

MONOGRAFÍA FINGERPRINTS EN FORENSICA AMBIENTAL

Tipologías de Especies Químicas
en Contaminación Atmosférica

Por
Raúl G. E. Morales Segura



Raúl Morales Segura es Decano de la Facultad de Ciencias (2018-2026) y Profesor Titular de la Universidad de Chile.

Obtuvo su grado de Doctor en Ciencias con mención en Química de la Universidad de Chile (1981) y la primera Beca del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo de la Química en Chile (1985), realizando una estadía postdoctoral en Princeton University, U.S.A. Actualmente se desempeña como académico del Departamento de Química en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.

Ha sido Fundador de la Carrera de Química Ambiental de la Universidad de Chile (1995); de la Sociedad de Química Ambiental de Chile (1997), siendo su presidente en tres períodos; y de la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales. También fue co-fundador del Programa de Bachillerato (1995) y junto a colegas de Física y Matemática refundaron la carrera de Pedagogía Científica de Formación Inicial en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile a contar del año 2005.

**MONOGRAFÍA
FINGERPRINTS
EN FORÉNSICA
AMBIENTAL**

**Tipologías de Especies Químicas
en Contaminación Atmosférica**

**Por
Raúl G. E. Morales Segura**

© Raúl G.E. Morales Segura

Inscripción N° 2025-A-1032
07 de Febrero de 2025

ISBN: 978-956-420-542-7

Edición del Centro de Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias
Universidad de Chile

Esta monografía o parte de ella puede ser reproducida para fines académicos y docentes con la cita correspondiente del título del libro y su autor.

Santiago de Chile
Año 2025

Nota sobre la Fotografía de la portada.
Vista de las Torres del Paine, fotografía de propiedad del autor.

... A mi nieto Eric.

PROLOGO

La Forénsica Ambiental se constituye como una nueva disciplina en el amplio estudio de las Ciencias Ambientales, atendiendo al posicionamiento social que han tenido los conflictos ambientales a nivel mundial y en particular en nuestro país.

Es en este contexto de establecer los orígenes y desarrollos dinámicos que los contaminantes ambientales tienen en el medio físico, tanto en la afectación de la salud de las personas y el deterioro en los ecosistemas naturales y urbanos, como del impacto específico sobre bienes ambientales y patrimoniales públicos y privados, que ha sido necesario ir estableciendo esta nueva área científica de estudio.

En el contexto nacional, esta área ha comenzado a ser relevante y oportuna, dado la implementación de los Tribunales Ambientales existentes en el país, tras la aprobación de la Ley N° 20.600 del 28 de junio de 2012, que los crea como órganos jurisdiccionales especiales, sujetos a la superintendencia directiva, correccional y económica de la Corte Suprema. De ahí que, se les asigna la función de resolver las controversias medio ambientales de su competencia y ocuparse de los demás asuntos que la ley somete a su conocimiento.

A la fecha se han establecido tres Tribunales Ambientales, estos son:

Primer Tribunal Ambiental, con sede en la comuna de Antofagasta, y con competencia territorial en las Regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá, de Antofagasta, de Atacama y de Coquimbo.

Segundo Tribunal Ambiental, con sede en la comuna de Santiago, y con competencia territorial en las Regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule.

Tercer Tribunal Ambiental, con sede en la comuna de Valdivia, y con competencia territorial en las Regiones del Biobío, de La Araucanía, de Los Ríos, de Los Lagos, de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, y de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Tras motivaciones científicas y académicas generadas en el espacio docente de nuestra carreras ambientales, tanto en la Universidad de Chile como en la Universidad de Concepción, se fueron desarrollando las primeras iniciativas en esta materia que, finalmente, permitieron convocar al primer encuentro denominado Primera Jornada de Forénsica Ambiental en el EULA y Facultad del Medio Ambiente en la Universidad de Concepción en el año 2015 y posteriormente

en la Facultad de Derecho de la Universidad de Chile en el año 2016.

Posteriormente tanto en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile como en la Facultad del Medio Ambiente de la Universidad de Concepción, se han ido estableciendo asignaturas semestrales de Forénsica Ambiental a nivel de estudiantes de pregrado.

Finalmente, las II Jornadas de Forénsica Ambiental entre ambas universidades, que cubrió tanto aspectos científicos como jurídicos, se desarrolló nuevamente con el patrocinio de la Universidad de Concepción en octubre de 2023.

Ha sido este cúmulo de experiencias académicas y docentes que nos han permitido ir estableciendo un conjunto de materias científicas y jurídicas, las que han ido dando cuerpo a esta especialización en el campo ambiental bajo la denominación de Forénsica Ambiental. De modo que, como parte de esta experiencia acumulada, surge esta Monografía en un ámbito específico de la Forénsica Ambiental, ligada fundamentalmente al establecimiento de los “fingerprints”, o especies moleculares que se van estableciendo como verdaderas huellas dactilares que quedan en el medio o “cuerpo del delito”, lo que hace relevante su reconocimiento como especies características y propias, a través de su identificación

química, o de las dinámicas moleculares evolutivas que experimentan o de sus transportes a través del medio físico, sea atmosférico, acuático o terrestre.

Considero que el aporte que representa este cúmulo de conocimientos expuestos en las siguientes páginas, permitirán ahondar con mayor propiedad en la identificación y apoyo al esclarecimiento de situaciones singulares que ocurren en nuestros ecosistemas, tras la intervención humana que deviene de impactos ambientales producidos por la actividad antropogénica en todas sus variantes.

El Autor
Santiago, enero de 2025.

Indice

	Pag
Sección 1	
Naturaleza de los Fingerprints Químicos ____	15
Sección 2	
Búsqueda de Fingerprints Químicos en la Dinámica Atmosférica _____	23
a. Morfología y Composición Atómica del Material Particulado _____	21
b. Moléculas Orgánicas como trazadores de Quema de Biomasa. _____	35
c. Variación de Concentraciones de Monóxido de Carbono (CO) en la atmósfera. _____	39
d. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos Derivados de la Combustión de Petróleo. _____	45
e. De Bencenos a Metilderivados y Xilenos (BTEx). _____	48
f. Dioxinas y Furanos como Compuestos Orgánicos Persistentes. _____	48
g. Trazadores de Especies Geológicas y Metales. _____	51
h. Caracterización Isotópica de Especies en Residuos o Contaminantes Atmosféricos. _____	55

Sección 3	
Conclusiones _____	61
 Sección 4	
Recomendaciones de Literatura sobre	
Forénsica Ambiental _____	65

Sección 1.

Naturaleza de los Fingerprints Químicos

Los fingerprints químicos o huellas dactilares químicas del rastro que podemos evidenciar de los procesos de contaminación, y que se producen en los distintos medios físicos que conforman el ecosistema natural o urbano, ha evolucionado hacia una práctica y un reconocimiento fundamental de las causas que, finalmente, explican los impactos ambientales a que tienen lugar en un determinado momento las actividades productivas o la ocupación territorial de un quehacer de origen antropogénico.

Estas nuevas formas de indagación, fundamentalmente se han ido consolidando sobre la base del reconocimiento de especies químicas tipos, las cuales permanecen o trazan su recorrido en el ecosistema, siendo identidades indelebles

que permanecen a través del tiempo y el espacio, de cuya presencia se puede establecer el nivel del daño que el impacto ambiental tiene sobre el ecosistema físico, su flora, su fauna, o sobre las personas que lo habitan, como también sobre bienes naturales, sociales, públicos y privados. De modo que estas huellas moleculares, se han ido constituyendo en pruebas inequívocas del rastro que se traduce en un impacto ambiental, que han venido a respaldar las diferentes normativas o juicios jurídicos, en la responsabilidad que tienen personas naturales o jurídicas, ante una acción de afectación del medio ambiente, lo que a su vez, ha permitido ir relevando el valor ambiental y que el daño producido tiene responsables identificables y que, de acuerdo a la ley, deben responder de ello.

Por consiguiente, a semejanza de lo que representa en la investigación forense el encontrar huellas identificatorias en un sitio de reconocimiento de un acto delictivo y de los individuos que formaron parte de dicho entorno, las que evidentemente no son directamente visibles al ojo humano, en ese mismo carácter indagatorio, surge la Forénsica Ambiental para que, a través de las metodologías propias que nos brinda el análisis químico y fisicoquímico ambiental, en la comprensión de los procesos naturales que experimentan los compuestos químicos, en un dado ámbito físico del ecosistema afectado, se

puedan establecer los orígenes de las causas que han derivado dinámicamente en un impacto reconocido como tal, siendo por ello fundamental identificar las especies moleculares de origen a través de su evolución molecular en el tiempo y en el espacio.

Así, en el medio atmosférico, fluido complejo que se conforma de un conjunto de gases fundamentales en cuanto a su composición como aire (N_2 , O_2 y Ar), con más del 99% del contenido total, surgen los cientos de componentes químicos orgánicos e inorgánicos que en composiciones de escala de ppm, ppb y ppt, o menos, establecen las diferentes características de un medio gaseoso complejo, el que a su vez, por los ciclos diurnos y nocturnos, la radiación solar, particularmente del rango ultravioleta y visible, interviene en procesos fotoquímicos, acrecentando la dinámica propia de las reacciones que se establecen en función de la temperatura y las dinámicas inducidas por el transporte en la escala meteorológica.

De este modo, en este escenario de complejidad, las reacciones y procesos fisicoquímicos que se dan en la atmósfera, junto al trabajo de identificar especies químicas y sus procesos dinámicos de evolución, transformaciones y de transporte, de acuerdo a sus propias reactividades químicas, influidas por sus propios tiempos

de vida media y niveles de concentraciones, quedan a su vez supeditadas a la naturaleza propia de reacciones con otros agentes químicos, principalmente oxidantes, que se dan en una atmósfera como la de nuestro planeta.

