

CIENCIA HOY

Revista de divulgación científica y tecnológica de la Asociación Civil Ciencia Hoy

Ejemplar en la Argentina \$20

EL TERREMOTO de Chile

- El Cabildo de Buenos Aires
- La basura de la ciudad
- El aire del subterráneo





Aerosoles en el subterráneo de Buenos Aires

Leonardo Murrúni, Andrés J Kreiner Mario E Debray y Valeria Solanes
Universidad Nacional de San Martín

Jorge Davidson, Miguel Davidson
CNEA

Siempre que contraemos el diafragma, expandimos nuestros pulmones y facilitamos el ingreso del aire que nos rodea. Necesitamos el aire para vivir pero...

El aire que respiramos contiene aerosoles, pequeñas partículas suspendidas en él con diámetros usualmente menores a los 100 micrómetros, μm (la millonésima parte de un metro). Aunque no existe un criterio unificado para la clasificación de este material particulado (así llamado y referido como MP), se distinguen tres grupos, a saber: partículas cuyo diámetro es inferior a $2,5\mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) o fracción respirable, partículas menores a $10\mu\text{m}$ en diámetro (MP_{10}) o fracción inhalable (dentro de este grupo se encuentran la fracción $\text{MP}_{2,5}$) y el material particulado total (MPT) que engloba todas las partículas con diámetros de hasta $100\mu\text{m}$. En general, las partículas menores a $10\mu\text{m}$ pueden permanecer varios días y aun semanas suspendidas en la atmósfera y ser transportadas a grandes distancias. En cambio, las mayores a $100\mu\text{m}$ se depositan, por acción de la gravedad, cerca de las fuentes de emisión y se las conoce como *material sedimentable*.

El material particulado de los aerosoles reconoce diferentes fuentes de emisión y se caracteriza por sus propiedades físicas y químicas. Entre las fuentes de emisión hay dos grandes grupos: las fuentes naturales y las producidas por la actividad del hombre. Las fuentes naturales contribuyen con el polvo de los suelos resuspendido por el viento, las partículas de origen marino como los cristales de cloruro de sodio, las emisiones volcánicas y las partículas de origen biológico como los granos de

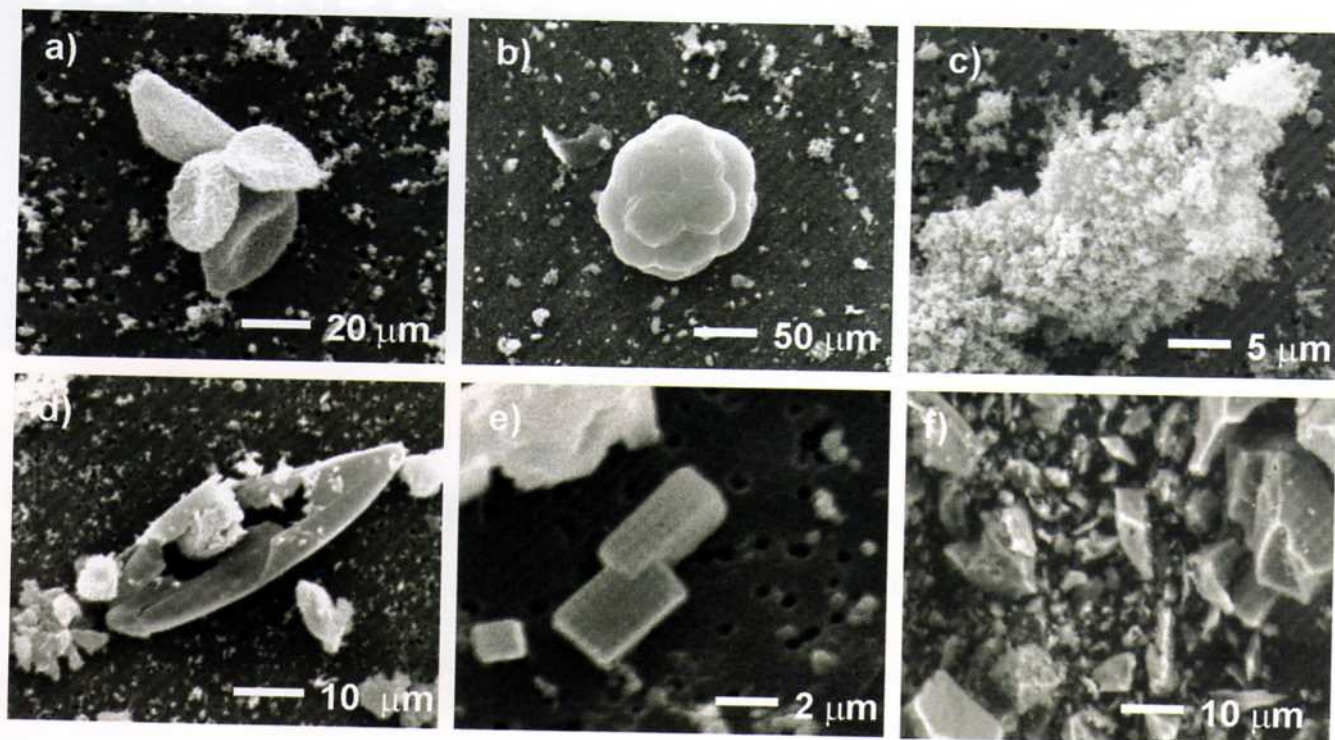
polen, las esporas y los hongos. Entre las fuentes antropogénicas están las emitidas por los vehículos y otros medios de transporte (caños de escape y abrasión de los neumáticos, por ejemplo) y las producidas por la actividad industrial y la generación de energía eléctrica, por mencionar sólo algunas de ellas. En general, se supone que las partículas grandes son emitidas por procesos naturales, entre los cuales se incluye la erosión de los materiales de construcción, mientras que las partículas más pequeñas provienen de fuentes antropogénicas. La figura 1 ilustra ambos casos con fotos de microscopio: por un lado partículas recolectadas en la ciudad de Esquel en mayo de 2008, a pocos días del inicio de la erupción del volcán Chaitén, y por el otro partículas recolectadas en Buenos Aires en el período 2003-2004.

