

Sofre i metalls pesants en fulles de *Platanus × hybrida* com a indicadors de la contaminació atmosfèrica a Barcelona

Margarida Parés*

Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals. Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra (Barcelona).

Key words: air pollution, heavy metals, industry, *Platanus × hybrida*, sulphur, traffic, zoning.

Abstract. Sulphur and heavy metal content in *Platanus × hybrida* leaves as indicators of air pollution in Barcelona. Results are presented from the measurement of the content of sulphur and of five heavy metals found in *Platanus × hybrida* leaf samples gathered from 37 stations throughout the city of Barcelona in 1986. The means found for the elements are ($\text{mg kg}^{-1} \text{dw}$): S, 5366; Fe, 216; Zn, 51; Pb, 27; Cu, 21; Cd, 0.15. The relationship is analyzed between these variables and the urban traffic variable as an indicator of the emission of pollutants. This analysis is done based on the construction of simple linear regression models. In the case of lead, an exponential function is proposed. Subsequently, the data obtained is synthesized in two factors (traffic and industry) by means of factor analysis of the correlations. It has been concluded that the behaviour of the samples from the various stations with respect to these factors, is consistent with the type of emission of pollutants predominating in the respective areas. Finally, by means of cluster analysis, the degree of similarity between the stations is quantified, and the stations are broken down into groups according to similar behaviour of samples.

Resum. Es presenten els resultats de les mesures dels continguts de sofre i cinc metalls pesants, en mostres foliars de *Platanus × hybrida* recollides el 1986 a 37 estacions de mostreig de la ciutat de Barcelona. Les mitjanes trobades pels elements són, en mg kg^{-1} , pes sec: S, 5366; Fe, 216; Zn, 51; Pb, 27; Cu, 21; Cd, 0.15. S'analitza la relació entre aquestes variables i el trànsit urbà com a indicador d'emissió de contaminants mitjançant regressions lineals simples, i es proposa una funció logarítmica per al cas del plom. A continuació, la informació disponible és sintetitzada en dos factors (trànsit i indústria), mitjançant una anàlisi factorial de correlacions. Es conclou que el comportament de les estacions de mostreig respecte als esmentats factors és coherent amb el tipus d'emissió de contaminants que predomina en cada zona. Finalment, una anàlisi de grups (cluster), quantifica el grau de similitud entre les estacions i les agrupa en conjunts de comportament semblant.

Introducció

La utilització dels vegetals com a bioindicadors de contaminació atmosfèrica es basa en el fet conegut que aquests són integradors en el temps dels contami-

* Adreça actual: Àrea de Salut Pública. Ajuntament de Barcelona. Plaça Lesseps, 1. 08023 Barcelona.

nants de l'aire i, per tant, que les anàlisis mostren l'ambient al qual han estat sotmesos en una època recent (uns mesos en el cas dels caducifolis), i no solament el del moment. Aquest és, per tant, un tipus de recerca complementària del control rutinari de la contaminació de l'aire mitjançant les xarxes de mesura, l'interès del qual és el coneixement de l'evolució diària dels nivells d'immissió.

A aquesta característica pròpia dels bioindicadors de pol·lució de l'aire, s'hi ha d'afegir el fet que permeten una descripció cartogràfica ràpida de la situació a un cost relativament baix, ja que no és necessària una xarxa instal·lada de presa de mostres. D'altra banda el nombre d'estacions de mostreig es pot elevar per damunt del nombre d'estacions de mesura d'immissió, la qual cosa permet disposar d'un coneixement més detallat de la distribució de la contaminació a la ciutat.

L'objectiu d'aquest treball és l'estudi de la relació entre els valors observats d'alguns bioindicadors de pol·lució atmosfèrica i l'emissió, mitjançant l'anàlisi de mostres vegetals i la cartografia dels valors obtinguts. L'espècie vegetal seleccionada ha estat *Platanus × hybrida*, particularment ben representada a la nostra ciutat.

Els indicadors escollits són les concentracions foliars de cinc metalls pesants (plom, cadmi, coure, zinc i ferro) i de sofre. Aquests contaminants interessen per la seva toxicitat, que causa efectes adversos en la salut humana i en els éssers vius en general. En el cas de la ciutat de Barcelona, l'interès del coneixement dels metalls pesants prové, a més, del fet que el 1986 no existien encara dades dels nivells d'immissió en l'aire, de la majoria d'aquests elements (actualment ja es mesura el plom i el cadmi en algunes estacions), i tampoc no es tenia una visió general de l'estat de la vegetació.

Un dels elements estudiats que té més interès és el plom, ja que les dades resultants esdevindran, en un futur relativament immediat, històriques, i un punt de referència per a la comprovació de la millora ambiental que s'ha de produir per a l'aplicació del Reial Decret vigent a Espanya, pel qual es rëbaixa de 0.6 g L^{-1} a 0.4 g L^{-1} el contingut de plom a les gasolines, tenint en compte que aquest darrer és el màxim permès per la CEE. D'altra banda, el Consell de Ministres va aprovar en data 10 de desembre de 1988 el nou contingut màxim acceptat, que passa de 0.4 g L^{-1} a 0.15 g L^{-1} , regulació que entrarà en vigor l'1 de juny de 1991. Pel que fa a les característiques dels contaminants estudiats, el sofre es troba a l'atmosfera urbana, sobretot en forma de SO_2 . En canvi, els metalls pesants es troben majoritàriament en forma sòlida, particulada, i formen part dels anomenats aerosols. Una part d'aquestes partícules tenen mides compreses entre 0.1 i $1 \mu\text{m}$ i romanen suspeses en l'atmosfera durant períodes llargs. Aquells aerosols formats per partícules majors a $1 \mu\text{m}$ estan subjectes a una significativa deposició gravitacional i reben el nom de sedimentables, ja que romanen en suspensió en l'aire durant períodes de temps relativament curts. El SO_2 prové sobretot de processos industrials i, a l'hivern, de la utilització de combustibles en calefacció. L'aportació dels vehicles és

menor, encara que aquells que utilitzen gas-oil en produeixen força més que els que utilitzen gasolina.

