

Estudio de contaminantes orgánicos atmosféricos tóxicos no regulados: implicaciones y desarrollos tecnológicos

Conferencia Magistral # 8

Omar Amador-Muñoz, Mariana Ramos-Cerón, Margarita Martínez-Domínguez, Armando Retama-Hernández, Olivia Rivera -Hernández, Manuel García-Espinoza, Emiliano Santa María de la Rosa, Oscar Rangel-Reyes, J. Francisco Bernal-Campos, Erika González-Lira

Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos – LEQAOA –



CIUDAD DE MÉXICO
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN



CALIDAD
DEL AIRE



CIUDAD DE MÉXICO
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA,
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN



Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

Mayo 15, 2025, 10:00 h



Contenido

1. Introducción

2. Mediciones automáticas para la especiación química

2.1. Fase particulada

2.2. Fase gaseosa

2.3. Implicaciones

3. Mediciones manuales para la especiación química

3.1. **Desarrollo tecnológico # 1, Aerosol**

3.2. **Desarrollo tecnológico # 2, Fase particulada**

3.3. **Desarrollo tecnológico # 3, Fase gaseosa**

■ ¿Porqué estudiar la contaminación atmosférica?

Air Pollution Data Portal

Burden of disease

6.7 million

deaths in 2019 from exposure to ambient and household air pollution

Household exposure

2.1 billion

people primarily rely on polluting fuels and technologies for cooking in 2022

Ambient exposure

99%

of the world's population live in places where air pollution levels exceed WHO guideline limits



<https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/ambient-air-pollution>

• **Efectos en salud**

- Enfermedades cardíacas
- Infartos cerebrovasculares (apoplejía)
- Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas
- Modificación endócrina
- Problemas neurológicos
- Cáncer, etc.

<https://www.who.int/data/gho/data/themes/theme-details/GHO/air-pollution>

Guías de la OMS – Contaminantes criterio

Table 0.1. Recommended AQG levels and interim targets

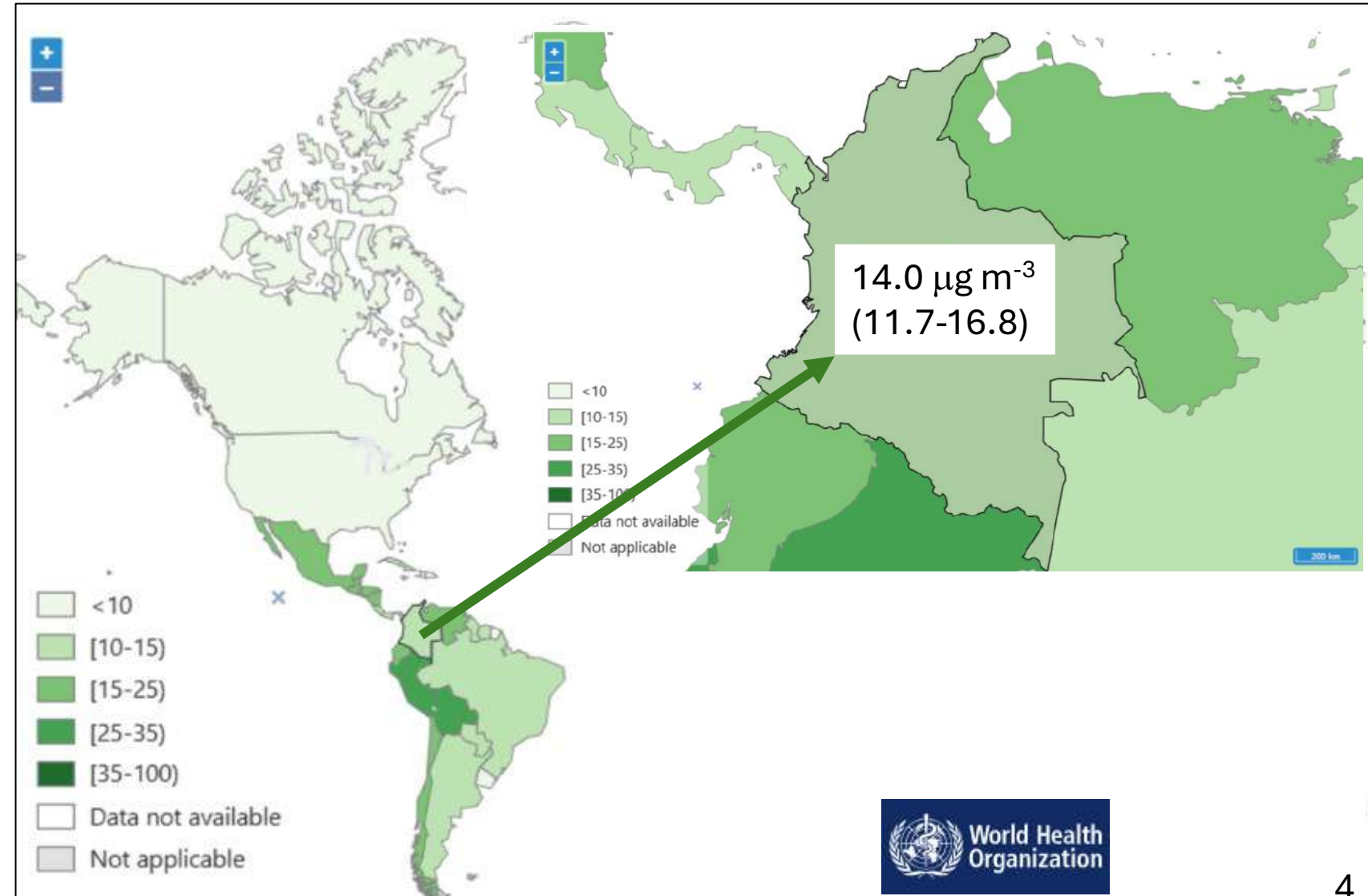
Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
$\text{PM}_{2.5}$, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour ^a	75	50	37.5	25	15
PM_{10} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour ^a	150	100	75	50	45
O_3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peak season ^b	100	70	–	–	60
	8-hour ^a	160	120	–	–	100
NO_2 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	40	30	20	–	10
	24-hour ^a	120	50	–	–	25
SO_2 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24-hour ^a	125	50	–	–	40
CO , mg/m^3	24-hour ^a	7	–	–	–	4

^a 99th percentile (i.e. 3–4 exceedance days per year).

^b Average of daily maximum 8-hour mean O_3 concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O_3 concentration.

WHO global air quality guidelines

Particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide

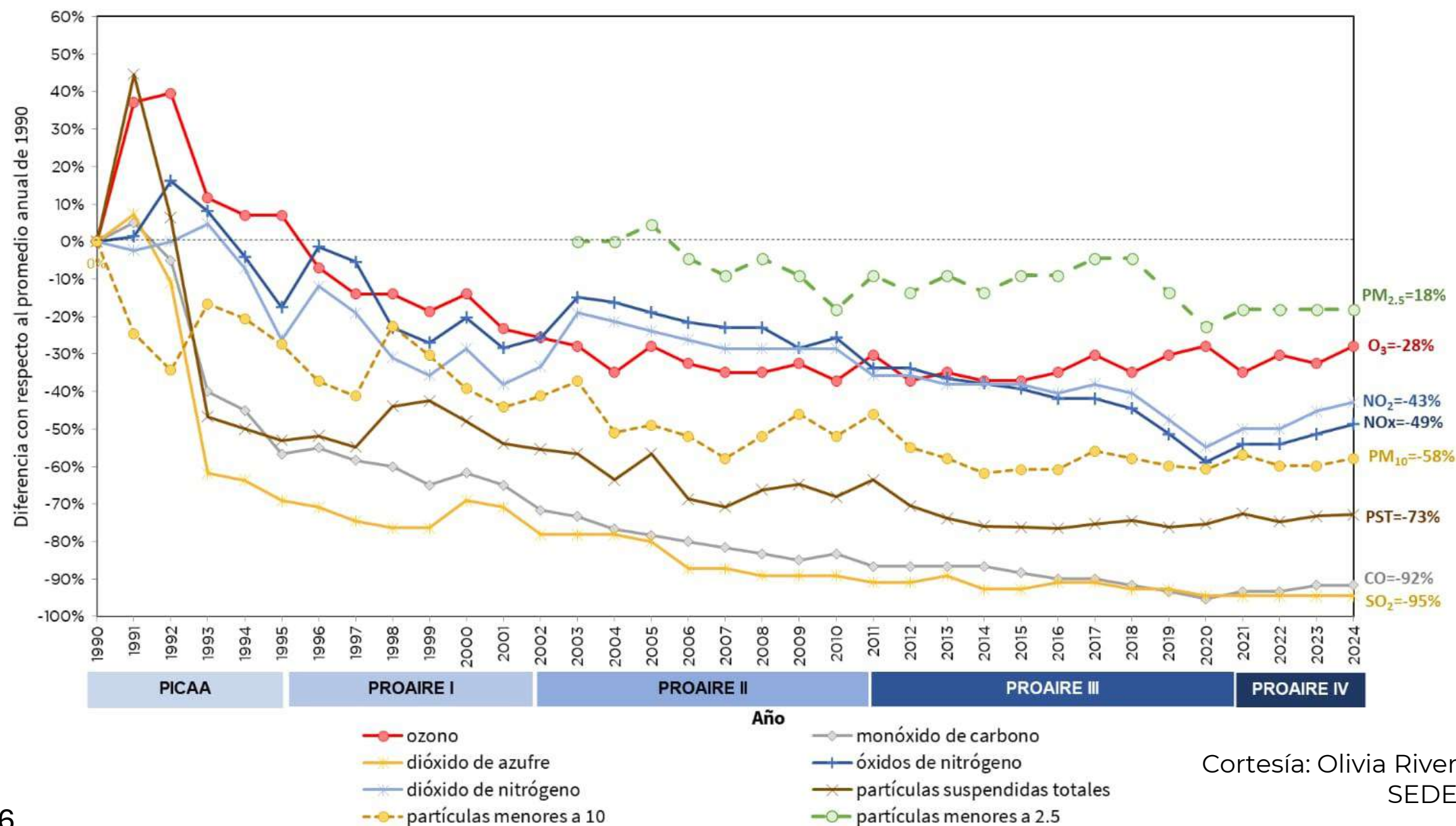


Contaminantes regulados (México)

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-022-SSA1-2019	20 de agosto de 2019	0.075 ppm, promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario 0.040 ppm, máximo promedio de 24 h
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-2021	29 de octubre de 2021	26 ppm, promedio horario 9 ppm, promedio móvil de 8 h
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-2021	27 de octubre de 2021	0.106 ppm, promedio horario 0.021 ppm, promedio anual
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1-2021	28 de octubre de 2021	Años 2022-2023: 0.090 ppm, promedio horario 0.065 ppm, promedio móvil de 8 h Años 2024-2025: 0.090 ppm, promedio horario 0.060 ppm, promedio móvil de 8 h A partir de 2026: 0.090 ppm, promedio horario 0.051 ppm, promedio móvil de 8 h
Partículas suspendidas totales (PST)			Derogada
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	NOM-025-SSA1-2021	27 de octubre de 2021	Años 2022-2023: 70 µg/m ³ , promedio de 24 h y 36 µg/m ³ , promedio anual Años 2024-2025: 60 µg/m ³ , promedio de 24 h y 28 µg/m ³ , promedio anual A partir de 2026: 50 µg/m ³ , promedio de 24 h y 20 µg/m ³ , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-2021	27 de octubre de 2021	Años 2022-2023: 41 µg/m ³ , promedio de 24 h y 10 µg/m ³ , promedio anual Años 2024-2025: 33 µg/m ³ , promedio de 24 h y 10 µg/m ³ , promedio anual A partir de 2026: 25 µg/m ³ , promedio de 24 h y 10 µg/m ³ , promedio anual
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-2021	29 de octubre de 2021	0.5 µg/m ³ , promedio anual obtenido mediante muestreos manuales de PM ₁₀

Dirección General de Calidad del Aire
Gobierno de la Ciudad de México.
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>

Tendencia de los contaminantes criterio desde 1990



Cortesía: Olivia Rivera, SIMAT-DCA,
SEDEMA, GobCdMx

Contaminantes atmosféricos

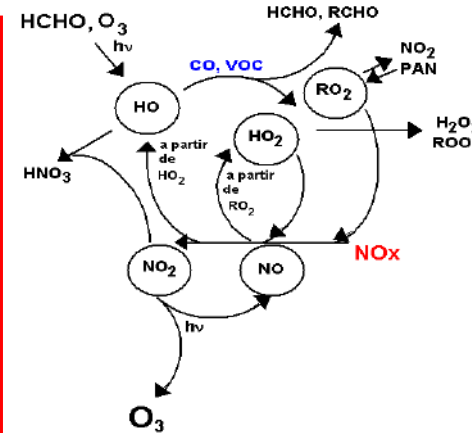
• **Primarios:** Emitidos a la atmósfera

- Vehículos
- Industria
- Domésticos
- Agricultura
- Quema de biomasa
- Erupciones volcánicas
- Geogénico
- Biogénico



• **Secundarios:** Formados en la atmósfera

- Fotoquímicos: Ozono, peróxidos
- Oxidación: Sulfatos, nitratos (SIA)
- Fotooxidación: Aerosol orgánicos secundario (SOA)



Aerosol inorgánico secundario, (SIA)



(Miyakawa et al. 2007, JGR, 112, D13209)



- Multicomponente
- Mezcla compleja

Fase gas

- NO_2
- SO_2
- CO
- O_3
- Compuestos orgánicos volátiles (COVs), etc

+

Fase particulada (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1)

Inorgánica

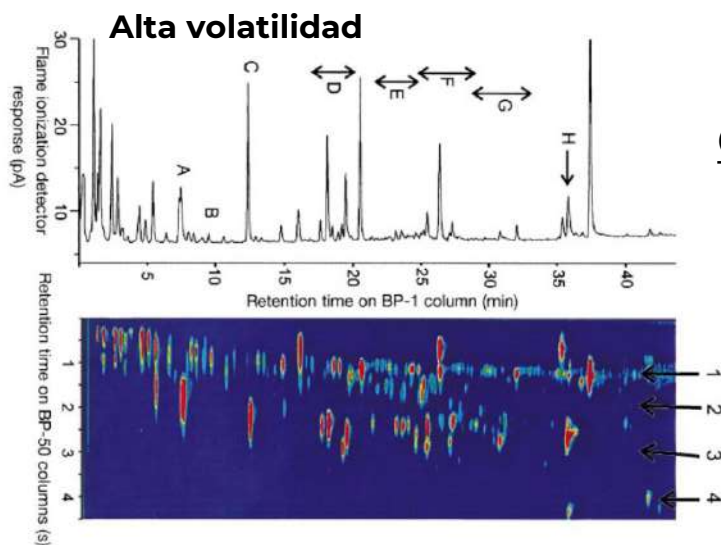
- Carbono elemental
- Metales
- Iones, sales, etc

Orgánica

- HAP
- Ftalatos
- Ácidos, etc

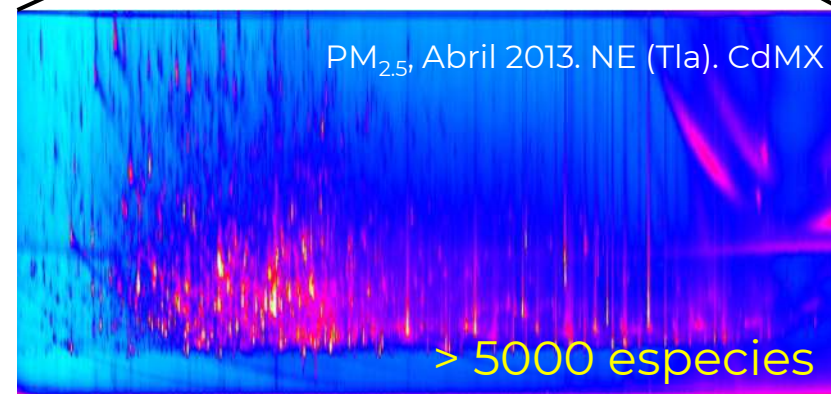
Material biológico

- Pólenes
- Bacterias
- Virus, etc.