En cuanto a su caracterización, las propiedades físicas (forma, tamaño) tienen efecto sobre el transporte de las partículas por acción del viento y en su tiempo de permanencia en la atmósfera, mientras que las químicas (contenido de metales pesados, hidrocarburos, etcétera) se definen por su impacto sobre la salud del hombre.

Efectos sobre la salud

Los aerosoles son considerados un contaminante del aire por sus efectos adversos sobre la salud humana. Se

Figura 1. Fotografías electrónicas de aerosoles atmosféricos recolectados en el período 2003-2004 en los exteriores del Laboratorio TANDAR, San Martín, provincia de Buenos Aires. a-b) partículas de origen biológico compuestas principalmente de carbono y oxígeno; c) aerosol antropogénico: aglomeración o cúmulo de pequeñas partículas (menores a $0,03\mu\text{m}$) emitidas por los vehículos y compuestas mayoritariamente por carbono; d) partículas probablemente relacionadas a la abrasión de materiales de construcción, compuestas de calcio y silicio; e) cristales de cloruro de sodio, de origen marino; f) cenizas volcánicas, emitidas por el volcán Chaitén durante la erupción de mayo de 2008, compuestas de silicio y aluminio, mayoritariamente. Las barras indican la escala de tamaño en micrones, mientras que las fotografías han sido obtenidas con aumentos entre 1000 y 20.000. Fotos de los autores



han encontrado efectos nocivos sobre el aparato respiratorio (irritación de las vías respiratorias, incremento de los ataques de asma, disminución de la capacidad pulmonar en niños y ancianos, cáncer de pulmón) y se ha verificado la inducción de diversas afecciones en el sistema cardiopulmonar. Estos efectos involucran tanto a la composición química del aerosol como al tamaño de la partícula. La fracción MP_{10} , y principalmente la $MP_{2.5}$, son consideradas como las más tóxicas por su capacidad de alcanzar las vías respiratorias más profundas donde ejercen sus efectos dañinos.

H R Anderson de la Universidad de Londres mostró recientemente que la tasa de mortalidad por afecciones cardiovasculares aumenta 1% por cada incremento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la fracción MP_{10} en la atmósfera ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, microgramo de partículas por m^3 de aire, donde $1\mu\text{g}$ es un millonésimo de gramo). Un grupo de investigadores suizos, por su parte, estimó que la vida del ser humano se acorta varios años si la concentración de $MP_{2.5}$ supera los $30\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS), el aire es limpio si el MP_{10} se limita a $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ y dentro de este no hay más de $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $MP_{2.5}$. La agencia norteamericana de protección ambiental EPA coincide con estos límites pero acota el $MP_{2.5}$ a solo $35\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la Argentina una ley nacional de 1973 pone límites, al MPT en $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ promediado mensualmente y en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires el decreto 198 de 2006 fija, como la OMS y la EPA, en $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ el máximo en MP_{10} .

