

Bulbo olfatorio, corteza prefrontal y cíngula anterior con daño neurodegenerativo en poblaciones pediátricas asociado a nanopartículas magnéticas y su movimiento bajo campos electromagnéticos

Lilian Calderón-Garcidueñas,^{1*}  Fredy R. Cejudo-Ruiz²  y Ricardo Torres-Jardón³ 

¹Department of Biomedical Sciences, University of Montana, Missoula, Montana, Estados Unidos; ²Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Piedras Negras, Piedras Negras, Coahuila, México; ³Geofísica Ambiental, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México; ⁴Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

Resumen

Antecedentes: Los rasgos neuropatológicos característicos del Alzheimer, el Parkinson y la degeneración lobular frontotemporal están presentes en jóvenes residentes urbanos expuestos a partículas finas (PM_{2.5}), partículas ultrafinas (UFPM) y nanopartículas (NP). Los metales asociados con catalizadores de automóviles deteriorados, emisiones de motores diésel, polvo de pastillas de freno y residuos electrónicos, incluidos los elementos de tierras raras, están entrando en el cerebro de los niños. Se han documentado déficits cognitivos y cambios estructurales y volumétricos en el cerebro mediante resonancia magnética en niños de la zona metropolitana de la Ciudad de México (MMC). **Objetivos:** Los objetivos del estudio son identificar materiales ferrimagnéticos y su comportamiento de movimiento tras la exposición a campos magnéticos de 25 1-000 mT de corriente alterna en 48 muestras cerebrales, incluyendo bulbos olfatorios, cíngulo anterior y corteza prefrontal. **Material y métodos:** Mediante magnetoforesis, identificamos pequeños desplazamientos y variaciones significativas en la dirección del vector magnético de las partículas magnéticas. La microscopía electrónica de transmisión y la espectrometría de rayos X de dispersión de energía permitieron identificar la ubicación y la composición de las NP ferrimagnéticas. **Resultados:** Las muestras cerebrales de MMC de 12 niños de 8.5 ± 7.6 años y 16 adultos de 39.2 ± 19.6 años contuvieron nanopartículas magnéticas móviles, capaces de dañar organelos, alterar proteínas solubles y causar daño neural, deficiencias olfatorias y manifestaciones neuropsiquiátricas, comunes en estadios tempranos de neurodegeneración. **Conclusión:** Las áreas críticas del cerebro se ven dañadas en edades pediátricas tempranas y la neurodegeneración está en curso en jóvenes urbanos expuestos a MMC con alto riesgo de bajo rendimiento académico. Se necesitan controles ambientales de MMC UFPM/NP.

PALABRAS CLAVE: Alzheimer. Campos electromagnéticos. Tecnología 5G. Bulbo olfatorio. Conducta de movilidad en nanopartículas. Magnetoforesis.

The olfactory bulb, prefrontal and anterior cingulate cortex are early pediatric targets for anthropogenic magnetic nanoparticles and their motion behavior under electromagnetic fields

Abstract

Background: Alzheimer's, Parkinson's, and frontotemporal lobar degeneration neuropathology hallmarks are present in young urbanites exposed to fine particulate matter (PM_{2.5}), ultrafine PM (UFPM), and nanoparticles (NPs). Metals associated with

*Correspondencia:

Lilian Calderón-Garcidueñas

E-mail: lilian.calderon-garcidueñas@umontana.edu

0016-3813/© 2025 Academia Nacional de Medicina de México, A.C. Publicado por Permanyer. Este es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Fecha de recepción: 06-07-2025

Fecha de aceptación: 22-09-2025

DOI: 10.24875/GMM.25000279

Gac Med Mex. 2026;162:222-232

Disponible en PubMed

www.gacetamedicademexico.com

deteriorated automobile catalysts, diesel motor emissions, brake-pads dust, and electronic waste, including rare earth elements, are entering children's brains. Cognition deficits and brain structural and volumetric changes by magnetic resonance are documented in Metropolitan Mexico City (MMC) children. **Objectives:** The objectives of the study are to identify ferromagnetic materials and their motion behavior upon exposure to magnetic fields 25-1,000 mT AC in 48 brain samples including olfactory bulbs, anterior cingulate, and prefrontal cortex. **Material and methods:** Using magnetophoresis, we identified small displacements and significant magnetic vector direction variations in magnetic particles. Transmission electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectrometry identified the location and composition of the ferrimagnetic NPs. **Results:** MMC brain samples from 12 children 8.5 ± 7.6 years and 16 adults 39.2 ± 19.6 year showed ferrimagnetic NPs with magnetic motion behavior possessing organelle and soluble protein risk for neural damage, olfactory deficits, and neuropsychiatric burden, common early neurodegenerative manifestations. **Conclusion:** Critical brain areas are damaged in early pediatric ages and neurodegeneration is in progress in MMC young urbanites at high risk of poor academic performance. Environmental MMC UFPM/NPs controls are needed.

KEYWORDS: Alzheimer. Electromagnetic fields. 5G technology. Olfactory bulb. Magnetic motion behavior of nano-particles. Magnetophoresis.

Introducción

Los metales pesados, los elementos de tierras raras y las nanopartículas magnéticas (NP) con comportamiento de movimiento identificadas en organelos críticos del bulbo olfatorio (BO) son probablemente actores clave en el daño neural grave del BO y de la unidad neurovascular (UNV) observado en niños y adultos jóvenes expuestos a material particulado (PM) y a la contaminación del aire industrial.^{1,2} Los residentes altamente expuestos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCC), incluidos niños desde los 11 meses de edad, presentan enfermedad de Alzheimer (AD), enfermedad de Parkinson (PD) y neuropatología asociada a la proteína de unión al ADN con respuesta transactiva TDP-43 (degeneración lobar frontotemporal [DLFT] y esclerosis lateral amiotrófica [ALS]).³⁻⁹ La proteinopatía cuádruple no difiere de la neuropatología en 365 autopsias de la *Kentucky University* en individuos con edades de 83.8 ± 8.8 años, blancos sin y con deterioro cognitivo.¹⁰

Estamos particularmente interesados en tres regiones cerebrales clave y su patología temprana en edades pediátricas: la afectación del sistema olfatorio en la primera estación de relevo y los déficits de olfacción, la patología de la corteza prefrontal y de la corteza cingulada anterior (CCA), con los correspondientes déficits cognitivos y el mayor riesgo de ansiedad, depresión, consumo de sustancias y trastornos del juego.¹¹⁻¹⁵ En consecuencia, dichos déficits sirven como marcadores funcionales de proteinopatías cuádruples y son críticos para el diagnóstico temprano no invasivo y el seguimiento de la progresión. Los marcadores pediátricos tempranos reflejan la

acumulación de PM ultrafino (UFPM) y NP industriales que alcanzan el cerebro de los niños a través de la vía nasal/olfatoria, los pulmones, el tracto gastrointestinal y la circulación sistémica, y se identifican claramente en UNV anormales, neuronas y células gliales.¹⁻⁹

Nuestra honda preocupación en edades pediátricas se basa en la estimación reciente de 2021 de 18.1 millones de mexicanos con trastornos mentales, siendo la depresión y la ansiedad las principales preocupaciones,¹⁶ en este sentido, los problemas ambientales —al ser prevenibles— deben ser un foco clave para las autoridades de salud.