GCxGC-TOF-MS

Volatilidad intermedia y baja





Mediciones automáticas para la especiación química



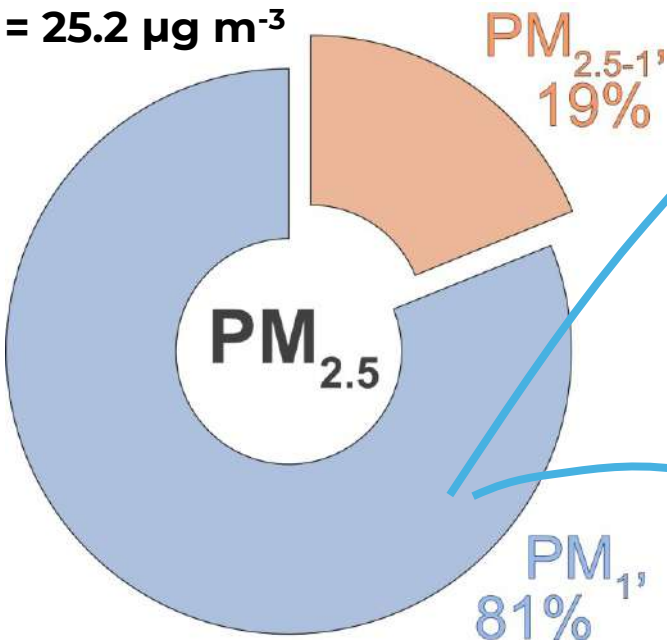
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

Composición química de la fase particulada

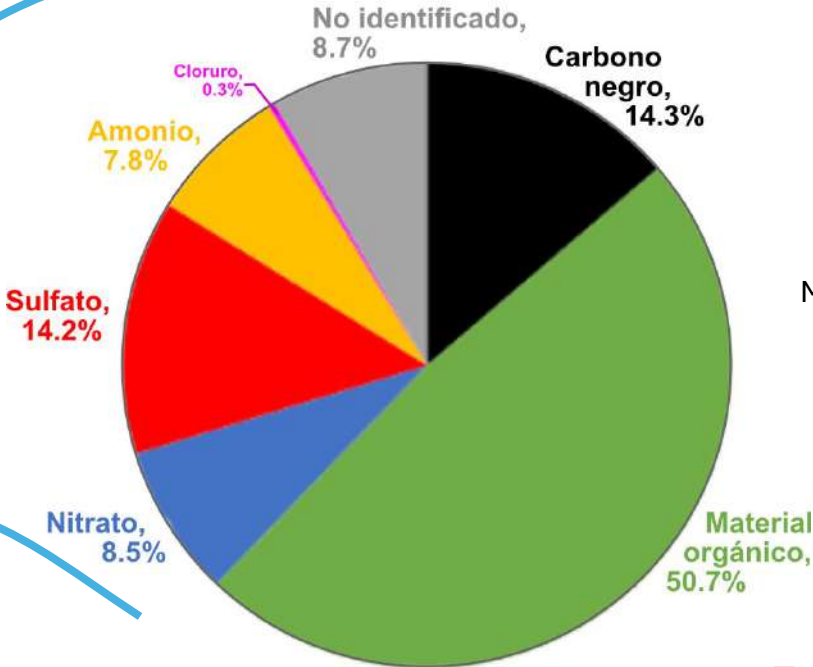
- Norte Cd. México
- Mayo – Junio 2022



$PM_{2.5} = 25.2 \mu g m^{-3}$



$PM_1 = 20.4 \mu g m^{-3}$



Mariana Ramos (2024)
Tesis **Maestría**,
PCT-UNAM

Beneficios

Monitor de $PM_{2.5}$ y PM_1 , Grimm, c/min



Monitor de especiación química de aerosoles **ACSM**, c/ 30 min



Al reducir:	Se disminuye:
Orgánicos	$PM_{2.5}$, O_3 y toxicidad
Carbono negro	$PM_{2.5}$ y toxicidad (calentamiento local y global)
Sulfato	$PM_{2.5}$
Nitrato	$PM_{2.5}$ y O_3
Amonio	$PM_{2.5}$

Compuestos orgánicos de volatilidad intermedia y baja

91 especies orgánicas en PM_{2.5}
Abril-mayo 2022

Termodesorbedor de
compuestos orgánicos
TAG-GC-MS



Control de Calidad

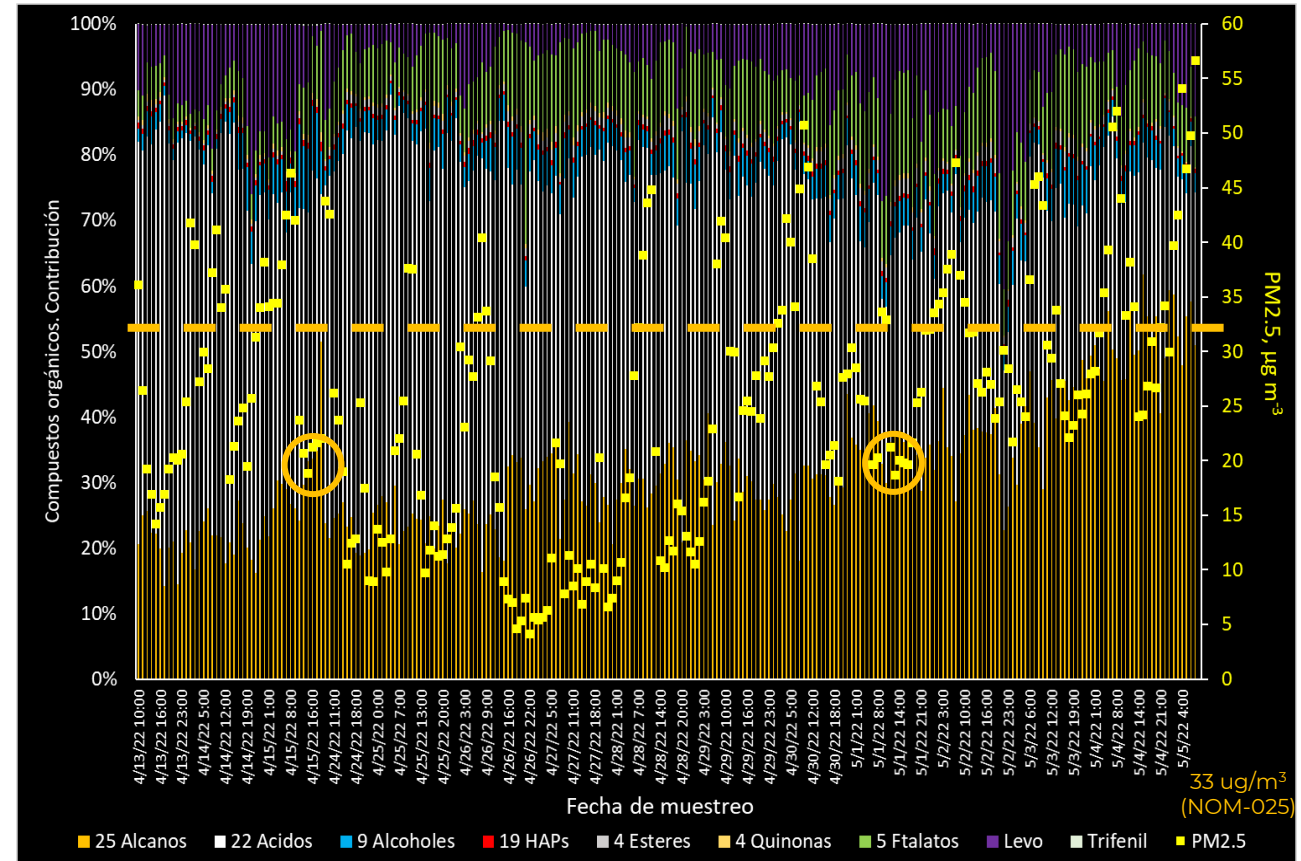
- Dil. Isot.
- Eficiencia
- Precisión
- Reg. Pond
- LD, LC



Margarita Martínez
Tesis **Doctorado**,
PCQ-UNAM
En proceso

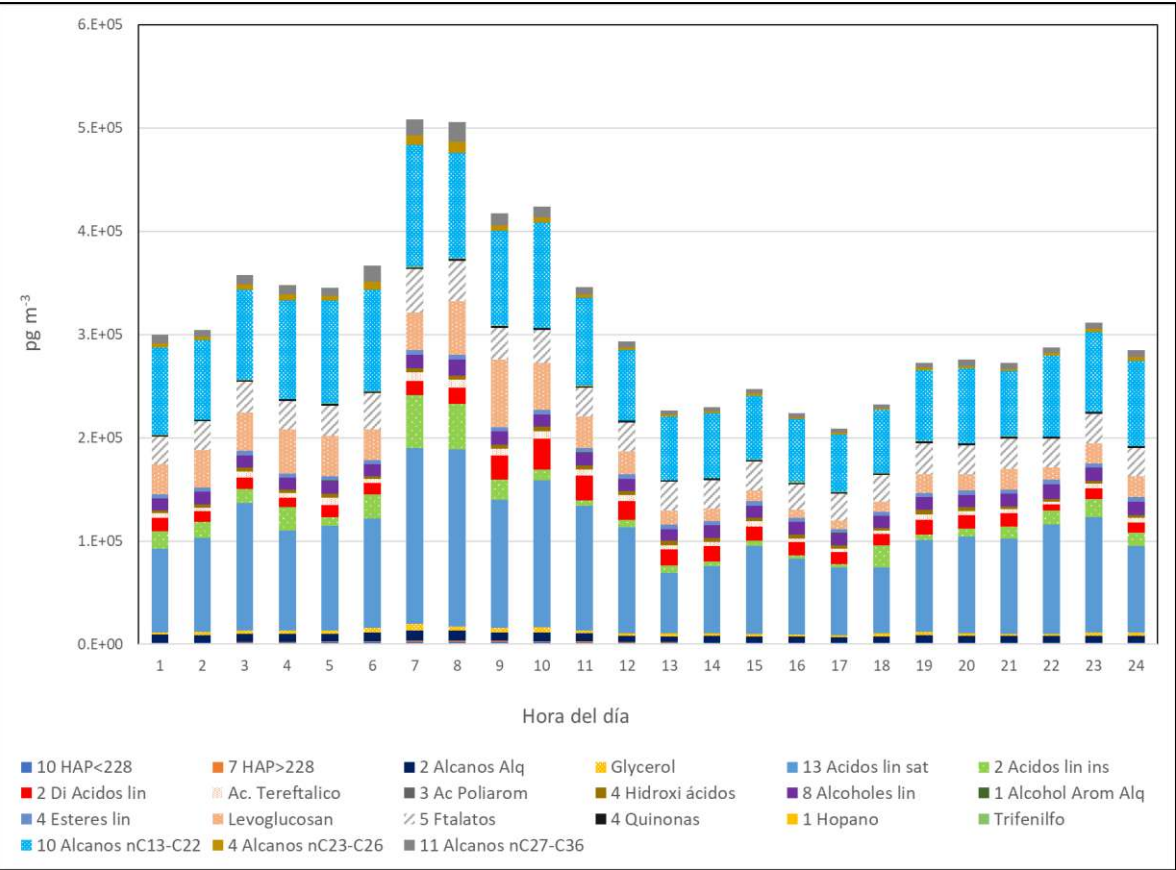
Universidad California, Berkeley
Aerodyne (<https://aerodyne.com/>)
SIMAT-DCA, SEDEMA

- La composición y la concentración de las partículas, no siempre correlacionan.
- La toxicidad es función de la composición química.
- La normatividad debe considerar la composición y la toxicidad.