Estos estándares representan la concentración de MP considerada segura, es decir que concentraciones menores a las citadas no representan un riesgo para la salud humana. Algunos son evaluados en un período de veinticuatro horas de medición continua, mientras que otros se presentan como un promedio mensual. Todos son ambientales, es decir evaluados en una atmósfera abierta, y suponen una exposición permanente a esas concentraciones.

Interrogantes

Surgen sin embargo algunas dudas. La primera es determinar si estos estándares son válidos también en sitios cerrados o semicerrados, donde las concentraciones de MP suelen ser superiores a aquellas medidas en espacios abiertos. Es decir, las mediciones de MP en el aire libre, ¿representan o no la verdadera exposición a los aerosoles atmosféricos? Desde hace algunos años se estudia la calidad del aire en sitios confinados no laborales (casas, colegios, medios de transporte público, etcétera), porque se considera que la gente pasa un 80% de su tiempo en estos lugares. ¿Se podrán determinar nuevos estándares para estos sitios?

La segunda duda tiene que ver con los promedios de tiempo del cuadro 1, ¿no enmascaran eventuales efectos generados en períodos más cortos? El científico norteamericano Robert Michaels ha señalado que, en eventos que van desde los quince minutos hasta una hora de exposición de altas concentraciones de MP, se manifiestan efectos adversos sobre la salud aunque se mantengan los estándares de calidad del cuadro cuando se los promedia sobre veinticuatro horas. Él encontró en dos mediciones, una en Birmingham, Estados Unidos, en abril de 1990, y otra en Zeebrugge, Bélgica, en marzo de 1993 valores pico de $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2000\mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP_{10} , respectivamente, medidos en períodos cortos (el último en quince minutos) mientras que promediados sobre veinticuatro horas resultaban en 70 y $101\mu\text{g}/\text{m}^3$, bien dentro de los rangos del cuadro. Estos picos de concentración de MP de corta duración se pudieron asociar con perturbaciones en la salud de la población.

Otro estudio encontró que una breve pero intensa (léase de alta concentración) exposición a MP puede lesionar los mecanismos de limpieza pulmonar en algunas personas. En cierta forma, estas evidencias refutan la suposición de la EPA y la OMS que consideran que

Cuadro 1. Estándares de calidad de aire de material particulado recomendados por la OMS (2005, disponible en www.who.int), la Agencia de Protección Ambiental Americana (EPA, NAAQS, disponible en www.epa.gov/air), la legislación nacional y la de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Fracción de MP (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OMS	EPA	Ley Nacional 20284/73	Decreto 198/06 CABA
MPT	-	-	150 (promedio mensual)	-
MP_{10}	150 (24 horas)	150 (24 horas)	-	150 (24 horas)
$MP_{2.5}$	75 (24 horas)	35 (24 horas)	-	-

los estándares de calidad (como valores promedio de veinticuatro horas) protegen a la gente contra los picos de concentración.

En la ciudad de Esquel, provincia de Chubut, el 4 de junio de 2008, un mes después de la erupción del volcán Chaitén, un grupo de investigadores realizó una serie de mediciones de corta duración de MPT (desde 35 hasta 50 minutos) y encontraron concentraciones de MPT que fueron desde los 400 hasta los 1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sobre la base de un estudio de la distribución del tamaño de las partículas, estimaron concentraciones promedio (de corta duración) de $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, valores que claramente superan los estándares de calidad de la EPA y la OMS. Aunque no se tienen datos epidemiológicos en este caso, los científicos ya han establecido que una exposición a cenizas volcánicas puede producir silicosis y cáncer debido a que dichas partículas contienen sílice cristalino, además de causar inflamación pulmonar por el contenido de hierro.