Sin embargo, no podemos desconocer que la atmósfera, como medio físico complejo de nuestro medio ambiente, se conforma como un sistema de tres fases en que, en el mismo fluido, sus constituyentes químicos se incorporan a la fase sólida determinadas por partículas de diferentes radios aerodinámicos capaces de mantenerse suspendidas en el aire, o las que por solubilidad son factibles de distribuirse en la fase líquida, determinadas por gotas y microgotas de agua, neblinas y lluvias, en tanto que la fase gaseosa se constituye en el medio mas extenso y propio de la atmósfera al contener sus gases atómicos y moleculares. Es en este espacio de tres fases, que los procesos químicos y sus dinámicas moleculares estarán sujetas a diversas condiciones que, en la dinámica diurna y nocturna, complejizarán aún más el estudio de las diferentes especies esperables que emerjan de los procesos indagatorios, al establecer la dinámica que de cuenta de las especies definidas como fingerprint químicos.

En la Figura 1, se presenta un cuadro sinóptico de los que podríamos denominar las dife-

rentes fuentes generadoras de especies químicas que intervienen en la dinámica atmosférica.

En esta figura se pueden observar como los diferentes orígenes de emisiones tienen su naturaleza en la actividad ecosistémica como las Fuentes Biogénicas y Bio-Geo-Antropogénicas, y a su vez, la actividad productiva antropogénica que determinan la naturaleza de las Fuentes Industriales, Móviles, Domésticas, Difusas y de Áreas. De modo que, en los procesos de reacciones químicas que se van dando en la atmósfera, a su vez, especies moleculares pueden ir abandonando este medio a través de integrarse a fases acuosas y sólidas que mediante su naturaleza de corpúsculos o particulado precipitan como forma de lluvia, llovizna o neblina, en una suerte

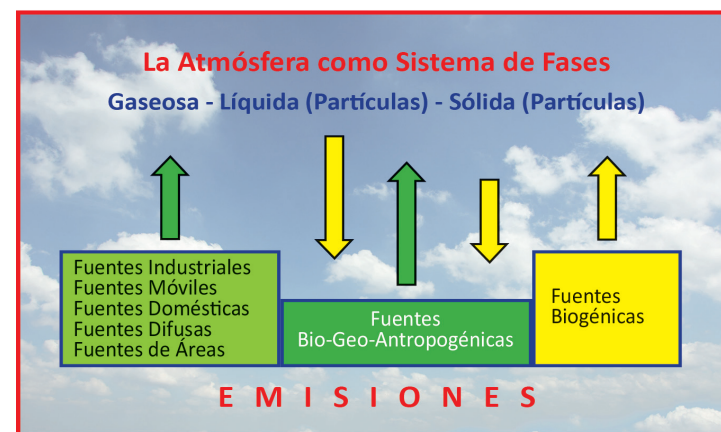


Figura 1.
Emisiones e inmisiones que se dan en el medio atmosférico, considerando a éste como un sistema de tres fases.

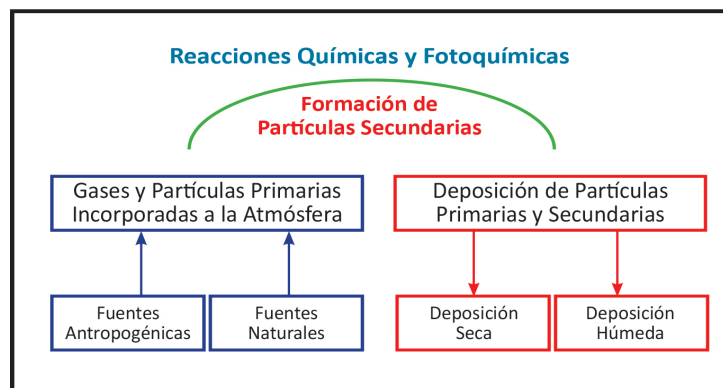


Figura 2.
Dinámica de las emisiones y deposiciones del material que se incorpora a la atmósfera y como sale fuera de ella.

de Deposición Húmeda y en su carácter sólido como Deposición Seca.

En la Figura 2 se presenta de modo esquemático una descripción típica de las fuentes naturales y antropogénicas intervinientes en la atmósfera y de cómo los materiales que se hacen parte de estos procesos dinámicos, como los aerosoles primarios y secundarios van integrándose a los procesos meteorológicos, para finalmente asimilarse al medio físico ecosistémico a nivel del aire, agua y suelos.

En este contexto, las emisiones y las inmisiones forman parte de la masa de aire que constituye nuestra fuente de información, así como la dinámica de gases, la reactividad química y

fotoquímica, y la naturaleza de las partículas suspendidas en el aire, definen finalmente las características químicas de la atmósfera, conformando todo nuestro espacio de investigación.

Por consiguiente, para establecer una clasificación de las fuentes emisoras de origen, hablamos de Fuentes Primarias como las que incorporan materiales que surgen directamente desde una fuente emisora hacia la atmósfera, y por lo general hablamos de Aerosoles Primarios, como partículas suspendidas en el aire que pueden ser de naturaleza sólida o líquida, en tanto que, las Fuentes Secundarias, son aquellos procesos químicos que van generando nuevas especies químicas en la atmósfera misma, producto de la dinámica química y fotoquímica natural en un determinado espacio y horario del lugar, sumado a los procesos de coagulación inducidos por colisión en la fase sólida o por disolución en la fase líquida, a los que denominamos Aerosoles Secundarios.

En la Figura 3 podemos apreciar un resumen de estos procesos correspondientes a aerosoles primarios y secundarios, los que sin duda alguna, serán parte integrante de la naturaleza y origen de los fingerprint químicos, ya sea por una incorporación directa de éstos a la atmósfera o por una serie de procesos químicos atmosféricos en que derivarán estos fingerprint como parte integral de los aerosoles secundarios.

Sección 2. Búsqueda de Fingerprints Químicos en la Dinámica Atmosférica

La selección de especies, así como sus concentraciones y composiciones relativas, son aspectos fundamentales a la hora de definir un determinado fingerprint, que habrá de emplearse como trazador de un proceso de contaminación ambiental. Este tipo de caracterización de especies químicas, propias de los procesos dinámicos y de transporte que se originan en la atmósfera, siguen siendo aún un área en pleno desarrollo, sin embargo, se pueden establecer algunos ámbitos bien definidos que hoy nos permiten racionalizar la búsqueda e identificación de estos fingerprints químicos.

De entre algunas de las descripciones más frecuentes de usos de identidades o metodologías

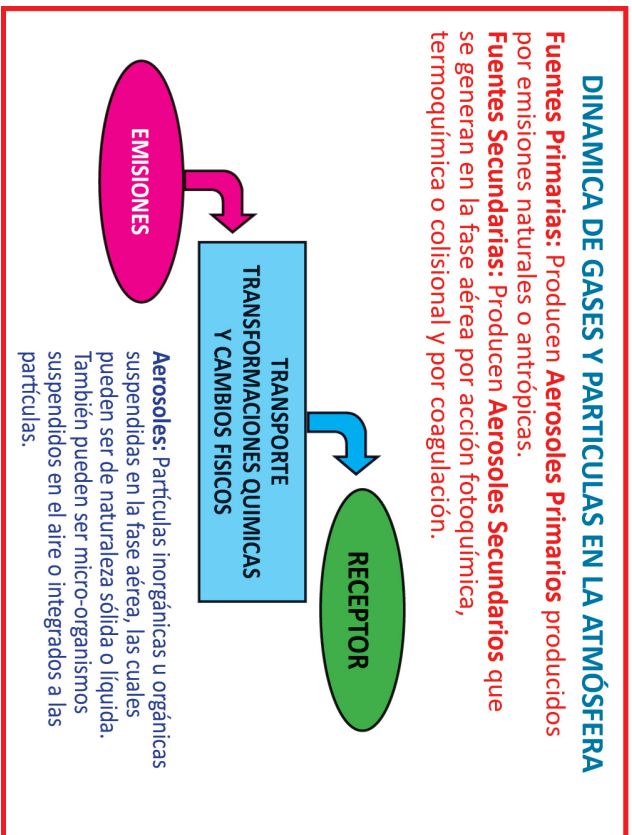


Figura 3.
Descripción de las fuentes generadoras de Aerosoles Primarios y Secundarios.

conducentes a caracterizarlas como fingerprints químicos, podemos describir las siguientes:

- a. Morfología y Composición Atómica del Material Particulado.
- b. Moléculas Orgánicas como trazadores de Quema de Biomasa.
- c. Variación de Concentraciones de Monóxido de Carbono (CO) en la atmósfera.
- d. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos Derivados de la Combustión de Petróleo.
- e. De Bencenos a Metilderivados y Xilenos (BTEX).
- f. Dioxinas y Furanos como Compuestos Orgánicos Persistentes.
- g. Trazadores de Especies Geológicas y Metales.
- h. Caracterización Isotópica de Especies en Residuos o Contaminantes Atmosféricos.

a. Morfología y Composición Atómica de Material Particulado

Las partículas que conforman la fase heterogénea de la atmósfera, ya sea como fase sólida o líquida, corresponden a material suspendido en el aire, que por su tamaño y peso pueden permanecer por largo tiempo, por lo que conforman un medio lo suficientemente estable de permanencia para ser descritos como parte del aire.

