

# L'aerosol orgànic a Catalunya. Fonts d'emissió i toxicitat

## *Organic aerosol in Catalonia. Emission sources and toxicity*

Clara Jaén, Barend L. van Drooge i Joan O. Grimalt  
*Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA-CSIC)*

**Resum:** L'aerosol orgànic (AO) present a la matèria particulada atmosfèrica és un factor determinant dels efectes adversos que provoca la contaminació atmosfèrica. En aquest estudi, diversos compostos orgànics traçadors han permès establir les principals fonts d'emissió de l'AO a tres indrets de Catalunya amb diferents problemàtiques pel que fa a la qualitat de l'aire. A més a més, l'estudi de la toxicitat en cèl·lules de pulmó dels extractes de PM<sub>10</sub> (material particulat amb un diàmetre aerodinàmic inferior a 10 µm) d'aquests indrets indica una major afectació de les funcions cel·lulars en les mostres de les àrees semiurbana i rural que tenen una gran contribució de la crema de biomassa. D'altra banda, el mostreig vertical amb globus captius posa de manifest l'acumulació a prop de superfície d'aquests compostos en condicions d'inversió tèrmica, fet que augmenta el risc per a la salut de la població exposada.

**Paraules clau:** Material particulat, aerosol orgànic, traçadors moleculars, distribució vertical, toxicitat.

**Abstract:** *The organic aerosol (OA) present in atmospheric particulate matter is a determinant cause of the adverse effects produced by atmospheric pollution. In this study, several organic tracer compounds were analysed to evaluate the main emission sources of OA in three locations in Catalonia with different air quality problems. The toxicity study on lung cells of PM<sub>10</sub> (particulate matter with aerodynamic diameter less than 10 µm) extracts from those sites indicates a greater impact on cellular functions in samples from semi-urban and rural areas that have higher levels of biomass burning. Likewise, sampling with captive balloons reveals that these compounds accumulate near the surface under inversion conditions, increasing the health risks of the exposed population.*

**Keywords:** *Particulate matter, organic aerosol, molecular tracers, vertical distribution, toxicity.*

## Introducció

**L**a contaminació atmosfèrica és un dels majors riscos mediambientals per als ecosistemes i la salut humana, fins i tot quan s'hi està exposat en períodes de temps curts [1, 2]. El 2016, aproximadament 4,2 milions de morts prematures al planeta s'atribuïren a la contaminació atmosfèrica, i encara el 2019, el 99% de la població mundial respirava aire que no complia amb les directrius de qualitat de l'aire que estableix l'Organització Mundial de la Salut (OMS) [3]. Els esforços per millorar la qualitat de l'aire són cada cop més grans amb l'objectiu de reduir la incidència de malalties relacionades amb aquesta causa, com són els vessaments cerebrals, les malalties cardíaques, el càncer de pulmó i diverses malalties respiratòries cròniques i agudes [3]. Amb aquest objectiu, la Comissió Europea ha establert diverses directives que proporcionen el marc actual per al control de la contaminació atmosfèrica per a diversos contaminants entre els quals es tro-

ben el diòxid de nitrogen (NO<sub>2</sub>), l'ozó (O<sub>3</sub>), el material particulat amb un diàmetre aerodinàmic inferior a 10 µm (PM<sub>10</sub>) i el benzo[a]pirè. El material particulat (PM, *particulate matter*) és un dels contaminants que presenta més efectes adversos. Consisteix en una barreja de material orgànic i inorgànic en fase sòlida o líquida que es troba suspesa a l'aire procedent de fonts naturals i antropogèniques. En inhalar, les partícules que hi ha a l'aire entren al sistema respiratori i es poden dipositar als pulmons; a més, les partícules més petites poden arribar a introduir-se al corrent sanguini i produir efectes adversos més greus [4]. Cal conèixer quines són les fonts d'emissió d'aquests contaminants, els seus processos de transport atmosfèric, els mecanismes de transformació que experimenten i els efectes que produeixen sobre la salut humana i els ecosistemes per poder implementar mesures efectives i reduir-ne l'impacte.

### *Fonts i composició del material particulat*

L'aerosol orgànic pot representar una fracció molt variable del PM i pot ser determinant en els efectes nocius d'aquest component atmosfèric, a més dels metalls pesants o altres substàncies inorgàniques [5]. L'aerosol orgànic pot ser emès directament a l'atmosfera per fonts primàries (aerosol orgànic

primari, AOP) o formar-se per transformacions fotoquímiques a l'atmosfera (aerosol orgànic secundari, AOS). Les fonts primàries varien notablement segons l'entorn: a les zones urbanes dominen les emissions relacionades amb la combustió, la cuina domèstica, el transport rodat, les activitats industrials i la pols de les carreteres, mentre que a les zones rurals la crema de biomassa i les partícules del sòl tenen més rellevància. D'aquesta manera, alguns compostos orgànics que es troben a la matèria particulada es poden atribuir específicament a un d'aquests orígens i es poden fer servir com a traçadors per identificar la presència i la magnitud de les diferents fonts d'emissió i dels processos de formació secundària.

La formació de l'AOS té lloc en presència d'oxidants forts a l'atmosfera, com són  $O_3$ ,  $NO_x$  o els radicals hidroxil. Aquests reaccionen amb compostos orgànics volàtils i amb l'AOP i formen derivats oxigenats que poden presentar toxicitats més altes que els compostos originals. Malauradament, encara es desconeixen molts dels mecanismes que participen en aquestes reaccions. Cal conèixer molts més detalls dels processos de formació de l'AOS per poder plantejar les mesures adients per protegir la salut humana.

### Condicions atmosfèriques

La interacció entre els contaminants atmosfèrics i les condicions meteorològiques són un factor clau d'aquests processos. De fet, la gran majoria de les emergències sanitàries en zones habitades estan més relacionades amb canvis en la meteorologia que amb variacions en les emissions. Així doncs, les condicions meteorològiques són un factor clau que determina la generació d'episodis contaminants amb concentracions elevades, la seva evolució i la seva intensitat [6].

Una gran part dels episodis d'elevada contaminació atmosfèrica tenen lloc en condicions anticiclòniques d'estancament que sovint impliquen inversions de temperatura, inhibeixen els moviments verticals i donen lloc a capes de barreja molt baixes. En aquestes condicions, la dilució més baixa de contaminants i la incorporació de derivats fotoquímics dels contaminants primaris generen acumulacions de compostos de toxicitat més alta [7, 8].

