les anomalies.

Tractament de les dades

Essent la zona d'estudi tan gran i heterogènia, ens trobem que la longitud de les sèries dendrocronològiques varia des de 50 fins a 214 anys. L'amplada dels anells de creixement tendeix sovint a disminuir quan augmenta l'edat de l'arbre. Per eliminar aquesta tendència i per poder comparar les diferents estacions i les diferents espècies s'han estandarditzat les sèries (Fritts 1976).

El tipus d'estandardització aplicat a cada sèrie es recull a la Taula 1. Generalment, quan les sèries són molt llargues i les gràfiques presenten una forma exponencial, aquestes es poden ajustar a una funció exponencial negativa:

$$Y(t) = a \cdot e^{-bt}$$

on $Y(t)$ és el creixement esperat en l'any t ; a i b són paràmetres específics de cada sèrie. Quan les sèries no s'ajusten a aquest tipus de funció, i a més són sèries curtes, hem utilitzat un ajustament lineal de tota o part de la sèrie:

$$Y(t) = a - bt$$

En algunes de les sèries no ha estat possible cap dels ajustaments ante-

Taula 1. Tipus d'ajustaments que s'han utilitzat per a cada sèrie per eliminar les tendències degudes a l'edat. $Y(t)$ és el valor esperat d'increment radial a l'any t .

Ajustament	Sèrie	Espècie
$Y(t) = a - bt$	1	<i>Pinus sylvestris</i>
	2-1	<i>Pinus sylvestris</i>
	4	<i>Pinus nigra</i>
	7	<i>Pinus halepensis</i>
$Y(t) = a \times e^{-bt}$	3	<i>Pinus nigra</i>
	5	<i>Pinus nigra</i>
$Y(t) = 20 \%$	2-2	<i>Pinus sylvestris</i>
	6	<i>Pinus halepensis</i>
	7	<i>Pinus nigra</i>
	8	<i>Pinus halepensis</i>
	9	<i>Pinus halepensis</i>

riors. Aleshores cada increment observat s'expressa com a percentatge de l'increment radial durant un període de 5 anys centrat en l'any en qüestió:

$$Z(t) = 100 \left(W(t) / \sum_{i=t-2}^{t+2} W(i) \right)$$

on $W(t)$ és l'increment radial observat l'any t . En aquest cas, l'increment esperat, $Y(t)$, té un valor de 20 %, per a qualsevol t (Taula 1).

A les sèries on s'ha aplicat un ajustament exponencial o lineal, s'han transformat els increments radials observats en índex, $I(t)$, definit com el quocient entre l'increment observat i l'esperat, per a cada any:

$$I(t) = W(t)/Y(t)$$

A les sèries on s'ha aplicat el tercer tipus d'ajustament, els índexs s'han calculat de la mateixa manera, però substituint en l'expressió anterior $W(t)$ per $Z(t)$. Amb aquest procediments, totes les sèries s'estabilitzen al voltant d'una mitjana de valor 1.

Per comparar les diferents gràfiques no hem treballat amb tota la sèrie completa, sinó solament amb el període 1936-1985, ja que és el més llarg i comú a totes les sèries.