Materiales y métodos

Ciudades de estudio y calidad del aire

La ZMCC tiene aproximadamente 24 millones de residentes expuestos crónicamente a altas concentraciones de PM_{2.5} y NP durante las últimas 3 décadas.¹⁷⁻²⁵ La distribución de los valores de magnetización remanente isotérmica de saturación (MRIS), un indicador de minerales ferrimagnéticos en el polvo de las carreteras, muestra la variación significativa de las concentraciones en la ZMCC para 2017 (Fig. 1). Las mediciones de concentraciones significativas de metales pesados en el polvo de las calles de la ZMCC se realizaron siguiendo una metodología basada en la digestión de muestras de polvo y el análisis por triplicado con un espectrómetro óptico de plasma acoplado inductivamente Agilent Technologies 5100 (*Inductively Coupled Plasma Optical Spectrometer*) (Estados Unidos: método EPA 6010C).¹⁷⁻²⁵ Los metales con concentraciones más altas en la ZMCC son

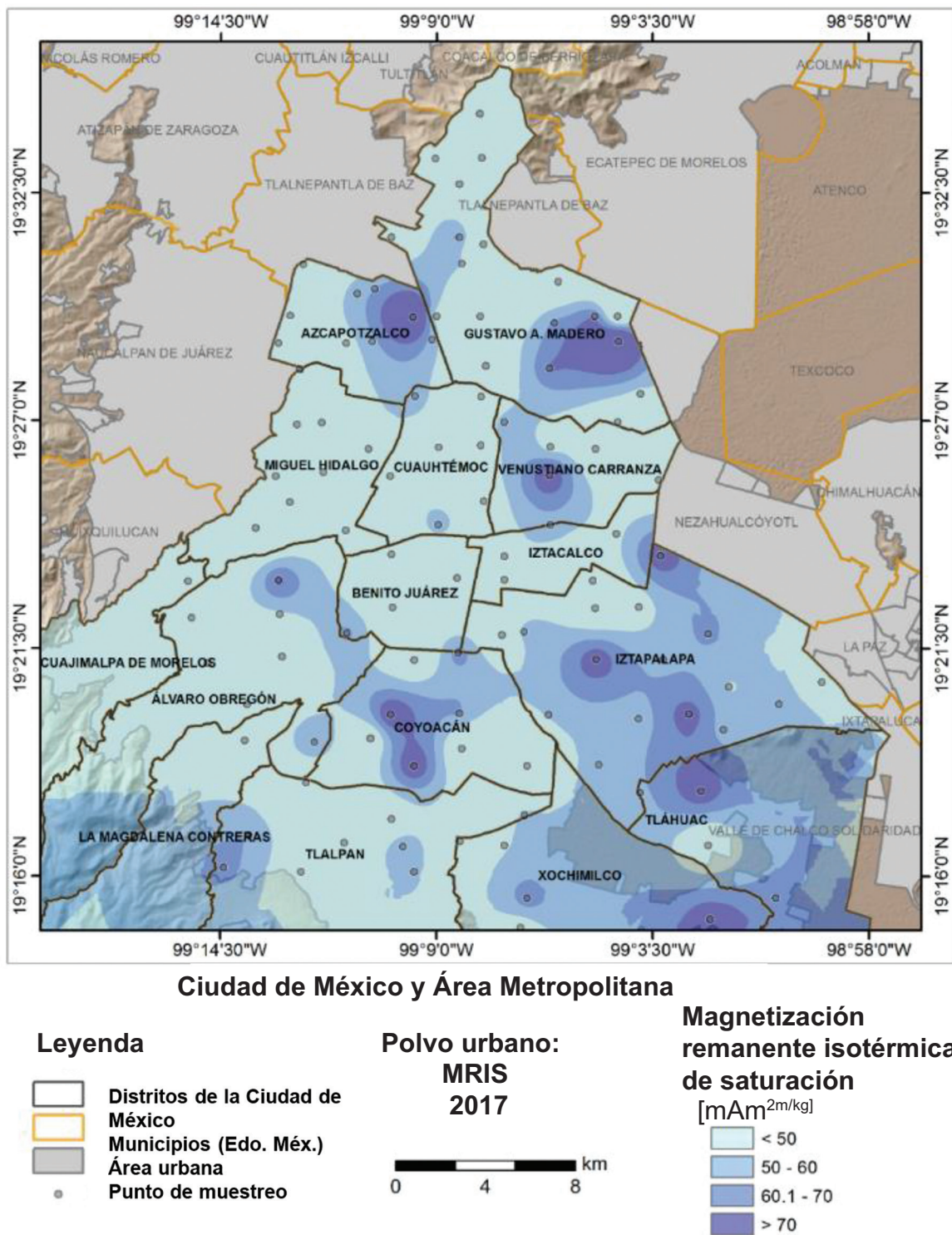


Figura 1. Valores de magnetización remanente isotérmica de saturación obtenidos en marzo de 2017 a partir de muestras de polvo de carreteras urbanas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCC). El azul más oscuro indica alta concentración de minerales magnéticos (ferrimagnéticos). Una zona altamente poblada de la ZMCC, Iztapalapa, con aproximadamente 2 millones de habitantes, es un ejemplo representativo de alta concentración de materiales ferrimagnéticos.

Cr, Zn, Cu y Pb. Cabe destacar que las principales zonas industriales y de alto tráfico vehicular de la ZMCC: Cuauhtémoc, Venustiano Carranza y Gustavo

A. Madero presentaron las concentraciones más altas de metales pesados en el polvo urbano.¹⁷⁻²⁵ Las avenidas con alto tráfico vehicular cercanas al Aeropuerto

Internacional de la Ciudad de México y a las zonas industriales del norte registraron las concentraciones más elevadas de partículas ferrimagnéticas, con tres factores que contribuyen a ello: intersecciones de alto tráfico vehicular, zonas obligatorias de baja velocidad ≤ 30 km/h y reductores de velocidad.²⁵ Relevante para este trabajo, entre 2011 y 2018, se ha observado un aumento en las concentraciones de Cu, Pb y Zn en el polvo de las calles de la ZMCC.²⁵

Las definiciones de UFPM y NP en este artículo son intercambiables: partículas $< 0.1 \mu\text{m}$ (100 nm) de diámetro, comúnmente denominadas PM0.1, incluidas aquellas de origen antropogénico, fuentes naturales (volcánicas) u origen industrial (es decir, alimentos, residuos electrónicos). La fracción PM0.1 no se mide de forma rutinaria en la ZMCC.

Diseño del estudio y muestras cerebrales

Examen de 48 muestras cerebrales forenses de la ZMCC, incluidos 12 niños, 8.5 ± 7.6 años y 16 adultos, 39.2 ± 19.6 años.

EXPERIMENTOS MAGNÉTICOS

Se examinó la adquisición tanto de la magnetización remanente anhística (MRA) como de la MRIS. La MRA se produce mediante la aplicación gradual de un campo magnético alterno (CMA) en presencia de un campo magnético débil constante. La MRA es altamente sensible a pequeños granos magnéticos de dominio único (DU).^{26,27} La magnetización remanente isotérmica (MRI) es la remanencia que queda en la muestra después de aplicar un campo remanente (1-1000 mT) durante un corto período (1 s). Se adquiere sin cambios de temperatura, tiene una relación directa con el espectro de coercitividad de la muestra y es útil para identificar minerales ferrimagnéticos (por ejemplo, la magnetita típicamente se satura a 300-500 mT) y su concentración.²⁸ Las curvas de adquisición de MRI se realizaron en todas las muestras, sometiendo cada muestra a un campo magnético creciente en la misma dirección. Un magnetizador de pulsos IM-10 (ASC Scientific) proporcionó campos directos de hasta 1000 mT y un campo inverso de 300 mT (dirección opuesta). La MRI adquirida a 1000 mT se consideró la MRIS. Los valores de MRA y MRIS se normalizaron por masa para los análisis. La relación S, útil para estimar la presencia de minerales magnéticos blandos con baja coercitividad, se calculó como $S_{300} = \text{MRI}_{-300} / \text{MRIS}$; en este caso, se utilizó MRI 300 mT en campo inverso (MRI_{-300}).