En aquest sentit, les condicions d'inversió de temperatura són particularment rellevants a la península Ibèrica, on la radiació

solar forta produeix una gran varietat de transformacions fotoquímiques. A més, les condicions anticiclòniques que es donen sovint a la zona generen diversos episodis d'inversió durant l'any en què es poden arribar a superar els nivells de qualitat europeus establerts de  $O_3$  i  $PM_{10}$  [9]. Tot i això, les dinàmiques associades als episodis ambientals depenen fortament de les condicions de l'àrea implicada, i s'observen contrastos entre zones continentals i costaneres [10].

### Qualitat de l'aire a Catalunya

La qualitat de l'aire a Catalunya és monitorada per la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA) de la Generalitat de Catalunya en col·laboració amb l'Agència de Salut Pública de Barcelona. Degut a la complexa orografia del terreny i als diferents usos del sòl, Catalunya presenta problemàtiques molt diverses a les diferents àrees del territori. La figura 1 mostra les mitjanes anuals entre el 2011 i el 2020 de diferents contaminants a tres estacions ben diferenciades, amb diferents problemes pel que fa la qualitat de l'aire. També s'hi indiquen els valors objectiu anuals fixats per l'OMS i els valors límit i objectiu fixats per la Unió Europea (UE) per al  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  i benzo[a]pirè per protegir la salut pública [3, 11].

Barcelona (l'Eixample) és una estació classificada com a urbana de trànsit i sovint registra concentracions molt elevades de  $NO_2$ . Les mitjanes anuals queden molt per sobre tant del valor objectiu de l'OMS com del valor límit de la UE per a aquest contaminant, i també supera el valor objectiu de l'OMS pel que fa a material particulat. D'altra banda, Manlleu, classificada com a estació suburbana de fons, sovint registra les concentracions més elevades de benzo[a]pirè i  $PM_{10}$  de la península Ibèrica, així com pics molt elevats d'ozó els mesos més càlids de l'any. Per últim, Bellver de Cerdanya és una estació rural de fons situada als Pirineus, on també es troben nivells elevats d'ozó i on se supera el valor objectiu de l'OMS per al benzo[a]pirè.

L'única superació dels límits europeus pel que fa al  $NO_2$  es dona a Barcelona; tot i així, els valors marcats per l'OMS, que són més restrictius, indiquen que la qualitat de l'aire en aquests indrets pot suposar un risc per a la salut de la població exposada.

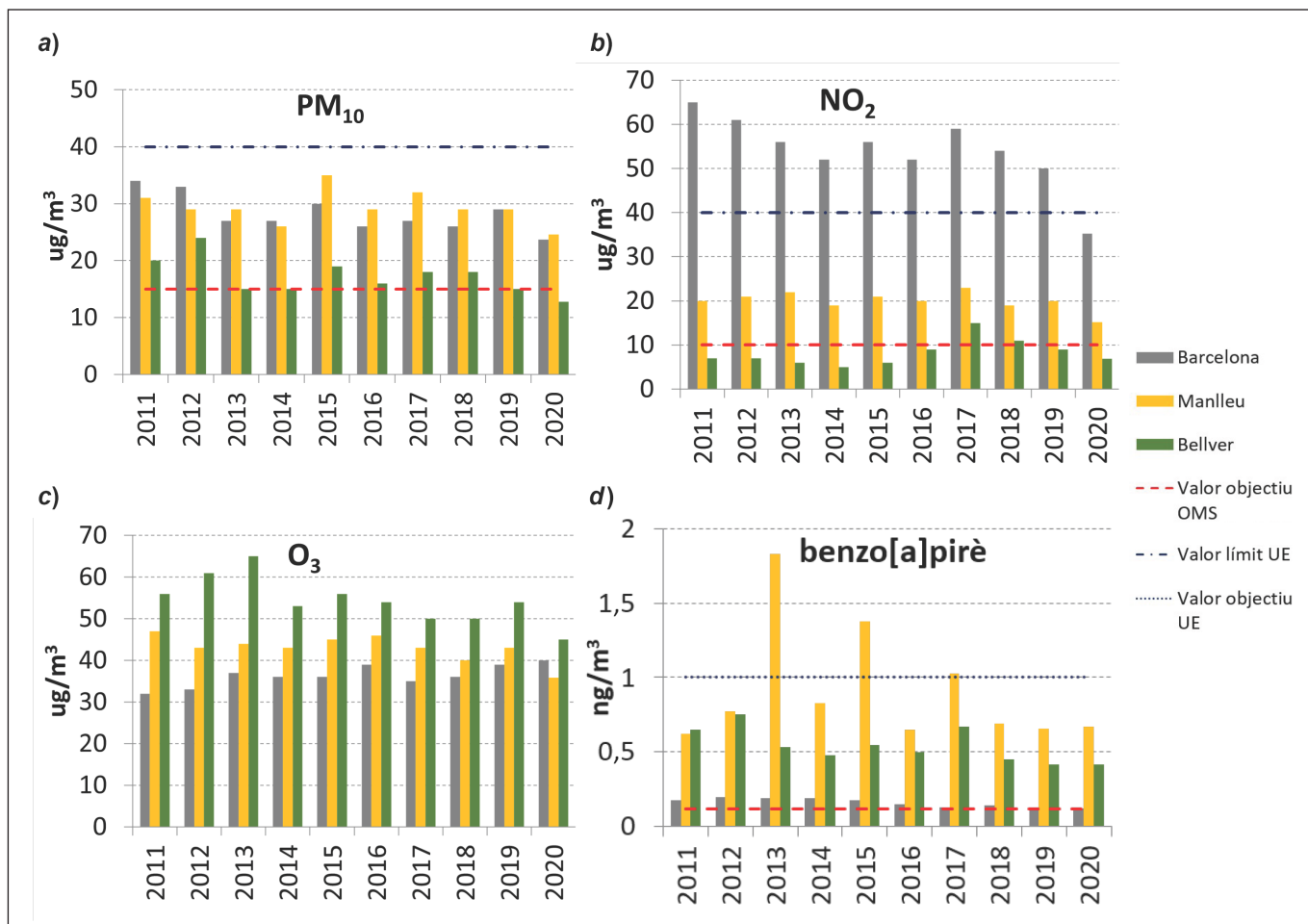


FIGURA 1. Mitjana anual de: a) PM<sub>10</sub>, b) NO<sub>2</sub>, c) O<sub>3</sub> i d) benzo[a]pirè a les estacions de qualitat de l'aire de Barcelona (l'Eixample), Manlleu i Bellver de Cerdanya. Les línies vermelles mostren els valors objectiu de qualitat de l'aire establerts com a segurs per l'OMS, i les blaves, el valor objectiu o límit fixat per la UE. Elaboració pròpia.