Pel que fa als metalls pesants, aquests es generen de formes diverses. La causa més important de la presència del plom a l'atmosfera és, sens dubte, la combustió de gasolines en vehicles, ja que aquest forma part de l'additiu anti-detonant emprat a l'Estat espanyol. La producció de plom augmenta amb la velocitat i és més important en gasolines de major octanatge. El gas-oil no en conté. Altres fonts de Pb són els processos emprats en algunes indústries i els productes que en resulten, com és el cas de bateries de cotxes, pintures anticorrosives (mini) i colorants, productes que aporten una part no gens menyspreable del Pb present a l'aire urbà.

El cadmi té orígens industrials molt diversos, però és produït també en certa mesura pel trànsit, ja que es troba als pneumàtics, radiadors, bateries, conduccions, etc. Una cosa semblant passa amb el coure i amb el zinc. El primer és àmpliament utilitzat en la indústria (acers, conduccions elèctriques, etc.) però també és originat pel trànsit en formar part dels frens i de les conduccions elèctriques. El zinc, en canvi, es genera en els processos de fabricació, de recuperació i d'ús de pneumàtics, de pastilles de fre i de galvanitzats. Finalment, el ferro és un metall àmpliament utilitzat i és per això que se'l considera ubiqüitari.

Cal, a més, considerar altres focus generadors de tot tipus de metalls, com per exemple les indústries de ferralla i fundició i els incineradors d'escombraries; a Barcelona aquests focus es troben a Sant Andreu, la Verneda i el Poblenou. D'altra banda, els cotxes són productors de metalls molt diversos ja que aquests formen la seva carrosseria, són additius dels olis lubricants, etc. Els cotxes de gas-oil produeixen més partícules que els de gasolina (en igualtat de condicions de 30 a 100 vegades més). El fet que tot els metalls puguin ser produïts tant pel trànsit com per la indústria no informa del tipus d'origen predominant per a cada metall a la ciutat de Barcelona; aquest factor depèn sobretot dels tipus d'activitats industrials que es donin i de la seva importància.

Les zones amb trànsit dens tenen una gran quantitat de partícules en l'aire, malgrat que part d'aquestes no hagin estat directament generades pels vehicles, sinó importades. Això és a causa de la capacitat dels vehicles d'eleva les partícules dipositades a les superfícies veïnes, i de retornar-les a l'atmosfera.

Mètodes

Mostreig

El treball de camp es va realitzar en dues etapes. La primera recollida de fulles de plàtan d'ombra es va fer a final de juliol de 1986 (dies 26 al 31), i la segona a principi de novembre del mateix any (dies 6 al 8). El pla de mostreig pretenia obtenir informació sobre fulles de plàtans d'ombra, veïns d'estacions de mesura de contaminació de l'aire, de l'Ajuntament de Barcelona, i sobre l'estat de

les fulles de plàtan de tota l'àrea geogràfica ocupada per la ciutat, mirant d'asolir la cobertura d'un màxim de zones diferents (indústria, urbanització, zones verdes, etc.) i d'àrees amb volums de trànsit ben diversos.

Les mostres de fulles de plàtans d'ombra es van prendre escollint un arbre per estació i a una alçada aproximada de 4 m. Aquest criteri va ser seguit amb les limitacions evidents que el port de cada arbre comporta. Les fulles recollides estaven completament desenvolupades. Es van prendre fulles d'un total de 37 estacions de mostreig, la localització de les quals es mostra a la Figura 1 i a la Taula 1, juntament amb els volums de trànsit als quals estan sotmeses.

Anàlisis químiques

Les mostres s'assecaren a l'estufa a 80 °C, es trituraren i s'incineraren a la mufia, a 400 °C. Les cendres obtingudes per aquest tractament es van digerir amb àcid nítric 1 N; a continuació es van filtrar i diluir fins a 25 mL. Així la mostra quedà preparada per llegir-ne les concentracions mitjançant tècniques espectrofotomètriques, i es va utilitzar la tècnica del plasma d'inducció per a Pb i Cd i l'absorció atòmica per a Cu, Zn i Fe.