En ese contexto, y de acuerdo a su tamaño, es de nuestro interés abordar el Material Particulado correspondiente a la fracción respirable, que de acuerdo a su diámetro, al ser consideradas como esferas aerodinámicas, son menores o iguales a 10 micrones. De este modo, en la actualidad se reconocen fundamentalmente tres niveles de fracciones que cumplen esta condición, las correspondiente a Partículas Gruesas (MP10), que van en el rango de 10 a 2.5 micrones, las Partículas Finas (MP2.5) en el rango de 2.5 micrones hasta 0.1 micrón, y finalmente la fracción de Material Particulado Ultrafino (MP0.1) correspondiente a partículas de diámetros aerodinámicos correspondientes a menores a 0.1 micrón.

A su vez, podemos clasificar al humo que surge de alguna fuente primaria, como a una emisión de gases y partículas generadas fundamentalmente por una fuente de combustión de material orgánico, inorgánico o de biomas. Este material heterogéneo, que se produce con temperaturas normalmente menores a 600°C, permite que en el proceso mismo se generen gases como partículas, ya sea por procesos de nucleación o de combustión incompleta de sus fragmentos, los que por la temperatura que alcanzan y el bajo peso que tienen son suficientemente posibles de ser elevados en el aire, describiendo alguna forma de penacho o pluma. De este modo, hoy se pueden caracterizar bastante bien

los componentes químicos de estos procesos de combustión incompletas, llevadas a cabo por materiales específicos como madera, biomasa, gomas, plásticos, papeles y cartones, e incendios forestales, en general, como también por incendios de viviendas, vertederos y rellenos sanitarios (Figura 4).

Por otra parte, procesos de combustión de altas temperaturas como los que se llevan a cabo en una serie de procesos industriales como fundiciones, cementeras y procesos de la producción de combustibles fósiles, normalmente a temperaturas por sobre 600°C, pueden aparecer en las emisiones material correspondiente a partículas de complejas constituciones producto de diversos elementos atómicos.

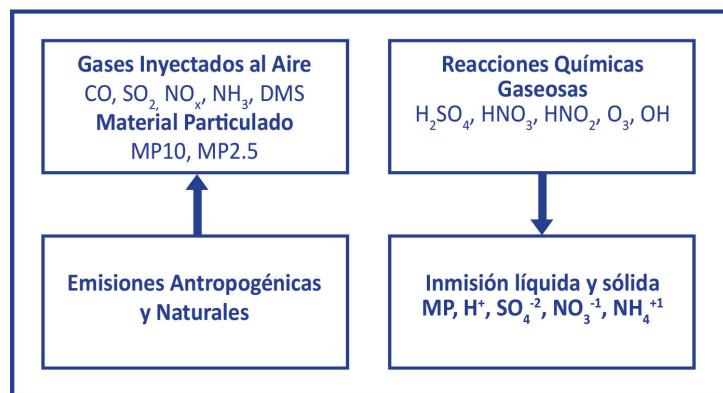


Figura 4.
Descripción de algunas de las fuentes generadoras de especies moleculares participantes en la química de la atmósfera.

Así en la combustión de biomasa e incineración de residuos domésticos, aparecen elementos como: K, Na, Ca, K, Zn, Pb y Carbono elemental y Carbono orgánico, entre otros; en quema de carbón: Al, S, Se, Co y As; y en combustiones de aceites y petróleos: V, Ni, Mn y Fe; etc.

De lo anterior resulta fácil entender que de acuerdo al tamaño de la fracción respirable, prácticamente todo el Material Particulado Fino y Ultrafino es posible de ser respirado en una inhalación regular, lo que es integrado rápidamente a nuestro sistema sanguíneo a partir de su paso a través de los alvéolos pulmonares, cuyo diámetro específico es lo suficientemente grande para recepcionar este tipo de partículas, y por consiguiente, de acuerdo a la toxicidad de los elementos químicos constitutivos de dichas partículas tendrá efectos directos en la salud de la población (ver Figura 5).

De ahí que, el tema de la contaminación atmosférica por este tipo de particulado, se ha transformado en una preocupación importante de los sistemas de salud tanto a nivel nacional como internacional, dado por la afectación masiva que esta tiene en la población y el desarrollo de enfermedades tanto a nivel pulmonar como cardiovascular, afectando órganos vitales como el corazón y el cerebro. De ahí que estos efectos masivos en la población, especialmente en los

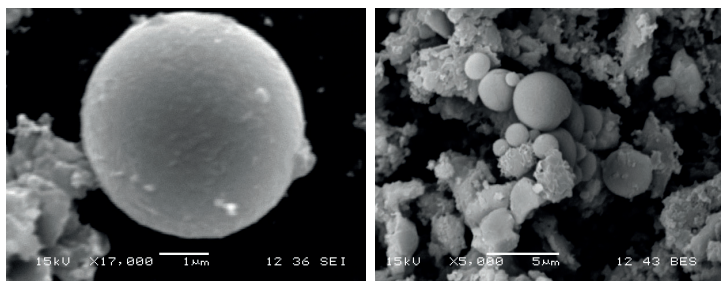


Figura 5.
Partículas esféricas propias de procesos industriales formadas a altas temperaturas con un tamaño variable del orden de 5 micrones (Fotografías propias)¹

rangos etarios más vulnerable, infantil y adulto mayor, obligan a impulsar permanentemente políticas públicas de salud en la prevención y control de las emisiones de dichos materiales, particularmente en las zonas urbanas saturadas de contaminantes gaseosos y por partículas, debido a una alta congestión vehicular y actividad industrial.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha sido una de las principales organizaciones internacionales que ha estado a cargo de esta temática a escala planetaria, planteando por muchos años metodologías de seguimiento y evaluaciones en Políticas Públicas de Salud Ambiental, estableciendo rangos de concentraciones críticas

¹ Richard Toro (Tesista) y Raúl Morales Segura (Director de Tesis). Tesis de Doctorado: “Formación de Material Particulado Secundario en Períodos Críticos de Contaminación en la Ciudad de Santiago”, Programa de Doctorado en Química, Universidad de Chile (2010).

de contaminantes en ciudades e identificando a aquellas con altos niveles de concentración de gases, partículas finas y gruesas.

Sin embargo, las economías en desarrollo con un alto impacto en crecimiento poblacional urbano como China, India y del sudeste asiático, así como en Oriente Medio, además de muchas ciudades de Asia y Europa, en general, aparecen como focos emergentes de ciudades con altos índices de contaminación, especialmente por material particulado, NO_x y ozono. Esto, sumado a los grandes desastres ecológicos que están imponiendo los incendios forestales, facilitados por el aumento del Calentamiento Global e incendios de vertederos y basurales en general, derivados de la pobreza y el hacinamiento de la población mundial en centros urbanos, particularmente en países menos desarrollados, han acrecentado el impacto de la contaminación en grandes urbes, con efectos en la salud de la población que se irán sucediendo en el tiempo, mientras dure el estado de subdesarrollo de la mayoría de la población planetaria urbana.

En estudios publicados por este organismo internacional el año 2022, muestran los niveles de concentraciones de material particulado que se alcanzan en diferentes ciudades de los continentes de nuestro planeta (ver Figura 6).

Por otra parte, estas mediciones determinadas principalmente mediante estaciones de monitoreos a nivel del suelo, se están complementando con mediciones satelitales y más recientemente, se están empleando drones para poder medir concentraciones en función de la altura hasta los cinco mil metros, lográndose conocer con mayor precisión el desarrollo de estos contaminantes en la parte baja de la Tropósfera.

De lo que viene ocurriendo con todo el material particulado que estamos emitiendo a la atmósfera, tras décadas de estudio, los procesos de contaminación atmosférica urbana han ido quedando plenamente descritos y sistemas de pronósticos con modelos altamente complejos a base de algoritmos de base estadística cada vez más precisos y sistemas de modelos matemáticos con base en aprendizajes del tipo neuronal, acoplados a las variables meteorológicas y procesos de cinética y reactividad química, hoy permiten describir de mejor forma la dinámica atmosférica de la contaminación.

A su vez, el desarrollo de nuevas tecnologías satelitales, de la informática y de supercomputadores para el procesamiento del Big Data, han permitido desarrollar nuevos enfoques del estudio de la distribución de contaminantes atmosféricos en la superficie del planeta y en altura, permitiendo un seguimiento mucho más efectivo de las fuen-

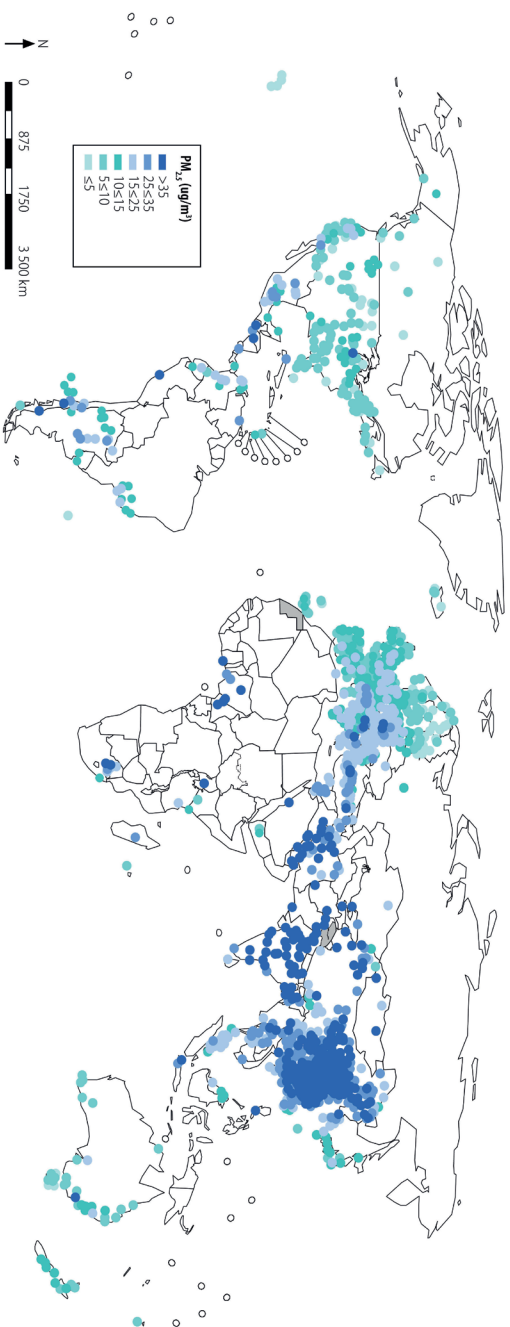


Figura 6.