## Metodologia de mostreig i anàlisi

### Filtres d'alt volum i toxicitat

En aquest treball, per estudiar quines són les contribucions de fons dels contaminants orgànics atmosfèrics i la seva toxicitat, s'han analitzat filtres de PM<sub>10</sub> recollits per la Generalitat de Catalunya i l'Agència de Salut Pública de Barcelona (l'Eixample), Manlleu i Bellver de Cerdanya. Els dies d'estudi (vegeu la taula 1) s'han elegit segons la disponibilitat dels filtres i els contrastos observats tant de les condicions meteorològiques com de qualitat de l'aire (NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> i O<sub>3</sub>). Aquests filtres s'instal·len en captadors d'alt volum que fan passar un total de 720 m<sup>3</sup> d'aire al dia. El material recollit és la matèria particulada en suspensió que passa a través del capçal selectiu amb una eficiència de tall del 50% per a un diàmetre aerodinàmic

de 10 µm. En cada cas, s'ha analitzat un quart del filtre per saber la composició orgànica del material particulat.

Per als assajos de toxicitat s'ha extret un vuitè dels filtres per ultrasonificació amb el medi de cultiu DMEM (Dulbecco's Mod-

TAULA 1. Dies d'estudi amb la qualitat de l'aire i les condicions meteorològiques corresponents. Elaboració pròpia.

Dia	Qualitat de l'aire	Condicions meteorològiques
2/8/2019	O <sub>3</sub> elevat	Anticicló
16/11/2019	Bona	Inestabilitat atmosfèrica
20/11/2019	PM <sub>10</sub> i NO <sub>2</sub> elevats	Estancament d'aire
18/12/2019	PM <sub>10</sub> i NO <sub>2</sub> elevats	Estancament d'aire i intrusió de pols sahariana
22/12/2019	O <sub>3</sub> elevat	Dia ventós

ified Eagle's Medium) suplementat amb un 10% de sèrum boví fetal en dues extraccions de 4 i 2 mL. El conjunt dels extractes s'ha centrifugat i el sobrenedant s'ha esterilitzat amb radiació ultraviolada (UV) durant una hora abans dels tests d'exposició.

Per estudiar la viabilitat cel·lular, s'ha exposat fins a 100 µL de l'extracte a cultius de cèl·lules epitelials de pulmó A549 prèviament sembrades en plaques de fons pla. S'han preparat sis concentracions més en dilucions seqüencials 1:2 per estudiar la viabilitat cel·lular a dosis diferents. Les plaques de cultiu s'han incubat durant 24 h en condicions estàndard. Després d'aquest temps, s'ha fet l'assaig de viabilitat cel·lular de Resazurina i s'han llegit les plaques amb un lector de microplaques de fluorescència a 560/590 nm com a longituds d'ona d'excitació/emissió.

### Mostreig vertical

En els casos d'inversió tèrmica, per tal d'estudiar la distribució vertical del material particulat s'han dut a terme mostrejos simultanis en superfície i per sobre de la capa d'inversió mitjançant globus captius d'heli (vegeu la figura 2). El material particulat es recull sobre un filtre de quars amb una bomba de baix cabal i el sutge es mesura amb un monitor d'exposició personal. El globus es lliga a terra amb un fil de pesca i es controla amb un carret elèctric per mantenir-lo a 300-400 metres

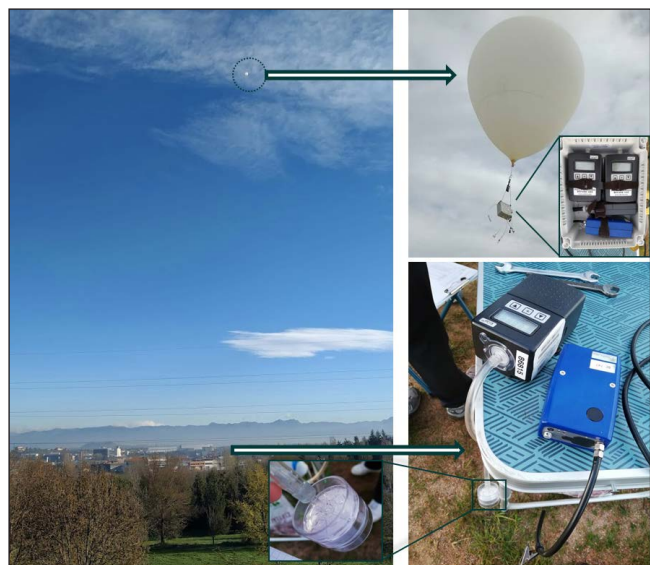


FIGURA 2. Resum esquemàtic del mètode de mostreig simultani a dues altures. Fotografies dels autors.

d'altura durant tres hores. A més, es monitoren als dos nivells la temperatura i la humitat relativa amb enregistadors de dades. Els filtres recollits corresponen a un volum aproximat de 0,9 m<sup>3</sup>. Aquest tipus de mostreig representa un gran repte perquè per analitzar filtres amb volums recollits tan baixos es necessiten instruments d'anàlisi d'alta resolució.

Aquest estudi de la distribució vertical de l'atmosfera s'ha dut a terme a Vic entre el 15 i el 17 de març del 2021, amb característiques similars a l'estació XVPCA de Manlleu abans esmentada, i a Mollerussa entre el 19 i el 23 de juliol del 2021. Aquest últim és un entorn rural envoltat de camps de cultiu.

### Anàlisi dels compostos orgànics traçadors

Els compostos orgànics traçadors de fonts s'han analitzat tant en els filtres de PM<sub>10</sub> d'alt volum com en els de baix volum recollits a terra i en altura. Els compostos mesurats han estat: el levoglucosà, el mannosà i el galactosà com a indicadors de la crema de biomassa, alguns àcids dicarboxílics i poliols de la formació d'aerosol secundari (incloent-hi productes d'oxidació de l'isoprè i l' $\alpha$ -pinè), els hopans com a traçadors de les emissions del trànsit i els hidrocarburs aromàtics policíclics (HAP) com a indicadors de combustió incompleta [12-16]. A més, aquests últims, juntament amb les quinones (HAP oxigenats), es poden utilitzar per calcular els quocients de toxicitat equivalent partint del factor de toxicitat associat a cada compost [17].