Pel que fa a les limitacions de les tècniques emprades, cal assenyalar que el

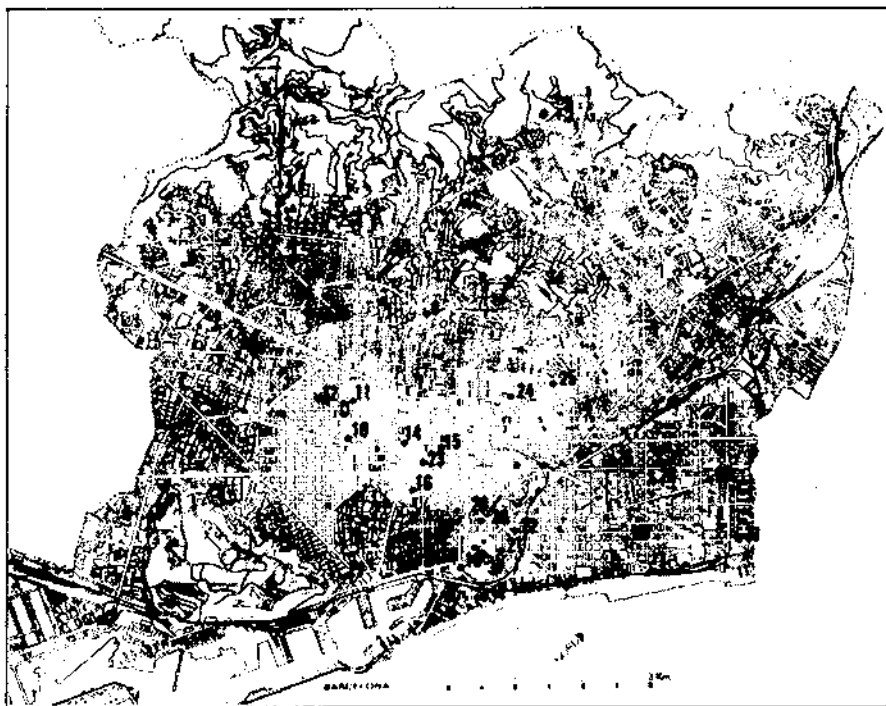


Figura 1. Situació de les estacions de mostreig a la ciutat de Barcelona.

Taula 1. Estacions: localització i volums de trànsit.

Núm.	Localització		Volums de trànsit ^a
1	c/Josep Canaleta	(Sant Gervasi)	2000
2	Plaça Artós	(Sarrià)	9800
3	c/Jordi Girona	(Pedralbes)	12100
4	c/Àngel Guimerà	(Les Tres Torres)	2000
5	Plaça Comas	(Les Corts)	2500
6	Plaça Comas	(Les Corts)	2000
7	Via Augusta	(Sarrià)	23000
8	Plaça Lesseps	(Gràcia)	43000
9	Ctra. de Sants	(Sants)	32000
10	Avda. Roma	(Eixample)	100000
11	Plaça Dr Ferrer Cajigal	(Eixample)	30000
12	c/ Urgell (Esc. Ind.)	(Eixample)	5000
13	c/ Balmes	(La Bonanova)	23000
14	c/ Aragó	(Eixample)	116000
15	c/ Bruc	(Eixample)	97000
16	Plaça Catalunya	(Eixample)	93000
17	c/ Vila i Vilà	(El Poble Sec)	5000
18	Pia del Palau	(Ciutat Vella)	50000
19	Pg. Circumval·lació	(Ciutat Vella)	39000
20	Pg. Lluís Companys	(Ciutat Vella)	13700
21	c/ Francesc Aranda	(Fort Pius)	2500
22	Pg. Carles I	(Fort Pius)	15000
23	c/ Pau Claris	(Eixample)	48000
24	c/ Marina	(Sagrada Família)	31000
25	c/ Sant A. M. Claret	(Guinardó)	47500
26	Plaça Valentí Almirall	(El Clot)	2000
27	c/ Andrade	(La Verneda)	2000
28	c/ Fluvià	(El Poblenou)	3000
29	Plaça Dr J. Trueta	(El Poblenou)	13500
30	c/ Maresme	(Barri del Besòs)	5000
31	c/ Llull	(Barri del Besòs)	6000
32	Plaça Orfila	(Sant Andreu)	23500
33	Plaça Orfila	(Sant Andreu)	23500
34	Plaça Font de la Mulassa	(Horta)	2000
35	c/ Modolell	(Sant Gervasi)	10000
36	Pg. Lluís Companys	(Ciutat Vella)	13700
37	Parc de la Ciutadella	(Ciutat Vella)	2000

^a Vehícles dia⁻¹ a les estacions de mostreig, 1986. S'ha assignat el valor de 2000 a les estacions amb valors inferiors a 2000 vehícles dia⁻¹. Elaborat segons dades de l'Àrea de Transports i Circulació de l'Ajuntament de Barcelona.

cadmi és un metall molt volàtil i que aquest fet, juntament amb les baixes concentracions presents a les fulles, en dificulta la interpretació.

Pel que fa a l'anàlisi del sofre, un cop les fulles assecades i triturades, es va procedir a la incineració de la mostra amb microcàmara de combustió d'oxi-

gen emprant una solució d' H_2O_2 com a captadora per fer passar tot el sofre a la forma de SO_2 . El contingut total de sofre s'analitzà per turbidimetria amb clorur de bari.

Com que no s'ha aplicat a les fulles cap procés de rentat, les mesures de metalls i sofre fan referència als contaminants dipositats damunt la superfície foliar i als elements que es troben als teixits interns.

Anàlisi estadística

Per a la consecució dels objectius ja esmentats s'han utilitzat la regressió lineal simple i l'anàlisi multivariant, en concret l'anàlisi factorial de correlacions i l'anàlisi de grups (cluster).

Les variables amb què s'ha treballat en la regressió són els nivells de plom, cadmi, ferro, coure, zinc i sofre (en mg kg^{-1} pes sec) en les mostres foliars, com a variables dependents, i la variable trànsit com a explicativa (mitjana diària de vehicles en una estació, el 1986). Per calcular el volum de trànsit al qual ha estat sotmesa una estació de presa de mostres vegetals, s'ha tingut en compte el fet que les partícules metàl·liques produïdes o aixecades pels cotxes afecten sobretot una franja de 40 m, comptats des del focus. Per tant, en casos justificats s'ha afegit al volum de trànsit de la via de l'estació d'estudi, el volum de trànsit de la via propera.

S'han assajat altres variables explicatives, com ara els nivells d'immissió de fums i SO_2 a les estacions municipals de mesura de contaminació de l'aire, però els resultats són més limitats, en part probablement a causa que el nombre d'observacions disponibles per al tractament estadístic es redueix considerablement (de 72 a 21).