Calidad de Aire por MP2.5 en ciudades principales a nivel mundial

(Fuente: Kerolyn Shairsingh et al., Bull World Health Organ 2023;101:800–807].
doi: <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.23.290188>²

² Bull World Health Organ. 2023 Oct 24;101(12):800–807. doi: 10.2471/BLT.23.290188

tes emisoras de contaminantes tanto industriales, urbanas, difusas y forestales, lo que ha facilitado el reconocimiento de las rutas de los contaminantes en función del espacio y del tiempo.

Cuando nos referimos a determinar la naturaleza y forma de las partículas, para así contribuir a la identificación de su fuente de origen (fingerprint), tenemos hoy día la gran herramienta que nos proporciona la Microscopía Electrónica de Barrido y, gracias a eso, podemos caracterizar morfológicamente estas pequeñas partículas de la fracción respirable. Sin embargo, el material particulado suele ser recogido en filtros de material como teflón, cuarzo, vidrio y policarbonato, de modo que al observar las imágenes no debe confundirse el tejido propio del filtro con las partículas adheridas a éste (Figura 7).

A su vez, en orden a determinar su contenido químico elemental, mediante un instrumento adosado al microscopio, correspondiente a una fuente de rayos X, complementado con un detector de fluorescencia atómica, van quedando registrados los componentes atómicos. Esta poderosa herramienta instrumental ha comenzado a sistematizarse desde los años 90, logrando identificar patrones morfológicos específicos propios de partículas provenientes de diferentes fuentes emisoras, especialmente tratándose de fuentes de tipo industrial de altas energías.

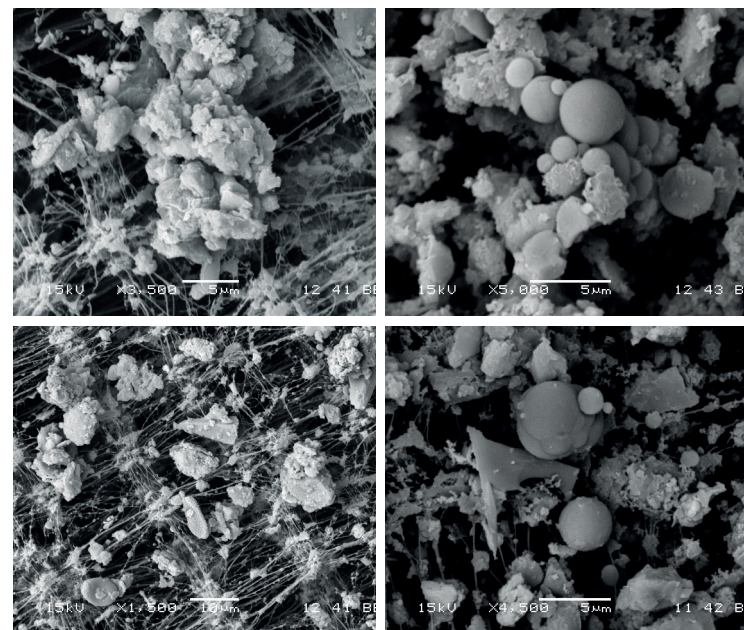


Figura 7
Material particulado MP10 encontrado en la atmósfera urbana de la ciudad de Santiago. Fotografías propias¹.

Una gran contribución a estudios de morfología del material particulado de la ciudad de Santiago y zonas aledañas al territorio, por primera vez se realizaron en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido del Centro Nacional del Medio Ambiente en la Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, bajo la dirección del Dr. José Sepúlveda Sánchez (Figura 8).

Así, muchas veces la identificación de fuentes emisoras estarán asociadas a los contaminan-

tes propios del proceso desde el cual surgen las emisiones. Por ejemplo la presencia de Vanadio permite determinar una trazabilidad a partir de la fuente de energía que provee el petróleo que alimenta la fuente emisora, también altos contenidos en Azufre pueden estar asociados a combustibles fósiles como carbón, otras pistas la proveen el Aluminio, Silicio o Fósforo y nos da posibilidades de identificar tipos de suelo.

Tratándose de emisiones industriales asociadas a la producción de fundiciones, se pueden encontrar partículas con formas singulares, determinadas por las temperaturas del proceso mismo, así como elementos atómicos propios asociados al proceso que permiten identificarlo a distancias importantes lejanas a la fuente emisora, actuando como verdaderos fingerprints.

b. Moléculas Orgánicas como Trazadores de Quema de Biomasa

A partir de los humos y gases que generan la combustión de biomasa, leña y maderas en general, ha permitido detectar, de entre los múltiples componentes orgánicos que se introducen a la atmósfera, particularmente de aquellos provenientes de incendios forestales, la presencia de monosacáridos anhídridos del tipo levoglucosano (1,6-anhidro-beta-D-glucopyranose), manosano (1,6-anhidro-beta-D-mannopyrano-

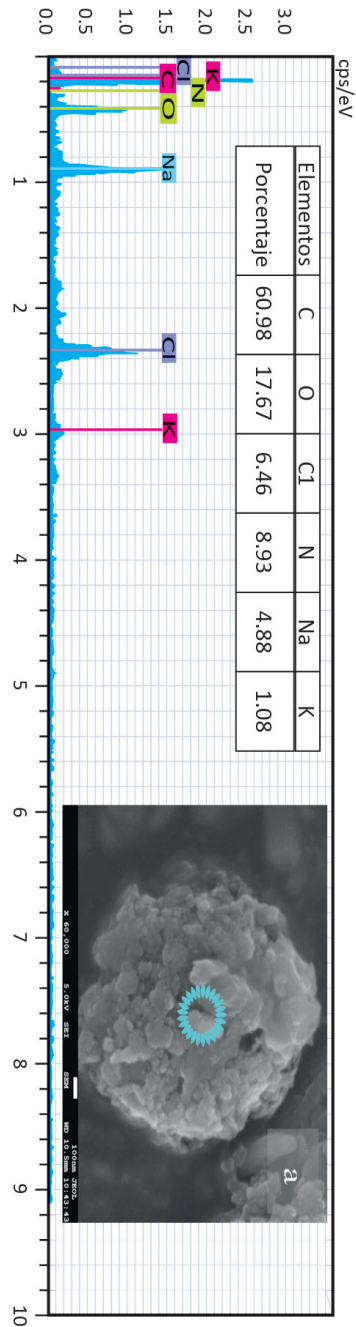


Figura 8.
Zona demarcada de determinación de composición química elemental por Fluorescencia de Rayos X en una partícula proveniente de un filtro de captación en la atmósfera urbana de la ciudad de Santiago. (Fotografías propias¹⁾)

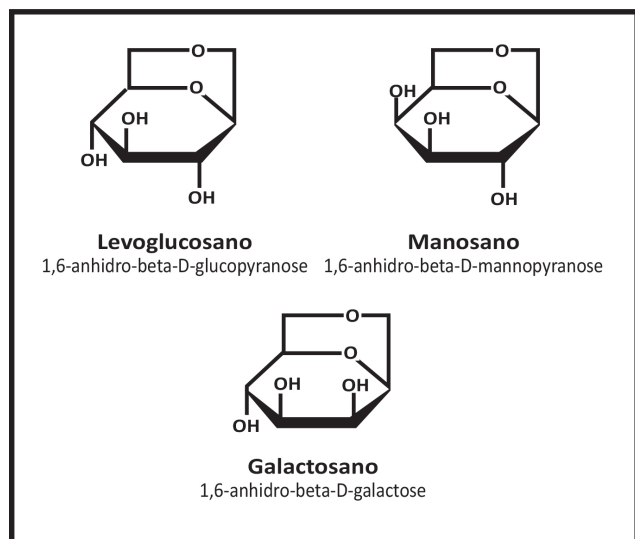


Figura 9.
Monosacáridos anhídridos derivados de la pirólisis de celulosa y hemicelulosa, en la quema de biomasa.

se) y galactosano (1,6-anhidro-beta-D-galactosa) (Figura 9).

A diferencia de los combustibles fósiles, los cuales por combustión no liberan estos monosacáridos, estos azúcares anhídridos derivados de la biomasa suelen ser resultantes de la degradación térmica de polisacáridos, en donde el galactosano y manosano se derivan de la pirólisis de la hemicelulosa, en tanto que levoglucosano es un producto de la pirólisis de celulosa.

Otras especies moleculares de la misma familia del tipo monosacáridos, como arabitol y

manitol, se encuentran como especies características derivadas de la microbiota dada por bacterias, líquenes y hongos.

Sin embargo, levoglucosano, ha sido caracterizado ya como un apropiado trazador atmosférico, atendiendo a su alta estabilidad molecular y baja reactividad oxidativa. Esta especie, al ser la que mayor concentración presenta respecto de los demás monosacáridos en el particulado fino atmosférico, es capaz de sobreponerse a otras especies como compuestos alifáticos, derivados oxigenados, terpenoides, etc. A su vez, su alta concentración y mayor estabilidad relativa a las demás especies derivadas de la combustión de biomasa, ésta puede ser detectada a largas distancias de sus fuentes de emisión.