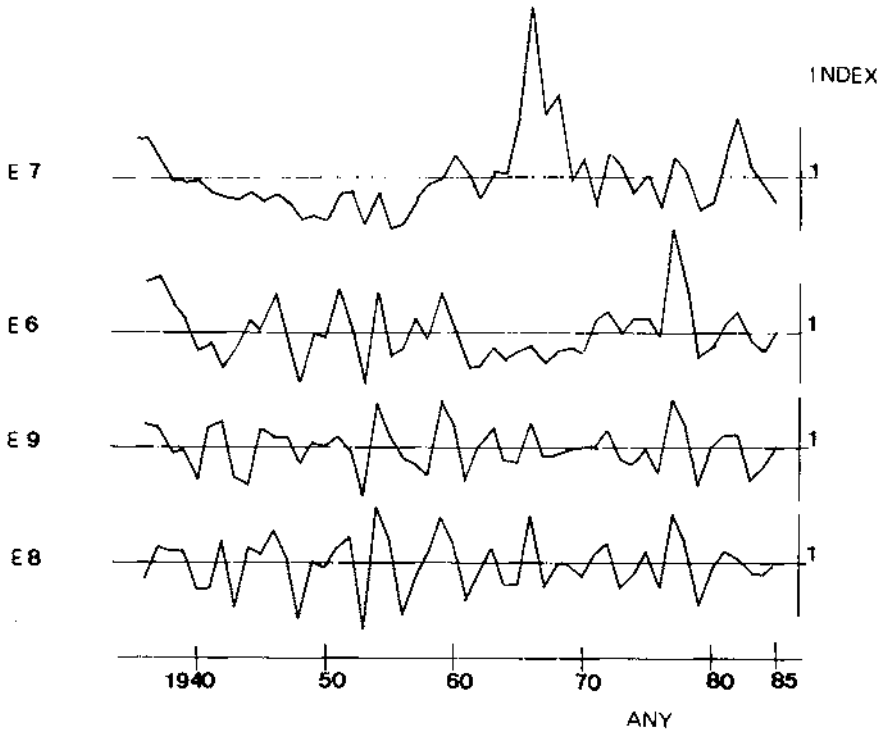


Figura 2. Sèries dendrocronològiques de *Pinus halepensis*.