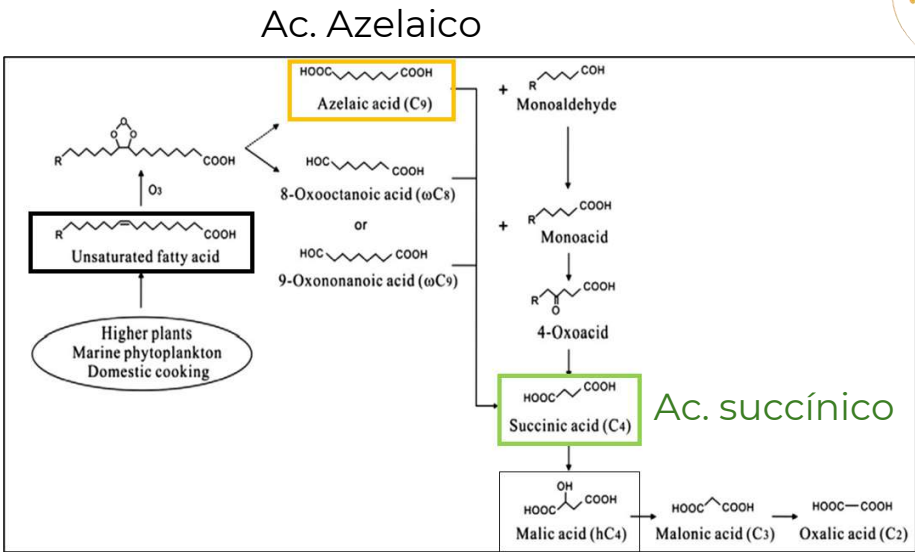


Compuestos orgánicos de volatilidad intermedia y baja

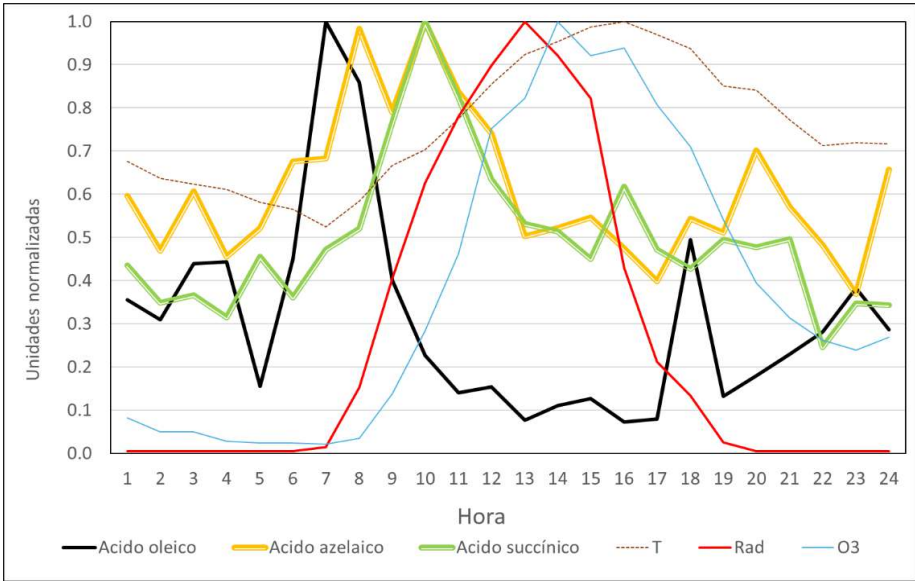
- La atmósfera ya amanece con carga de compuestos orgánicos.
- Principales fuentes de emisión: **Diesel** (evaporación y combustión, **cocción de alimentos** y **plásticos**)



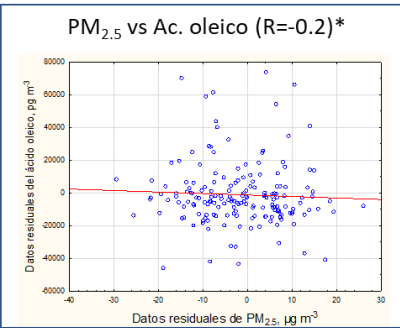
(Fase particulada)



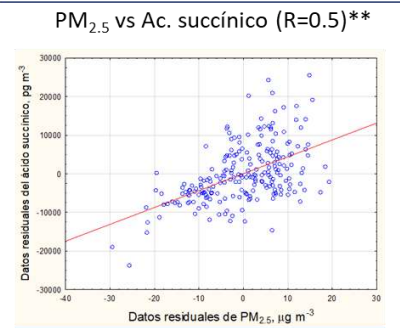
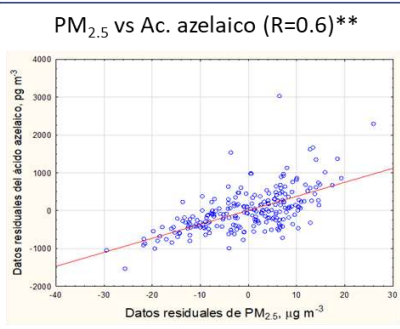
Kawamura *et al.* (1996a, b) y Kawamura y Sakaguchi (1999)



POA



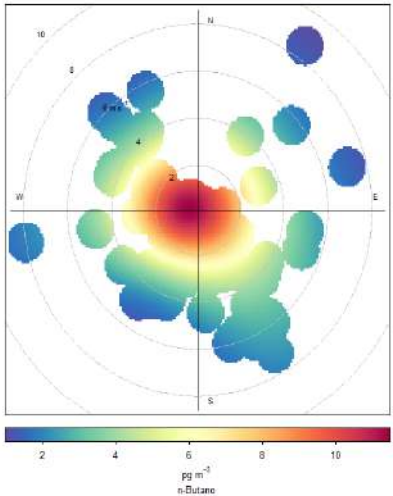
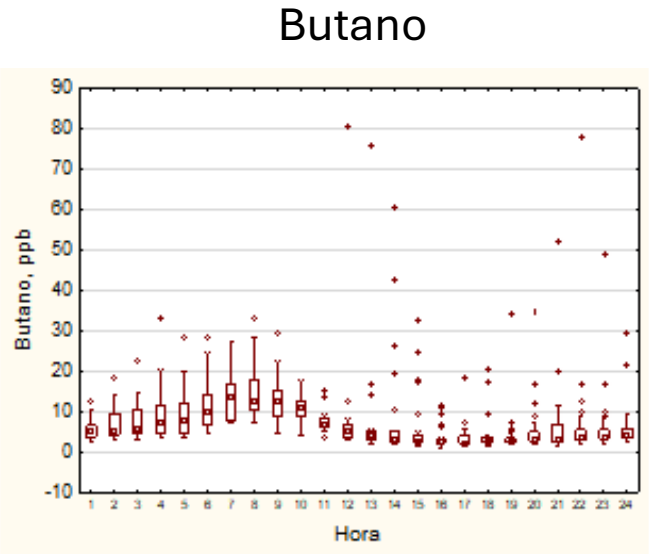
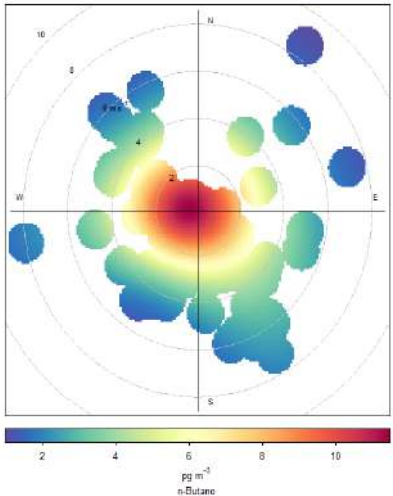
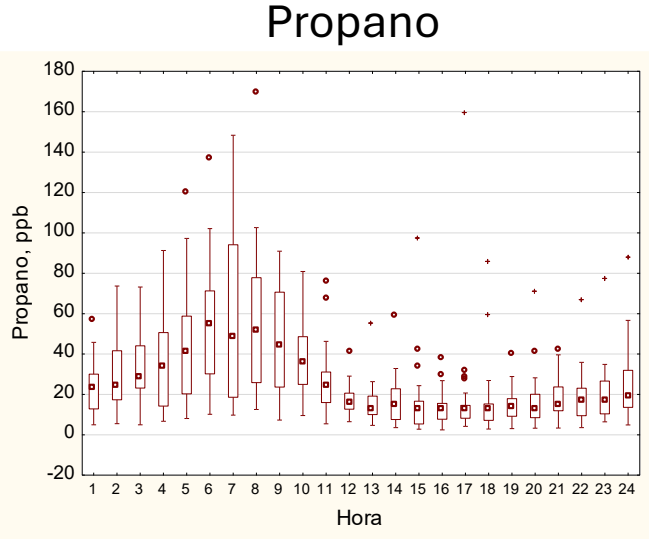
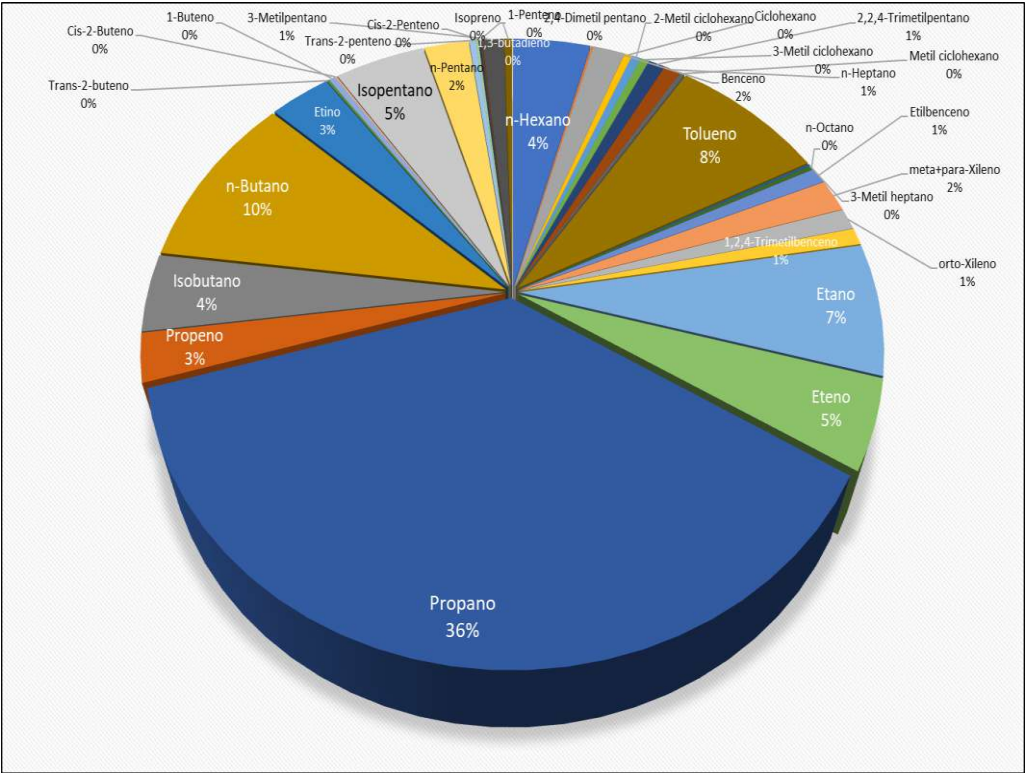
SOA



* - p>0.05, ** p<0.05

COVs: Cocción de alimentos y aseo personal (Gas licuado)

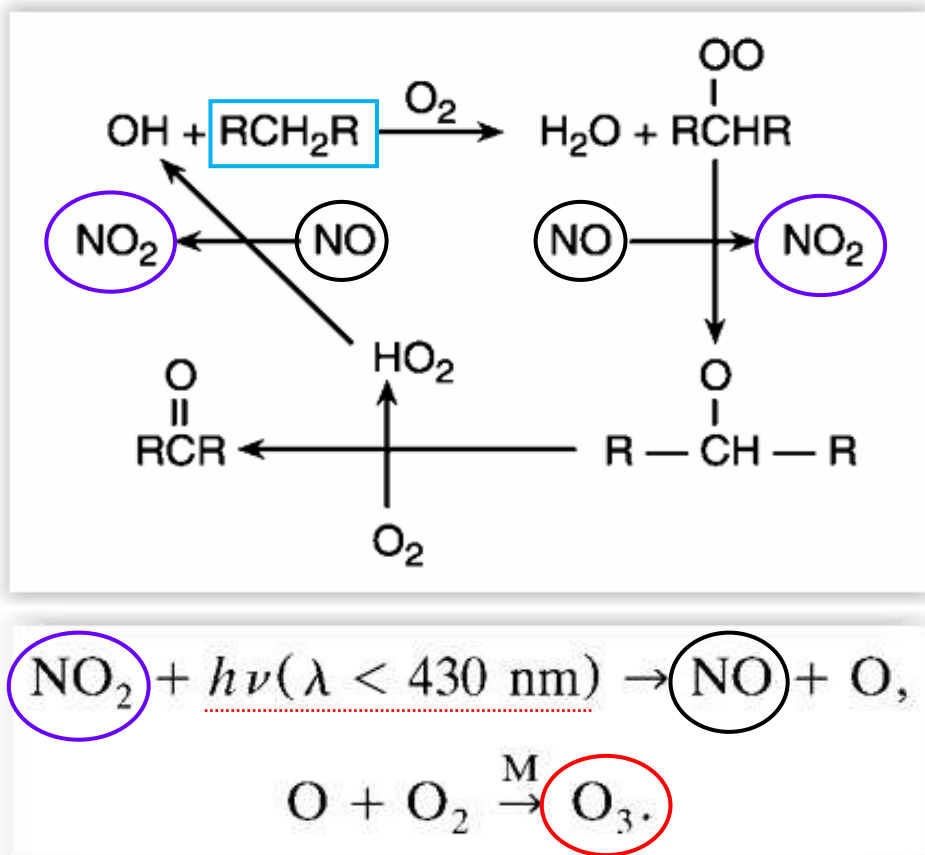
(Fase gaseosa)



TD-CG-FID

Implicaciones

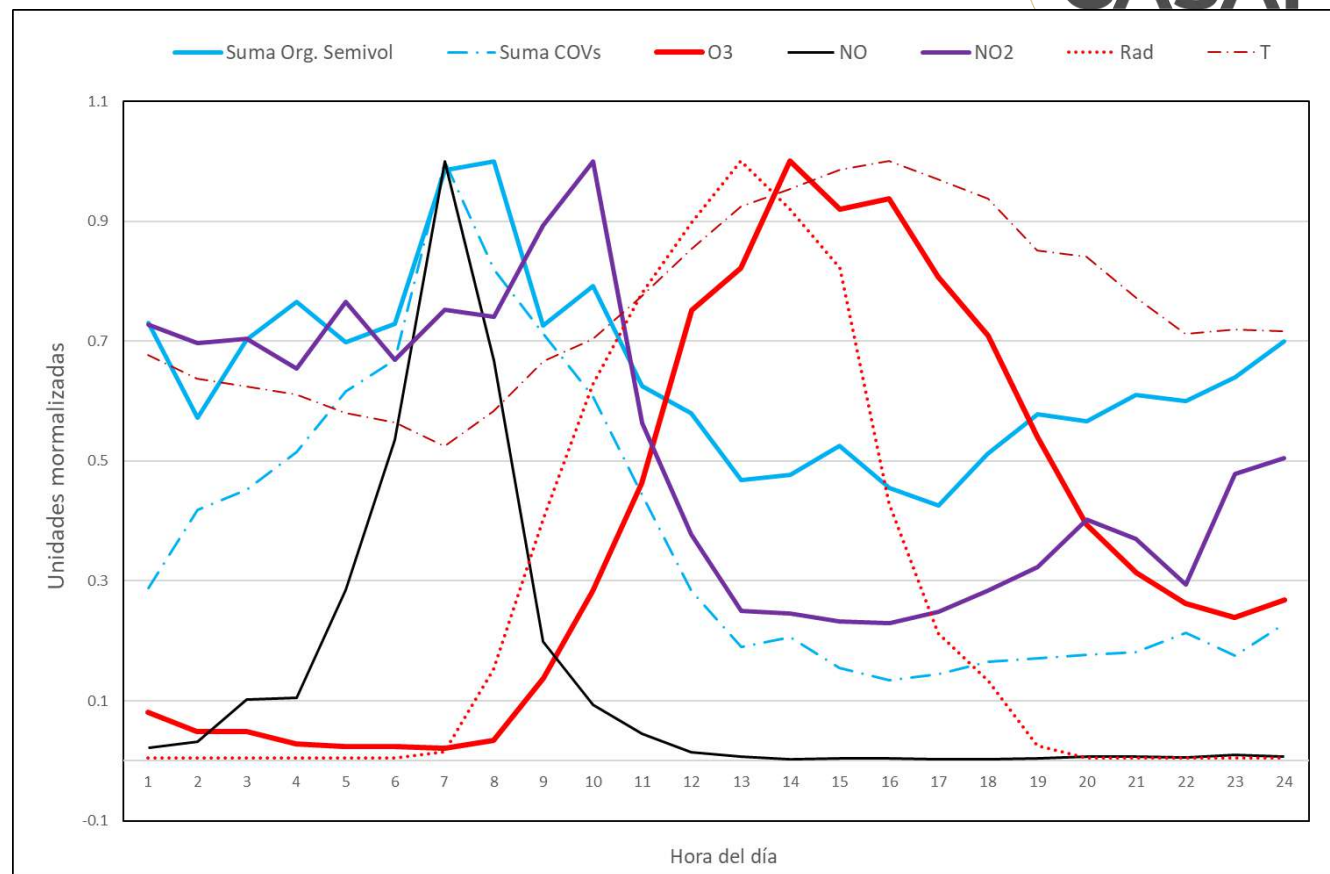
Formación de O₃ y NO₂



Blacet (1952), Pitts y Pitts Jr. (2000)

Amador-Muñoz O., Rivera-Hernández O., Retama A. et al. (2024). Especiación química de partículas atmosféricas y compuestos orgánicos volátiles al norte de la Ciudad de México: identificación de fuentes de emisión y procesos de formación secundaria. Financiamiento fideicomiso para apoyar los programas, proyectos y acciones ambientales de la Megalópolis (FIDAM 1490).