Determinación de levoglucosano atmosférico por quema de biomasa (Figura 10), a nivel de combustión por calefacción domiciliar, presente en el material particulado fino (MP 2.5), ha sido estudiado como trazador en ciudades del sur de Chile, región de Los Ríos, por Héctor Guerra quién realizó su Seminario de Licenciatura en Biología en la Universidad Austral de Chile, patrocinado por el Dr. Bravo (2015).

Por otra parte, el reteneno o metil-isopropil-fenantreno, también 1-metil-7-isopropilfe-

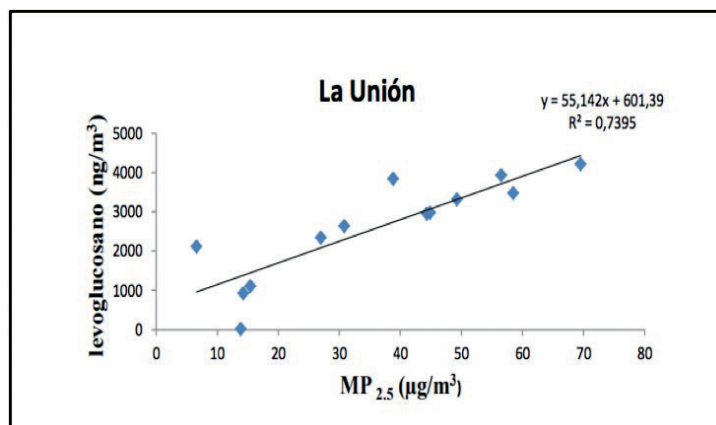


Figura 10.

Determinación de levoglucosano en MP2.5. Ciudad de La Unión, Región de Los Ríos, Chile.

(Héctor Guerra, Universidad Austral de Valdivia, Tesis de Licenciatura en Biología 2015).

nantreno, $C_{18}H_{18}$, es un hidrocarburo aromático policíclico caracterizado como un biomarcador de Plantas Mayores, al ser un producto derivado de la degradación propia de diterpenoides en pirólisis de coníferas.

La presencia de trazas de reteneno en el aire es un trazador de fuentes de incendios forestales, sin embargo, es también posible de encontrar en efluentes de las industrias de la celulosa debido a residuos provenientes de pulpa de madera y papel (Figura 11).

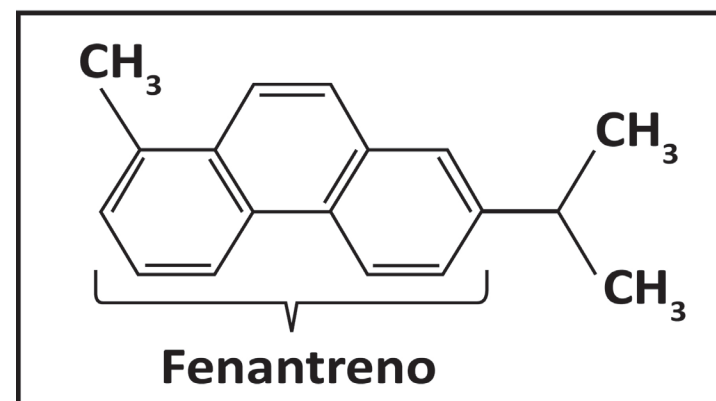


Figura 11.

Estructura química del Reteneno, molécula que se estructura a partir del Fenantreno.

c. Variación de Concentraciones de CO en la Atmósfera por Quema de Biomasa

La calefacción por leña ha sido uno de los recursos energéticos más empleados de larga data, particularmente en los poblados rurales, pero también en muchos entornos de los grandes conglomerados urbanos. Esta energía que se emplea ampliamente por su menor costo en los períodos invernales, viene a incrementar significativamente la contaminación atmosférica por material particulado (MP10 y MP2.5) y por monóxido de carbono (CO). De ahí que, la presencia tanto de partículas como de CO, se transforman en verdaderos fingerprints a la hora de identificar sus fuentes, principalmente de origen difuso.

Chile no ha estado exento de ello, tanto en ciudades de la zona sur, debido a su clima más frío y a la abundancia de bosques, como en la región Metropolitana, en sus comunas más periféricas y de menor nivel socio-económico. Como caso de análisis se puede presentar un estudio que hemos realizado en el pasado sobre este tema en un análisis comparativo de dos comunas separadas por más de 1.000 km de distancia, pero que mantienen una cultura similar de quema de leña en invierno.

La Comuna de Talagante a 300 m.s.n.m., corresponde a la zona geográfica que desde el sur poniente de la Región Metropolitana antecede a la ciudad de Santiago a unos 500 m.s.n.m., siendo el lugar por donde la cuenca hidrográfica reúne la salida de los dos ríos del valle, el río Maipo y el río Mapocho. Por tanto, es una zona que esta más baja en altura que la ciudad Santiago y forma parte del cañón por donde el aire costero se introduce subiendo al valle de la ciudad de Santiago. De ahí, la importancia de su ubicación estratégica para la ventilación y recambio de aire en la cuenca atmosférica desde el sur poniente, que, de emitir altos niveles de contaminación atmosférica, necesariamente continuarán su camino ascendente a la metrópolis.

Sin embargo, las bajas temperaturas que se han observado durante el mes de junio de 2015

en toda la Región Metropolitana y la ausencia de lluvias durante todo el mes, han inducido en la Provincia de Talagante a una quema significativa de leña como medio de calefacción masivo, atendiendo a su fuerte componente de zona rural de la región.

En la Figura 12 se analizan las fluctuaciones y comportamiento de la contaminación de material particulado fino (MP2.5) medidos en la estación de calidad del aire de Talagante, tanto diarios como semanal durante los episodios críticos de Emergencia y Pre-emergencia observados durante el mes de junio en la ciudad de Santiago.

En particular se ha observado que el monóxido de carbono (CO) se comporta como un trazador apropiado para la quema de leña, siguiendo en paralelo con bastante precisión el comportamiento de las variaciones de MP2.5. De igual modo se ha observado que diariamente se producen dos máximos de concentración, tanto para CO como MP2.5 de manera simultánea, correspondientes a las 8.00 hrs. y hacia la 22.00 hrs.

Los resultados se comparan con la ciudad de Temuco en la zona de una de las dos estaciones del sector de Padre Las Casas, una zona residencial de alto consumo de leña en la Región de la

Araucanía, lugar que sigue un patrón similar de comportamiento al observado en la zona de Talagante (Figura 12).

Efectivamente, el mes de junio del año 2015 fue un mes singular en la historia invernal chilena, pues no tuvo precipitaciones lluviosas, transformándose en el mes de junio más seco del siglo. Sin embargo, las bajas temperaturas contribuyeron a aumentar las emisiones por usos de combustibles de biomasa en la Provincia, lo que conllevó, como se observa de las Figura 13, a un aumento antes no visto de quema de leña, lo que se tradujo en días de episodios por MP2.5, con una correlación de ambas variables muy satisfactorias.

Las figuras adjuntas muestran de manera comparativa la situación experimentada en dos zonas con alto entorno rural como son Talagante en la Región Metropolitana y Padre Las Casas en la Región de la Araucanía. En este último lugar esta bien caracterizado el origen de los Episodios Críticos por la quema de leña a nivel doméstico, y así se observa de los gráficos de MP2.5 y CO. De allí nuestro interés en compararla con Talagante, dado que hasta ahora no se había evidenciado el uso masivo de este combustible en dicha zona. Los resultados son evidentes, en el percentil 99 los resultados que se muestran en los gráficos, presentan una correlación entre MP2.5 y CO de

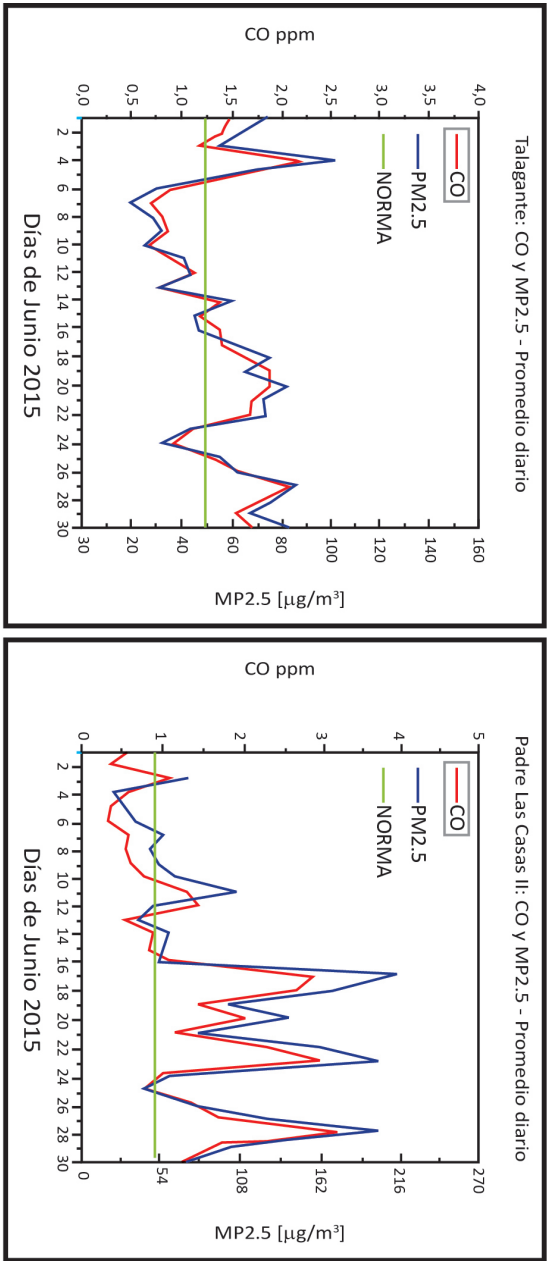


Figura 12.
Determinación de promedios diarios de CO y MP2.5 en dos ciudades de Chile (Gráficos propios de datos extraídos del Sistema de Información Público Nacional de Calidad del Aire, Ministerio del Medio Ambiente, Chile).