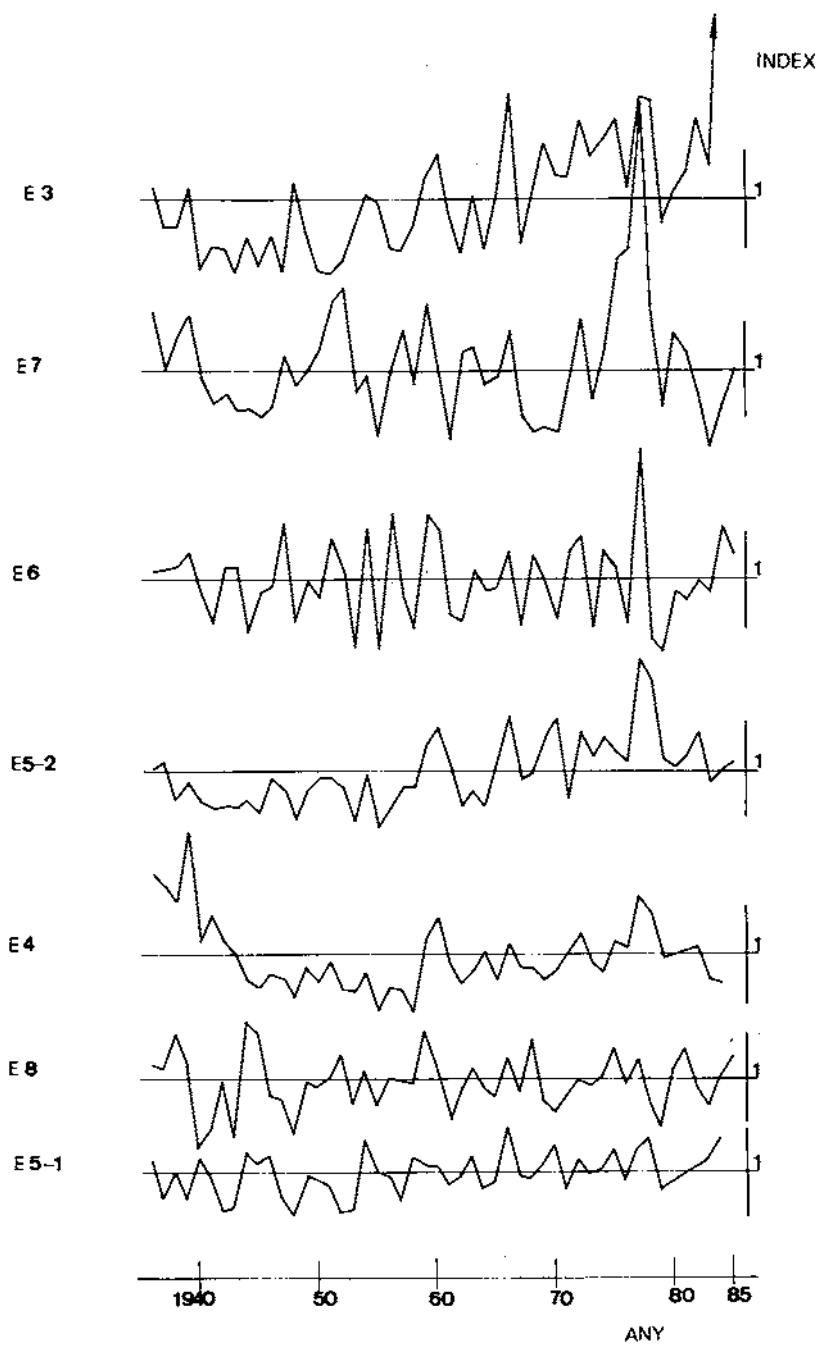


Figura 3. Sèries dendrocronològiques de *Pinus nigra*.

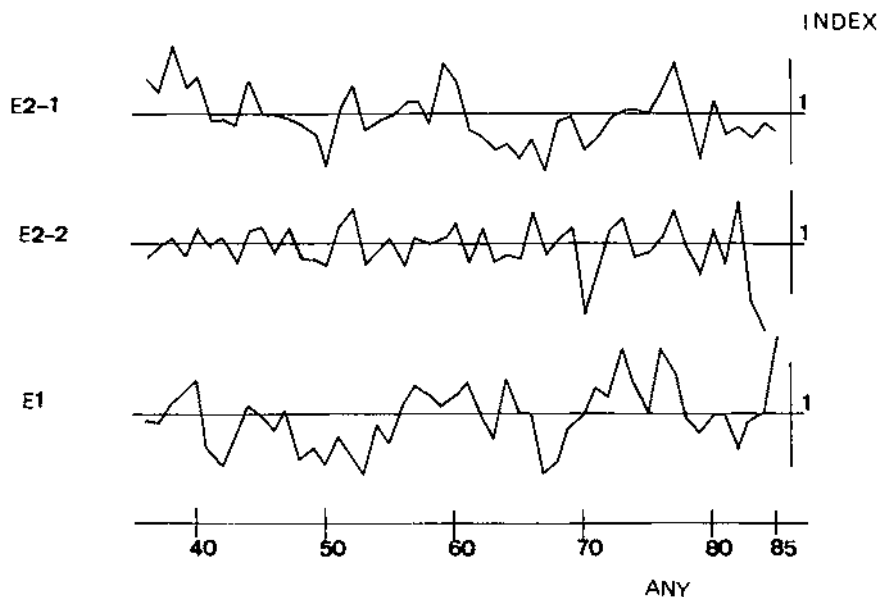


Figura 4. Sèries dendrocronològiques de *Pinus sylvestris*.

Hem fet servir també, per obtenir més informació sobre les sèries, dos estadígrafs d'ús molt freqüent en dendrocronologia, a més de la mitjana i la desviació estàndard: l'autocorrelació i el coeficient de sensibilitat mitjana. El valor de l'autocorrelació pot variar entre -1 i 1 i ens expressa la dependència entre els increments successius en una mateixa sèrie. El coeficient de sensibilitat mitjana ens avalua quantitativament la variabilitat de cada una de les sèries (Fritts 1976).

Resultats i discussió

Malgrat que es tracta de tres espècies diferents de pins, les sèries són molt semblants entre si (Figs. 2-4) i coincideixen en els anys de referència (*pointer years*), o anys en què les influències externes són molt fortes, i molts arbres reaccionen de la mateixa forma a aquestes influències i presenten el mateix tipus de variació en el creixement comparat amb l'any anterior. Per a les tres espècies hi ha quatre anys que són significatius: 1961, 1967, 1978 i 1979. Són anys, a més, que coincideix amb valors baixos de precipitació en els mesos de primavera.