Sitio Vallejo, CdMx, abril-mayo 2022



❖ Para reducir el ozono, el SOA y las PM_{2.5}, se deben reducir las emisiones de hidrocarburos emitidos por evaporación y combustión de Diesel, así como por cocción de alimentos.

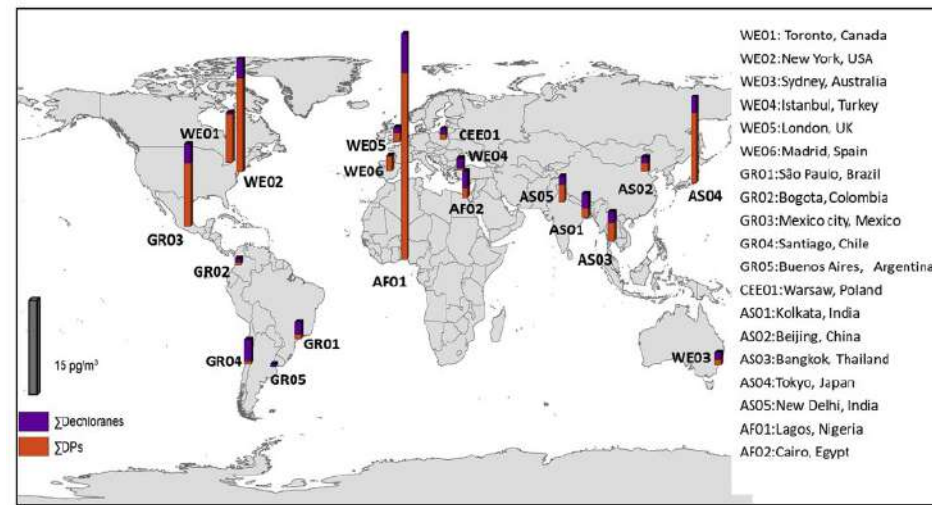
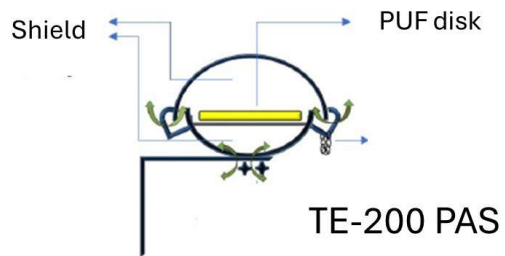
Mediciones manuales para la especiación química



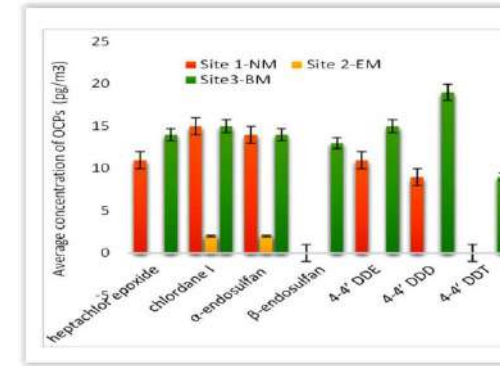
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS)

(Aerosol) – Compuestos Orgánicos Persistentes (POPs) –



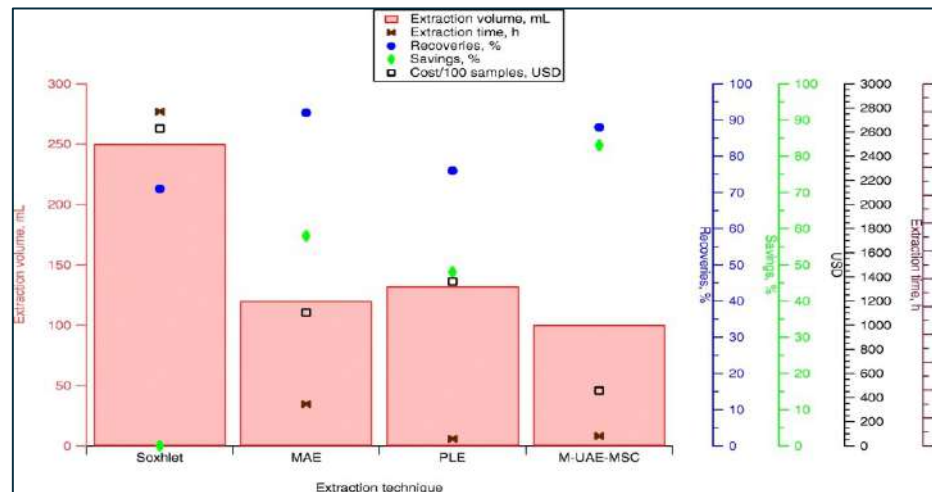
Saini et al. (2020).
Environ Pollut
267, 115416



García-Solorio et al. (2022). *Environ Sci Pollut Res*
32, 49291



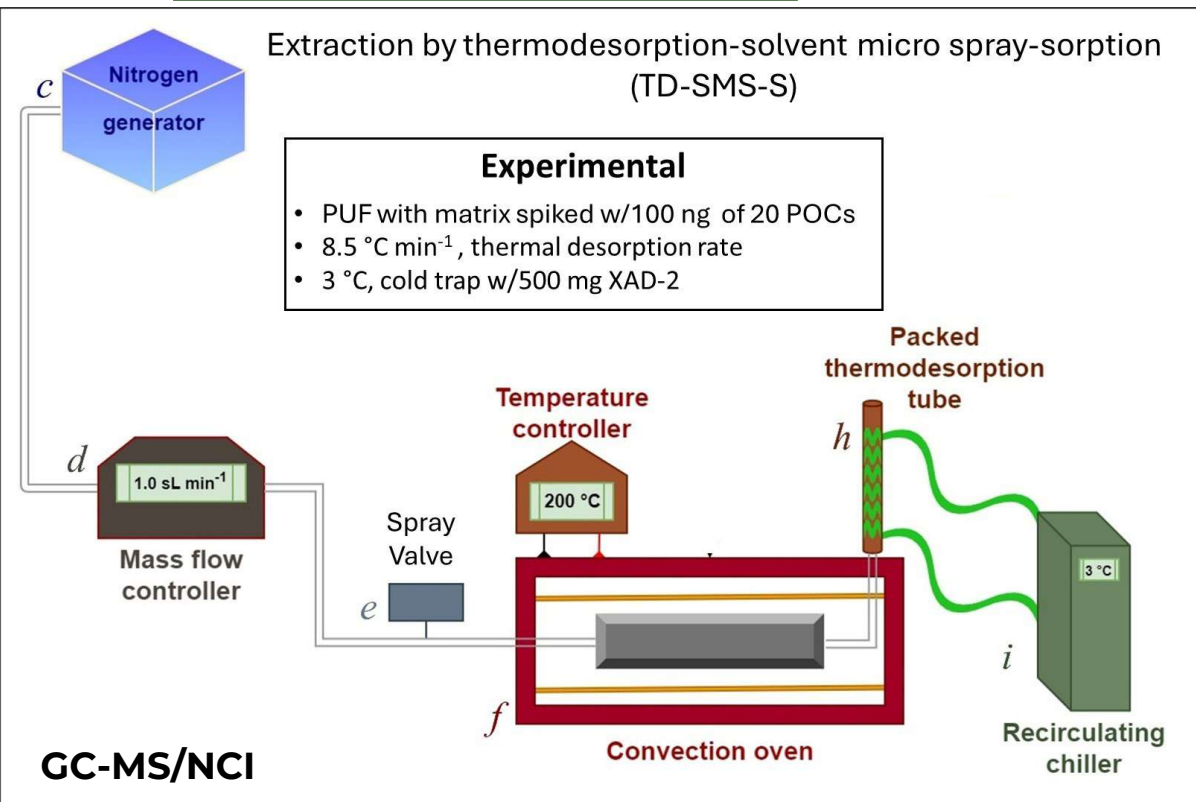
Amador-Muñoz et al. (2014).
Patent Num. 325624



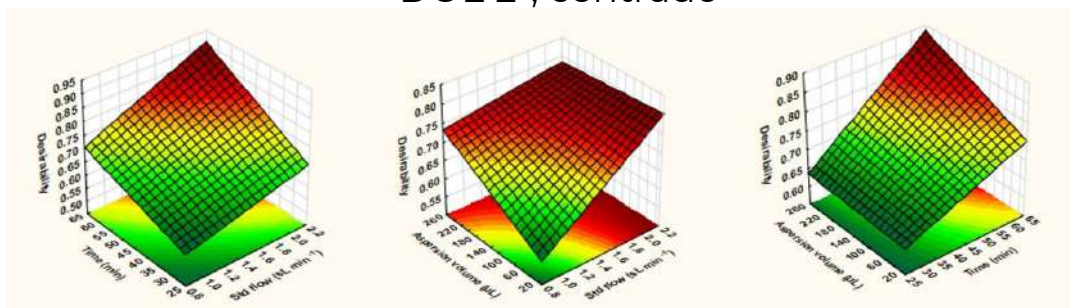
Arias-Loaiza et al. (2018). *Water Air Soil Pollut*
229, 282

Desarrollo tecnológico # 1:

Celda térmica libre de disolventes (Aerosol)

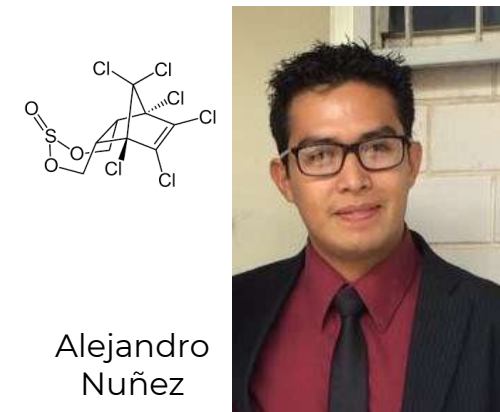
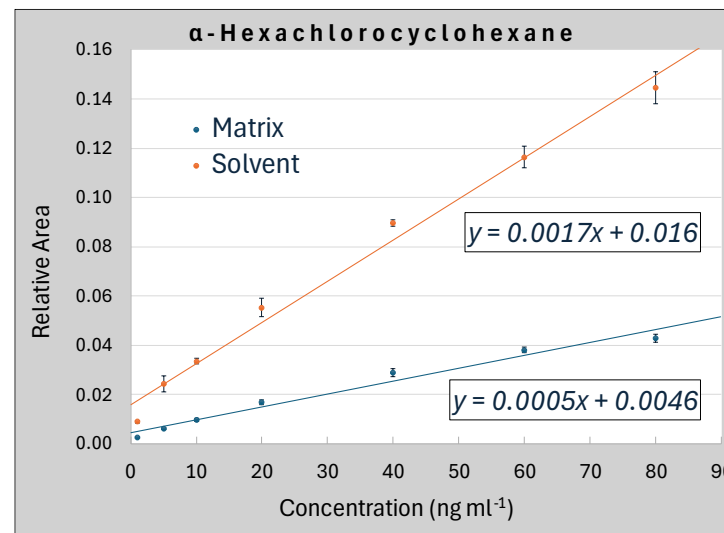


DOE 2³, centrado



Contaminantes orgánicos
termoestables
- Plaguicidas organoclorados -

Efecto matriz, N=27, 1-100 ng

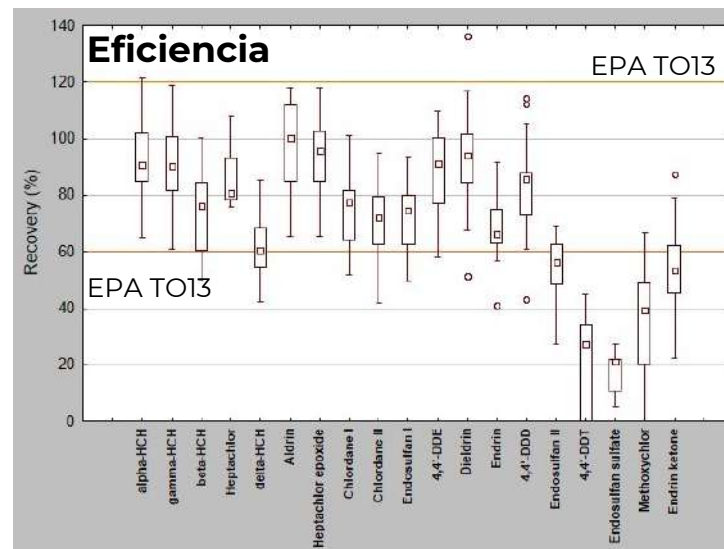


Alejandro Nuñez

Tesis Doctorado PCQ-UNAM, en proceso

Ventajas

- Reduce disolvente > 90%
- Reduce residuos > 90%
- Reduce costos > 60 %
- Recuperaciones 60-100 % (14 de 20 POCs)
- Variaciones < 30 %
- LD, 4-50 pg m⁻³
- En proceso de patente



Desarrollo tecnológico # 2: Celda de extracción a microescala

Fase particulada
(PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁)

Inorgánica	Orgánica	Material biológico
→ Carbono elemental	→ HAP	→ Pólenes
→ Metales	→ Ftalatos	→ Bacterias
→ Iones, sales, etc	→ Ácidos, etc	→ Virus, etc.