Talagante ($R^2 = 0.9299$) y Padre Las Casas ($R^2 = 0.9324$) muy satisfactoria, quedando a la vista el comportamiento del CO como trazador de la combustión de biomasa para estos efectos.

d. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos Derivados de la Combustión de Petróleo

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son una particular serie de familias moleculares que pueden ser usados como trazadores de contaminación atmosférica, particularmente presentes en atmósferas industriales, pero también en la contaminación ambiental urbana, producto de las emisiones provenientes del uso de combustibles derivados del petróleo en el transporte público y privado. A su vez, es un hecho ampliamente conocido que los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentan efectos nocivos en la salud humana y en los ecosistemas en general.

Estos HAPs han sido detectados en una serie de otros procesos de combustión incompletos que involucran al carbón, maderas, basuras, etc., incluso en la quema de tabaco y de carne asada a fuego. Estos residuos que se generan desde una incineración de bajas temperaturas, suelen incorporarse a la fase aérea por humos, vale decir, gases y partículas, estas últimas dando origen al carbono negro u hollín. A pesar de su complejidad química, estas especies, además, suelen for-

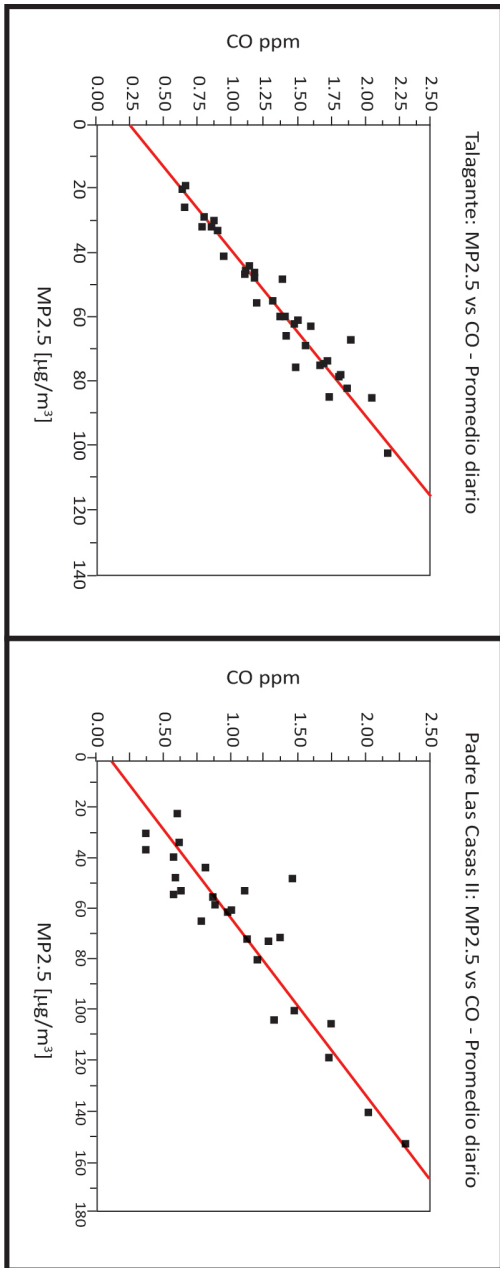


Figura 13.
Correlación de datos de promedios diarios de Monóxido de Carbono (CO) y MP2.5 en dos ciudades de Chile (Correlaciones propias de datos extraídos del Sistema de Información Público Nacional de Calidad del Aire, Ministerio del Medio Ambiente, Chile).

mar parte de materiales de uso cotidiano, a partir de derivados del residuo terminal del proceso de producción de combustibles en las refinerías de petróleo, integrándose al uso masivo como asfalto de carreteras y alquitrán, entre otras aplicaciones.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Norteamérica (U.S.A.), ha establecido un conjunto de estos HAPs como especies con actividad toxicológica, pero que dado su carácter propio de formación como agentes químicos derivados de procesos de combustión, pueden ser para nuestros efectos considerados como efectivos trazadores de procesos de combustión cuyas fuentes pueden ser altamente identificables de acuerdo a los productos descritos (https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs69.html).

De entre los más frecuentes se pueden distinguir las familias derivadas de Naftaleno, Antraceno, Criseno, Coroneno, Fenantreno, Fluoreno, Perileno y Pireno, por lo general con especies sustituidas del tipo hidrocarburos alifáticos y aromáticos (Figura 14).

Ya en el año 1995, el grupo de investigación del Dr. Lionel Gil en Chile, determinó en el material particulado de la ciudad de Santiago un total de 18 especies HAPs, entre los cuales seis han sido descritos como cancerígenos por

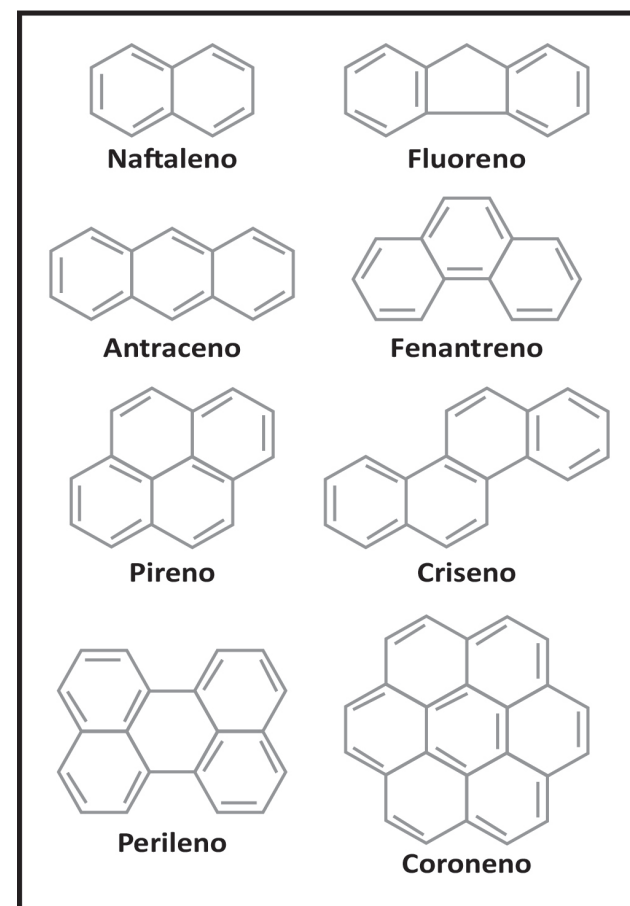


Figura 14.
HAPs que dan origen a especies sustituidas por anillos aromáticos adicionales.

la OMS: benzo(a)antraceno, benzo(a)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno e indeno(c,d)pireno. Especies todas derivadas de la combustión de petróleo, principalmente para motores diesel (Cuad.Méd. Soc. XXXVI, 4, 9-15(1995)).

e. De Bencenos a Metilderivados y Xilenos (BTEX)

Los BTEX son un acrónimo para describir a un conjunto de compuestos orgánicos volátiles (COV) obtenidos a nivel industrial en gran escala a partir de la estructura principal del benceno. Estas especies son Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos o Dimetilbenceno sustituidos (Figura 15) en las posiciones orto-, meta- y para-. Sus principales fuentes provienen de la gasolina, o como solventes de uso doméstico, industrial, preparación de pinturas y de almacenamiento de hidrocarburos en general. A temperatura ambiente son altamente volátiles e inflamables, siendo insolubles en agua.

Por otra parte, estas especies moleculares presentan distintos niveles de reactividad a la oxidación y fotoquímica, siendo las razones de concentración a través del tiempo de estas especies, criterios de trazabilidad de fuentes contaminantes. Entre los más frecuentes usados en este tipo de análisis se encuentran los pares de especies como: etilbenceno/xileno y benceno/tolueno.

f. Dioxinas y Furanos como Compuestos Orgánicos Persistentes

Las dioxinas y furanos constituyen dos familias de compuestos orgánicos aromáticos

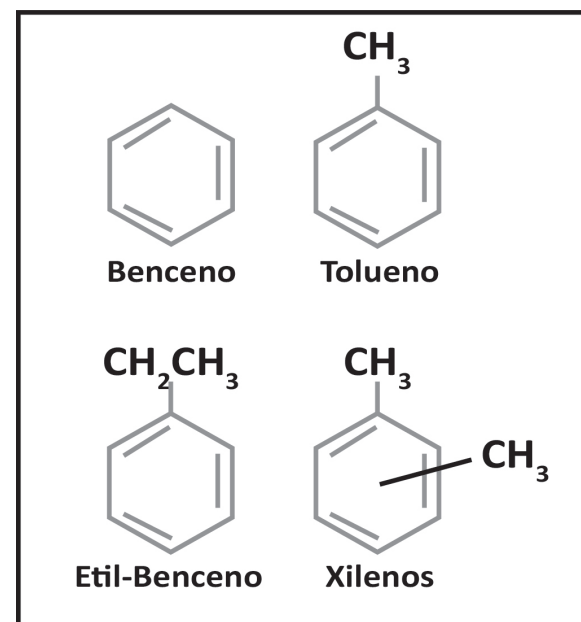


Figura 15.
BTEX correspondientes a Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos, especies que a su vez pueden estar sustituidas por grupos Metilos.

del tipo cloropolisustituídos, conocidos como especies altamente estables en el ambiente atmosférico, caracterizados como Compuestos Orgánicos Persistentes (COP), de alta toxicidad. Estas especies moleculares, por lo general resultan ser formadas en procesos de combustión incompleta, ya sea por incendios forestales o por quema de basuras domiciliarias conteniendo materiales plásticos, restos de neumáticos, residuos derivados de algunos procesos

sanitarios e industriales, entre los que se cuenta el blanqueo de pulpa de papel por especies cloradas o la fabricación de ciertos herbicidas desfoliantes e insecticidas en el control de plagas.