No obstant això, hi ha diferències quant a la variabilitat, i se'n poden fer tres grups: (a) les sèries de *Pinus nigra* de les estacions 3, 6 i 7, amb uns coeficients de sensibilitat mitjana molt alts, per sobre de 0.38 (Taula 2); (b) les sèries 2-1 de *P. sylvestris*, 4 de *P. nigra* i 7 de *P. halepensis*, amb els coeficients més baixos; i (c) la resta de les sèrie, amb valors intermedis.

Taula 2. Creixement radial mitjà, coeficient de sensibilitat mitjana i coeficient d'autocorrelació en 14 sèries dendrocronològiques de pins als Ports de Morella i Villarroya per al període 1936-1985.

Sèrie	Espècie	Nombre màx. anells	Creixement radial (mm/any)		Sensibilitat mitjana	Autocor- relació
			\bar{X}	$\pm S_x$		
1	<i>P. sylvestris</i>	214	1.58	0.36	0.20	0.45
2-1	<i>P. sylvestris</i>	98	1.25	0.34	0.16	0.89
2-2	<i>P. sylvestris</i>	63	1.05	0.29	0.22	0.56
3	<i>P. nigra</i>	133	0.81	0.39	0.38	0.44
4	<i>P. nigra</i>	146	0.70	0.28	0.18	0.84
5-1	<i>P. nigra</i>	56	1.56	0.37	0.21	0.36
5-2	<i>P. nigra</i>	71	1.71	0.48	0.22	0.46
6	<i>P. nigra</i>	78	1.05	0.62	0.42	0.37
6	<i>P. halepensis</i>	55	2.02	0.53	0.21	0.29
7	<i>P. nigra</i>	68	0.56	0.23	0.38	0.14
7	<i>P. halepensis</i>	52	2.19	0.96	0.18	0.88
8	<i>P. nigra</i>	110	0.92	0.34	0.27	0.60
8	<i>P. halepensis</i>	89	0.95	0.28	0.26	0.33
9	<i>P. halepensis</i>	71	1.35	0.35	0.18	0.41

Per a *P. sylvestris*, Tessier (1982) troba valors de coeficients de sensibilitat mitjana entre 0.16 i 0.23, i per a *P. halepensis*, Serre (1982) dóna valors entre 0.15 i 0.38, considerant una sensibilitat molt feble 0.15 i forta 0.38. Els valors trobats en aquest estudi per a les dues espècies, s'ajusten molt a les referències bibliogràfiques amb valors per sobre de 0.15. Els valors per a altres espècies de pins són: 0.20 per a *P. pinea* i 0.21 per a *P. pinaster* (Serre 1982); per a *P. uncinata* Puigdefàbregas & Creus (1976) troben valors entre 0.16 i 0.24, i Génova (1986) entre 0.14 i 0.26. En el cas de *P. nigra* no tenim informació que ens permeti comparar els valors obtinguts, però els coeficients de sensibilitat mitjana de les diferents espècies de pins i la variació de valors entre les diferents sèries de *P. nigra* fan pensar que les sèries de les estacions 3 i 7, i sobretot, la sèrie de l'estació 6 tenen uns coeficients de sensibilitat mitjana alts, entre 0.38 i 0.42. Aquesta variabilitat ha de venir condicionada per factors locals externs, limitants per a aquesta espècie per dues raons: la primera és que les sèries de *P. halepensis* de les estacions 6 i 7 són les que presenten una mitjana de creixement més gran, mentre que les sèries de *P. nigra* d'aquestes estacions, sobretot la 7, tenen mitjanes de creixement molt petites; la segona es relaciona directament amb els valors normals dels coeficients de sensibilitat mitjana per a les sèries de *P. halepensis*.