Colecta de partículas
Muestreadores activos

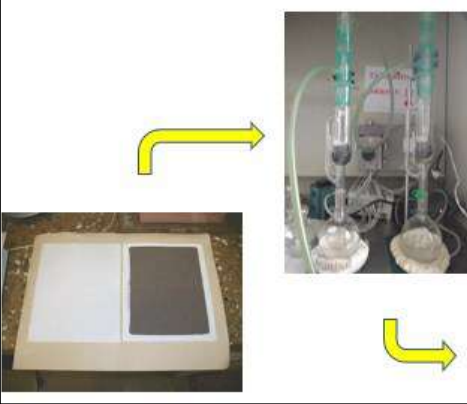
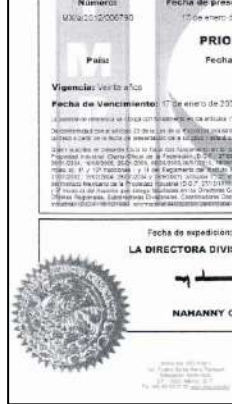
Altos volúmenes



Bajos volúmenes



Optimización e Innovación en los sistemas de extracción

1996-2004	2005-2008	2009-2012	2013- a la fecha
Soxhlet, 18 h, 300 mL (700 mL c/EPU)¹ 	Ultrasonido sin reflujo 90 min, 90 mL, 25°C² 	Ultrasonido con reflujo 60 min, 60 mL, 60°C³ 	Celda a microescala con reflujo 10 min, 10 mL, 60°C⁴ 

TÍTULO DE PATENTE NO. 325624

Titular(es): UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Domicilio: 9^a Pta de la Torre de Rectoría S.N. Ciudad Universitaria, Delegación Ciudad de México, México

Denominación: CELDA DE EXTRACCIÓN A MICROESCALA ASISTIDA POR ULTRASONIDO, CON Y SIN REFLUJO, ACOPADA A UN SISTEMA DE FILTRACIÓN

Clasificación: VII C.8. B01D25.010305, G01N1/00

Inventor(es): OMAR AMADOR MUÑOZ, GRACIELA LOZTE SANTOS MORA, ARON JADLEVNIK DIAZANT, BRENDA LE VALLE HERNÁNDEZ

Número: 325624

Fecha de presentación: 17 de febrero de 2012

Hora: 12:15

Prioridad: 17 de febrero de 2012

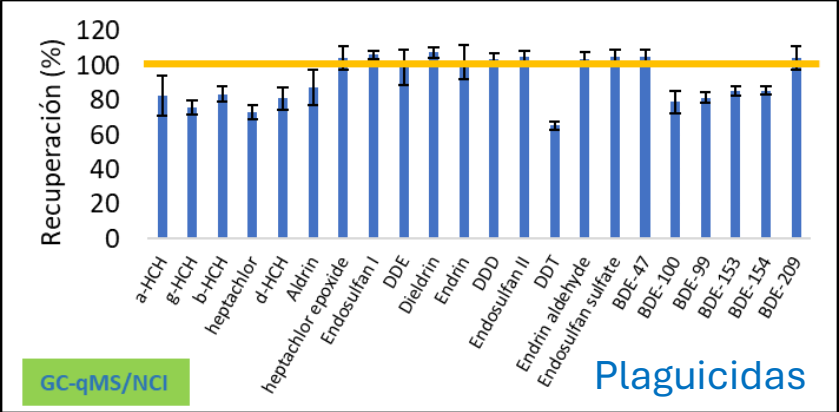
Fecha de expedición: 12 de noviembre de 2014

LA DIRECTORA DIVISIONAL DE PATENTES

NAHANNY CANAL REYES

Ventajas

1. Reduce residuos >70%
2. Reduce costos >70 %
3. Reduce tiempos >90%
4. Eficiente (80-100 % y reproducible, CV<20%)



¹ USEPA (1999), Method TO-13A, EPA/625/R-96/010b; ² Villalobos-Pietrini, Amador-Muñoz et al. (2006), Atmos. Environ. 40, 5845; ³ Valle-Hernández et al. (2010). STOTEN, 408, 5429; ⁴ Amador-Muñoz et al. (2014). IMPI, Título de Patente: 325624, Beristain-Montiel et al. (2016). J. Chromatogr. A, 1477, 100-107.

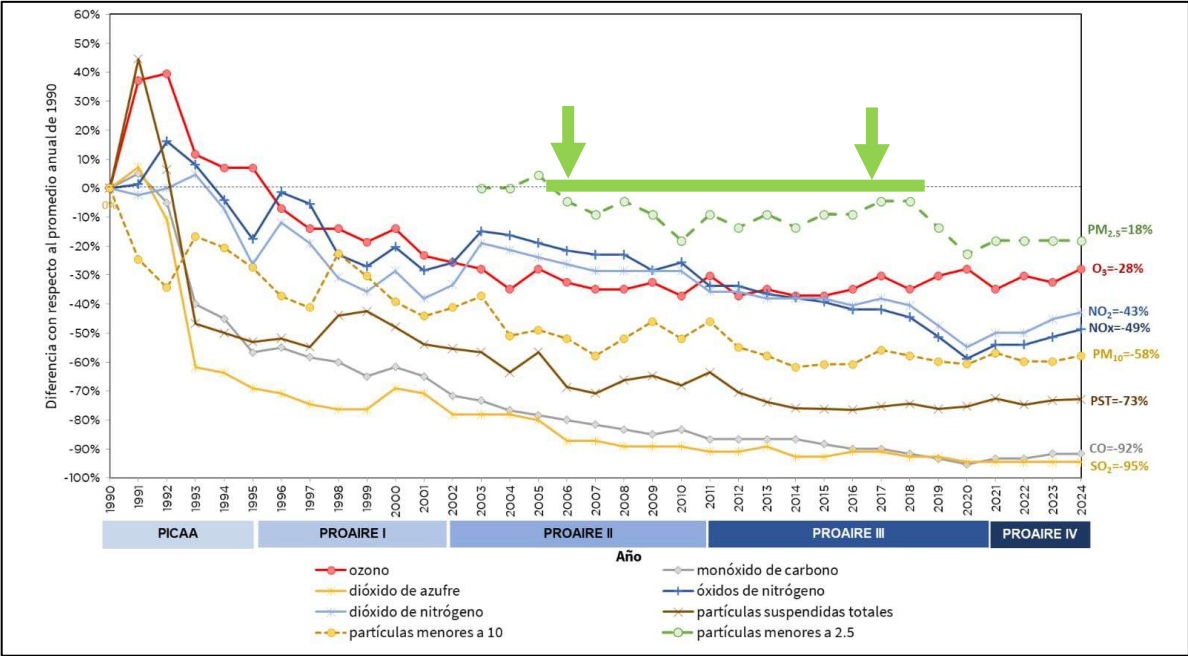


Aplicación de la patente

Reducción de PM_{2.5} con respecto a 2006 fue 0 % en 2017

Reducción de carcinógenos en 34±9 %
Decisiones correctas!!

Actualmente las partículas deberían ser **menos tóxicas**...pero no lo sabemos



Urban Climate 42 (2022) 101096

Contents lists available at ScienceDirect

Urban Climate

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ucim

Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in the metropolitan zone of Mexico Valley: Impact of air quality management programmes

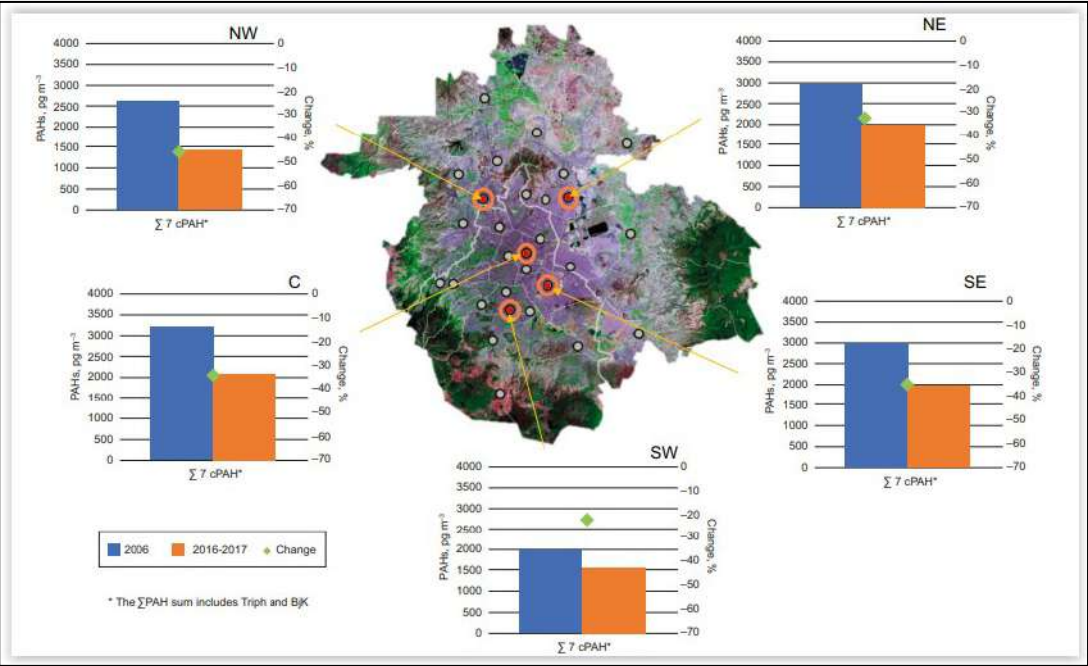
Amador-Muñoz Omar^{*}, A.E. González-Ramírez, R. Villalobos-Pietrini¹

Atmospheric Organic Aerosols Chemical Speciation Group, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, CP 04510, México

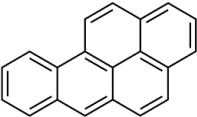


(Fase particulada)

Hidrocarburos aromáticos policíclicos - 2006 vs 2017



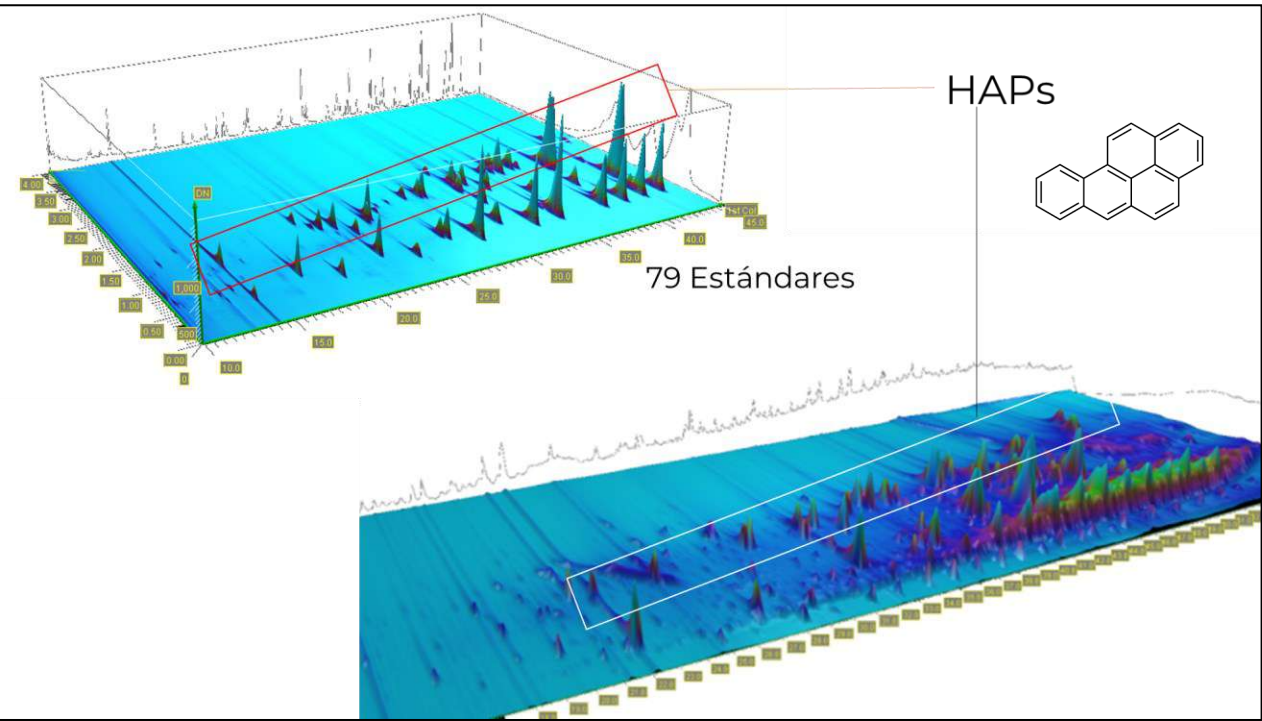
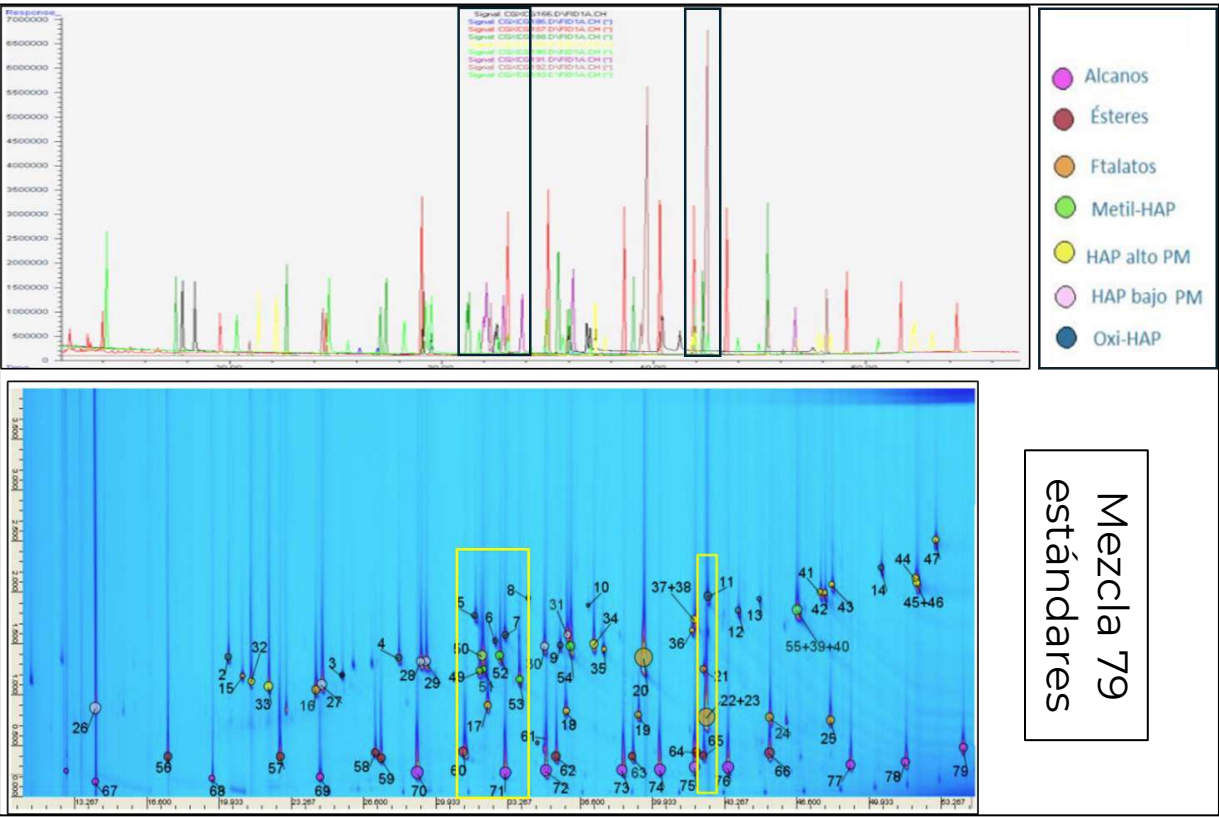
Mayor control:
- Diesel, - Motocicletas