En l'anàlisi, els filtres es dopen amb compostos deuterats (alguns HAP deuterats, levoglucosà-D<sub>7</sub> i àcid succínic-D<sub>4</sub>) i s'extreuen amb 10 mL de diclorometà: metanol (1:1 v/v) per triplicat. Els extractes es filtren i es concentren amb el rotavapor i sota un corrent de N<sub>2</sub> fins a un volum final de 0,5 mL. Una alíquota de 25 µL s'evapora fins a la sequedat i s'hi afegixen 25 µL de N,O-bis(trimetilsilil)trifluoroacetamida (BSTFA) i 10 µL de piridina per obtenir els derivats trimetilsilans dels compostos polars (àcids i poliols), els quals s'analitzen per cromatografia de gasos acoblada a espectrometria de masses (GC-MS) per detectar i quantificar els compostos. Amb la resta de l'extracte es fa una partició líquid-líquid amb 1 mL d'hexà per triplicat i es concentra sota un corrent de N<sub>2</sub> fins a un volum final de 25 µL per analitzar els compostos menys polars per cromatografia de gasos acoblada a espectrometria de masses d'alta resolució (GC - Orbitrap MS).

Els orígens de les contribucions dels contaminants es determinen a partir de la matriu normalitzada dels compostos traçadors amb el mètode d'anàlisi multivariant MCR-ALS (*multivariate curve resolution - alternating least squares*) sota restriccions de no-negativitat. El mètode descompon la matriu amb un algoritme de mínims quadrats alterns i genera els components. Cada un d'aquests descriu dues informacions: la constitució del component segons els compostos mesurats i la contribució del component a les mostres recollides [18]. Així doncs, la contribució dels compostos mesurats a cada component ens indica la font de material orgànic a què correspon.

## Aportació de fonts de l'aerosol orgànic

S'ha aplicat el mètode MCR-ALS a la matriu que contenia les concentracions normalitzades de vint-i-vuit compostos traçadors per a cadascuna de les quinze mostres d'alt volum de Barcelona, Manlleu i Bellver (tres estacions, cinc dies). S'han obtingut quatre components que expliquen el 95% de la variància de la base de dades (vegeu la figura 3). El primer component conté el 91% dels hopans, fet que permet associar-lo al trànsit. A més, conté un 28% d'àcids que han estat relacionats amb anterioritat en la literatura amb l'AOS de les emissions de trànsit i altres activitats urbanes com ara la cuina domèstica [12]. El segon component correspon a la crema de biomassa, perquè conté un 85% dels compostos traçadors

d'aquest tipus de crema (levoglucosà, mannosà i galactosà). També conté el 75% dels HAP i de les quinones, cosa que indica que la crema de biomassa és una font important d'aquest tipus de compostos. Els altres dos components estan clarament relacionats amb l'aerosol secundari. El component que conté el 87% dels productes d'oxidació de l'isoprè i l' $\alpha$ -pinè (àcid 2-metilglucèric, 2-metiltreitol, 2-metileritrol, àcid cis-pinònic, àcid 3-hidroxi-glutàric i àcid 3-metil-1,2,3-butantricarboxílic, MBTCA) correspon a l'AOS biogènic, encara que també conté contribucions d'alguns àcids més antics (productes de segona formació). Per últim, el component etiquetat com a AOS conté la majoria dels àcids dicarboxílics (40%), tot i que també té una contribució important de l'àcid cis-pinònic, producte de primera generació de l'oxidació de l' $\alpha$ -pinè.

La contribució de cadascun d'aquests components a les diferents mostres es troba representat a la figura 4a. En la mostra d'estiu, l'AOS biogènic domina a totes tres estacions degut a la major presència de compostos orgànics volàtils (COV) durant aquesta època de l'any i a la concentració d'ozó elevada (vegeu la taula 1), que afavoreix la formació de compostos secundaris. D'altra banda, els dies caracteritzats per condicions meteorològiques d'estancament (20/11 i 18/12) mostren les contribucions més altes de les fonts d'emissió primàries, trànsit per a Barcelona i crema de biomassa per a Manlleu i Bellver. La figura 4b mostra que les emissions del trànsit dominen l'aerosol orgànic a Barcelona (70%), la crema de biomassa a l'estació suburbana de Manlleu (67%) i l'AOS a la rural de Bellver de Cerdanya (47%).

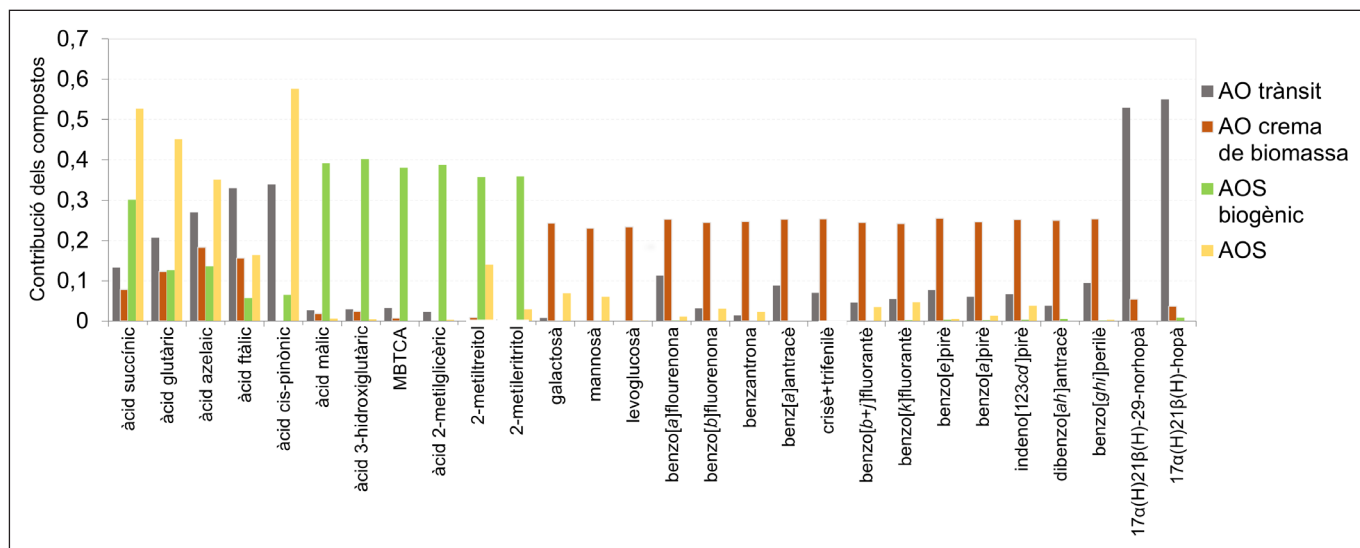


FIGURA 3. Contribució de cada compost orgànic traçador a cadascun dels quatre components en l'aerosol orgànic. Elaboració pròpia.