No ha estat possible utilitzar dades d'immissió de metalls pesants en l'aire urbà, ja que el 1986 només es mesurava el Pb en dues estacions de la ciutat. Com que els metalls són un dels components dels fums, els nivells d'immissió d'aquests haurien de ser una bona variable explicativa dels metalls pesants en mostres foliars, però existeix la limitació citada. El trànsit s'ha imposat, per la seva condició de productor d'una part molt important dels fums de la ciutat, com la variable indicadora de metalls més adequada.

En la construcció de les regressions s'ha treballat amb un màxim de 72 observacions, i s'han tractat conjuntament les dades de juliol i les de novembre corresponents a les 36 estacions de mostreig de les quals es disposa de dades. A més de les regressions que relacionen cada metall i el sofre amb la variable trànsit s'han construït models de regressió entre metalls, per tal d'analitzar-ne les correlacions per parelles.

Pel que fa a l'anàlisi factorial i a l'anàlisi de grups (cluster), aquestes s'han realitzat amb quatre variables de metalls pesants, excloent el Cd de l'anàlisi un cop conegut el seu valor de comunalitat, la qual cosa manifesta que una bona part de la informació queda als residus. Es presenten dues anàlisis factorials, una que inclou totes les dades i una altra que inclou exclusivament les del

mes de novembre, ja que en aquesta milloren els resultats. Per tal que els factors resultin més ben representats s'ha realitzat una rotació de tipus Varimax.

Les puntuacions resultants de l'anàlisi factorial són utilitzades per fer l'anàlisi de grups, realitzada per un procediment de tipus jeràrquic acumulatiu, amb distància euclidiana i pel mètode d'anàlisi de similituds entre els grups (*average linkage between groups*).

Resultats i discussió

Descriptors de les variables

Segons els descriptors resultants de les dades obtingudes (Taula 2), els diferents metalls tenen abundàncies relatives molt diferents. Atenent les mitjanes, resulten de més a menys pes: Fe, Zn, Pb, Cu i Cd. Les concentracions dels elements oscil·len entre marges força amplis: per coure i cadmi la relació és d'1 a 38 i d'1 a 37, respectivament. Pel plom és de 1 a 22, d'1 a 12 pel Zn i d'1 a 11 pel Fe. En el cas del S és de 1 a 7.

Els nivells trobats per altres autors d'elements estudiats en vegetals contextualitzen els resultats de Barcelona. Concretament pel que fa al S es registraren valors entre 7850 i 920 mg kg⁻¹ pes sec, en fulles de *Pinus sylvestris*, segons la distància a la central tèrmica de Cercs (Ferrés 1986). El Fe i el Zn han estat mesurats en *Quercus ilex* al Montseny; els valors de Fe oscil·len (segons edats foliars) entre 118 i 223 mg kg⁻¹, pes sec, i els de Zn, entre 22 i 49 mg kg⁻¹, pes sec (Caritat 1986). D'altra banda, a la ciutat de Brussel·les (Denaeyer *et al.* 1978) es trobaren valors de 77 mg kg⁻¹, pes sec, per a Pb i de 20 mg kg⁻¹, pes sec, per a Cu, en *Quercus robur*. Finalment, per Cd es van observar valors compresos entre 0.04 i 0.30 mg kg⁻¹, pes sec, en gramínies dels voltants de les autopistes de Madrid (Rodríguez & Mariño 1980).

Taula 2. Concentracions d'elements en fulles de plàtan d'ombra^a. En mg kg⁻¹ (pes sec).

Variable	Valor màxim	Valor mínim	Mitjana	Desviació típica	N. d'observacions
Pb	101.60	4.60	27.30-27.50	19.20-19.40	70-72
Cd	0.75	0.02 ^c	0.15	0.14	70-72
Cu	103.00	2.70	20.50-20.70	18.90-19.00	69-70
Zn	137.50	11.50	50.80-51.10	24.70-24.80	70-71
Fe	406.25	35.50	214.10-215.80	78.40-78.90	69-71
S	10635.00	1578	5366.00	2230.00	71
trànsit ^b	116000	2000	25744-26141	30886-31237	70-72

^a Els valors de les mitjanes i de les desviacions típiques es donen amb intervals, ja que s'han calculat segons el nombre d'observacions de cada cas.

^b Vehicles dia⁻¹.

^c S'ha assignat el valor 0.02 a totes aquelles estacions amb valors <0.05.

Taula 3. Regressions entre les concentracions de metalls pesants en fulles de plàtan a Barcelona (y , en mg kg^{-1}) i la intensitat de trànsit (x , en vehicles dia^{-1}). El model és $y=a+bx$.

Element	n	a	S_a	b	S_b	r^2	$S_{y,x}$	P^a
Pb	72	15.3	2.0	4.6×10^{-4}	$4.9 \cdot 10^{-5}$	0.56	12.8	0.000
$\log P_{pb}^b$	72	-0.069	0.1	0.3489	3.5×10^{-2}	0.58	0.2	0.000
Cd	72	0.14	0.0	3.94×10^{-7}	5.2×10^{-7}	0.01	0.1	0.46
Cu	70	20.4	3.0	4.63×10^{-6}	7.3×10^{-5}	0.00	19.0	0.95
Zn	71	43.9	3.6	2.73×10^{-4}	9.0×10^{-5}	0.12	23.3	0.003
Fe	71	181	10.6	1.3×10^{-3}	$2.6 \cdot 10^{-4}$	0.25	68.2	0.000
S	71	5005	342	0.014	8.5×10^{-3}	0.04	2204	0.11

^a Probabilitat del test F.