Separación de mezclas complejas multicomponentes

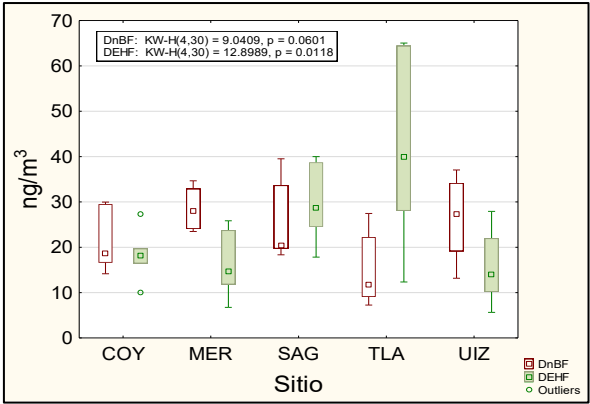
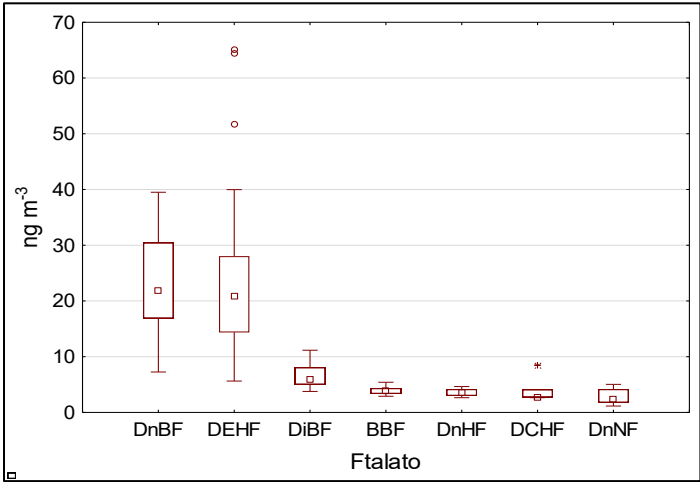
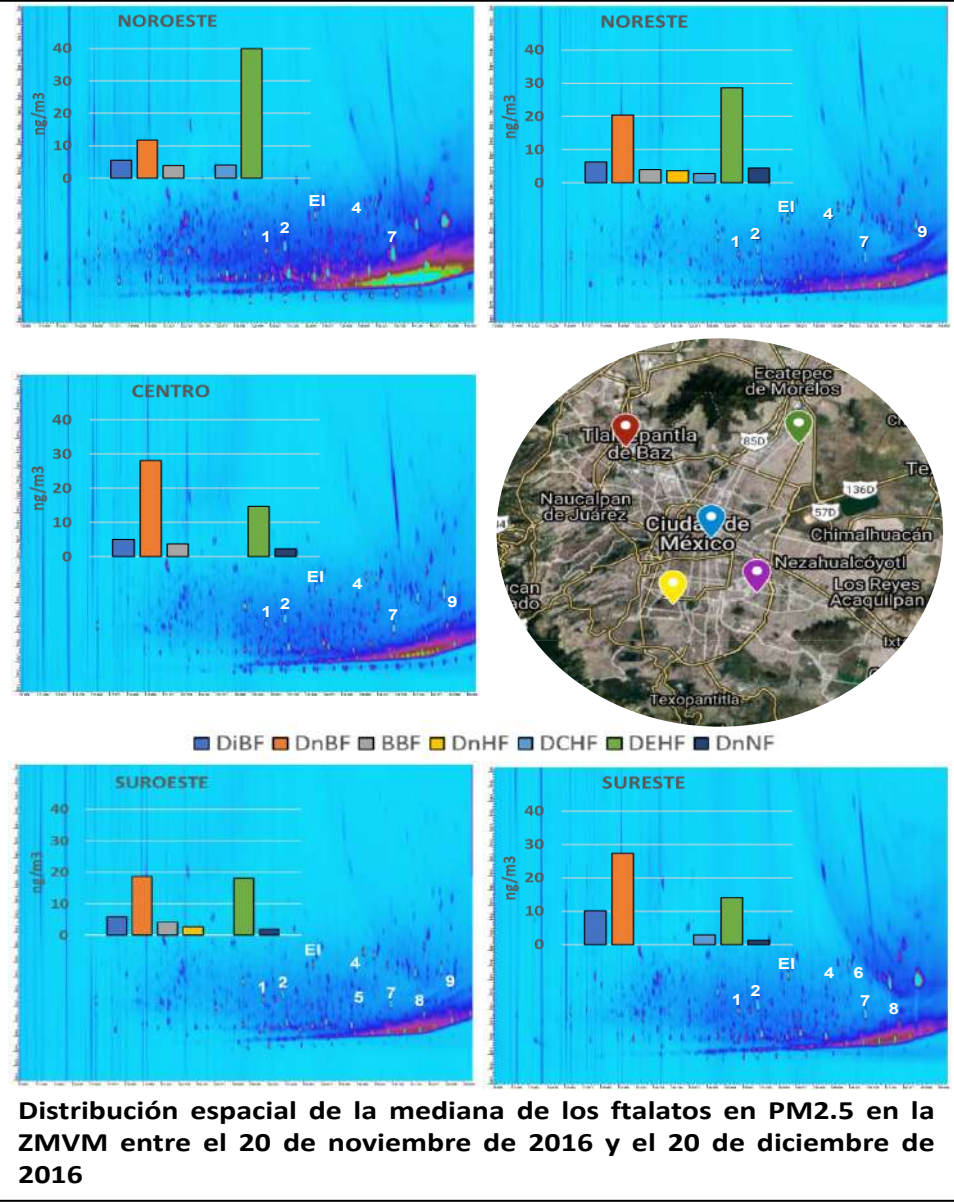
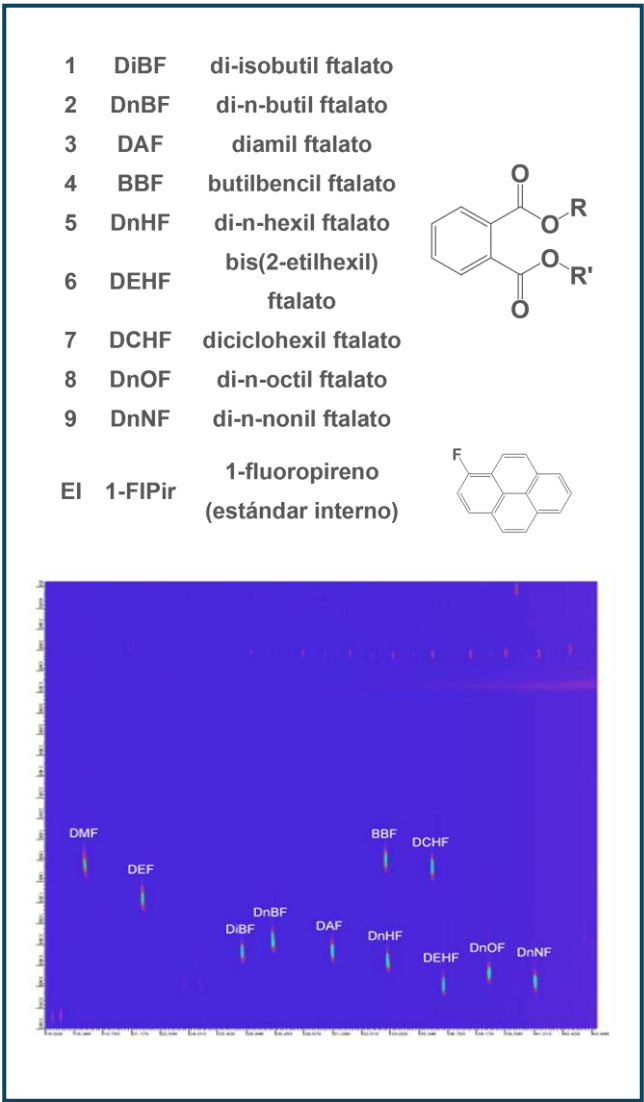
Cromatografía de gases bidimensional, GCxGC

Ventajas: Disminuye la preparación de la muestra}



Extracto orgánico
PM_{2.5}, Suroeste Ciudad de México

Ftalatos en PM_{2.5} – Modificadores endócrinos, Cinco sitios Ciudad de México



- Más abundantes
- Bis (2-etilhexil) ftalato
 - di n-butil ftalato

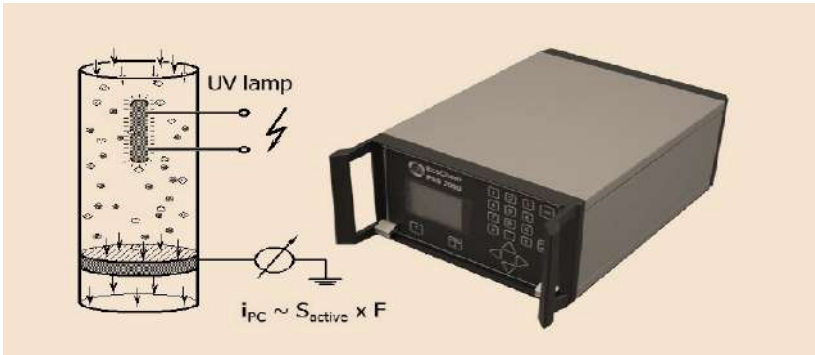
Vigilancia del comportamiento de contaminantes

GC-MS (Específica, sensible)

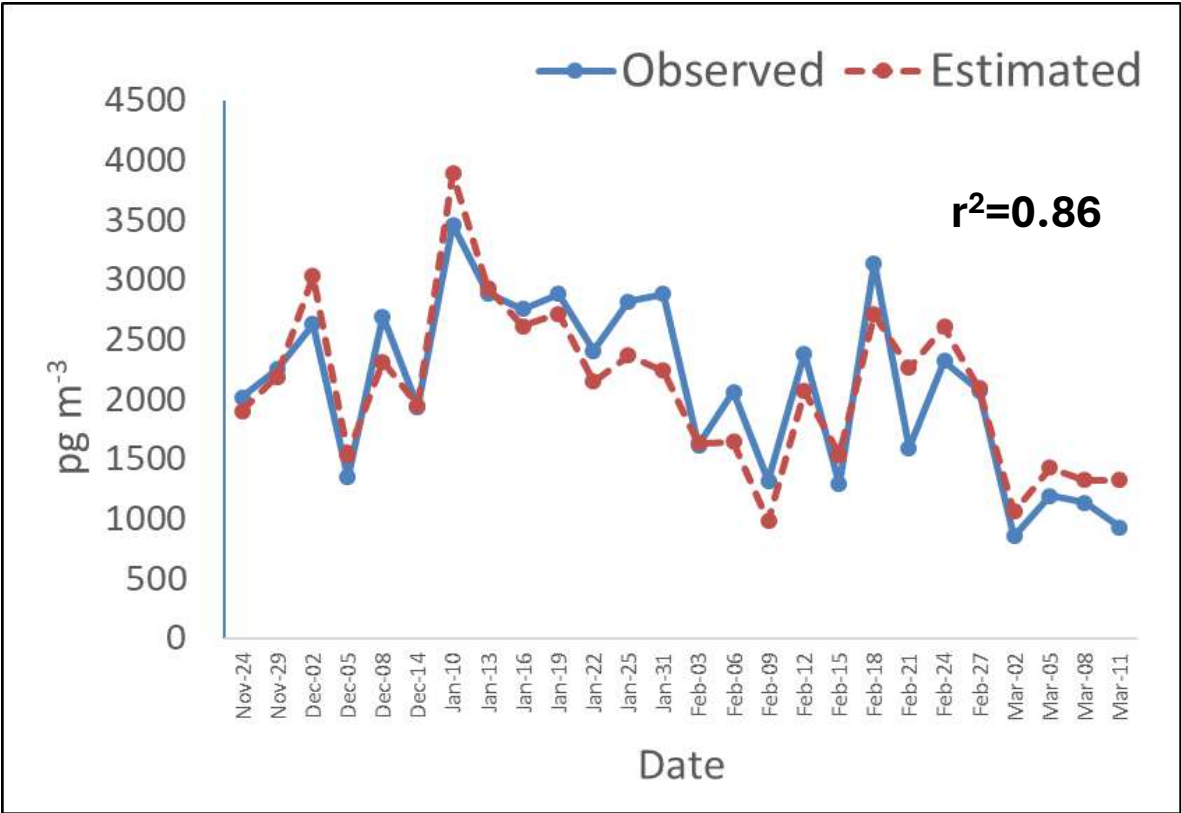
(Fase particulada)



PAS-2000 (Inespecífica, menos sensible)