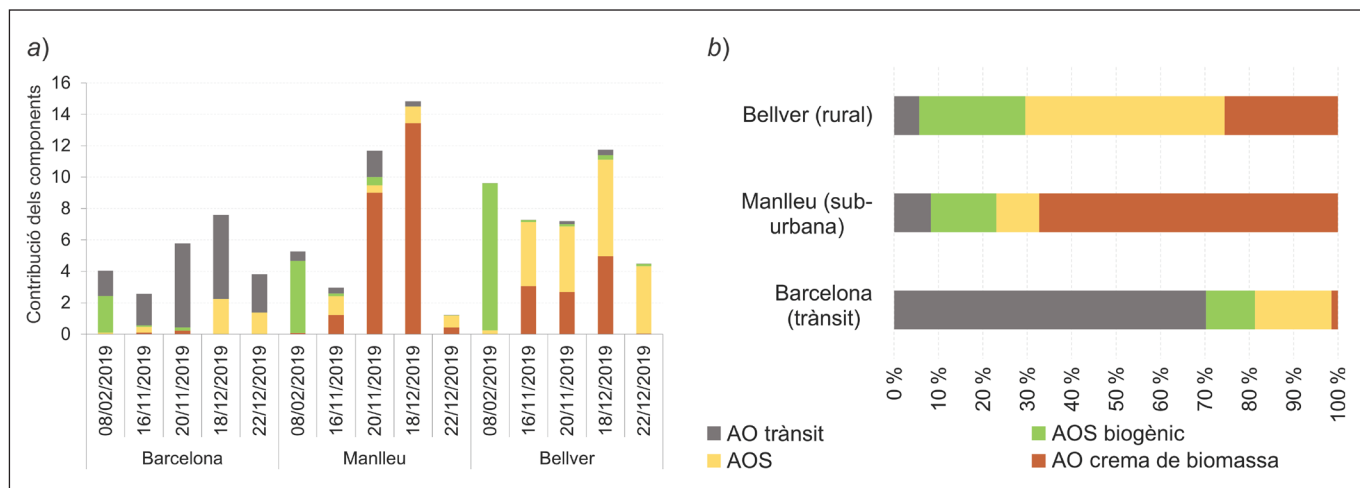


FIGURA 4. a) Contribució dels components de l'aerosol orgànic a cada mostra. b) Tant per cent de contribució de cada component a cada estació. Elaboració pròpia.

## Toxicitat del material particulat

La toxicitat de les mostres recollides en cèl·lules epitelials de pulmó A549 es mostra a la figura 5, on es representa la viabilitat de les cèl·lules vint-i-quatre hores després de l'exposició a diferents concentracions d'extractes dels filtres. Les mostres més tòxiques, les que presenten una viabilitat cel·lular menor, corresponen als dies amb estancament d'aire (20/11 i 18/12) a l'estació suburbana de Manlleu i a la rural de Bellver de Cerdanya. Aquests dos dies de major toxicitat a Manlleu coincideixen amb les concentracions més altes d'aerosol orgànic en aquesta estació, majoritàriament per la crema de biomassa. Les concentracions d'HAP i quinones d'aquests dies amb condicions meteorològiques d'estancament són rellevants, ja que donen quocients de toxicitat equivalents de  $8 \text{ ng/m}^3$ , mentre que la resta de dies en aquesta estació no superen la unitat. Aquest comportament suggereix que els compostos relacionats amb la crema de biomassa poden alterar les funcions cel·lulars dels organismes i, fins i tot, produir-ne la mort [19]. D'altra banda, les mostres d'aquests dies a l'estació de Bellver produeixen toxicitats similars, però tenen també contribucions considerables d'aerosol secundari. Tot i així, el paper de l'AOS en la toxicitat és dubtós, perquè altres mostres amb contribucions majoritàries d'aquest component presenten viabilitats cel·lulars altes. En contrast, les cèl·lules exposades als extractes dels filtres de Barcelona presenten toxicitats més baixes.

Els resultats obtinguts en aquest estudi confirmen que els nivells actuals de contaminants poden provocar efectes en la

salut humana perquè els volums equivalents d'aire per produir la inhibició del 50% de l'activitat cel·lular varien entre  $4,4 \text{ m}^3$  i  $30 \text{ m}^3$ , que són valors dins del marge del que respira un ésser humà durant un dia.

En els dies marcats per l'estancament d'aire, quan la capa de barreja és baixa i els contaminants es dispersen en un volum petit d'aire, hi ha un risc més alt per a la població. És necessari, doncs, conèixer la distribució d'aquests compostos a l'atmosfera sota les condicions d'inversió tèrmica que provoquen aquest estancament. A més, la formació de l'aerosol secundari lluny de les fonts d'emissió primàries (estació rural) ens pot indicar la formació d'aquests compostos a les capes més altes de l'atmosfera. Aquests compostos podrien introduir-se a les capes habitades en créixer la capa de barreja durant les hores diürnes, fenomen que es coneix com a *fumigació de la capa residual* i que s'ha observat amb anterioritat a Catalunya amb altres contaminants [20].

## Distribució vertical de l'aerosol orgànic

L'estudi de la distribució vertical amb globus captius ha permès veure les diferències entre les condicions estàndard i les d'inversió tèrmica. A la figura 6 es mostra la suma dels compostos traçadors a la localització suburbana (Vic) i a la rural (Mollerussa), tant al terra com al globus. Es mostren els valors obtinguts per diferents sondejos que tenen una durada aproximada de tres hores.

