

# partículas en suspensión en la atmósfera\*

## I. Aspectos estadísticos

Alex Trier\*\*

---

*RESUMEN: Se pasa revista al tratamiento estadístico de la distribución por tamaño de la materia particulada en suspensión en la atmósfera. Se presentan resultados preliminares de mediciones hechas al microscopio sobre partículas recogidas por muestreo de aspiración sobre diversos sustratos, en locales de la Universidad de Santiago de Chile. Los diámetros geométricos medios determinados por el criterio de Feret se sitúan entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ , según las condiciones del muestreo. La composición elemental de muestras aspiradas sobre papel filtro exento de cenizas se ha investigado cualitativamente por fluorescencia de rayos X y se compara con la de muestras de suelos.*

*SUMMARY: The statistical treatment of size distributions of atmospheric particulate matter is reviewed. Preliminary results of microscope measurements performed on particles collected by aspiration are presented for samples obtained in the Universidad de Santiago de Chile campus. Geometric mean diameters measured according to Feret's criterion range from 5 to 10  $\mu\text{m}$  with varying sampling conditions. Elemental composition of samples aspirated onto ashless filter paper has been investigated by X-ray fluorescence and is compared to that of soil samples.*

---

\* Manuscrito revisado y aprobado en forma definitiva en Agosto de 1981.

\*\* Departamento de Física, Facultad de Ciencia, Universidad de Santiago de Chile, (Ex-Universidad Técnica del Estado).

## 1. INTRODUCCION

Las partículas en suspensión en la atmósfera constituyen un importante factor de la contaminación ambiental. Entre sus consecuencias negativas como tal deben citarse efectos tóxicos y de irritación por inhalación de o contacto con aire contaminado, el ensuciamiento y corrosión de edificaciones y estructuras con el consiguiente daño económico, la reducción de la visibilidad y de la insolación directa.

Habitualmente se considera como contaminación aquella componente de la materia en suspensión que resulta de la actividad humana. En ella se incluyen productos particulados provenientes de procesos industriales y domésticos de combustión, del desgaste de neumáticos vehiculares, de la erosión activada por la construcción, transporte y urbanización, y de procesos industriales y mineros en general. Estas emisiones de contaminantes señalan muchas veces fallas en la planificación y ejecución de actividades. Tal es el caso de la mala conducción de un proceso de combustión, acompañada del despilfarro de energía disponible, y de la falta de reposición de vegetación protectora destruida por la urbanización.

Está documentada la gravedad de la contaminación atmosférica en Santiago por materia particulada en suspensión.<sup>1</sup> Hasta fecha muy reciente las investigaciones sobre este problema se limitaban al muestreo de la masa total en suspensión seguido de ciertos análisis químicos. Actualmente existen algunas estaciones de muestreo que fraccionan la masa en suspensión por tamaño de partícula.<sup>2</sup>

En el Departamento de Física de la Facultad de Ciencia se ha iniciado un programa de investigación que pretende aportar conocimientos adicionales acerca de la contaminación atmosférica particulada en Santiago y Región Metropolitana. Los correspondientes trabajos fueron iniciados en agosto de 1979. Se propone llegar al análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X (FRX) de muestras obtenidas con procedimientos que fraccionan la materia en suspensión por tamaño de partícula.

En el presente trabajo se comunican algunos resultados estadísticos sobre distribución por tamaño de la contaminación atmosférica particulada en un lugar de Santiago, así como sobre su composición elemental.

## 2. DISTRIBUCION POR TAMAÑO

Las investigaciones de muchos autores han cubierto toda la gama de tamaño de partículas en suspensión entre 1 milimicrón y algunos cientos de micrones.<sup>3</sup> El intervalo de mayor interés se extiende de 0,01 micrones a algunas decenas de micrones. Es indispensable, y no es trivial, definir lo que ha de entenderse por "tamaño de partícula". No existe una definición única y según el método físico empleado en la detección, recuento u observación de partículas se definirá un "diámetro de partícula". Con la mayor frecuencia se trata de partículas de forma completamente irregular.