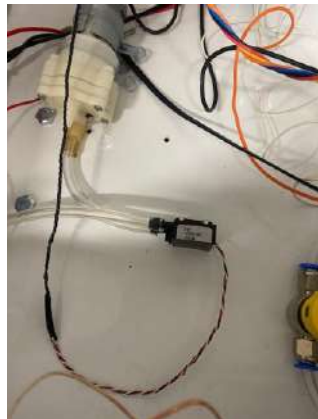
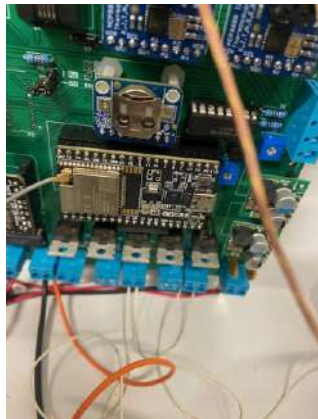
$$\Sigma\text{PAH Canc} = - 1723 + 1150*\ln\text{PPAH} + 0.63*(\text{NO}_2)^2 - 929*\ln\text{WS}$$



Desarrollo tecnológico # 3: Monitor y colector de COVs



Componentes electrónicos



(Fase gaseosa)

LEQAQA - COV



Parámetros de medición

Laboratorio, TDs-GC-MS

- 85 COVs

En **continuo** (Sensores, ~1 min)

- COVs totales
- PM_{2.5}
- NOx
- AQI
- Temperatura
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Dirección del Viento
- Flujo de aire
- Tiempo de colecta

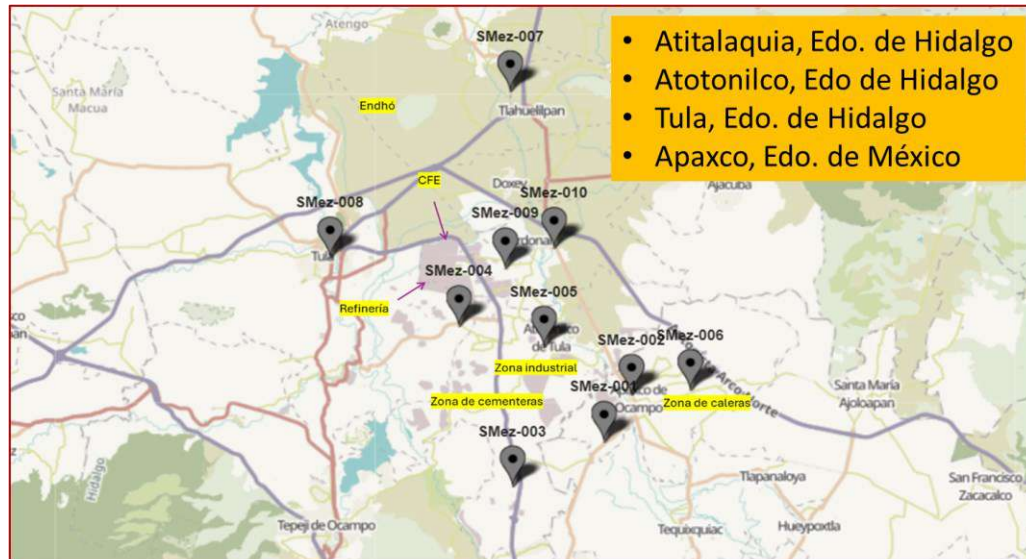
Solar con baterías (48 h)
Transportable (~15 Kg)

COVs, Sur del Valle del Mezquital. NE Cd. México. Refinerías, cementeras y zonas agrícolas, entre otras



SECIHTI
PRONAI 022

Fundamental la participación ciudadana. **Inclusión**
de la **sociedad** en proyectos de investigación

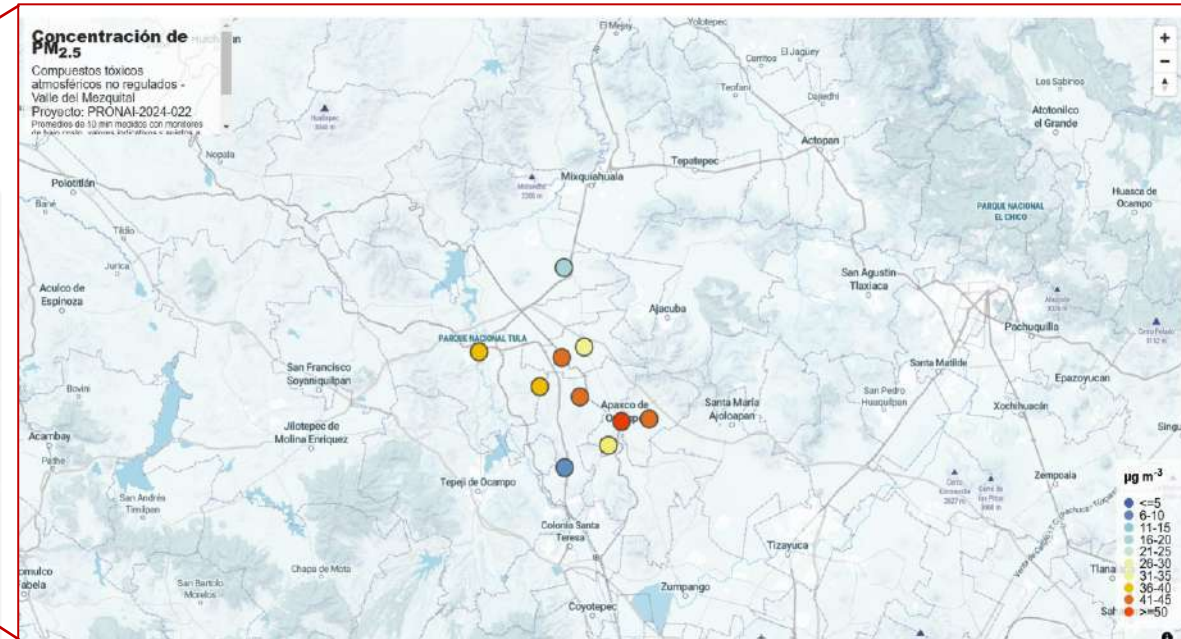
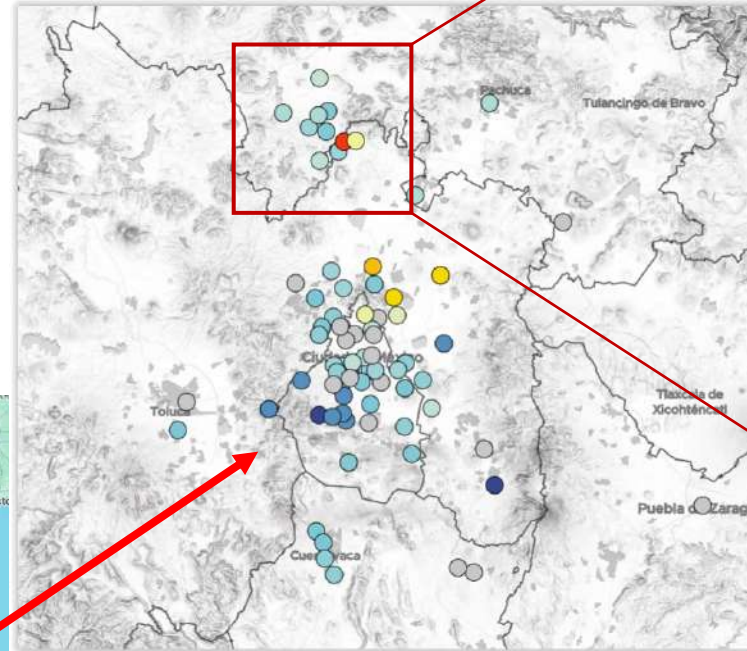
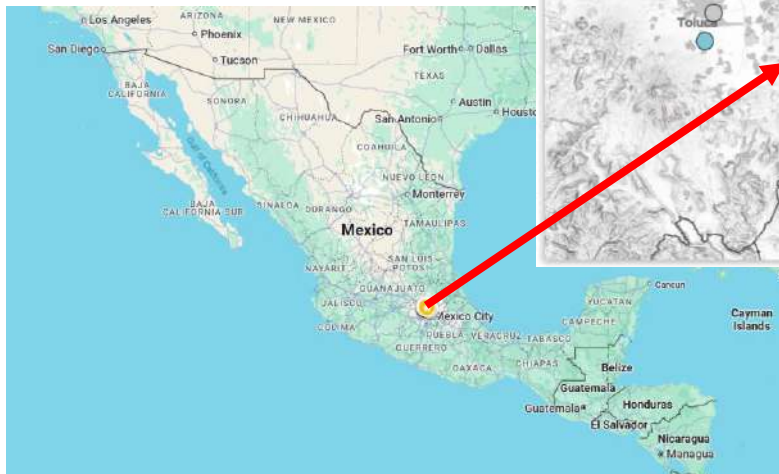


- Afectados, ~200,000 personas
- Equipos distribuidos viento abajo y un blanco viento arriba
- Equipos operarios por personas de la comunidad

COVs, Sur del Valle del Mezquital. NE Cd. México. Refinerías, cementeras y zonas agrícolas, entre otras

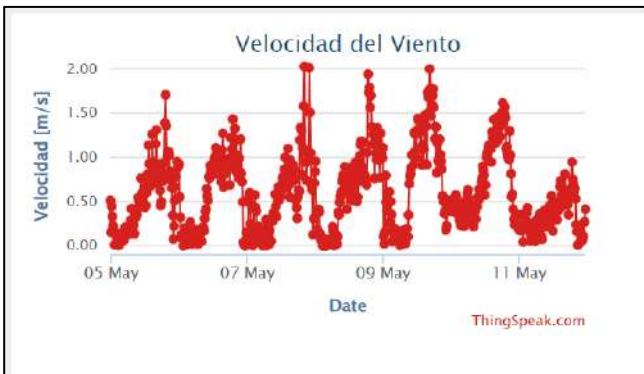
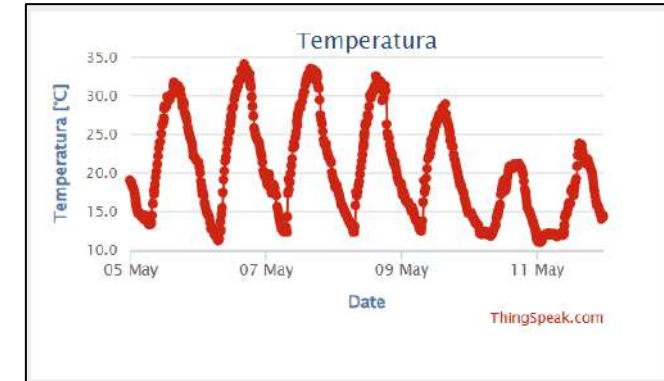
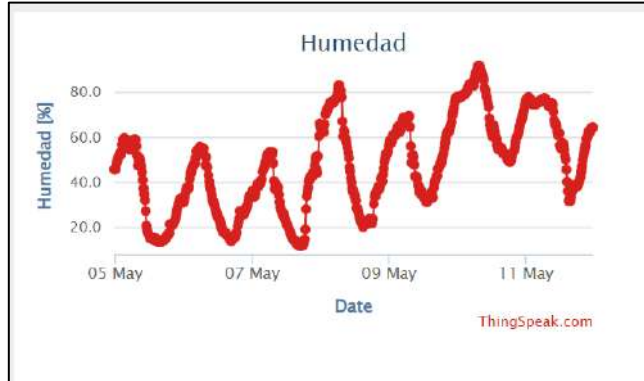
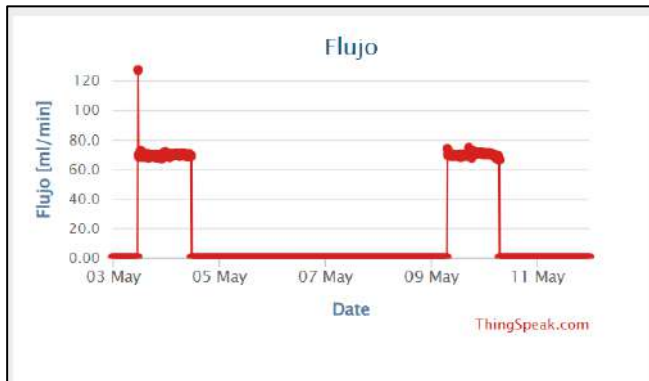
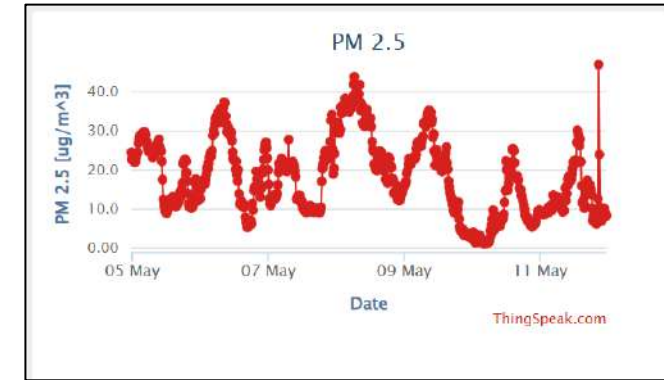
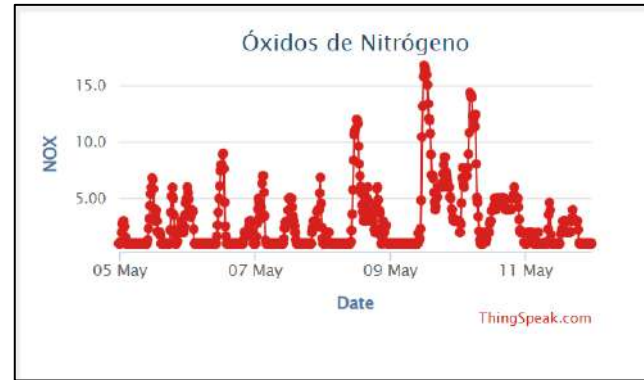
Proyecto VER-PM_{2.5}
Variación Espacial Regional de PM_{2.5} en el Centro de México
Mediciones con monitores de bajo costo, valores en tiempo real, valores indicativos.
Actualización: Jueves, 09 de enero, 2025 01:36