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (MET) Y ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X POR DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDX)

Los estudios MET se realizaron utilizando muestras cerebrales en bloques de 3 mm. Las muestras se cortaron con cuchillos cerámicos y se manipularon con pinzas de plástico, libres de contaminación metálica. Las secciones se examinaron con un microscopio Carl Zeiss Axioskop 2 PLUS equipado con un sistema de imagen AxioVision REL 4.8. El MET se utilizó para documentar la UNV, definir la localización de UFPM/NP electrodensas y describir los cambios estructurales en los organelos celulares. Analizamos todas las muestras y rejillas/secciones de tejido, seleccionando áreas de rejilla al azar y escaneándolas de manera metódica. Para el EDX, la información sobre los elementos químicos presentes en las muestras se obtuvo mediante espectros característicos de rayos X.⁴

Análisis estadístico

Nos centramos en estadísticas descriptivas y en el resumen de las variables magnéticas de interés. Comparamos variables magnéticas, particularmente las diferencias entre regiones subcorticales y corticales en distintos grupos de edad. Realizamos los análisis estadísticos utilizando Excel y el software estadístico "R" (<http://www.r-project.org/>).

Resultados

Contaminación del aire

La ZMCC es un ejemplo de crecimiento urbano no controlado y contaminación ambiental insuficientemente controlada durante los últimos 28 años.^{29,30} El área de la ZMCC es de aproximadamente 2,000 km² y se encuentra en una cuenca elevada a 2,200 m sobre el nivel del mar. La ZMCC tiene aproximadamente 24 millones de habitantes, alrededor de 1,000 industrias altamente contaminantes, más de 100,000 camiones pesados de pasajeros y carga diésel no regulados y más de 1 millón de motocicletas no reguladas. La energía anual necesaria para sostener las actividades de la ZMCC consume > 10 millones de metros cúbicos de combustibles líquidos derivados del petróleo y > 5 mil millones de m³ de gas natural y gas LP. Los vehículos a motor en la ZMCC, es decir,

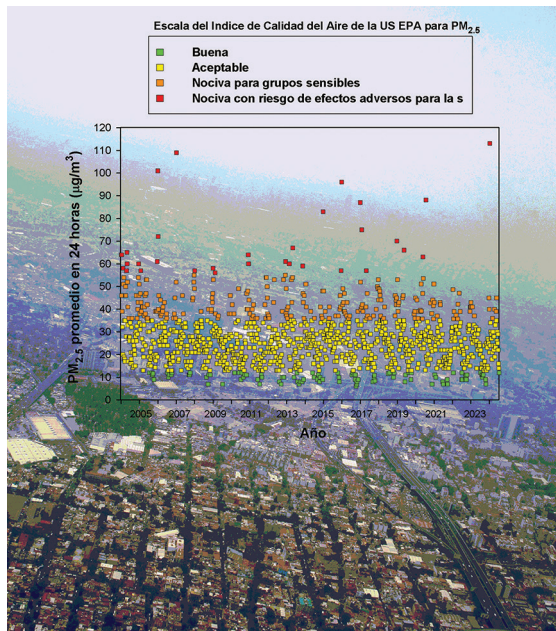


Figura 2. Tendencia en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCC) de las concentraciones máximas promedio de material particulado (PM_{2.5}) en 24 h medidas cada 6° día, en 5 estaciones clave de vigilancia entre enero de 2004 y diciembre de 2024, y su comparativa con las categorías correspondientes del índice de calidad del aire de la US EPA. El gráfico de PM_{2.5} se superpone a una imagen aérea de la ZMCC del 13 de diciembre de 2024. Datos obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/aire/default.php>.

los vehículos pesados diésel, liberan grandes cantidades de PM_{2.5} primario, carbono elemental, hidrocarburos aromáticos policíclicos unidos a partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y una amplia gama de sustancias tóxicas, incluyendo lipopolisacáridos, formaldehído, acetaldehído, benceno, tolueno y xilenos.²⁹

En este estudio, los residentes de la ZMCC han estado expuestos a concentraciones medias de PM_{2.5} durante 24 h por encima del estándar actual de la US EPA (35 µg/m³) durante toda su vida, desde la concepción (Fig. 2). Cabe destacar que los días con aire limpio de PM_{2.5} (puntos verdes) son poco frecuentes.

Estudios magnéticos cerebrales

MRA

La MRA es una magnetización que las partículas magnéticas adquieren cuando se someten a un

campo alterno (AF) de amplitud gradualmente decreciente (H_{AF}) con un decremento constante ($\Delta H_{AF}/\text{ciclo}$), simultáneamente con un campo de (corriente continua) DC unidireccional constante (HDC). La MRA se mide cuando tanto los campos AF como DC son 0. Las curvas de MRA se producen al reducir gradualmente un campo magnético alterno fuerte en presencia de un campo magnético débil constante. Las curvas de MRA de las 4 diferentes regiones anatómicas cerebrales mostraron un aumento de la magnetización entre 30 y 50 µT, un indicador de la presencia de partículas ferromagnéticas pseudo-DU o DU (tamaño de partícula < 76 nm) (Fig. 3).

La figura 3 muestra que todas las muestras cerebrales de niños presentaron partículas magnéticas. Las muestras cerebrales fueron expuestas a pulsos de campo magnético que aumentaban de 25 mT a 1000 mT.

Se observa una dirección vectorial magnética estable para materiales ferrimagnéticos con un cambio de orientación (180°) esperado cuando se aplica un campo inverso de 300 mT. La posición de las partículas magnéticas se clasificó en tres grupos distintos de comportamiento de movimiento: T1 no cambia durante la magnetización, manteniendo una orientación $-x$ de 180° durante la adquisición de MRI. T1 invierte su orientación a $+x$ (0°) cuando se aplica un campo inverso (300 mT). T2 demuestra cambios en la orientación magnética, rotando aproximadamente 180° durante la adquisición de magnetización, con posibles cambios en la posición del material magnético cerca de su posición original. Por otro lado, T3 cambia su orientación a lo largo del proceso de adquisición, y no se observaron en ninguna de las muestras examinadas en este estudio. El comportamiento T3 se ha relacionado con variaciones en la posición del mineral magnético.⁷

MUESTRAS CEREBRALES: MRIS e MRI

Se obtuvieron la MRIS de 48 muestras cerebrales congeladas en fresco de regiones corticales y subcorticales seleccionadas, incluido el BO. Cada una de las regiones cerebrales seleccionadas mostró la presencia de partículas magnéticas en MRIS (Tabla 1), y se indujo comportamiento de movimiento magnético mediante campos magnéticos aplicados de 25-1000 mT AC.