^b En aquesta regressió, la variable independent és el logaritme de la intensitat de trànsit.

Taula 4. Estadística dels models de regressió amb les variables metalls pesants com a dependents.

Model	r^2	N. obs.	Model	r^2	N. obs.
Zn/Fe	0.22	70	Fe/Pb	0.47	71
Cu/Zn	0.49	70	Zn/Pb	0.33	71
Cd/Fe	0.11	71	Cd/Pb	0.04	72
Cd/Zn	0.23	71	Cu/Pb	0.04	70
Cd/Cu	0.10	70	Cu/Fe	0.00	69

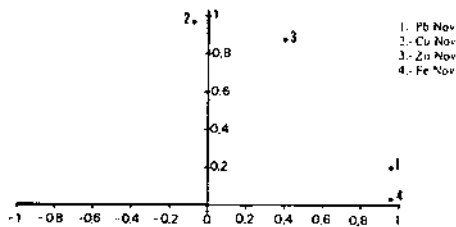
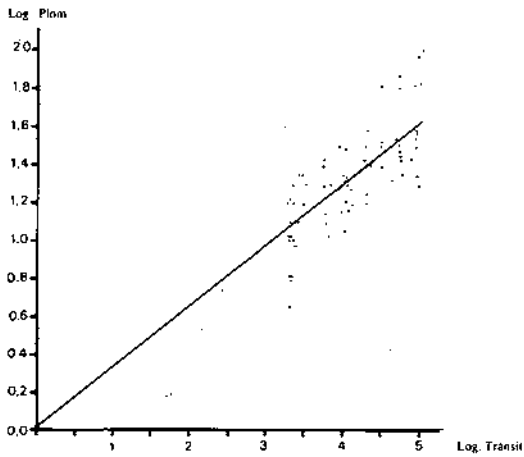
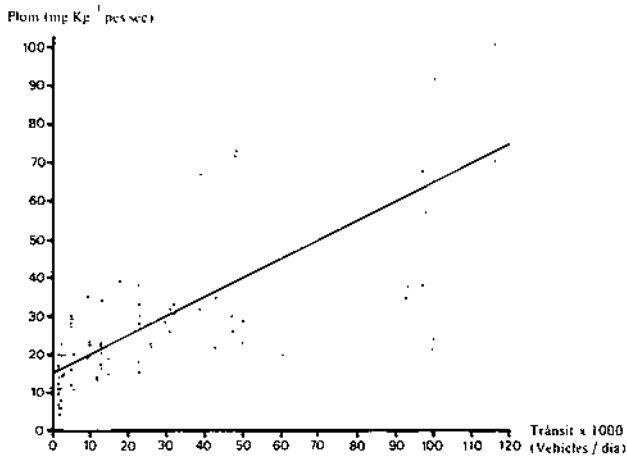
Models de regressió

A la Taula 3 es presenten els resultats dels models de regressió estudiats, prenent com a variable explicativa el trànsit, i a la Taula 4, els resultats dels models en què les variables predictores són els mateixos metalls. La pretensió de l'anàlisi realitzada fou comprovar l'existència d'una correlació positiva entre trànsit i metalls i sofre, i descriure la força d'aquesta associació, com també la forma. De moment es farà referència conjunta als dos models referits al Pb i després s'anitzaran separatament.

Una primera dada a observar, a la Taula 3, és la concordança entre els signes esperats dels coeficients de regressió i els obtinguts. Pel fet de ser tots ells positius, confirmen la hipòtesi que, com més trànsit, més metalls a l'atmosfera per a tots els casos.

Pel que fa als coeficients de correlació r^2 , aquests posen de manifest que, per al plom, un 56-58% del total de la variabilitat és explicada per la variable predictora. El cadmi, el coure i el sofre queden escassament explicats per la variable trànsit, i Zn i Fe queden en un estadi intermedi.

Els coeficients de regressió són significativament diferents de zero en els



Figures 2-4. 2) Núvol de punts i recta de regressió entre plom i trànsit. 3) Núvol de punts i recta de regressió entre log-plom i log-trànsit. 4) Situació dels metalls pesants respecte als factors (factor 1. abscissa; factor 2, ordenada).

casos de les regressions de Pb, Fe i Zn. La dependència lineal del S respecte al trànsit queda per sota de la significació (89%) i més encara les de Cd i Cu. Per tant, es pot afirmar que la variable trànsit no explica les variacions de Cu i Cd en la seva distribució per les estacions de la ciutat i explica molt poc les de S. Sobretot en els casos de S, Cd i Cu, però també en els de Fe i Zn, faltarien altres variables de tipus predictor als models respectius. Aquest resultat és plenament coherent amb el fet que només una petita part del total de SO₂ llançat a l'atmosfera de la ciutat prové dels cotxes i també amb el fet que el Cd i el Cu no són metalls àmpliament produïts pels vehicles.

En resum, doncs, per al plom, d'una forma molt clara, i per al ferro i zinc, es pot afirmar que variacions del trànsit porten associades variacions significatives dels metalls pesants en mostres foliars. Per tant, el Pb passa a ser, de tots els estudiats, el metall més clarament indicador de trànsit a Barcelona, mentre que en els altres metalls, altres fonts d'emissió tindran pesos específics importants.

La relació altament significativa observada entre plom i trànsit condueix a una validació necessària del model de regressió per poder afirmar veritablement que aquest és correcte. El procés de validació efectuat inclou l'anàlisi gràfica dels residus i l'anàlisi dels valors atípics, i posa de manifest que malgrat un r² acceptable i una F altament significativa, ens trobem en una situació d'existència de valors atípics, de no normalitat dels errors i d'heteroscedasticitat. Aquesta anàlisi, juntament amb la distribució del núvol de punts en la gràfica de regressió (Fig. 2), suggereix que una transformació de tipus logarítmic podria corregir les deficiències detectades en el model.