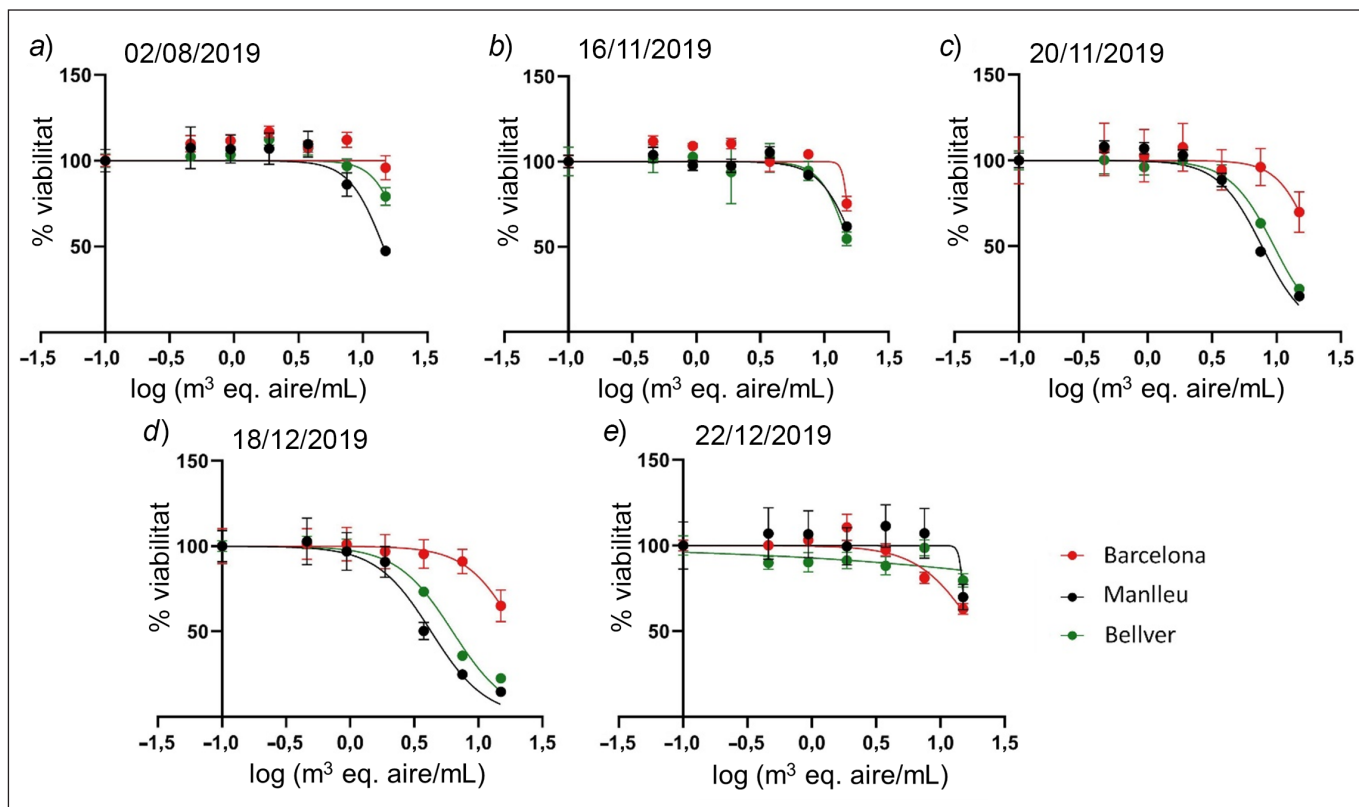


FIGURA 5. Corbes de toxicitat que representen el tant per cent de viabilitat, relatiu al control, de les cèl·lules davant el logaritme dels metres cúbics equivalents d'aire per mil·lilitre d'extracte exposat a les cèl·lules. Elaboració pròpia.

En el mostreig del març del 2021 a la zona suburbana de Vic (vegeu les figures 6a i 6c), la concentració dels traçadors de la crema de biomassa i de combustió incompleta són majors a terra que en altura en tots els casos, però les diferències més acusades tenen lloc als sondejos fets sota condicions d'inversió (marcats en vermell).

Les inversions de temperatura es formen normalment a la nit, quan la superfície es refreda radiativament i les capes altes de l'atmosfera queden aïllades a una temperatura més alta, i es trenquen al matí amb l'escalfament solar. Aquest comportament es veu reflectit en la diferència de concentracions entre els sondejos fets quan es forma la inversió, a l'última hora de la tarda, i quan es trenca a la matinada. Durant la nit s'acumulen els contaminants emesos a superfície i la concentració a terra va augmentant. Així doncs, un cop surt el sol, la capa de barreja augmenta i dispersa els contaminants acumulats en un volum més gran d'aire, tot disminuint-ne les concentracions. En el cas de Vic, el quocient de toxicitat equivalent a la superfície sota condicions d'inversió és més de cinc cops superior que en condicions de barreja (3,9 i 0,6 ng/m³, respectivament).

D'altra banda, la correlació de les concentracions dels traçadors amb el sutge indiquen que la font principal de material particulat a Vic a l'hivern és la combustió incompleta de biomassa, mentre que a Mollerussa a l'estiu (juliol) aquests traçadors presenten contribucions molt menors. A Mollerussa els traçadors de la combustió incompleta (HAP) també són sempre més alts a terra, però amb valors molt menors i, en aquest cas, podrien estar associats al trànsit rodad. En aquesta estació rural, a l'estiu, la contribució dominant és de l'aerosol secundari biogènic (productes d'oxidació de l' $\alpha$ -pinè i l'isoprè), que en molts dels sondejos presenta concentracions més elevades en altura que en superfície. Aquests productes són més estables i es poden acumular a la capa residual de l'atmosfera per sobre de la inversió. La mateixa tendència també s'ha observat amb l'ozó, que afavoreix els processos d'oxidació. L'acumulació d'aquest tipus de compostos a la capa residual és significativa, perquè quan l'atmosfera es barreja a les hores diürnes es reintrodueixen a la capa de barreja i poden afavorir els processos d'oxidació a prop de la superfície.