Aerosoles en los subterráneos de Buenos Aires

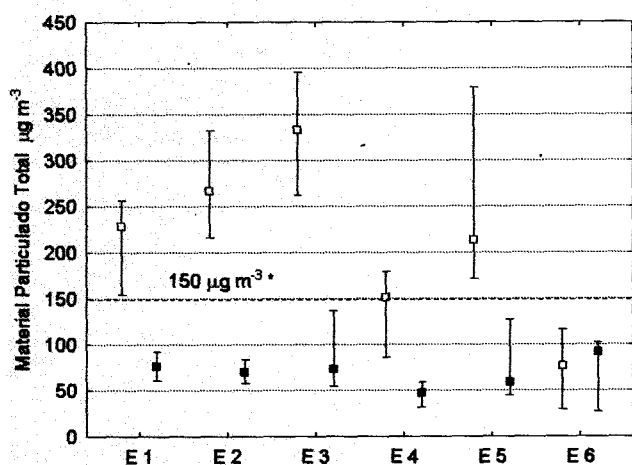
Si bien existen varios trabajos sobre mediciones de MP en Buenos Aires, la vasta mayoría de ellos se ha realizado en sitios abiertos. Dada la cantidad de gente que diariamente viaja usando el sistema de trenes subterráneos en Buenos Aires y considerando los antecedentes antes mencionados, nuestro grupo decidió hacer mediciones de MPT en varias estaciones del subterráneo de Buenos Aires.

Al mismo tiempo determinamos el contenido de metales pesados –hierro (Fe), cobre (Cu) y cinc (Zn)– en cada una de las muestras de aerosoles recolectadas. El motivo es que algunos investigadores han señalado que las partículas de los subterráneos son más dañinas para el material genético (*genotóxicas*) y tienen más tendencia a causar estrés oxidativo en células pulmonares, que las provenientes de las calles y avenidas. Investigadores suecos

EL AIRE EN LOS SUBTERRÁNEOS DE BUENOS AIRES

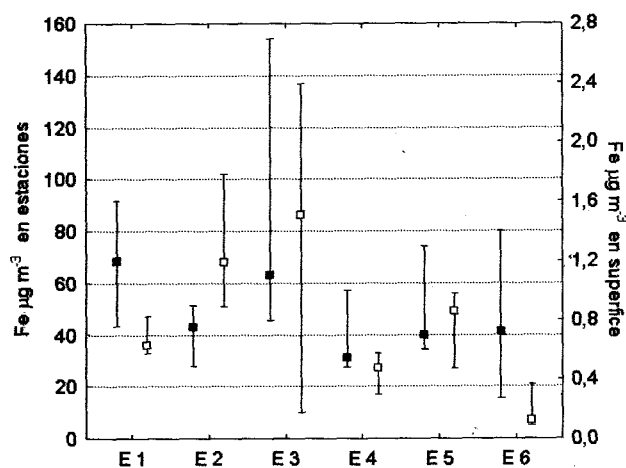
Mediante el uso de una bomba de aspiración instalada en las estaciones de subterráneo, filtramos el aire a través de un filtro de policarbonato. Sobre este filtro quedan retenidas las partículas suspendidas en la atmósfera de la estación. Cada muestra fue recolectada durante 40 minutos aproximadamente. Por gravimetría, se establece la masa de las partículas depositadas en cada filtro y, como el volumen de aire filtrado es conocido, se determina la concentración de partículas en el aire. A su vez, y con el objetivo de conocer

Figura 1. Concentraciones de material particulado total medidas en estaciones del subterráneo (cuadrados vacíos) y en sitios superficiales cercanos a cada estación (cuadrados rellenos). Límite de Calidad de Aire recomendado por la ley nacional 20.284, 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



las concentraciones de metales (Fe, Cu, y Zn) en la atmósfera del subterráneo, aquellas muestras de partículas depositadas en el filtro se analizaron con la técnica PIXE (ver CIENCIA HOY, vol. 1, N° 1, 1988, p. 8), usando el acelerador TANDAR, en las instalaciones del Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). De esta manera, se determinan las concentraciones de los metales en la atmósfera de las estaciones, cuyos valores son también expresados como microgramo de metal por metro cúbico de

Figura 2. Concentraciones de hierro medidas en estaciones del subterráneo (cuadrados vacíos, escala de la izquierda) y en sitios superficiales cercanos a cada estación (cuadrados rellenos, escala de la derecha).



han relacionado estos dos efectos con altos contenidos de hierro en las partículas. Otro grupo de científicos, también sueco, hizo un estudio epidemiológico sobre la incidencia de cáncer de pulmón en conductores de trenes subterráneos de la ciudad de Estocolmo pero, al comparar a estos con otros grupos de trabajadores de otros medios de transporte, concluyó que no hay un incremento en la incidencia de cáncer de pulmón en los trabajadores del subterráneo. En el mismo país y la misma ciudad otro estudio epidemiológico realizado durante el período 2004-2005 no encontró cambios en los marcadores de riesgo cardiovascular atribuibles a la exposición al material particulado. Cabe señalar que la concentración de MP_{10} encontrada en las estaciones del subterráneo de Estocolmo fue de $470\mu\text{g}/\text{m}^3$, en promedio. Resta seguir explorando esta correlación, pero se hace necesario contar con más datos y eso es lo que nuestro estudio persiguió.