Les diferències tan grans, quant al creixement, i també entre els coeficients de sensibilitat mitjana, indiquen que en aquestes estacions els factors

locals no són gens favorables per a *P. nigra* i sí per a *P. halepensis*; encara que s'ha de considerar també la diferència d'edat entre les dues espècies, uns 20 anys més joves els *P. halepensis*, com a possible factor que pot explicar parcialment les diferències d'increment radial entre les dues espècies.

En el cas de l'estació 8, les dues espècies tenen, tot i la diferència d'edat, una variabilitat semblant, amb valors bastant normals i unes mitjanes de creixement molt petites, perquè les condicions no afavoreixen cap de les dues espècies.

Les sèries 3 i 4 de *P. nigra*, també tenen una mitjana de creixement baixa, ja que no arriba en cap cas a 1 mm/any d'increment radial, però hi ha una diferència considerable entre els seus coeficients de sensibilitat mitjana. L'aspecte extern dels arbres de l'estació 3 és decrepít, amb individus parcialment defoliats, altres infectats per vesc i alguns de morts; les alçades mitjanes no superen els 12 m. Tot això fa pensar que la qualitat de la zona és baixa i es tradueix en unes taxes de creixement baixes i un augment de la sensibilitat enfront del medi climàtic. En canvi l'estació 4, situada sobre un terreny col·luvial amb un fort pendent (35°), està ocupada per un bosc regular d'aspecte general bo, amb alçades mitjanes fins a 20 m; això vol dir que, malgrat llur baixa taxa de creixement, aquest arbres no es troben debilitats, com ho confirma el valor baix del coeficient de sensibilitat mitjana. Tot i que la mitjana de creixement és baixa, s'ha de fer notar que els índex de creixement són més alts en els darrers 30 anys a causa segurament de les últimes aclarides.

En fer l'estudi de les mostres de *P. sylvestris* ens vàrem trobar amb molts problemes de lectura i sincronització a causa de la mida tan petita d'alguns anells, i per la dificultat de determinar els falsos anells o els anells absents. Per això, en el segon mostreig i aprofitant que estaven tallant arbres, vàrem obtenir seccions circulars de troncs en tres situacions diferents de l'estació 2 (part alta de la muntanya, vessants, i fondalades); en total, 23 arbres entre les dues recollides. A més, i en una zona propera, es van treure mostres de 6 arbres molt grans i aïllats en uns prats (estació 1).

Dels 23 arbres que es van mostrejar a l'estació 2, només 13 s'han pogut utilitzar per confeccionar les sèries dendrocronològiques mitjanes. La major part de les mostres procedien de la part alta de la muntanya, de la qual només s'ha pogut fer la sèrie 2-2.

No hi ha una diferència significativa entre les mitjanes de creixement de les estacions 1 i 2 i els valors trobats per Tessier (1982), i els coeficients de sensibilitat mitjana es troben dins de l'interval de valors trobats pel mateix autor. Les sèries dendrocronològiques d'ambdues estacions són força semblants (Fig. 4) excepte per als últims anys: la sèrie 2-2 mostra una disminució molt forta en el creixement a partir de 1982, juntament amb la desaparició de l'últim anell de creixement corresponent a 1985 que hauria de ser-hi present, ja que les mostres varen ser recollides pel novembre. Això i l'as-

pecte extern del bosc fan pensar en l'existència d'algun factor, a determinar, que afecta aquests individus i no pas els de vessants i fondalades. Els pins de l'estació 1, malgrat tenir més de 200 anys, presenten un bon creixement i un coeficient de sensibilitat normal (Taula 2), a causa, fonamentalment, de la condició d'arbres solitaris.

En conjunt, la reducció dels increments radials que s'esperaba en els últims 4 anys com a conseqüència de les emissions de SO_2 , no es posa en evidència, tot i que l'aspecte exterior d'algunes zones era bastant decreït.