Las muestras corticales de niños mostraron valores más altos de MRIS magnética que las muestras de adultos (18.4 ± 19.7 frente a 9.9 ± 4.3 µAm²/kg) y tanto la corteza prefrontal como el BO también mostraron una fuerte tendencia a valores más elevados. Notablemente,

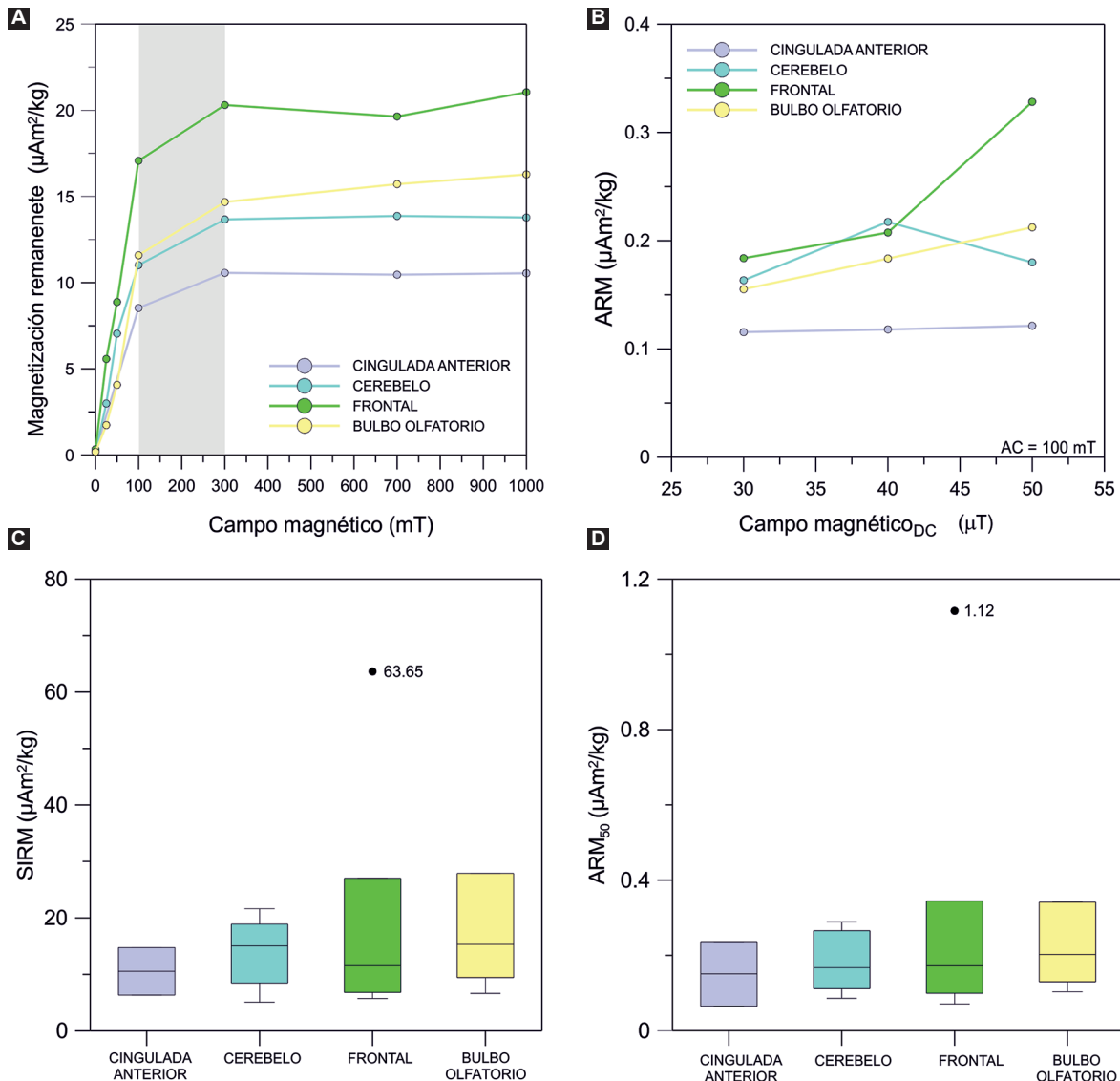


Figura 3. **A:** curvas representativas de la adquisición de magnetización remanente en muestras de 4 diferentes regiones cerebrales de niños indican la presencia de minerales ferrimagnéticos (área gris: saturación de minerales ferrimagnéticos). **B:** curvas representativas de magnetización remanente anhistrérica (MRA) obtenidas entre 30 y 50 μT indican la presencia de minerales ferrimagnéticos con tamaño de grano de dominio único (0.03-0.1 μm) en muestras cerebrales de 12 niños. Las variaciones en el crecimiento de las curvas entre 40 y 50 μT se asocian a cambios en la orientación o desplazamiento de las partículas magnéticas en respuesta a los campos combinados de 100 mT AC y 40-50 μT DC. **C:** el diagrama de caja y bigotes de los valores de magnetización remanente isotérmica de saturación (valor de magnetización remanente a 1000 mT) muestra concentraciones parecidas de material ferrimagnético en las 4 regiones cerebrales. **D:** el diagrama de caja y bigotes de MRA muestra valores similares en la corteza frontal y el bulbo olfatorio.

la acumulación de partículas magnéticas cerebelosas, una región afectada por atrofia en la RM cerebral de adultos jóvenes aparentemente sanos de la ZMCC,³¹ fue mucho mayor en adultos que en niños.

EDX y MET cerebral

El EDX del presente estudio y de estudios previos^{5,7-9} ha mostrado NP de Fe, Ni, Co, Ti, V, Hg, Cu,

Zn, Cd, Al, Mg, Ag, Ce, La, Pr, W, Ca, Cl, K, Si, S, Na y/o Br en núcleos hipotalámicos y talámicos, glándula pineal, hipocampo, ganglios basales, sustancia negra, tectum, sustancia gris periventricular, locus coeruleus, rafe dorsal, rafe magnus, formación reticular mesencefálica, núcleo rojo, núcleos reticulares pontinos orales, núcleo olivar inferior, corteza frontal y temporal y cerebelo. La figura 4 ilustra UFPM/NP en el BO de residentes pediátricos de la ZMCC. Los

Tabla 1. Cuarenta y ocho muestras cerebrales con mediciones de MRIS. La media de edad de los individuos de este estudio fue de 27.8 ± 20.9 años, incluidos 12 niños, con una edad de 8.5 ± 7.6 años.