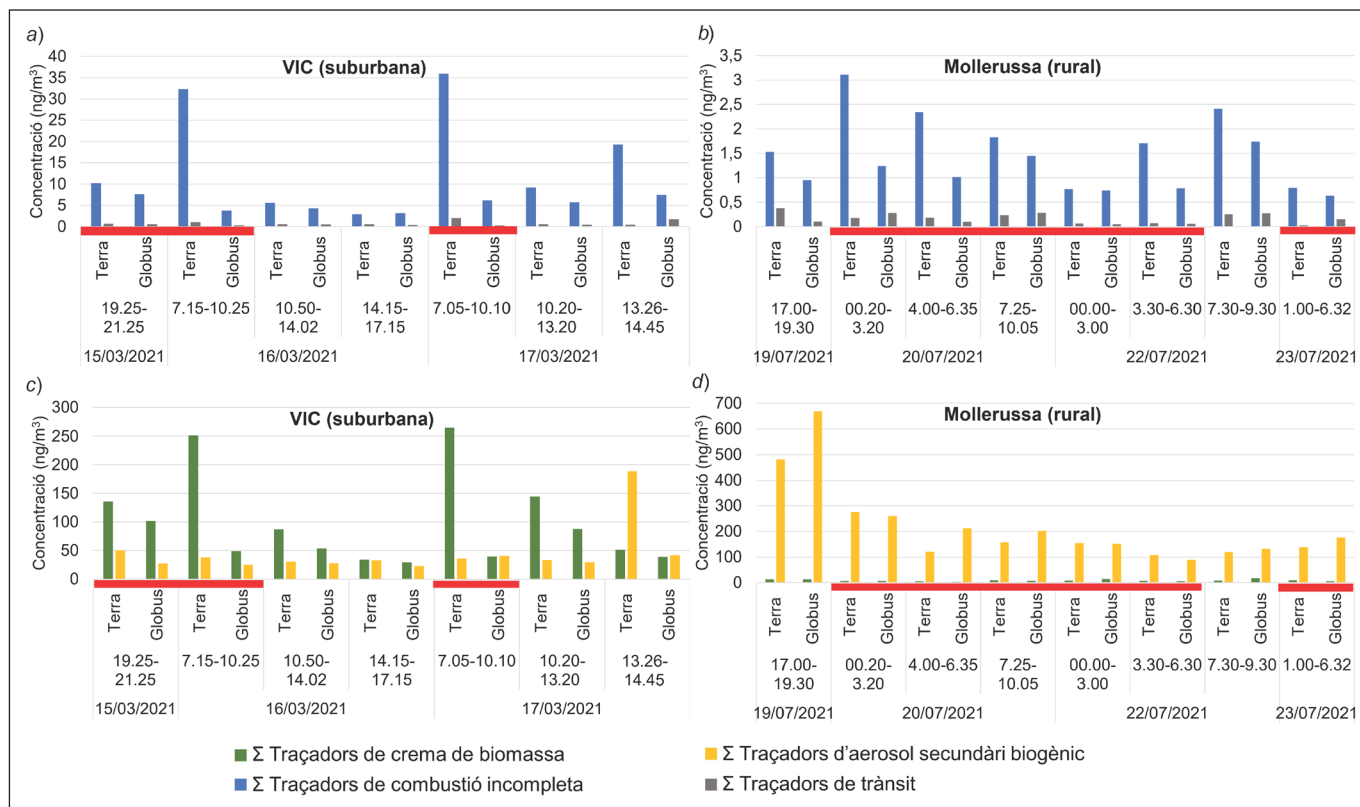


FIGURA 6. Suma dels compostos traçadors a terra i al globus per a cada mostreig fet a Vic el març del 2021 (a i c) i a Mollerussa el juliol de 2021 (b i d). Els mostrejos marcats en vermell indiquen una temperatura major al globus que a terra i, per tant, condicions d'inversió. Elaboració pròpia.

## Conclusions

L'estudi d'aportació de fonts de l'aerosol orgànic en la matèria particulada de les estacions de Barcelona, Manlleu i Bellver indica que cal aplicar mesures diferents per millorar la qualitat de l'aire a les diferents àrees. A les zones urbanes, dominades per les emissions de trànsit, cal canviar els tipus de cotxes i/o millorar els sistemes de transport col·lectiu. Altrament, a les zones suburbanes o rurals, on la crema de biomassa i l'aerosol secundari són dominants, la crema de rostolls o les llars de foc domèstiques poden influir de manera significativa i és necessari regular com es duen a terme aquestes cremes perquè, d'acord amb els estudis de toxicitat, la combustió incompleta afecta les funcions cel·lulars dels organismes. Aquest fet és particularment preocupant en condicions d'estancament d'aire, quan les concentracions dels contaminants són més elevades.

D'altra banda, el mostreig amb globus d'heli permet l'estudi de la distribució vertical dels traçadors orgànics en aquestes condicions d'estancament. Les concentracions dels traçadors

de fonts primàries són significativament més grans a terra sota condicions d'inversió tèrmica a l'hivern i poden suposar un risc per a la població exposada si les condicions d'estancament persisteixen. En canvi, l'aerosol orgànic secundari es troba més barrejat a l'atmosfera i es pot acumular a la capa residual nocturna a l'estiu. La complexitat de la formació secundària de compostos suposa un repte que cal esbrinar per identificar els efectes que tenen sobre la salut humana i per poder establir les estratègies més adients per reduir-los.

## Agraïments

Els autors agraeixen les aportacions en aquest treball de Carme Bedia i Paula Villascaras. Aquest treball ha estat finançat pel Pla Nacional d'R+D+I del Ministeri de Ciència i Innovació (INTEMPOL PGC2018-10228-B-I00) i pel projecte CEX2018-000794-S del centre d'excel·lència Severo Ochoa IDAEA-CSIC. Clara Jaén agraeix també la beca predoctoral FPU del Ministeri d'Universitats (FPU19/06826).