En el presente trabajo no se profundizará en este problema. Los resultados que se comunican se han obtenido mediante un método de microscopía óptica, midiendo en forma directa una dimensión lineal de las imágenes de partículas según el criterio de Feret.<sup>4,5</sup> Las muestras fueron recogidas por aspiración sobre sustratos varios; las diversas mediciones han sido hechas por tres grupos de observadores independientes.<sup>4</sup>

Numerosas investigaciones han mostrado que en el caso de contaminación atmosférica urbana particulada la distribución por tamaño puede ser descrita en forma muy satisfactoria por una función logarítmica normal.<sup>6,7,8</sup> Se han encontrado y postulado distribuciones bimodales y trimodales para la contaminación urbana particulada.<sup>6,8</sup> Los resultados que aquí se comunican pertenecen al modo "grueso" de la contaminación particulada, que se atribuye en forma preferente a la actividad humana.<sup>8</sup> Las mediciones comprenden, aproximadamente, el intervalo entre 1 y 35 micrones de "diámetro de partícula".

## 3. DISTRIBUCION LOGARITMICA NORMAL

Se trata de una distribución normal del logaritmo (natural) de la variable en torno al modo o valor mediano de la distribución,  $\mu$ . Se acostumbra escribirla de modo que está normalizada a 1.

$$f(\ln x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\ln x) d(\ln x) = 1$$

La dispersión de la distribución en torno a  $\mu$  está medida por la varianza,  $\sigma^2$ .

para  $\ln x = \mu$  tenemos  $f(\ln x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$  y para

$$\ln x = \mu \pm \sigma \text{ tenemos } f(\ln x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi e}} = \frac{0,6065}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

El modo,  $\mu$ , de la distribución da el valor geométrico medio de la variable:

$$\int_{-\infty}^{\mu} f(\ln x) d(\ln x) = \int_{\mu}^{+\infty} f(\ln x) d(\ln x) = \frac{1}{2}$$

$$x_{gm} = \exp(\mu)$$

es el valor medio geométrico

Interesa también el valor aritmético medio de la variable:

$$x_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(\ln x) d(\ln x) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

y la correspondiente varianza

$$\sigma_1^2 = x_1^2 (\exp(\sigma^2) - 1)$$

Estos resultados se obtienen fácilmente con el cambio de variable

$$\ln x \equiv u$$

En igual forma se calcula el momento de orden  $p$  en torno al modo según

$$x_p = \int_{-\infty}^{+\infty} x^p f(\ln x) d(\ln x)$$

$$= \exp\left(p\mu + \frac{p^2 \sigma^2}{2}\right)$$

Estos momentos presentan el interés siguiente:<sup>7</sup> si  $x$  es el “diámetro” de partícula, entonces  $x^2$  es proporcional a la superficie y  $x^3$  es proporcional al volumen. En consecuencia, puede esperarse una correlación entre  $x^2$  y la reactividad química de la dispersión de partículas, y también una correlación entre  $x^3$  y la masa (por unidad de volumen) de las partículas dispersas. Se puede mostrar también<sup>6</sup> que los momentos cuarto, quinto y sexto ( $p=4, 5, 6$ , respectivamente) son susceptibles de interpretación en términos de propiedades observables de la dispersión de partículas.

La varianza del momento del orden  $p$  resulta ser

$$\sigma_p^2 = x_p^2 (\exp(p^2 \sigma^2) - 1)$$

Puede demostrarse<sup>7</sup> que  $f(\ln x^p)$  es logarítmica normal con modo  $\exp(p\mu)$  y varianza  $p^2 \sigma^2$ .