Fuentes de las muestras y comportamiento de movimiento	n	Media de edad	Peso, gramos	MRA ₅₀	MRIS	MRI ₋₃₀₀	S ₃₀₀
		Años		$\mu\text{Am}^2/\text{kg}$	$\mu\text{Am}^2/\text{kg}$	$\mu\text{Am}^2/\text{kg}$	AD*
Todas las muestras	48	27.8 ± 20.9	0.8 ± 0.3	0.20 ± 0.17	15.1 ± 15.6	14.6 ± 15.2	1.0 ± 0.05
Todas las muestras de adultos	28	40.1 ± 18.2	0.8 ± 0.3	0.17 ± 0.12	14.4 ± 17.2	14.0 ± 16.9	1.0 ± 0.06
Todas las muestras de niños	29	10.5 ± 7.3	0.8 ± 0.4	0.23 ± 0.22	16.1 ± 13.2	15.4 ± 12.7	1.0 ± 0.05
Todas las muestras corticales	22	32.8 ± 21.7	0.9 ± 0.4	0.18 ± 0.22	12.9 ± 12.3	12.3 ± 11.8	1.0 ± 0.1
Corticales de adultos	15	43.7 ± 18.7	0.8 ± 0.3	0.12 ± 0.06	9.9 ± 4.3	9.5 ± 4.3	1.0 ± 0.1
Corticales de niños	8	12.3 ± 6.6	0.9 ± 0.6	0.28 ± 0.35	18.4 ± 19.7	17.6 ± 18.8	1.0 ± 0
Todas las muestras frontales	10	25.4 ± 23.2	1.0 ± 0.5	0.23 ± 0.32	16.03 ± 18.1	15.4 ± 17.3	1.0 ± 0.04
Frontales de adultos	4	47.2 ± 21.7	1.0 ± 0.1	0.09 ± 0.04	8.5 ± 4.8	8.4 ± 4.8	1.0 ± 0.01
Frontales de niños	6	10.8 ± 7.05	0.9 ± 0.6	0.33 ± 0.39	21 ± 22.4	20 ± 21.4	1.0 ± 0.05
Todas las muestras del cíngulo anterior	13	38.5 ± 19.4	0.8 ± 0.2	0.14 ± 0.06	10.5 ± 4.2	9.9 ± 4.2	0.9 ± 0.08
Cíngulo anterior de adultos	11	42.4 ± 18.5	0.8 ± 0.2	0.13 ± 0.06	10.5 ± 4.2	9.9 ± 4.3	0.9 ± 0.09
Cíngulo anterior en niños	2	17	0.8 ± 0.2	0.15 ± 0.12	10.5 ± 5.9	10.2 ± 5.7	1.0 ± 0.002
Todas las muestras de cerebelo	21	27.5 ± 18.5	0.8 ± 0.3	0.21 ± 0.13	17.2 ± 19.3	16.8 ± 18.9	1.0 ± 0.03
Cerebelo de adultos	14	36.2 ± 17.5	0.8 ± 0.3	0.23 ± 0.15	19.1 ± 23.9	18.8 ± 23.4	1.0 ± 0.02
Cerebelo de niños	8	12.2 ± 6.5	0.8 ± 0.3	0.18 ± 0.08	13.8 ± 6.01	13.4 ± 6.1	1.0 ± 0.05
Bulbo olfatorio	4	1	0.5 ± 0.2	0.21 ± 0.11	16.2 ± 9.9	15 ± 9.1	0.9 ± 0.07
T1 Todos	46	29.5 ± 20.5	NA	0.25 ± 0.37	17.7 ± 19	17.3 ± 18.7	1.0 ± 0.05
Movimiento T1 en adultos	30	39.5 ± 18.1	NA	0.26 ± 0.44	17.4 ± 20.6	17.3 ± 20.3	1.0 ± 0.06
Movimiento T1 en niños	16	10.7 ± 7.3	NA	0.23 ± 0.19	18.2 ± 16.1	17.8 ± 15.9	1.0 ± 0.03
T2 Todos los niños	3	7 ± 8.7	NA		18.9 ± 3.6		

AD*: adimensional.

AD: enfermedad de Alzheimer; MRA₅₀: magnetización remanente anisotrópica; MRI₋₃₀₀: magnetización remanente isotérmica; n: número de muestras; MRIS: magnetización remanente isotérmica de saturación.

metales se asociaron a emisiones por combustión (Fe, Ti, Ni), abrasión y deterioro de catalizadores automotrices, residuos electrónicos y elementos de tierras raras, es decir, lantano, cerio y praseodimio (parte esencial de muchos dispositivos de alta tecnología).

Un hallazgo notable en todas las muestras infantiles fue el daño ultraestructural de la UNV tal y como se observa en la figura 4A, C y D. Las UFPM/NP (Fig. 4F) se identificaron en mitocondrias, retículo endoplásmico (RE), lisosomas, aparato de Golgi, heterocromatina, matriz y poros nucleares. Todos los sujetos de este estudio mostraron hallazgos neuropatológicos de AD, PD y/o enfermedades asociadas a TDP-43.

Discusión

Áreas cerebrales críticas están dañadas en etapas pediátricas tempranas y déficits cognitivos a corto y largo plazo, carga neuropsiquiátrica y neurodegeneración están en curso en jóvenes metropolitanos de la ZMCC.^{1-9,31-40} En Estados Unidos y México, millones de residentes que viven en regiones que no cumplen con los estándares de PM2.5 están expuestos a la fracción más pequeña PM0.1 (UFPM/NP), una fracción que ni está regulada ni monitorizada.⁴ Estas partículas PM0.1 son emitidas por la combustión de combustibles, actividad volcánica, incendios forestales, combustión de madera y estufas de pellets, NP (alimentos), etc., y contienen metales tóxicos,

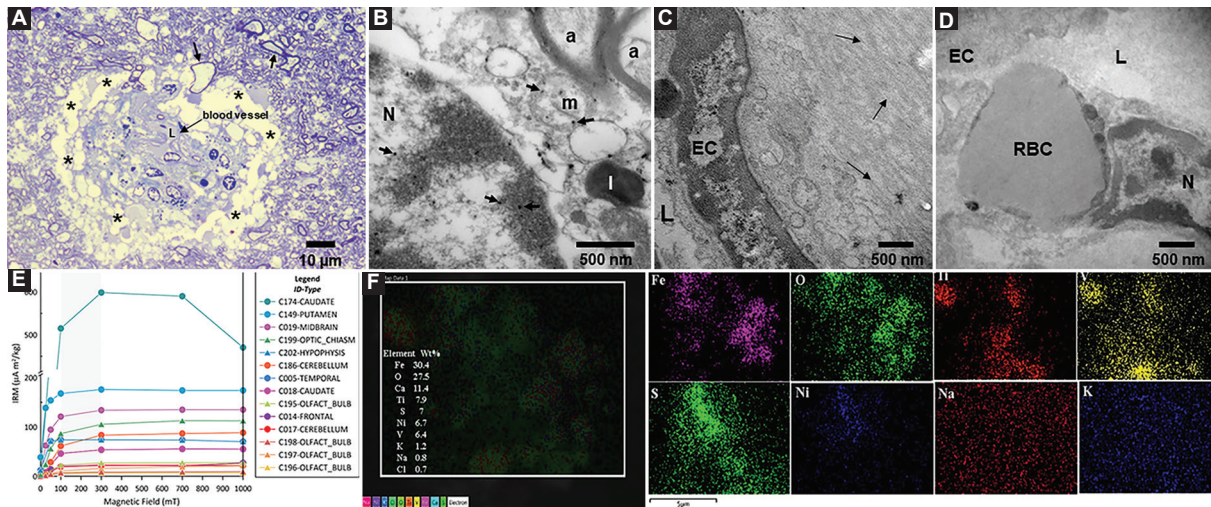


Figura 4. Bulbos olfatorios en residentes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. **A:** niña de 13 años con daño grave de la unidad neurovascular, el * indica el espacio perivascular anormal agrandado. **B:** núcleos neuronales y mitocondrias anormales (m) muestran nanopartículas (NP) (flechas cortas) junto a lisosomas (l) y axones (a). **C:** pequeño capilar con un núcleo de célula endotelial (CE) con amiloide fibrilar en lámina β (flechas cortas); la luz está marcada como L. **D:** eritrofagocitosis endotelial en un niño de 17 años. El eritrocito ya dentro del citoplasma de la CE está marcado como glóbulo rojo. L indica la luz del vaso y N el núcleo de la CE. **E:** curvas de magnetización remanente isotérmica de saturación (imagen por resonancia magnética) del bulbo olfatorio (BO) y áreas cerebrales de contraste. Todas las muestras mostraron baja coercitividad y magnetización de saturación en el rango de 100-300 mT, consistente con materiales ferrimagnéticos. Los incrementos de magnetización se asociaron a concentraciones magnéticas más altas. El material ferrimagnético en el BO de un niño de 11 meses es el 25% del observado en el caudado de un individuo de 72 años. **F:** las NP muestran Fe, Ti, V y Ni en una preparación de espectrometría de rayos X por dispersión de energía.