Desplegamos filtros recolectores de aire en las estaciones Diagonal Norte, San Martín e Independencia de

la línea C, y en las estaciones Callao, Federico Lacroze y Leandro N. Alem de la línea B. Comparando con la densidad de $150\mu\text{g}$ por m^3 de aire, establecido por la ley nacional 20.284 de 1973 para atmósferas externas abiertas, encontramos que, en las estaciones de la línea C, las concentraciones observadas de partículas suspendidas superan el valor de calidad establecido por la legislación nacional. Sabemos que las partículas en el subterráneo provienen, en su mayoría, de procesos de fricción entre las ruedas de los trenes y los rieles, y de los sistemas de alimentación de energía eléctrica, por lo cual un gran porcentaje de ellas son partículas pequeñas menores a $10\mu\text{m}$ en diámetro, con lo cual se infiere que la fracción MPT es, en gran medida, MP_{10} .

No hemos realizado, hasta el momento de esta publicación, mediciones de MP_{10} , pero las concentraciones de esta fracción de partículas podrían superar el valor de calidad de $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ (medido en ocho horas) recomendado por el gobierno de Hong Kong para sitios confinados. La realidad es que no existen, actualmente, estándares

aire. A modo de comparación, se han realizado mediciones de MPT en la superficie, en sitios cercanos a cada una de las estaciones estudiadas.

Las figuras 1 a 4 muestran las concentraciones de material particulado total, hierro, cobre y cinc, medidas en seis estaciones del subterráneo de Buenos Aires (estaciones Diagonal Norte 'E1', San Martín 'E2' e Independencia 'E3' de la línea C, y estaciones Callao 'E4', Federico Lacroze 'E5' y Leandro N. Alem 'E6' de la línea B), y en los sitios superficiales

cercanos a cada estación. El monitoreo de contaminantes fue realizado en el período 2005-2006. Los cuadrados vacíos indican las concentraciones promedio halladas en las estaciones, mientras los cuadrados rellenos señalan los promedios encontrados en superficie, en tanto que las barras indican los valores de concentraciones máximos y mínimos observados. Cabe señalar que el metal cobre fue escasamente detectado en superficie, por ello sólo se presentan las concentraciones en las estaciones.

Figura 3. Concentraciones de cinc medidas en estaciones del subterráneo (cuadrados vacíos) y en sitios superficiales cercanos a cada estación (cuadrados rellenos).

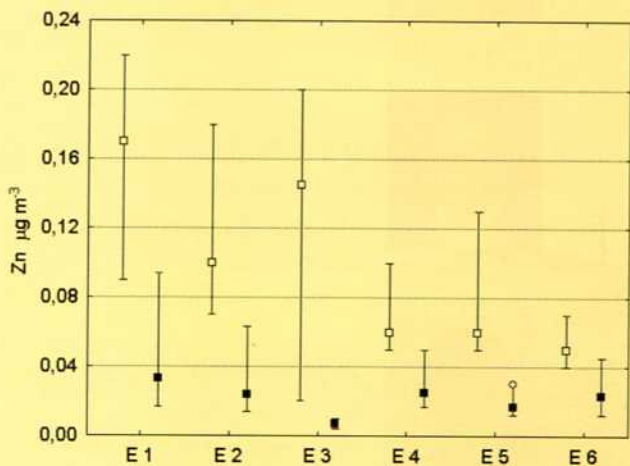
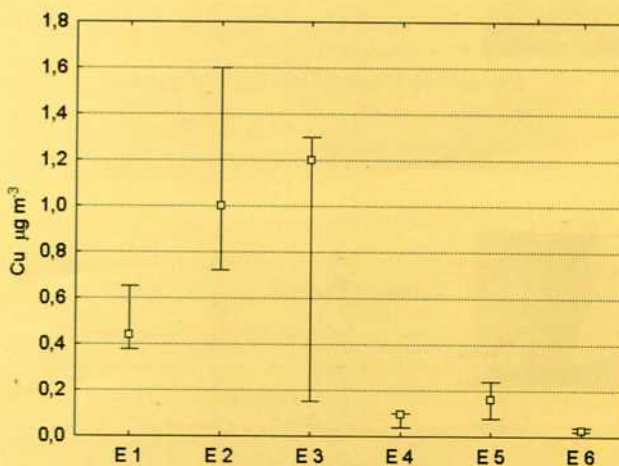


Figura 4. Concentraciones de cobre medidas en estaciones del subterráneo.



nacionales de calidad para sitios confinados no laborales. Organismos tales como la EPA y OMS han comenzado a trabajar sobre esta problemática emitiendo, hasta ahora, algunas recomendaciones para mejorar la calidad del aire en los interiores.