Estas familias se constituyen en torno a dos especies químicas, cuyas estructuras de base son el Tetrahydrofurano (THF) y su Dibenzo-furano, y la Dioxina o Dibenzo-para-dioxina (DBD), las cuales, al ser sustituidas preferencialmente por átomos de cloro, bromo y otros metilderivados en sus anillos aromáticos, van dando origen a más de un centenar de especies con diferentes niveles de toxicidad (Figura 16).

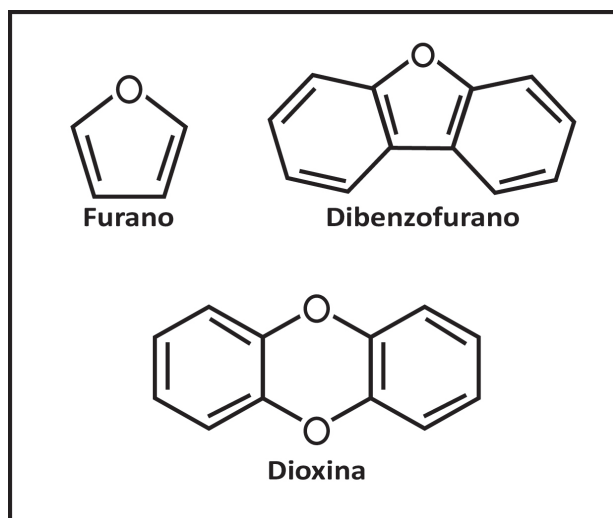


Figura 16.
Tetrahydrofurano o Furano, Dibenzofurano y Dioxina o Dibenzo-para-dioxina

Dado su alta solubilidad en tejidos grasos, aceites y solventes orgánicos en general, estos compuestos químicos derivan desde el aire en finas partículas normalmente en cristallitos blancos o transparentes, hasta depositarse en los suelos e incorporarse a las cadenas tróficas alimentarias, llegando finalmente a encontrarse en alimentos cárneos a nivel de trazas, en nano y pico gramos, siendo incluso en esa escala altamente tóxicos para la salud de las personas, con efectos cancerígenos a nivel de piel y otros órganos, así como también afectaciones sobre el sistema inmunológico y hormonal.

g. Trazadores de Especies Geológicas y Metales

La meteorización de rocas y suelos como fuentes de material particulado atmosférico, producto de fenómenos químicos y físicos que ocurren en el ambiente, terminan originando una clase de material particulado en suspensión, por lo general del tipo grueso MP10, cuya denominación de particulado Crustal, resulta ser propio de los minerales asociados a la roca madre del suelo. De ahí, la aparición de elementos atómicos como sodio, potasio calcio, silicio y aluminio, en contenidos salinos provenientes de silicatos, carbonatos, óxidos, hidróxidos, sulfatos y fosfatos, han de ser considerados al momento de establecer los ele-

mentos contaminantes provenientes de fuentes antropogénicas.

En tanto que, fuentes de actividades antropogénicas ligadas a la industria, como las del acero, generan aerosoles que conllevan especies atómicas como hierro, cromo, níquel, molibdeno, manganeso y cobre, en tanto que otras industrias como cerámica generan partículas de cesio, zirconio y plomo, y en el caso de refinerías de petróleo o centrales eléctricas le son más propios especies como titanio, vanadio, cromo, níquel, zinc, arsénico y antimonio. No siendo despreciable el aporte que realizan el tráfico vehicular y el desgaste de neumáticos y frenos, con elementos como zinc, molibdeno, bario, cobre y antimonio. De ahí que el conocimiento de los inventarios de emisiones pasa a ser una información de base fundamental para poder establecer la naturaleza de los procesos de contaminación que pudiesen estar vinculados a situaciones propias de investigación de contaminantes específicos que corresponden al ámbito de la forensica ambiental.

Por otra parte, la contribución atómica y molecular que hacen los mares y los océanos a la conformación del aerosol marino en el borde costero, resulta ser un factor significativo y determinante de la composición atmosférica tanto urbana como rural de estas zonas marítimas. De hecho, se estima que a nivel planetario, se incor-

poran a la atmósfera del orden de 2.000 a 5.000 millones de toneladas de material particulado menor a 25 micrometros, siendo cerca del 40% particulado fino.

De las especies constituyentes del aerosol marino se encuentran cationes del tipo sodio, magnesio, calcio y potasio, en tanto que a nivel de aniones se encuentran cloruros, bromuros, sulfatos y carbonatos. Sin embargo, la producción de dimetilsulfuro (DMS) por fitoplancton, también introduce una serie de otras especies moleculares orgánicas debido a las reacciones fotoquímicas y procesos de oxidación atmosférica inducidas a partir de esta especie DMS (Figura 17), contribuyendo con sus procesos foto-oxidativos a la formación del dióxido de azufre (SO_2) y ácido metanosulfónico ($\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$).

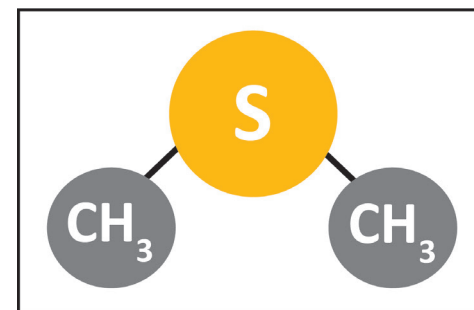


Figura 17.
Fórmula molecular del dimetilsulfuro (DMS).

Por otra parte, estudios asociados a la liberación de metales a la atmósfera desde incineradores de desechos municipales, o quemas en vertederos o rellenos sanitarios, han sido focos de estudio, en relación a seguir como fingerprints las ratios observadas por pares de elementos contaminantes.

Un caso interesante lo constituye un estudio desarrollado en el Reino Unido para emisiones gaseosas de un conjunto de seis Incineradores de Residuos Municipales (IRM), con poblaciones cercanas a 10 km de los mismos, en el que se identificaron ratios características de concentración de metales comparando con las especies existentes en el entorno ambiental de estas fuentes de contaminantes.

De la Tabla 1 se desprende que aquellos pares de metales que correlacionaron por sobre un $R > 0.75$, fueron definidos como especies apropiadas para definirlos como fingerprints, los cuales fueron seleccionados de un conjunto de especies integradas por As, Cd, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V y Hg.

De los resultados que se desprenden para estos casos, las ratios encontradas pueden ser consideradas como fingerprints para este tipo de contaminantes provenientes de Incineradores en entornos cercanos a poblaciones urbanas. Sin embargo, debe ser necesario contar con infor-

mación de base sobre otras posibles fuentes de metales en el área urbana de que se trate.

Tabla 1 Ratios representativas de emisiones de metales en MP provenientes desde seis Incineradores de Residuos Municipales del Reino Unido	
Cu/Pb	0.83 [0.67–0.99]
Cd/Pb	0.08 [0.06–0.10]
Cd/Cu	0.14 [0.12–0.170]
Cr/Pb	0.564 [0.38–0.75]
Ref. A. Font et al. Atmospheric Environment, 113, 177-186 (2015)	

h. Caracterización Isotópica de Especies en Residuos o Contaminantes Atmosféricos

Las variaciones isotópicas de las especies que se constituyen en contaminantes atmosféricos también permiten generar una huella isotópica como fingerprint ambiental. A su vez, la espectrometría de masas se ha constituido como un instrumento fundamental en este tipo de investigaciones.

La distribución isotópica de los elementos estables sigue patrones propios de acumulación en la biota y en el ecosistema físico, por lo que

caracterizaciones de origen y comparaciones con distribuciones isotópicas patrones permiten finalmente establecer análisis comparativos que determinan un tipo de isotópico sobre otro.

Por ejemplo, azufre presenta un conjunto de tres isótopos estables, ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S y ^{36}S , siendo el más abundante el isótopo 32. De modo que, mediante un método estandarizado con respecto a las determinaciones de la ratio de dos isótopos estables, en este caso de azufre 34 y 32, éstos pueden dar indicios de una fuente contaminante característica de acuerdo a la función delta, según se presenta en la Figura 18.

Hay una amplia literatura que ha ido cubriendo los temas de usos isotópicos provenientes de materiales específicos de una región o proceso biodinámico, lo que ha permitido diferenciar fuentes de contaminación según la región geográfica, movimiento de materia orgánica, aspectos botánicos y procesos de mineralización, como de materiales de origen fósil (carbón, petróleo, etc.).

A su vez, muchos de estos materiales y sus correspondientes procesos se pueden rastrear desde fingerprints tanto de isótopos de carbono, como de nitrógeno, azufre, oxígeno e hidrógeno, permitiendo clasificar sus fuentes, escalas de tiempo y cantidades de forma proporcional.