Armando Retama



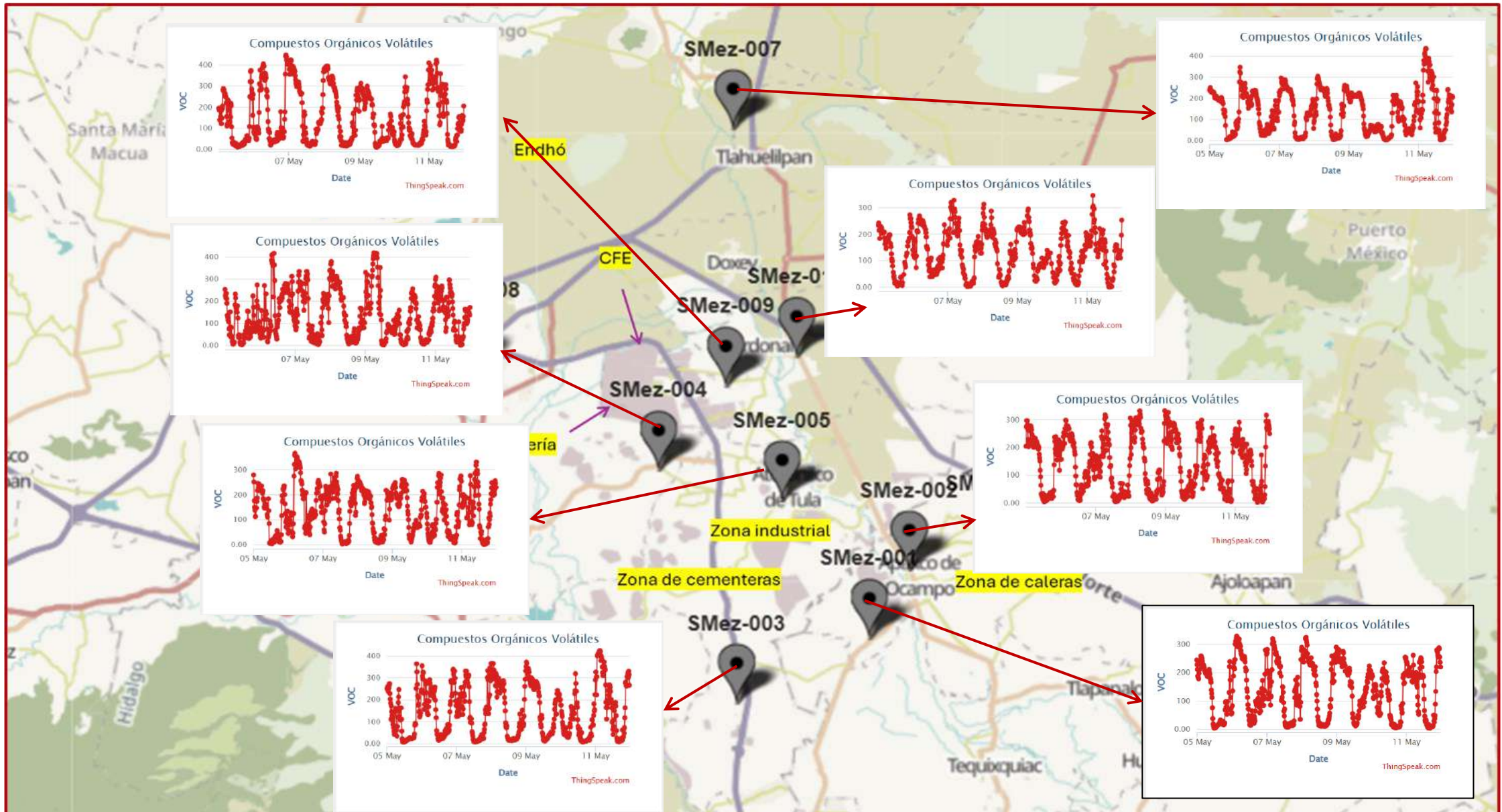
- Mediciones cada minuto

Sitio 1. Apaxco. Edo de México



- Monitoreo via remota
- Programación por blutetoooh (Android)

Campaña de medición de COVs. Enero – mayo 2025. Ocho sitios. Sur del Valle del Mezquital, Edos. Hidalgo y México



Capacidad de análisis: 85 COVs por TDs-GC-MS

#	Compuesto	Número de datos	Mediana ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Percentil 5 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Percentil 95 ($\mu\text{g m}^{-3}$)
1	Chloroform	103	0.20	0.03	7.54
2	1,2-Dichloroethane	75	0.07	0.01	0.23
3	Benzene	140	1.34	0.25	6.59
4	Heptane	101	7.67	0.87	43.57
5	Trichloroethylene	25	0.36	0.11	1.97
6	Bromodichloromethane	6	0.05	0.03	0.07
7	cis-1,3-Dichloropropene	5	0.11	0.04	0.62
8	Toluene	145	6.29	0.85	16.92
9	Octane	106	0.55	0.10	1.38
10	Tetrachloroethylene	22	0.19	0.10	0.33
11	Chlorobenzene	12	0.01	0.01	0.03
12	Ethylbenzene	146	1.20	0.18	3.67
13	m+p-Xylene	141	3.15	0.51	8.88
14	Nonane	63	0.33	0.10	1.68
15	Styrene	141	0.65	0.08	5.17
16	o-Xylene	145	1.15	0.21	3.76
17	Bromoform	5	0.02	0.02	0.04
18	Ethylene glycol butylether	148	2.73	0.72	9.86
19	Cumene	110	0.10	0.02	0.27
20	Propylbenzene	110	0.17	0.04	0.39
21	Mesitylene	109	0.16	0.03	0.52
22	Phenol	110	2.34	0.83	7.12
23	Decane	108	0.54	0.13	2.72
24	tert-Butylbenzene	5	0.005	0.004	0.01
25	1,2,4-Trimethylbenzene	110	0.67	0.12	1.81
26	sec-Butylbenzene	32	0.01	0.00	0.03
27	2-ethyl-1-hexanol	110	3.64	0.63	17.78
28	1,4-Dichlorobenzene	148	3.33	1.12	9.68
29	p-Cymene	110	0.64	0.09	5.54
30	1,2-Dichlorobenzene	128	0.02	0.004	0.05
31	Butylbenzene	37	0.34	0.10	1.29
32	Undecane	88	0.47	0.11	1.60
33	Dodecane	105	0.68	0.21	3.44
34	Naphthalene	106	0.25	0.09	0.61
35	Hexachloro-1,3-butadiene	26	0.003	0.002	0.01
36	Tridecane	54	0.22	0.09	1.08
37	Tetradecane	68	0.30	0.08	2.16
38	Pentadecane	5	0.20	0.14	1.02
39	Hexadecane	5	0.32	0.19	0.79

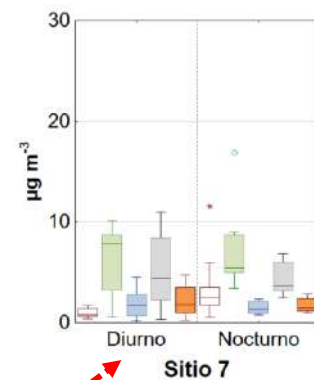
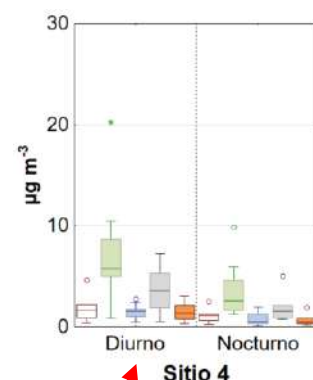
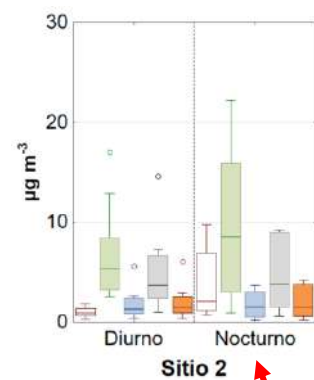
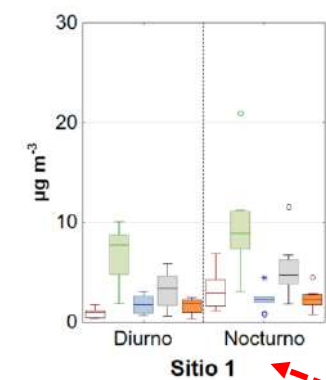


Tubos c/tenax y
XAD-2

TDs-GC-MS/IE,
Scan 40-250 Da



BTEX

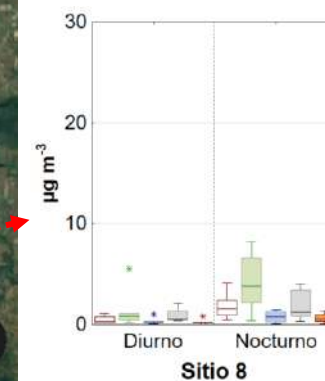
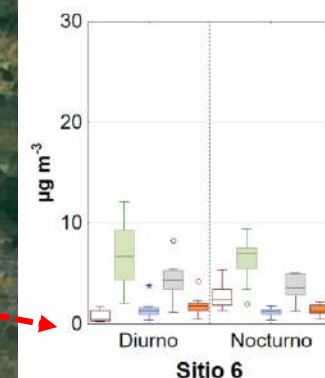
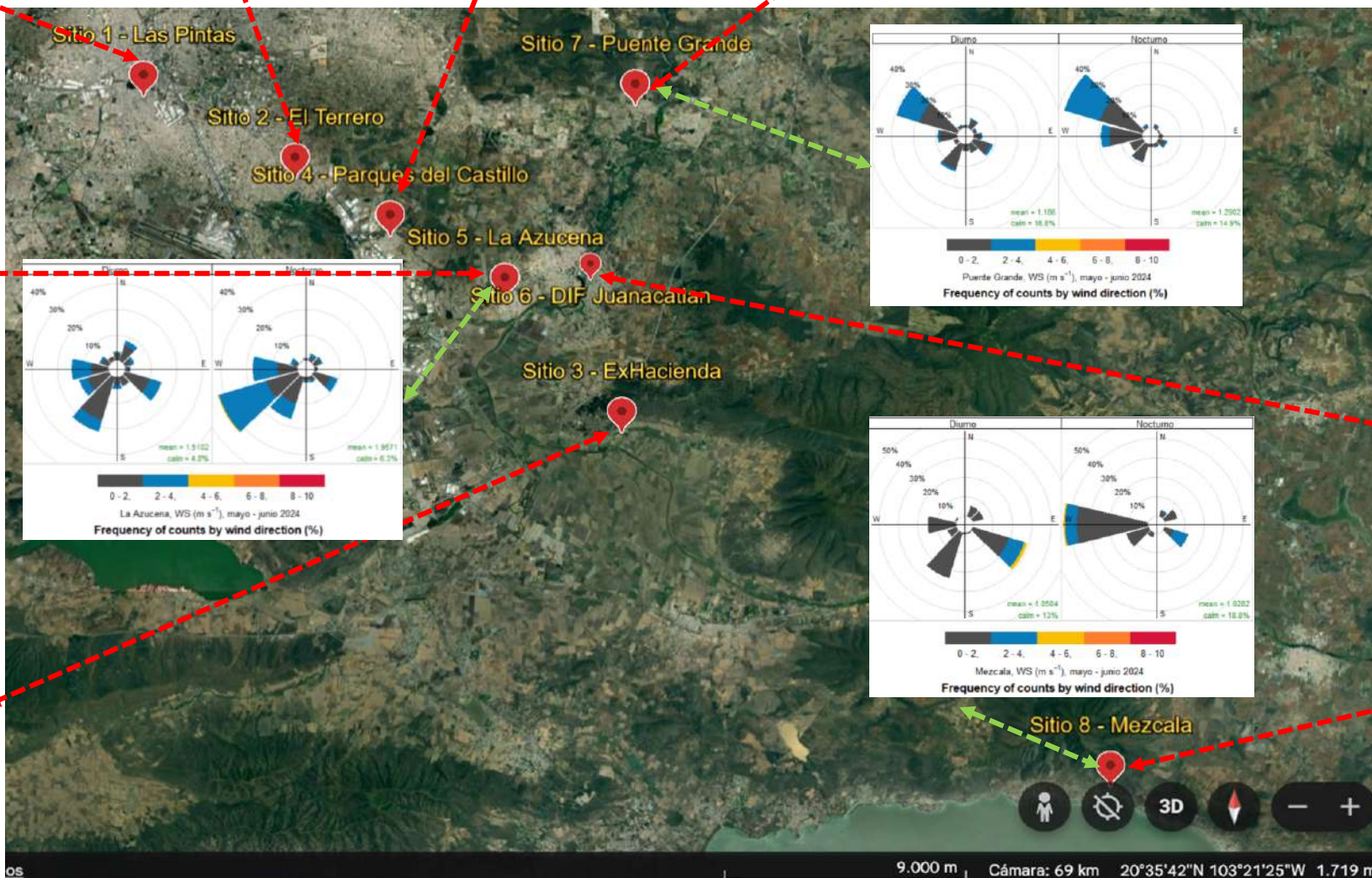
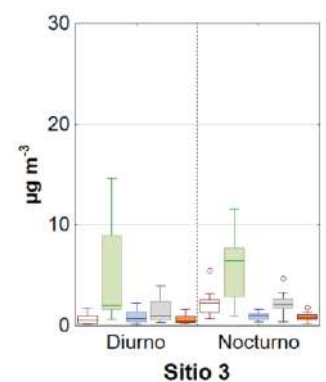
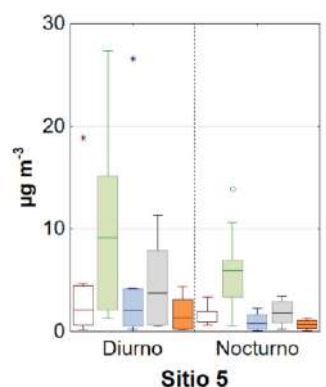


1	2	3	4	5	6	7	8
*	*	*			*	*	*

* Con diferencia significativa MW ($p < 0.05$)
- Sin valor

(N: 4 – 11)

- Benceno
- Tolueno
- Etilbenceno
- m+p-Xileno
- o-Xileno



Reflexiones

- Se tienen tecnologías automáticas para estudiar a detalle el comportamiento de los contaminantes orgánicos tóxicos no regulados.
- Se tienen nuevas tecnologías de bajo costo que ofrecen alta calidad en:
 - La extracción de compuestos orgánicos con intermedia y baja volatilidad.
 - En las mediciones de Compuestos Orgánicos Volátiles.
- El objetivo es generar evidencia científica para mejorar la calidad del aire y de vida de la población.
- Pensar de manera diferente impulsa el avance de la tecnología y el conocimiento.....

¡ Avancemos apoyándonos !



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

Agradecimientos  **CASAP X**
Medellín, Colombia

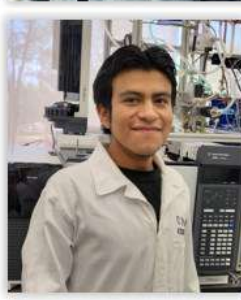
Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos (LEQAOA)

Dr. Omar Amador Muñoz
Investigador Titular

oam@atmosfera.unam.mx



- Programa de Gestión del Conocimiento en Contaminación Atmosférica y sus Efectos en la Salud, Sistema General de Regalías
- El Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
- El Comité de Promotor CASAP X



**Profesora Miriam
Gómez Marin**