Existe todavía una relación más de importancia. La función de distribución para  $x^p$  puede escribirse

$$g_p = \frac{x^p}{x_p} f(\ln x), \text{ de tal modo que } \int_{-\infty}^{+\infty} g_p d(\ln x) = 1$$

Reescribimos esto

$$g_p = \exp \left\{ -(p\mu + p^2 \sigma^2 / 2) \right\} \cdot \exp(p \ln x) \cdot \exp \left\{ -\left( \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right)^2 / 2 \right\} / \sigma \sqrt{2\pi}$$

$$g_p = \exp \left\{ -(\ln x - (\mu + p\sigma^2))^2 / 2\sigma^2 \right\} / \sigma \sqrt{2\pi}$$

de modo que  $g_p(\ln x)$ , función de distribución de  $x^p$ , tiene modo  $\mu_p = \mu + p\sigma^2$  pero la misma varianza  $\sigma^2$  que  $f(\ln x)$ .

Para terminar este acápite debe señalarse que la función de distribución  $f(\ln x)$  no representa adecuadamente la distribución de tamaño de la contaminación atmosférica particulada cuando actúan fuentes puntuales de contaminación en las cercanías de la estación de muestreo.

#### 4. ESTIMACIONES ESTADISTICAS

Una representación conveniente para datos distribuidos en forma logarítmica normal se obtiene a través de la función

$$I(t) = \int_{-\infty}^t \frac{\exp(-t^2/2) dt}{\sqrt{2\pi}}$$

Esta integral puede calcularse a partir de las tabulaciones de la función

$$E(t) = \int_0^t \frac{\exp(-t^2/2) dt}{\sqrt{2\pi}}$$

Para la representación de  $I(t)$  se prefiere el papel logarítmico de probabilidades, obtenible en fuentes comerciales. En este papel  $I(t)$  se representa en % sobre abscisas logarítmicas, en forma de recta, siendo la escala de ordenadas no lineal. Se puede apreciar así en forma visual si un juego de datos está distribuido en forma logarítmica normal.

El modo y la dispersión se estiman en la forma habitual:

$$m = (\sum_n \ln x) / n$$

$$s^2 = (\sum_n (\ln x - m)^2) / (n - 1)$$

Es usual agrupar los datos en intervalos iguales y las estimaciones se hacen según

$$m = (\sum_i n_i \ln x_i) / n, \quad i = 1, 2, \dots, i, \dots, k$$

$$s^2 = (\sum_i n_i (\ln x_i - m)^2) / (n - 1), \quad i = 1, 2, \dots, i, \dots, k$$

Aquí  $s^2$  es la estimación de la varianza y  $s$  la estimación de la desviación típica. Para  $x_i$  se acostumbra tomar el valor central de cada intervalo. Si el ancho de los intervalos es inferior a un tercio de  $\exp(m)$  el agrupamiento de datos no tiene efecto significativo sobre las

estimaciones.<sup>7</sup> Las estimaciones hechas con los datos del presente trabajo resultaron insensibles a variaciones de ancho de intervalos.<sup>4</sup>

En la representación logarítmica de probabilidades,  $m$  es la abscisa correspondiente a la ordenada 500/o. Las abscisas  $m \pm s$  corresponden a las ordenadas 84,130/o y 15,870/o, lo que resulta de  $E(1,00) = 0,3413$ .

Notemos aun que la representación logarítmica de probabilidades de la función de distribución para  $x^p$  es una recta paralela a aquella que representa  $f(\ln x)$  y desplazada en  $p\sigma^2$  de ella. La función  $f(\ln x)$  corresponde a la función de distribución para el caso  $p=0$ .

## 5. DATOS LOCALES<sup>4</sup>

Los presentes resultados se basan en datos obtenidos en locales de la Universidad de Santiago de Chile, ex Escuela de Artes y Oficios, Avenida Ecuador, comuna de Quinta Normal, Santiago de Chile, a partir de marzo de 1980. Se incluyen datos correspondientes a muestras tomadas al aire libre y en ambiente de laboratorio. Se tomó muestras en aspiración directa y también aspirando a través de un ciclón separador<sup>4</sup>. Las mediciones de tamaño se hicieron con un aumento de 530x. Las unidades de medida, correspondientes a divisiones de un dispositivo micrométrico, equivalen a 0,17  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Los datos se agrupan en intervalos iguales de diez unidades.