De éstos, un caso particular lo provee el átomo de carbono, al generar una típica huella isotópica o fingerprint. Como se sabe, los isótopos ^{12}C y ^{13}C son especies estables desde el punto de vista radiactivo, no así, el ^{14}C , ampliamente usado para la datación de especies antiguas al tener una vida media de 5.730 años.

$$\delta^{34}\text{S} = \left[\frac{\left[\frac{^{34}\text{S}}{^{32}\text{S}} \right]_{\text{muestra}}}{\left[\frac{^{34}\text{S}}{^{32}\text{S}} \right]_{\text{estandar}}} - 1 \right] \times 10^3\%$$

Figura 18.
Fórmula para la obtención de una función delta de dos isótopos estables de azufre de una muestra respecto de una referencia estandarizada.

Sin embargo, ha de saberse que el ^{14}C se produce en la alta atmósfera por la impactación de neutrones, producidos por rayos cósmicos provenientes del sol, sobre átomos de nitrógeno atmosféricos, en una reacción nuclear expresada en la Figura 19, sistema en que a su vez el C-14 sigue su propia desintegración radiactiva:

Este proceso de reacciones nucleares y desintegraciones alcanza su estado de equilibrio en

la atmósfera, en donde los C-14 se van incorporando a la biota y a sus procesos bioquímicos de forma gradual y proporcional a la distribución porcentual propia del total de los isótopos de carbono, en cada uno de los equilibrios químicos correspondientes.

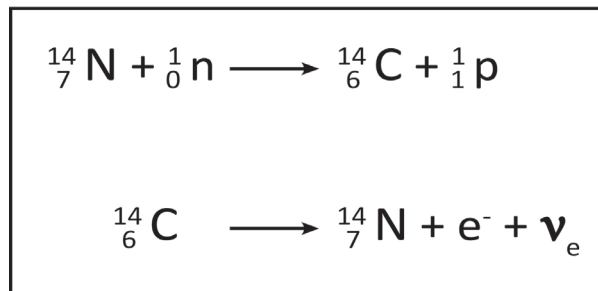


Figura 19.
Reacciones nucleares de la formación de carbono 14 y su correspondiente desintegración radiactiva.

Sin embargo, las especies orgánicas al quedar aisladas del intercambio atmosférico o por término de procesos de intercambio de materia con su medio, su contenido de carbono radiactivo se va perdiendo y por tanto, el C-14 disminuye en función del tiempo de acuerdo a la ecuación diferencial de desintegración nuclear y su solución a tiempo t (Figura 20). Así, en esta ecuación diferencial de primer orden, que da cuenta del proceso de desintegración radiactiva de C-14, N_0 representa al número de átomos de C-14 iniciales en la muestra y $N(t)$ al número de átomos de C-14 a tiempo t , en donde λ es la

constante de desintegración radiactiva (1/5.730 años).

Ecuación diferencial

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N$$

Solución

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Figura 20.
Desintegración nuclear y su solución a tiempo t para una ecuación diferencial de primer orden.

Es sobre esta base que se puede usar para datación el C-14, atendiendo que las variaciones de C-12 y C-13 permanecen inalteradas después de muchos miles de años.

Son estas propiedades de las variedades isotópicas, tanto en su composición como en sus tiempos de vida media, que pueden, adecuadamente, constituirse en verdaderos trazadores o fingerprints de determinados contaminantes o sus correspondientes variaciones en el tiempo.

En general, a parte de los isótopos estables, cuya distribución relativa permite generar una modalidad de detección de fingerprints por la

función delta, también conjuntos de radioisótopos para determinados ámbitos de interés, como en forense ambiental, pueden generar información valiosa en la determinación de fuentes de origen como se señalan algunas a continuación:

a. Radioisótopos en Rocas: ^3He , ^{10}Be , ^{14}C , ^{21}Ne , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{38}Ar y ^{53}Mn .

b. Radioisótopos en Suelos y Sedimentos: ^3He , ^{10}Be , ^{14}C , ^{21}Ne , ^{26}Al , ^{36}Cl y ^{39}Ar .

c. Radioisótopos en Glaciares: ^{10}Be y ^{14}C .

d. Radioisótopos en Biomasa: ^{10}Be y ^{14}C .

e. Radioisótopos en Aguas: ^{40}K , ^{214}Pb , ^{222}Rn ,

Sección 3. Conclusiones

La Forense Ambiental se nos presenta como una disciplina nueva y reciente en el campo de los estudios ambientales, particularmente con la puesta en marcha de Tribunales Ambientales, los cuales buscan establecer justicia frente a las situaciones de daño ambiental que en las diferentes constituciones o cartas magnas de la mayoría de los países, hoy se presenta como una forma de proteger el Medio Ambiente.

Las técnicas analíticas que tanto en las disciplinas experimentales de la Física como de la Química se constituyen como herramientas fundamentales a la hora de caracterizar determinados tipos de muestras gaseosas, líquidas o sólidas, es el contexto en que se obtienen estas muestras lo que permite finalmente caracteri-

zar las dinámicas y procedencias de las fuentes emisoras de contaminantes, lo que finalmente redundará en la identificación de los impactos ambientales y los efectos que generan sobre el medio ambiente.

En los últimos años se han venido desarrollando una amplia casuística derivada de las experiencias internacionales y nacionales sobre impactos ambientales sobre los ecosistemas naturales, tanto en sus correspondientes ámbitos físicos y biológicos, aportando experiencias únicas a la hora de establecer responsabilidades producto del daño ambiental generado. De ahí que la consulta bibliográfica que se puede recoger de fuentes de comunicación diversas, se ha ido expandiendo a través de las redes de internet y medios escritos tanto periodísticos como literatura científica.

Por otra parte, la formación sistemática en Forénsica Ambiental comienza a extenderse a través de cursos, programas de perfeccionamiento y encuentros científicos de análisis de casos y experiencias metodológicas que van conformando el actual desarrollo de esta disciplina incipiente.

Es por ello que a continuación se presentan un conjunto de textos y recopilaciones que pueden ser interesantes a quienes hoy día están iniciando un proceso formativo en esta nueva

vertiente de la formación científica en el área ambiental, cuyos alcances están orientados a establecer responsabilidades y definir niveles de impacto. En este sentido, los sistemas de justicia ya han comenzado a operar en el interés de preservar el bien común, público o privado, desde una perspectiva en que socialmente ya se ha ido estableciendo que el desarrollo sustentable requiere de un manejo apropiado y respetuoso de continuar conviviendo en un ambiente libre de contaminación y con preservación, o en su defecto, con compensación de las alteraciones ambientales que pueden formar parte del necesario uso del territorio.

Sección 4.
Recomendaciones de Literatura sobre
Forénsica Ambiental

1. Eds. Scott A. Stout and Zhendi Wang.
*Standard Handbook of Oil Spill,
Environmental Forensics, Fingerprinting
and Source Identification*. Elsevier
Academic Press (2016). London, UK. ISBN
978-0-12-809695-8
2. Eds. Brian L. Murphy and Robert D.
Morrison. *Introduction to Environmental
Forensics* Third Edition. Elsevier Academic
Press (2015). CA. USA. ISBN 978-0-12-
404696-2.

3. Ed. Stephen M. Mudge. *Methods in Environmental Forensics*. CRC Press. Taylor & Francis Group (2009). Florida, USA. ISBN 13: 978-0-8493-5007-8.
4. Eds. Karl Ritz, Lorna Dowson and David Miller. *Criminal and Environmental Soil Forensics*. Springer Science + Business Media (2009). London UK ISBN 978-1-4020-9204-6, ISBN e 978-1-4020-9204-6.
5. Eds. Stephen M. Mudge, Scott E. Belanger and Allen M. Nielsen. *Fatty Alcohols, Anthropogenic and Natural Occurrence in the Environments*. RSC Publishing. Published by the Royal Society of Chemistry (2008). Cambridge, UK. ISBN 978-0-85404-152-7.
6. Eds. Robert D. Morrison and Brian L. Murphy. *Environmental Forensics, Contaminant Specific Guide*. Elsevier Inc. London UK (2006). ISBN 13: 978-0-12507751-4, ISBN 10: 0-12-50775.
7. I. G. Petrisor, *Environmental Forensics Fundamentals. A Practical Guide*, CRC Press, Taylor & Francis Group (2014). ISBN 13:978—1-4665-7159-4 (eBook-PDF).
8. *Anuarios del Tribunal Ambiental de Santiago* (años 2013 al 2023).
<https://tribunalambiental.cl/informacion-institucional/sobre-el-tribunal-ambiental/anuario/>

Entre otras actividades, ha sido Director del Centro Nacional del Medio Ambiente, Director del Departamento de Química y Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile (2002-2010). Ha publicado mas de ochenta artículos científicos en Fisicoquímica Molecular, Ciencias Ambientales y Astroquímica, con más de un centenar de presentaciones y diversas conferencias en Congresos Nacionales e Internacionales. También ha realizado, como parte de su interés académico, publicaciones sobre Políticas Públicas en Educación, en Medio Ambiente y en Ciencia y Tecnología. Además ha sido Profesor Visitante en diferentes instituciones universitarias de Chile, Latinoamérica, Europa y Japón.

Con más de cuarenta años en docencia universitaria ha sido un pionero de la Educación Ambiental y formación profesional en el Campo Ambiental, contribuyendo en los últimos años al desarrollo de la disciplina de la Forénsica Ambiental, y dictando conferencias en las primeras Jornadas de Forénsica Ambiental realizadas en la Universidad de Concepción y en la Universidad de Chile.

Recibió el año 2009 de la Sociedad de Química Ambiental de Chile la máxima distinción que esta entidad otorga: **Premio a la Trayectoria Nacional en Ciencias Ambientales**; y por su destacada trayectoria académica y compromiso con su ciudad natal, la Ilustre Municipalidad de San Antonio le otorgó la distinción de **Hijo Ilustre** en el año 2010.

Edición del Centro de Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias
Universidad de Chile

Santiago de Chile
Año 2025