metaloides y elementos naturales, incluido Fe, Ti, Al, V, Ni, Hg, Co, Cu, Zn, S, Si, Ag, Pt, C, Ce, La, Pr y W identificados en neuronas prenatales y postnatales, glía y endotelio.³⁵⁻⁹ El daño a membranas celulares, mitocondrias, RE, aparato de Golgi, lisosomas, heterocromatina, ADN, poros nucleares, etc. está asociado a estrés oxidativo, del RE, mitocondrial y endotelial, neuroinflamación, afectación del ADN, agregación y mal plegamiento de proteínas, hipertermia, reducción de la actividad lisosomal, RE-fagia, alteraciones del complejo del poro nuclear y del transporte nucleocitoplasmático.³²⁻³⁷

La afectación de las áreas críticas del neurodesarrollo dañadas por UFPM/NP¹¹⁻¹⁶ probablemente sea irreversible, particularmente, porque hemos documentado los hallazgos de enfermedades neurodegenerativas mayores, déficits cognitivos, trastornos del sueño y cambios estructurales y volumétricos en la resonancia magnética cerebral en residentes jóvenes aparentemente sanos de la ZMCC.^{31,38-40}

Nuestra principal preocupación es el impacto de la contaminación del aire en las capacidades olfatorias de los niños, el comportamiento, la carga neuropsiquiátrica y el rendimiento académico.⁴¹⁻⁴⁴ El *Programme for International Student Assessment* valora los conocimientos y habilidades de estudiantes de 15 años en

matemáticas, lectura y ciencias.⁴⁵ Las pruebas exploran la capacidad de los estudiantes para resolver problemas complejos, el pensamiento crítico y comunicarse de manera efectiva. Los estudiantes en México obtuvieron puntuaciones por debajo de la media fijada por la *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)* en matemáticas, lectura y ciencias. Casi ningún estudiante de México fue de alto rendimiento en matemáticas ni ciencias. En México, el 1% de los estudiantes alcanzó el nivel 5 o superior en lectura (media de la OCDE = 7%). Los estudiantes mexicanos no logran comprender textos extensos, manejar conceptos abstractos ni contraintuitivos ni establecer distinciones entre hechos y opiniones basadas en señales implícitas del contenido o la fuente de la información, ni son capaces de aplicar de forma creativa y autónoma sus conocimientos científicos a una amplia variedad de situaciones, incluidas las desconocidas. Nuestros estudiantes de zonas metropolitanas contaminadas (aquellos en la ZMCC con mayor concentración de polvo magnético) de bajo nivel socioeconómico y con una educación de baja calidad, tienen mínimas probabilidades de enfrentar desafíos de la vida real y lograr el éxito futuro: México presenta los niveles más

bajos de comprensión lectora, matemáticas y ciencias de todos los países de la OCDE.

Un factor de riesgo adicional extraordinariamente alto debe discutirse aquí: las exposiciones a campos electromagnéticos de radiofrecuencia individuales han aumentado significativamente en los últimos años, con los enlaces descendentes y ascendentes móviles y 5G-New Radio contribuyendo a las exposiciones más altas.⁴⁶ Las poblaciones pediátricas y de adultos jóvenes de la ZMCC, masivamente expuestas a teléfonos celulares, tabletas y equipos electrónicos, no están protegidas contra exposiciones cercanas de 5G, y las poblaciones que acumulan UFPM/NP magnéticas cerebrales podrían estar en muy alto riesgo.⁴⁷⁻⁴⁹

Conclusiones

Las UFPM/NP magnéticas en BO, corteza prefrontal y CCA abren una vía de daño celular magnético, clave para los déficits olfatorios tempranos y relevante para las enfermedades neurodegenerativas fatales en curso. Los efectos citotóxicos de las FeNP, bien conocidos por los investigadores del cáncer, con y sin el uso de CMA, preocupan enormemente, ya que pueden provocar una disminución de la viabilidad celular asociada a la hipertermia por fluidos magnéticos.³⁵ Las células endoteliales (CE) son altamente vulnerables a los contaminantes del aire, y las NP magnéticas están fuertemente implicadas en la disminución de la viabilidad de las CE y en la alta producción de especies reactivas de oxígeno, lactato deshidrogenasa y marcadores de apoptosis.³⁶ El BO es una estructura clave en contacto directo con el ambiente, con funciones importantes en la olfacción, respuestas neuroendocrinas, conductuales, sociales y metabólicas, y es un sitio temprano de neuroinflamación y neurodegeneración. Las exposiciones a UFPM/NP magnéticas representan una amenaza grave para la salud cerebral en la ZMCC y a nivel global.

Los investigadores han demostrado que las exposiciones subagudas a NP modifican el transcriptoma del BO y sus respuestas, incluida la unión a odorantes, la regulación sináptica y los genes de la vía de señalización de mielinización.⁴⁷ De relevancia para los habitantes de zonas metropolitanas, se ha encontrado evidencia de diésel NPs en neuronas sensoriales olfatorias y células periglomerulares del BO de fetos expuestos cuando se administró a ratonas gestantes mediante inhalación nasal exclusiva en el día gestacional GD28.⁴⁸ Como los BO muestran neurogénesis

continua, es decir, interneuronas inhibitorias, desde el nacimiento y durante la edad pediátrica y la adultez temprana,⁴⁹ los eventos tempranos que alteran las células granulares podrían modificar el procesamiento innato de la información olfatoria.⁴⁹ Dejou et al.⁴⁹ discutieron las graves consecuencias de alterar la memoria olfatoria en etapas tempranas de la vida y su impacto en la percepción en la adultez, es decir, en las respuestas a eventos aversivos y en la susceptibilidad a trastornos emocionales. Más de un tercio de los adolescentes y adultos jóvenes clínicamente sanos de la ZMCC presentaron puntuaciones bajas en una prueba de identificación de olores.¹²

La cuestión no es si los niños y adultos jóvenes de la ZMCC desarrollarán enfermedades neurodegenerativas fatales, la pregunta es ¿cómo podemos neuroprotegerlos y cuán temprano podemos diagnosticarlos? La patología del BO, la corteza prefrontal y la corteza cingulada anterior es temprana, progresiva y presenta una neuropatología superpuesta. Los hallazgos neuropatológicos de AD, PD, DLFT y ALS comienzan en la infancia y progresan de manera implacable. Estamos siendo testigos del bajo rendimiento académico, los déficits cognitivos, los cambios estructurales y volumétricos cerebrales en RM y los efectos neuropsiquiátricos en población pediátrica y adultos jóvenes.^{3,7,9,16,31,38-40}

¿Cuáles son las medidas más importantes que se deben tomar para proteger a nuestras poblaciones?

La vigilancia de UFPM/NP resulta crítica, incluidas aquellas provenientes de elementos tóxicos en suelos, actividad volcánica y desastres naturales; además, es urgente tomar las medidas adecuadas para reducir las emisiones tóxicas. Los vehículos pesados diésel deben ser regulados y el transporte público, incluido el metro, debe reducir drásticamente sus emisiones de NP.¹⁸ Los niños en escuelas K-12 cercanas a zonas con mucho tráfico no deberían estar expuestos a la contaminación exterior en horas pico. La población debería contar con sistemas de alerta rápida y eficiente en tiempo real cuando existan exposiciones elevadas a contaminantes y, dado que las diferentes alcaldías de la ZMCC presentan perfiles de contaminación distintos, la alerta debería ser regional.

Es evidente la necesidad de aplicar pruebas prácticas y objetivas no invasivas de la función olfatoria tanto en niños como en adultos con fines de vigilancia.⁵⁰

¿A alguien le importa?