A la Figura 3 es presenta una funció potencial transformada en una recta de tipus logarítmic que explica el tipus de relació Pb/trànsit. És evident, a la Taula 3, que els estadístics r² i F milloren en aquest model, però bàsicament el que s'ha aconseguit és una distribució dels residus més propera a la normal, eliminar els valors atípics i que la dispersió dels errors es redueixi de forma important. El model s'apropa, per tant, a l'acompliment de les condicions del terme d'error de la regressió.

Des del moment que el Pb, el Fe i el Zn són variables que en més o menys grau queden explicades per la variable trànsit, és interessant la realització de l'anàlisi de les correlacions entre metalls que es presenta a la Taula 4. Els coe-

Taula 5. Estadística de l'anàlisi factorial de correlacions entre les variables Pb, Cu, Zn i Fe. Dades de juliol i novembre.

Variable	Comunalitat	Factor	Valor propi	% Var
Pb	0.8290	1	2.389	59.7
Cu	0.9398	2	1.138	28.4
Zn	0.8979			
Fe	0.8601			

Taula 6. Estadística de l'anàlisi factorial de correlacions entre les variables Pb, Cu, Zn i Fe. Dades de novembre.

Variable	Comunalitat	Factor	Valor propi	% Var
Pb	0.9185	1	2.400	60.0
Cu	0.9688	2	1.362	34.1
Zn	0.9661			
Fe	0.9092			

ficients de correlació r^2 informen, en aquestes regressions, d'una associació important entre les variacions de Zn i Cu i les de Pb i Fe i d'unes associacions molt minses, sense dependència lineal significativa, entre Cu i Fe, Cu i Pb, i Cd i Pb. Aquesta variació o no variació conjunta apunta de nou cap a una dependència important del Pb i del Fe respecte al trànsit i cap a una independència del Cu i del Cd respecte a aquest factor. Això no va acompanyat d'una r^2 important entre Cd i Cu, però aquesta relació és significativa al 99%, és a dir que existeix una dependència lineal d'una certa força entre l'un i l'altre. El Zn torna a tenir un paper intermedi i s'associa fortament amb el Cu però també amb el Pb (99% de significació en ambdós casos); també són significatives totes les relacions analitzades en les quals intervé.

Anàlisi factorial de correlacions

En la realització de l'anàlisi factorial s'han assajat les possibilitats d'utilitzar totes les dades (juliol i novembre), i només les d'una època. Això significa passar de 69 casos a 34 casos. Es presenten els resultats d'ambdues proves (Taulas 5 i 6), resultats que evidencien que la proporció d'informació continguda als residus (comunalitats) és major al novembre que al juliol+novembre.

De les dues anàlisis realitzades se n'extreuen dos factors, amb valors propis majors a la unitat, i un 94.1% de la variança total acumulada pel novembre i un 88.2% pel juliol+novembre per aquests dos factors. Apareixerien, per tant, dos eixos (Fig. 4); al voltant d'un d'ells se situen les variables de plom i ferro i al voltant de l'altre, les de coure i zinc; és aquest el que d'una forma més clara se situa en una posició intermèdia. Aquests resultats, d'altra banda, són coherents amb els de l'anàlisi de la regressió ja descrita. Una anàlisi de les coordenades dels factors (o pesos dels factors) fa evident que per al plom i per al ferro pesa molt més el factor 1, i que per al coure i per al zinc pesa més el factor 2. Al primer dels factors se li assigna el significat de trànsit i al segon, el d'indústria. La situació de les puntuacions de cada estació al voltant dels dos eixos dona credibilitat a aquesta hipòtesi. En la Figura 5 es pot apreciar aquesta ordenació pel mes de novembre, ordenació que posa en relleu dos fets:

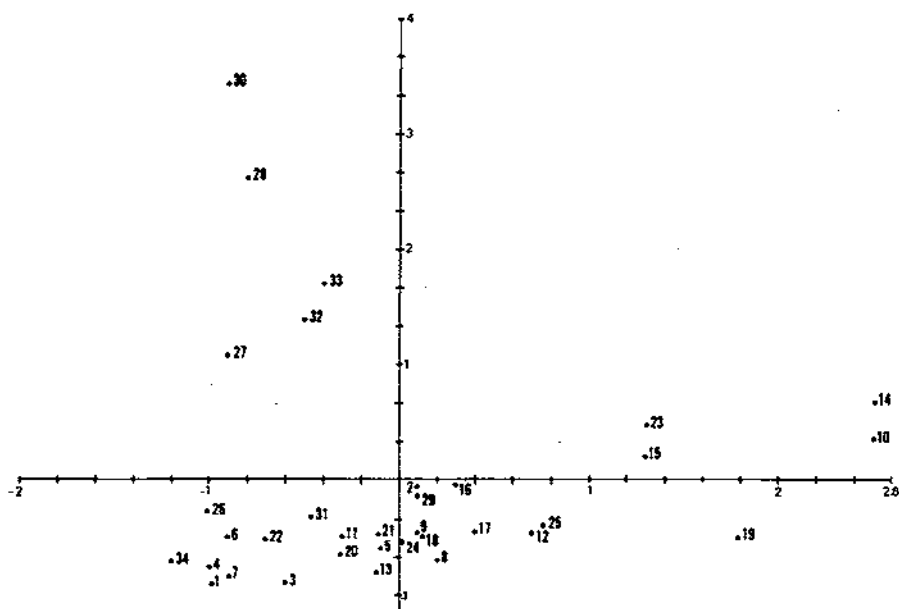


Figura 5. Situació de les puntuacions de les estacions de mostreig respecte als factors (factor 1, abscissa; factor 2, ordenada).