## Referències i altres fonts

- [1] JANSSEN, N. A. H.; FISCHER, P.; MARRA, M.; AMELING, C.; CASSEE, F. R. «Short-term effects of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> on daily mortality in the Netherlands». *Sci. Total Environ.* [en línia], 463-464 (2013), p. 20-26. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>>.
- [2] MASSERAN, N.; MOHD SAFARI, M. A. «Intensity-duration-frequency approach for risk assessment of air pollution events». *J. Environ. Manage.* [en línia], 264 (2020), article 110429. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110429>>.
- [3] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Ambient (outdoor) air pollution* [en línia]. Ginebra: WHO, 2021. <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)> [Consulta: 3 març 2022].
- [4] NEMMAR, A.; HOET, P. H. M.; VANQUICKENBORNE, B.; DINSDALE, D.; THOMEER, M.; HOYLAERTS, M. F.; VANBILLOEN, H.; MORTELMANS, L.; NEMERY, B. «Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans». *Circulation* [en línia], 105 (4) (2002), p. 411-414. <<https://doi.org/10.1161/hc0402.104118>>.
- [5] KELLY, F. J.; FUSSELL, J. C. «Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter». *Atmos. Environ.* [en línia], 60 (2012), p. 504-526. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>>.
- [6] HOLLINGSWORTH, A.; ENGELEN, R. J.; TEXTOR, C.; BENEDETTI, A.; BOUCHER, O.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; ELBERN, H.; ESKE, H.; FLEMING, J.; GRANIER, C.; KAISER, J. W.; MORCRETTE, J.-J.; RAYNER, P.; PEUCH, V.-H.; ROUIL, L.; SCHULTZ, M. G.; SIMMONS, A. J.; THE GEMS CONSORTIUM. «Toward a monitoring and forecasting system for atmospheric composition: The GEMS Project». *Bull. Am. Meteorol. Soc.* [en línia], 89 (8) (2008), p. 1147-1164. <<https://doi.org/10.1175/2008BAMS2355.1>>.
- [7] LAMPILAHTI, J.; LEINO, K.; MANNINEN, A.; POUTANEN, P.; FRANCK, A.; PELTOLA, M.; HIETALA, P.; BECK, L.; DADA, L.; QUÉLÉVER, L.; ÖHRNBERG, R.; ZHOU, Y.; EKBLUM, M.; VAKKARI, V.; ZILITINKEVICH, S.; KERMINEN, V. M.; PETÄJÄ, T.; KULMALA, M. «Aerosol particle formation in the upper residual layer». *Atmos. Chem. Phys.* [en línia], 21 (10) (2021), p. 7901-7915. <<https://doi.org/10.5194/acp-21-7901-2021>>.
- [8] BEHERA, S. N.; CHENG, J.; HUANG, X.; ZHU, Q.; LIU, P.; BALASUBRAMANIAN, R. «Chemical composition and acidity of size-fractionated inorganic aerosols of 2013-14 winter haze in Shanghai and associated health risk of toxic elements». *Atmos. Environ.* [en línia], 122 (2015), p. 259-271. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.053>>.
- [9] «Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa». *Diario Oficial de la Unión Europea* [en línia], núm. L 152 (11 juny 2008), p. 1-44. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en>> [Consulta: 5 maig 2022].
- [10] DROOGE, B. L. van; FONTAL, M.; FERNÁNDEZ, P.; FERNÁNDEZ, M. A.; MUÑOZ-ARNANZ, J.; JIMÉNEZ, B.; GRIMALT, J. O. «Organic molecular tracers in atmospheric PM<sub>1</sub> at urban intensive traffic and background sites in two high-insolation European cities». *Atmos. Environ.* [en línia], 188 (2018), p. 71-81. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.024>>.
- [11] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). *Air quality standards* [en línia]. <<https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>> [Consulta: 5 maig 2022].
- [12] ALIER, M.; DROOGE, B. L. van; DALL'OSTO, M.; QUEROL, X.; GRIMALT, J. O.; TAULER, R. «Source apportionment of submicron organic aerosol at an urban background and a road site in Barcelona (Spain) during SAPUSS». *Atmos. Chem. Phys.* [en línia], 13 (20) (2013), p. 10353-10371. <<https://doi.org/10.5194/acp-13-10353-2013>>.
- [13] ALVES, C.; NUNES, T.; VICENTE, A.; GONÇALVES, C.; ETVYUGINA, M.; MARQUES, T.; PIO, C.; BATE-EPEY, F. «Speciation of organic compounds in aerosols from urban background sites in the winter season». *Atmos. Res.* [en línia], 150 (2014), p. 57-68. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.012>>.
- [14] CLAEYS, M.; SZMIGIELSKI, R.; KOURTCHEV, I.; VEKEN, P. van der; VERMEYLEN, R.; MAENHAUT, W.; JAOUI, M.; KLEINDIENST, T. E.; LEWANDOWSKI, M.; OFFENBERG, J. H.; EDNEY, E. O. «Hydroxydicarboxylic acids: Markers for secondary organic aerosol from the photooxidation of  $\alpha$ -pinene». *Environ. Sci. Technol.* [en línia], 41 (5) (2007), p. 1628-1634. <<https://doi.org/10.1021/es0620181>>.
- [15] SZMIGIELSKI, R.; SURRETT, J. D.; GÓMEZ-GONZÁLEZ, Y.; VEKEN, P. van der; KOURTCHEV, I.; VERMEYLEN, R.; BLOCKHUY, F.; JAOUI, M.; KLEINDIENST, T. E.; LEWANDOWSKI, M.; OFFENBERG, J. H.; EDNEY, E. O.; SEINFELD, J. H.; MAENHAUT, W.; CLAEYS, M. «3-methyl-1,2,3-butane-tricarboxylic acid: An atmospheric tracer for terpene secondary organic aerosol». *Geophys. Res. Lett.* [en línia], 34 (24) (2007), article L24811. <<https://doi.org/10.1029/2007GL031338>>.
- [16] PÉREZ-PASTOR, R.; SALVADOR, P.; GARCÍA-ALONSO, S.; ALASTUEY, A.; SANTOS, S. G. dos; QUEROL, X.; ARTIÑANO, B. «Characterization of organic aerosol at a rural site influenced by olive waste biomass

burning». *Chemosphere* [en línia], 248 (2020), article 125896. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125896>>.

[17] NISBET, I. C. T.; LAGOY, P. K. «Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)». *Regul. Toxicol. Pharmacol.* [en línia], 16 (3) (1992), p. 290-300. <[https://doi.org/10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X)>.

[18] JAUMOT, J.; GARGALLO, R.; JUAN, A. de; TAULER, R. (2005). «A graphical user-friendly interface for MCR-ALS: A new tool for multivariate curve resolution in MATLAB». *Chemom. Intell. Lab. Syst.* [en línia], 76 (1) (1992), p. 101-110. <<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.12.007>>.

[19] MESQUITA, S. R.; DROOGE, B. L. van; OLIVEIRA, E.; GRIMALT, J. O.; BARATA, C.; VIEIRA, N.; GUIMARÃES, L.; PIÑA, B. «Differential embryotoxicity of the organic pollutants in rural and urban air particles». *Environ. Pollut.* [en línia], 206 (2015), p. 535-542. <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.008>>.

[20] JAÉN, C.; UDINA, M.; BECH, J. «Analysis of two heat wave driven ozone episodes in Barcelona and surrounding region: Meteorological and photochemical modeling». *Atmos. Environ.* [en línia], 246 (2021), article 118037. <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118037>>.



C. Jaén



B. L. van Drooge



J. O. Grimalt

**Clara Jaén** és graduada en química per la Universitat de Barcelona (UB) des de l'any 2018 i va obtenir el Màster Oficial en Meteorologia l'any 2020. Ha fet estades de recerca enfocades a la qualitat de l'aire a l'Institut de Geoquímica de Guangzhou i al grup de Modelització Atmosfèrica de Mesoescala i Microescala de la UB. Actualment és estudiant de doctorat a l'Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA-CSIC), on estudia els canvis en la composició de contaminants orgànics en la matèria particulada atmosfèrica i les condicions meteorològiques que afecten els episodis d'alta contaminació.

**Barend L. van Drooge** és llicenciat en ciències ambientals als Països Baixos des de l'any 1998 i doctor en ciències ambientals per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) des de l'any 2004. Després d'haver fet una estada postdoctoral al Joint Research Centre (JRC) de la Comissió Europea (Itàlia), actualment és científic titular a l'Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA-CSIC) des del 2020. La seva recerca gira entorn de l'estudi dels contaminants atmosfèrics, el seu mode de transport i el seu impacte en la salut i el medi natural en zones remotes, rurals i urbanes.

**Joan O. Grimalt** és enginyer químic per l'Institut Químic de Sarrià (IQS) des de l'any 1978, llicenciat en ciències químiques per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) des del 1979, doctor en ciències químiques per la UAB des del 1983 i professor d'investigació del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) des del 1992. Va ser director de l'Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA-CSIC) entre 2008 i 2018 i director del Centre d'Investigació i Desenvolupament (CID-CSIC) entre 2012 i 2018. Geoquímic orgànic ambiental de trajectòria llargament llorejada, ha dedicat la seva investigació a l'estudi dels compostos orgànics naturals i antropogènics com a indicadors del canvi climàtic i de l'estat de salut dels ecosistemes i organismes (incloent-hi els humans).