Agradecimientos

El trabajo de microscopía electrónica de A. González-Maciel y R. Reynoso-Robles (Figs. 4 B-D) fue parcialmente apoyado por el Programa local E022 en el *Instituto Nacional de Pediatría* en la Ciudad de México (México). Agradecemos a Samuel Tehuacanero Cuapa, del Laboratorio de Microscopía Óptica, por la fotografía de la figura 4F (CIE UNAM 1407279/26466555).

Conflicto de intereses

Los autores no declararon ningún conflicto de intereses.

Financiamiento

Los autores declaran que no se recibió apoyo financiero para la investigación, autoría y/o publicación de este artículo.

Consideraciones éticas

Protección de sujetos humanos y animales. Los autores declaran que los procedimientos seguidos estuvieron de acuerdo con las normas éticas del comité responsable de experimentación en humanos y con la Asociación Médica Mundial y la Declaración de Helsinki. Los procedimientos fueron autorizados por el Comité de Ética institucional.

Confidencialidad, consentimiento informado y aprobación ética. Los autores han seguido los protocolos de confidencialidad de su institución, obtuvieron el consentimiento informado de todos los pacientes y aseguraron la aprobación del Comité de Ética. Se siguieron las directrices SAGER según lo aplicable a la naturaleza del estudio.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial (IA). Los autores declaran que no se utilizó inteligencia artificial generativa en la redacción o creación del contenido de este manuscrito.

Bibliografía

- Calderón-Garcidueñas L, Franco-Lira M, Roldan-Henriquez C, Osnaya N, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, et al. Urban air pollution: influences on olfactory function and pathology in exposed children and young adults. *Exp Toxicol Pathol*. 2010;62:91-102.
- Calderón-Garcidueñas L, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Kulesza RJ, Mukherjee PS, Torres-Jardón R, et al. Alzheimer's disease and alpha-synuclein pathology in the olfactory bulbs of infants, children, teens and adults ≤ 40 years in Metropolitan Mexico City. APOE4 carriers at higher risk of suicide accelerate their olfactory bulb pathology. *Environ Res*. 2018;166:348-62.
- Calderón-Garcidueñas L, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Delgado-Chávez R, Mukherjee PS, Torres-Jardón R, et al. Hallmarks of Alzheimer disease are evolving relentlessly in Metropolitan Mexico City infants, children and young adults. APOE4 carriers have higher suicide risk and higher odds of reaching NFT stage V at ≤ 40 years of age. *Environ Res*. 2018;164:475-87.
- Calderón-Garcidueñas L, Ayala A, Mukherjee PS. 2024 united States elections: air pollution, neurodegeneration, neuropsychiatric, and neurodevelopmental disorders. Who cares? *J Alzheimers Dis*. 2024;98:1277-82.
- Calderón-Garcidueñas L, Stommel EW, Torres-Jardón R, Hernández-Luna J, Aiello-Mora M, González-Maciel A, et al. Alzheimer and Parkinson diseases, frontotemporal lobar degeneration and amyotrophic lateral sclerosis overlapping neuropathology start in the first two decades of life in pollution exposed urbanites and brain ultrafine particulate matter and industrial nanoparticles, including Fe, Ti, Al, V, Ni, Hg, Co, Cu, Zn, Ag, Pt, Ce, La, Pr and W are key players. Metropolitan Mexico City health crisis is in progress. *Front Hum Neurosci*. 2024;17:1297467.
- Calderón-Garcidueñas L, Pérez-Calatayud AA, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Silva-Pereyra HG, Ramos-Morales A, et al. Environmental nanoparticles reach human fetal brains. *Biomedicine*. 2022;10:410.
- Calderón-Garcidueñas L, Cejudo-Ruiz FR, Stommel EW, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Torres-Jardón R, et al. Single-domain magnetic particles with motion behavior under electromagnetic AC and DC fields are a fatal cargo in Metropolitan Mexico City pediatric and young adult early Alzheimer, Parkinson, frontotemporal lobar degeneration and amyotrophic lateral sclerosis and in ALS patients. *Front Hum Neurosci*. 2024;18:1411849.
- Calderón-Garcidueñas L, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Hammond J, Kulesza R, Lachmann I, et al. Quadruple abnormal protein aggregates in brainstem pathology and exogenous metal-rich magnetic nanoparticles (and engineered Ti-rich nanorods). The substantia nigrae is a very early target in young urbanites and the gastrointestinal tract a key brainstem portal. *Environ Res*. 2020;191:110139.
- Calderón-Garcidueñas L, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Silva-Pereira HG, Torres-Jardón R, Brito-Aguilar R, et al. Environmentally toxic solid nanoparticles in noradrenergic and dopaminergic nuclei and cerebellum of Metropolitan Mexico City children and young adults with neural quadruple misfolded protein pathologies and high exposures to nano particulate matter. *Toxics*. 2022;10:164.
- Karanth SD, Schmitt FA, Nelson PT, Katsumata Y, Kryscio RJ, Fardo DW, et al. Four common late-life cognitive trajectories patterns associate with replicable underlying neuropathologies. *J Alzheimers Dis*. 2021;82:647-59.
- Pirau L, Lui F. Frontal lobe syndrome. In: *StatPearls*. Treasure Island, FL: StatPearls;2023.
- Guan L, Qiu M, Li N, Zhou Z, Ye R, Zhong L, et al. Inhibitory gamma-aminobutyric acidergic neurons in the anterior cingulate cortex participate in the comorbidity of pain and emotion. *Neural Regen Res*. 2025;20:2838-54.
- Fatemizadeh M, Riahi E, Hassanzadeh G, Torkaman-Boutorabi A, Radfar F, Farahmandfar M. Deep brain stimulation of the anterior cingulate cortex reduces opioid addiction in preclinical studies. *Sci Rep*. 2025;15:2065.
- Chen Y, Li HT, Luo X, Li G, Ide JS, Li CR. Polygenic risk for depression and resting-state functional connectivity of subgenual anterior cingulate cortex in young adults. *J Psychiatry Neurosci*. 2025;50:E31-44.
- Zheng YB, Zhang SN, Tang HD, Wang SW, Lin X, Bao YP, et al. Gaming disorder: neural mechanisms and ongoing debates. *J Behav Addict*. 2025;14:55-78.
- Medina-Mora ME, Orozco R, Rafful C, Cordero M, Bihai J, Ferrari A, et al. Mental disorders in Mexico 1990-2021. Results from the global burden of disease 2021 study. *Gac Med Mex*. 2023;159:527-38.
- Aguilar-Castillo DI. Distribución de Tamaño de Partículas Ultra Finas Presentes en la Atmósfera del Norte de la Ciudad de México. [B.S. Thesis]. IPN, Mexico City, Mexico: Escuela Nacional de Ciencias Biológicas; 2023.
- Velasco E, Retama A, Segovia E, Ramos R. Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmos Environ*. 2019;219:117044.
- Caudillo L, Salcedo D, Peralta O, Castro T, Alvarez-Ospina H. Nanoparticle size distributions in Mexico City. *Atmos Pollut Res*. 2020;11:78-84.
- Dunn MJ, Jimenez JL, Baumgardner D, Castro T, McMurry PH, Smith JN. Measurements of Mexico City nanoparticle size distributions: observations of new particle formation and growth. *Geophys Res Lett*. 2004;31:(L10102):1-4.
- Kleinman LI, Springston SR, Wang J, Daum PH, Lee YN, Nunnermacker LJ, et al. The time evolution of aerosol size distribution over the Mexico City plateau. *Atmos Chem Phys*. 2009;9:4261-78.
- Berrellez-Reyes F, Schiavo B, González-Grijalva B, Angulo-Molina A, Meza-Figueroa D. Characterization of soot and crystalline atmospheric ultrafine particles. *Environ Pollut*. 2025;364:125314.