Per recolzar aquests resultats s'han fet correlacions entre les sèries i la precipitació dels mesos de primavera en els últims 10 anys. Per *P. halepensis* hi ha bona correlació ($r = 0.74$, $P < 0.05$) i millor per *P. nigra* ($r = 0.81$, $P < 0.05$). Això indica que la precipitació de primavera és un factor important per al creixement d'aquestes espècies. Per a *P. sylvestris* la correlació és molt baixa ($r = 0.44$, $P < 0.05$); això no permet però de dir que el creixement d'aquesta espècie no estigui influït per les precipitacions, més aviat creiem que hi ha d'altres factors que prenen un paper més important i que són els que provoquen l'estat actual d'aquest bosc.

Per altra banda, s'han fet tests de significació entre les mitjanes de creixement radial dels últims 4 anys i les dels 46 anys anteriors, i en cap cas, ni en les sèries individuals ni en les mitjanes per espècies, s'han trobat diferències significatives ($P > 0.10$). Tampoc aquests resultats confirmen la hipòtesi d'una reducció del creixement deguda a la contaminació per SO_2 . Baes & McLaughlin (1984) i Fox et al. (1986) han detectat problemes en el creixement a causa de la contaminació atmosfèrica, però troben que la resposta es presenta després d'un període llarg de temps (més de 10 anys) des que comencen les emissions de SO_2 . Cal considerar també que en climes humits, l'obertura dels estomes de les fulles permet l'entrada de sofre més fàcilment.

Hem de destacar que les zones estudiades i que es troben en un estat més delicat estan apartades de la direcció dels fums, com és el cas de les estacions 1 i 2 situades al sud de la central, i per altra banda que l'alçada de la xemeneia fa que els fums es dilueixin a la vegada que es dispersen en un radi molt ample. Davant d'aquesta situació i dels resultats obtinguts, si continua l'emissió de SO_2 , fóra interessant de seguir l'evolució d'aquests boscos, tant des del punt de vista dels possibles efectes de la contaminació com de la relació entre les condicions climàtiques i el creixement dels arbres.

Agraïments

A l'Institut Nacional de Investigaciones Agrarias (CRIDA 6) i particularment a K. Richter de la Càtedra de la Fusta d'Hamburg, que feia un estatge a l'esmentat centre, per haver-nos permès d'utilitzar l'aparell mesurador i el programa CATRAS, facilitant així la tasca d'aquest treball.

Bibliografia

- Aniol, R. W. 1983 Tree-ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia* 1:45-53.
- Baes, C. F. & McLaughlin, S. B. 1984. Trace elements in tree-rings: evidence of recent and historical air pollution. *Science* 224:494-497.
- Ferrés, Ll. 1986. Efectes de les emissions de SO₂ de la central tèrmica de Cercs (Alt Berguedà) sobre els boscos de *Pinus sylvestris* L. *Orsis* 2:97-102.
- Fox, C. A. Kincaid, W. B., Young, D. L. & Fritts, H. C. 1986. Tree-ring variation in western larch (*Larix occidentalis*) exposed to sulfur dioxide emissions. *Can. J. For. Res.* 16:283-292.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree-Rings and Climate*. Academic Press. London.
- Génova, R. 1986. Dendrochronology of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram) in the Central plain of Spain. *Tree-Ring Bull.* 46:3-12.
- Manning, W. J. & Feder, W. A. 1982. *Biomonitoring Air Pollution with Plants*. Applied Science Publishers. London.
- Puigdefàbregas, J. & Creus, J. 1976. Climatologia històrica y dendrocronologia del *Pinus uncinata* Ram. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 2:16-30.
- Serre, F. 1982. Analyse dendroclimatologique comparée de quatre espèces de pins et du chêne pubescent dans la région de la Gardiole pres Rians. *Ecologia Mediterranea* 8:167-183.
- Smith, W. H. 1981. *Air Pollution and Forests*. Springer-Verlag. New York.
- Tessier, L. 1982. Analyse dendroclimatologique comparée de six populations de *Pinus sylvestris* dans la Drôme. *Ecologia Mediterranea* 8:185-202.

Manuscrit rebut el desembre de 1986.