En lo que respecta a las concentraciones de hierro y cinc, ambas superan significativamente las medidas en la superficie. El cobre, inversamente, se detectó escasamente en los sitios superficiales alejados a las estaciones.

Hasta la fecha y en lo que concierne al conocimiento que tenemos en el grupo, no existen claras evidencias en cuanto a la probable peligrosidad de las partículas suspendidas en el aire del subterráneo. La información acerca de la toxicidad de los metales cinc y cobre en aire es realmente escasa, e incluso no hay estándares de calidad ambientales para los tres metales que hemos medido.

Aunque los niveles de contaminantes que se respiran en el subterráneo de Buenos Aires son más altos que aquellos encontrados en sitios exteriores, no hay evidencias para afirmar que representan un peligro para la salud del pasajero y el trabajador. Un estudio más amplio, en el que deben converger varias disciplinas, tiene que ser alentado por parte de las autoridades pertinentes. **CH**

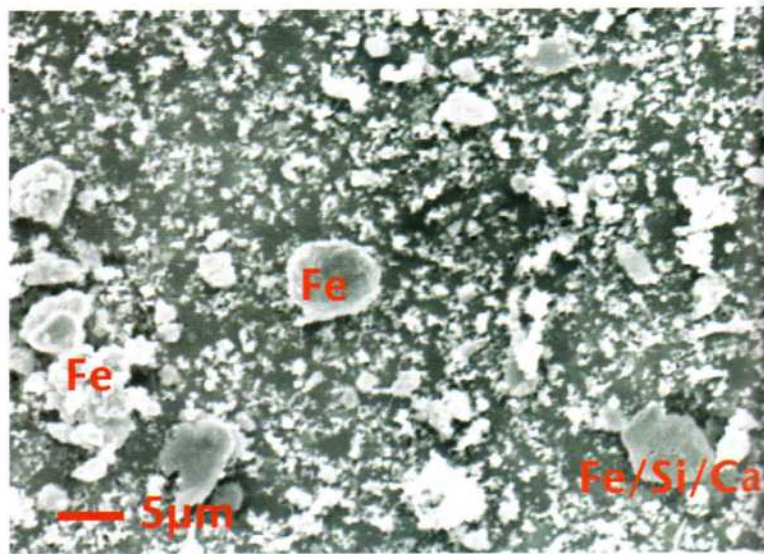


Figura 2. Fotografía electrónica de una muestra de material particulado total recolectada en la estación Diagonal Norte. Obsérvese que la vasta mayoría de las partículas parecen tener diámetros menores a 10µm. Los símbolos químicos (Fe, Si, Ca) indican la composición elemental de las partículas.

LECTURAS SUGERIDAS

'Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud relativas a material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre', resumen de evaluación de riesgo, 2005. Disponible en internet: www.who.int US Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Office of Air and Radiation, www.epa.gov/air



Leonardo Murruni

Licenciado en análisis ambiental, Universidad Nacional de San Martín.
Jefe de trabajos prácticos en la UTN.
Investigador del SEGEMAR.

Doctorando del Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, UNSAM.

murruni@tandar.cnea.gov.ar



Andrés J Kreiner

Doctor en ciencias naturales, Universidad Técnica de Munich, Alemania.
Profesor titular regular de la UNSAM y la UBA.

Investigador superior de la CNEA y del Conicet.
kreiner@tandar.cnea.gov.ar



Mario E Debray

Doctor en física, UBA.
Profesor adjunto en la UNSAM.

Investigador de la CNEA.
debray@tandar.cnea.gov.ar



Valeria Solanes

Estudiante de la licenciatura en análisis ambiental, UNSAM.



Miguel Davidson

Doctor en física, UBA.
Investigador adjunto del Conicet.



Jorge Davidson

Doctor en física, UBA.
Investigador adjunto del Conicet.