23. Bautista-Hernández DA, Bautista F, Goguitchaichvili A, Cejudo R. Street dust pollution by heavy metals: a geographically weighted regression approach in México City. *Int J Environ Sci Technol*. 2023;20:9795-822.
24. Aguilera A, Bautista F, Gutiérrez-Ruiz M, Cenicer-Gomez AE, Cejudo R, Goguitchaichvili A. Heavy metal pollution of street dust in the largest city of Mexico, sources and health risk assessment. *Environ Monit Assess*. 2021;193:193.
25. Cejudo R, Goguitchaichvili A, Bautista F, Cervantes-Solano M, Mendiola F, Cortés J, et al. El polvo urbano de las vialidades de la Ciudad de México: un análisis espacialmente lineal de los elementos potencialmente tóxicos, propiedades magnéticas y tamaño de partículas. *Rev Int Contam Ambie*. 2022;38:351-71.
26. Vasquez CA, Sapienza FF, Somacal A, Fazzito SY. Anhyseretic remanent magnetization: model of grain size distribution of spherical magnetite grains. *Stud Geophys Geod*. 2018;62:339-51.
27. Evans M, Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. In: *Proceedings*; 2013. Available from: <https://api.semanticscholar.org/corpusid:261863166>
28. Ma Z, Mohapatra J, Wei K, Liu P, Sun S. Magnetic nanoparticles: synthesis, anisotropy, and applications. *Chem Rev*. 2023;123:3904-43.
29. Molina LT, Madronich S, Gaffney JS, Apel E, De Foy B, Fast J, et al. An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos Chem Phys*. 2010;10:8697-760.
30. Villalobos-Pietrini R, Amador-Muñoz O, Valle-Hernández B, Gomez-Arroyo S, Waliszewski S. Organic compound in airborne particles and their genotoxic effects in Mexico City. In: *Air Quality Monitoring, Assessment and Management*. London: IntechOpen; 2011.
31. Calderón-Garcidueñas L, Hernández-Luna J, Mukherjee PS, Styner M, Chávez-Franco DA, Luévano-Castro SC, et al. Hemispheric cortical, cerebellar and caudate atrophy associated to cognitive impairment in Metropolitan Mexico City young adults exposed to fine particulate matter air pollution. *Toxics*. 2022;10:156.
32. Narayanaswamy V, Al-Omari IA, Kamzin AS, Khurshid H, Khaleel A, Issa B, et al. Coercivity and exchange bias in Ti-doped maghemite nanoparticles. *Magnetochemistry*. 2022;8:165.
33. Yarjanli Z, Ghaedi K, Esmaeili A, Rahgozar S, Zarrabi A. Iron oxide nanoparticles may damage to the neural tissue through iron accumulation, oxidative stress, and protein aggregation. *BMC Neurosci*. 2017;18:51.
34. Gutiérrez L, De La Cueva L, Moros M, Mazarío E, De Bernardo S, De La Fuente JM, et al. Aggregation effects on the magnetic properties of iron oxide colloids. *Nanotechnology*. 2019;30:112001.
35. Dan M, Bae Y, Pittman TA, Yokel RA. Alternating magnetic Field-induced hyperthermia increases Iron oxide nanoparticle cell association/uptake and flux in blood-brain barrier models. *Pharm Res*. 2015;32:1615-25.
36. Gárate-Vélez L, Escudero-Lourdes C, Salado-Leza D, González-Sánchez A, Alvarado-Morales I, Bahena D, et al. Anthropogenic Iron oxide nanoparticles induce damage to brain microvascular endothelial cells forming the blood-brain barrier. *J Alzheimers Dis*. 2020;76:1527-39.
37. Badman RP, Moore SL, Killian JL, Feng T, Cleland TA, Hu F, et al. Dextran-coated iron oxide nanoparticle-induced nanotoxicity in neuron cultures. *Sci Rep*. 2020;10:11239.
38. Calderón-Garcidueñas L, Engle R, Mora-Tiscareño A, Styner M, Gómez-Garza G, Zhu H, et al. Exposure to severe urban air pollution influences cognitive outcomes, brain volume and systemic inflammation in clinically healthy children. *Brain Cogn*. 2011;77:345-55.
39. Calderón-Garcidueñas L, Chávez-Franco DA, Luévano-Castro SC, Macías-Escobedo E, Hernández-Castillo A, Carlos-Hernández E, et al. Metals, nanoparticles, particulate matter, and cognitive decline. *Front Neurol*. 2022;12:794071.
40. Calderón-Garcidueñas L, Mukherjee PS, Kulesza RJ, Torres-Jardón R, Hernández-Luna J, Ávila-Cervantes R, et al. Mild cognitive impairment and dementia involving multiple cognitive domains in Mexican urbanites. *J Alzheimers Dis*. 2019;68:1113-23.
41. Maitre L, Julvez J, Lopez-Vicente M, Warembourg C, Tamayo-Uria I, Philippat C, et al. Early-life environmental exposure determinants of child behavior in Europe: a longitudinal, population-based study. *Environ Int*. 2021;153:106523.
42. Mota-Bertran A, Coenders G, Plaja P, Saez M, Barceló MA. Air pollution and children's mental health in rural areas: compositional spatio-temporal model. *Sci Rep*. 2024;14:19363.
43. O'Hare K, Watkeys O, Whitten T, Dean K, Laurens KR, Tzoumakis S, et al. Cumulative environmental risk in early life: associations with schizotypy in childhood. *Schizophr Bull*. 2023;49:244-54.
44. Smolker HR, Reid CE, Friedman NP, Banich MT. The association between exposure to fine particulate air pollution and the trajectory of internalizing and externalizing behaviors during late childhood and early adolescence: evidence from the adolescent brain cognitive development (ABCD) study. *Environ Health Perspect*. 2024;132:87001.
45. PISA Exam. Available from: https://www.oecd.org/en/publications/pisa-2022-results-volume-i-and-ii-country-notes_ed6fbcc5-en/mexico_519e-af88-en.html
46. Redmayne M, Maisch DR. ICNIRP guidelines' exposure assessment method for 5G millimetre wave radiation may trigger adverse effects. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20:5267.
47. Saveleva L, Sima M, Klema J, Krejčík Z, Vartiainen P, Sitnikova V, et al. Transcriptomic alterations in the olfactory bulb induced by exposure to air pollution: Identification of potential biomarkers and insights into olfactory system function. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2023;104:104316.
48. Bernal-Meléndez E, Lacroix MC, Bouillaud P, Callebert J, Olivier B, Persuy MA, et al. Repeated gestational exposure to diesel engine exhaust affects the fetal olfactory system and alters olfactory-based behavior in rabbit offspring. *Part Fibre Toxicol*. 2019;16:5.
49. Dejou J, Mandairon N, Didier A. Olfactory neurogenesis plays different parts at successive stages of life, implications for mental health. *Front Neural Circuits*. 2024;18:1467203.
50. The New EU Ambient Air Quality Directive Addressing Environmental Protection Agencies (EPAs); 2024. Available from: <https://tsi.com/resources/ufp-monitoring-fundamentals-and-more/the-new-eu-ambient-air-quality-eu-directive-addressing-environmental-protection/agencies/epas#:~:text=the%20new%20eu%20ambient%20air%20quality%20directive%20addressing%20environmental%20protection,of%20their%20local%20monitoring%20strategies>