a) No hi ha estacions que tinguin, alhora, valors alts respecte al factor trànsit i respecte al factor indústria. En el cas dels valors alts respecte a indústria tots se situen negativament respecte al trànsit, i no és així en el cas contrari. És a dir, allí on hi ha trànsit, en alguna mesura hi són presents tots els metalls pesants; en canvi, allí on hi ha indústria, no. Hi ha correspondència entre aquesta informació i les activitats predominants de cada zona de la ciutat. Les estacions que responen respecte a indústria responen immediatament de forma alta (>1). En canvi, en el cas del trànsit es donen totes les gradacions.

b) Hi ha, d'altra banda, la resta d'estacions, i totes responen negativament al factor indústria, una part respon també negativament al factor trànsit i l'altra, positivament. Les cinc estacions que presenten els valors més negatius per als dos factors es troben en zones de la ciutat allunyades de focus emissors importants (sector oest o nord-oest).

L'ordenació de les puntuacions d'indústria d'una banda, i de trànsit de l'altra, en un plànol de la ciutat, posa encara de manifest alguns aspectes interessants. Pel que fa a indicadors d'indústria, hi ha una zona NE de la ciutat amb valors positius elevats, una petita zona del centre de la ciutat (allí on se situen les estacions de trànsit més intenses) amb uns valors encara positius, i la resta de la ciutat amb valors negatius. No és estrany trobar valors positius al centre de la ciutat, ja que si bé s'ha assignat el significat indústria al factor 2, això no vol

dir que el trànsit estigui exempt d'un cert nivell de producció dels metalls més relacionats amb l'activitat industrial. A la zona oest de la ciutat es troben els valors més negatius.

Pel que fa al factor trànsit, els valors més negatius es donen a la zona oest de la ciutat, seguida molt de prop pels de la zona est (justament la zona industrial). Existeix, a més, un anell al voltant del nucli central amb valors intermedis (negatius i positius) i, finalment, una zona central molt afectada pel trànsit amb valors positius alts per a aquest factor, valors que, val a dir-ho, són menors que els màxims d'indústria.

Globalment, doncs, tenim:

- a) Una zona oest i nord-oest de la ciutat amb valors negatius de puntuacions per als dos factors.
- b) Una zona central molt afectada pel trànsit.
- c) Una zona est i nord-est molt afectada per la indústria.
- d) Un anell perifèric respecte a la zona central poc afectat per la indústria i moderadament afectat pel trànsit.

Anàlisi de grups (cluster)

Es presenta l'anàlisi de grups de novembre, d'interpretació més immediata que la de juliol + novembre, elaborada a partir de la informació sintetitzada de les variables, o sigui a partir de les puntuacions que simbolitzen trànsit i indústria. En aquest tipus d'anàlisi de grups es poden trobar estacions que geogràficament estiguin distants entre si i en canvi estiguin al mateix grup.

En l'etapa núm. 29 del procés aglomeratiu es dona una situació en la qual hi ha sis grups força aclaridors de la zonificació de Barcelona ciutat (Fig. 6). Les estacions que l'anàlisi factorial ha situat a prop del voltant dels eixos, aquí formen part del mateix grup. Dos d'aquests grups inclouen les estacions més afectades pel trànsit intens; dos més, les afectades per la indústria, un altre, les que gaudeixen d'una atmosfera menys contaminada, i el darrer inclou les que estan en situacions intermèdies entre les esmentades. A continuació se citen les estacions que pertanyen a cadascun d'aquests quatre grans blocs:

- a) Trànsit intens: inclou les estacions núm. 10 i 14, d'un grup, i 15, 23 i 19, d'un altre.
- b) Indústria: inclou les estacions núm. 32 i 33, d'un grup, i 27, 28 i 30, d'un altre.
- c) Aire net: inclou les estacions 6, 22, 26, 1, 7, 4, 34 i 3. Les tres estacions afegides respecte a les citades en l'anàlisi factorial són de fet molt a prop en el gràfic de puntuacions (Fig. 5).
- d) Altres: inclou la resta de les estacions, de situacions intermèdies.

Conclusions

Les dades obtingudes en aquesta recerca confirmen la hipòtesi inicial de la utilitat de l'estudi dels nivells de metalls pesants en fulles de plàtan d'ombra com

a bioindicadors de l'estat ambiental de les diferents zones de la ciutat de Barcelona, i, molt especialment, de la utilitat de la variable trànsit com a predictor dels nivells de plom. S'ha arribat a unes primeres conclusions sobre la distribució dels valors de sofre i de metalls pesants i sobre la seva relació amb els focus emissors:

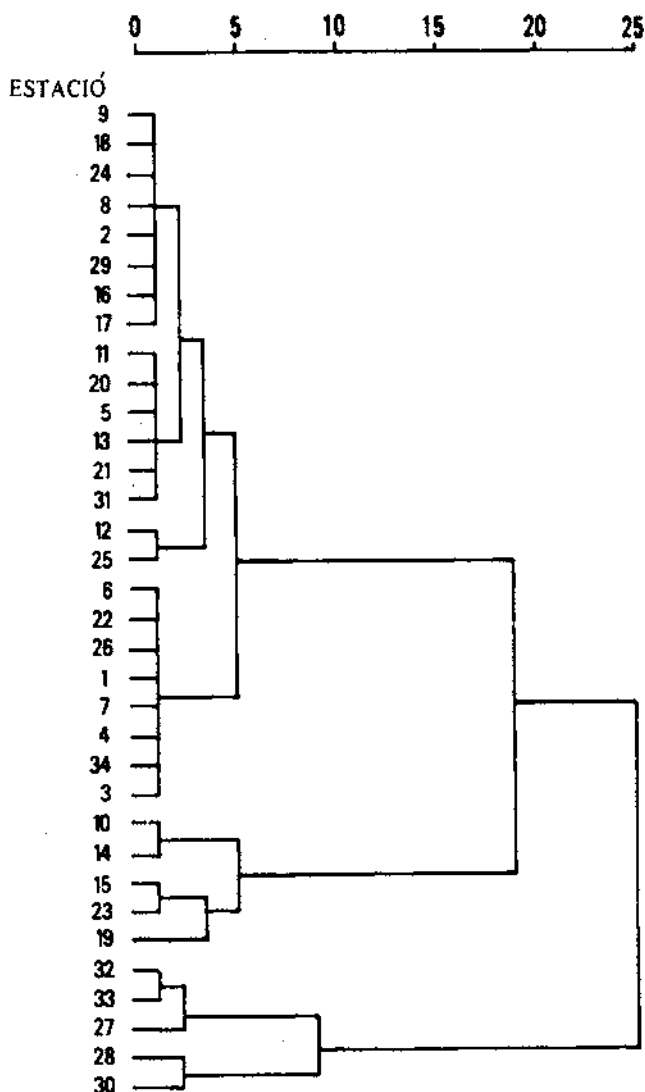


Figura 6. Dendrograma de similitud entre els comportaments de les estacions de mostreig respecte als factors trànsit i indústria.

1. En l'espècie estudiada (*Platanus × hybrida*), l'abundància en pes del sofre i dels metalls estudiats és, considerant les mitjanes i de més a menys pes. en mg kg^{-1} pes sec: sofre (5366), ferro (216), zinc (51), plom (27), coure (21) i cadmi (0.15). Tot i haver-hi una gran variabilitat entre els elements, aquestes dades deixen entreveure l'existència d'uns nivells no gens menyspreables d'aquests contaminants a la nostra ciutat.

2. Els valors totals de metalls pesants a les fulles de plàtans d'ombra no s'expliquen completament per la variable trànsit. Altres factors, com ara la presència de focus industrials a la ciutat, productors de partícules metàl·liques, les condicions locals de ventilació de les vies de trànsit i la pluviositat, han de ser valorats.

3. Es dona una correlació positiva entre la intensitat de trànsit i els nivells de plom a les fulles de plàtan d'ombra. Trànsit i plom es relacionen per una funció de tipus potencial amb el resultat que un 58% de la variabilitat del plom s'explica per la del trànsit, amb una dependència lineal altament significativa (99%). Així, el plom és el metall pesant que va més clarament associat al trànsit, conclusió lògica si es té en compte la presència d'aquest metall com a anti-detonant a les gasolines.

4. La informació continguda en les variables Pb, Cu, Zn i Fe se sintetitza mitjançant dos factors als quals s'assigna el significat trànsit i indústria. La situació geogràfica i l'activitat predominant de les estacions són coherents amb aquesta assignació. El Pb i el Fe pesen especialment en el factor trànsit i el Cu i el Zn en el d'indústria, i és el Zn el metall pesant en situació més clarament intermèdia. L'àmplia distribució del ferro per la ciutat, que coincideix amb la també àmplia distribució de la variable trànsit, fa pensar que és difícil discernir entre la producció de Fe pel trànsit i la producció de Fe per altres factors d'índole diversa.

5. El trànsit apareix com a productor de tot tipus de metalls, encara que el Pb i potser el Fe siguin els més importants. En canvi, la indústria apareix com a productora sobretot de Cu, Cd i Zn.

6. De l'anàlisi de grups, en resulta la formació d'un primer grup d'estacions molt afectades pel trànsit (lleuger o pesant), d'un segon grup d'estacions molt afectades per la indústria, d'un tercer grup amb nivells baixos de contaminants, i finalment, d'un quart grup d'estacions en situacions intermèdies. El resultat de l'anàlisi de les estacions que formen els grups es correspon amb les activitats que en la realitat predominen a cada estació.

Agraïments

Agraïm a J. Terradas la direcció de l'estudi, i a F. Rodà els suggeriments en el manuscrit; agraïm també la col·laboració de Ll. Ferrés, de M. Riba i de R. Pérez en l'elaboració del treball, com

també la cura en la realització de les anàlisi químiques a M. Abril, P. Comín i T. Corellano i de les figures a Ll. Duelo. També s'han de fer constar les facilitats per realitzar l'estudi i la informació que ens van proporcionar el Servei de Parcs i Jardins, el Servei d'Ordenació i Seguretat Vial de l'Àrea de Transports i Circulació, i el Servei de Vigilància Ambiental de l'Àrea de Salut Pública, tots ells de l'Ajuntament de Barcelona. La realització d'aquest estudi ha estat possible gràcies a un Ajut a la Recerca de la Caixa de Barcelona, convocatòria de l'any 1985.

Bibliografia

- Denaeyer, S., Kummer, J., & Rondia, D. 1978. La pollution atmosphérique dans l'écosystème urbain bruxellois. Echevinat de l'Environnement. Agglomération de Bruxelles. Bruxelles.
- Ferrés, L. 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.
- Rodríguez, J., & Mariño, M. 1980. Estudio de la contaminación de suelos y plantas por metales pesados en los entornos de las autopistas que confluyen en Madrid. III. Contaminación de plantas. Anales de Edafología y Agrobiología 12: 2117-2126.

Manuscrit rebut el març de 1989.