En general se observó que en los intervalos sobre 155 unidades aparecen muy pocas partículas. Se registró partículas de hasta 205 unidades de tamaño, equivalente a 35  $\mu\text{m}$  aproximadamente. Para muestras obtenidas por aspiración directa el punto de corte para la representación logarítmica normal de la distribución de tamaño se sitúa alrededor de los 28  $\mu\text{m}$ . El tamaño geométrico medio,  $D_g = \exp(m)$ , se sitúa entre 10 y 11  $\mu\text{m}$ . La desviación típica geométrica  $s_g$ , definida por la relación  $s^2 = (\ln s_g)^2$  se sitúa alrededor de 1,6. Estas estimaciones se basan en un intervalo total de 15 a 165 unidades, equivalentes a 2,5 hasta 28  $\mu\text{m}$ ; este intervalo se toma como patrón. El intervalo patrón se escogió examinando la sensibilidad de las estimaciones  $D_g, s_g$  al punto de corte.

En aspiración directa se encuentran distribuciones de tamaño que pueden aproximarse mediante funciones logarítmicas normales, según lo revela el graficado en papel logarítmico de probabilidades. Sin embargo, existen desviaciones significativas, que quedan de manifiesto en un análisis de  $\chi^2$ . El muestreo se ha hecho con dos estaciones de diverso régimen. En una estación se muestrea a razón de 10  $\text{m}^3/\text{h}$ , en la otra a razón 2,5  $\text{m}^3/\text{h}$ . Las cifras son aproximadas. Como es de esperar, la interposición de dispositivos clasificadores por tamaño modifica las distribuciones observadas para las partículas.<sup>4</sup> Se ha observado, en estas condiciones, tamaños geométricos medios que se sitúan entre 5 y 7  $\mu\text{m}$ .

## 6. DATOS ANALITICOS PRELIMINARES

Con el fin de obtener información acerca de la composición elemental de la materia en suspensión se ha obtenido muestras en exterior por aspiración sobre papel filtro Whatman exento de cenizas. El muestreo se ha hecho directamente y también con interposición de un ciclón separador. Estas muestras han sido analizadas por FRX en el espectrómetro Philips de la Facultad de Ciencia.<sup>9</sup> Se trata de un instrumento dispersivo en energía, provisto de un cristal de Si(Li). Por ahora sólo es posible efectuar análisis cualitativo y semicuantitativo con este espectrómetro.

Los muestreos se efectuaron por períodos variables entre 10 y 40 horas, aproximadamente, entre el 6/10/80 y el 11/2/81. De un total de 37 muestras, ocho fueron tomadas con un ciclón separador. El ciclón elimina preferencialmente partículas cuyo diámetro de Feret es superior a los ocho micrómetros.<sup>4</sup>

Se analizó igualmente por FRX quince muestras de suelos tomadas en abril de 1981 en diversos lugares del campus de la Universidad de Santiago de Chile y del área metropolitana de Santiago, en sitios no sometidos al tráfico habitual de personas o animales.

En los espectros de FRX se tomó el área bajo el pico de rayos  $K\alpha$  característicos del elemento de interés, corregida cualitativamente por el fondo continuo de radiación bajo ese pico, como medida proporcional aproximada de la concentración del elemento en la mues-

tra. Este procedimiento cualitativo, ilustrado en Fig. N° 1, permite hacer inferencias estadísticas acerca de las concentraciones de los elementos en las muestras si los espectros de todas las muestras son cualitativamente similares, lo que es efectivo para las muestras de aire y de suelos, consideradas separadamente.

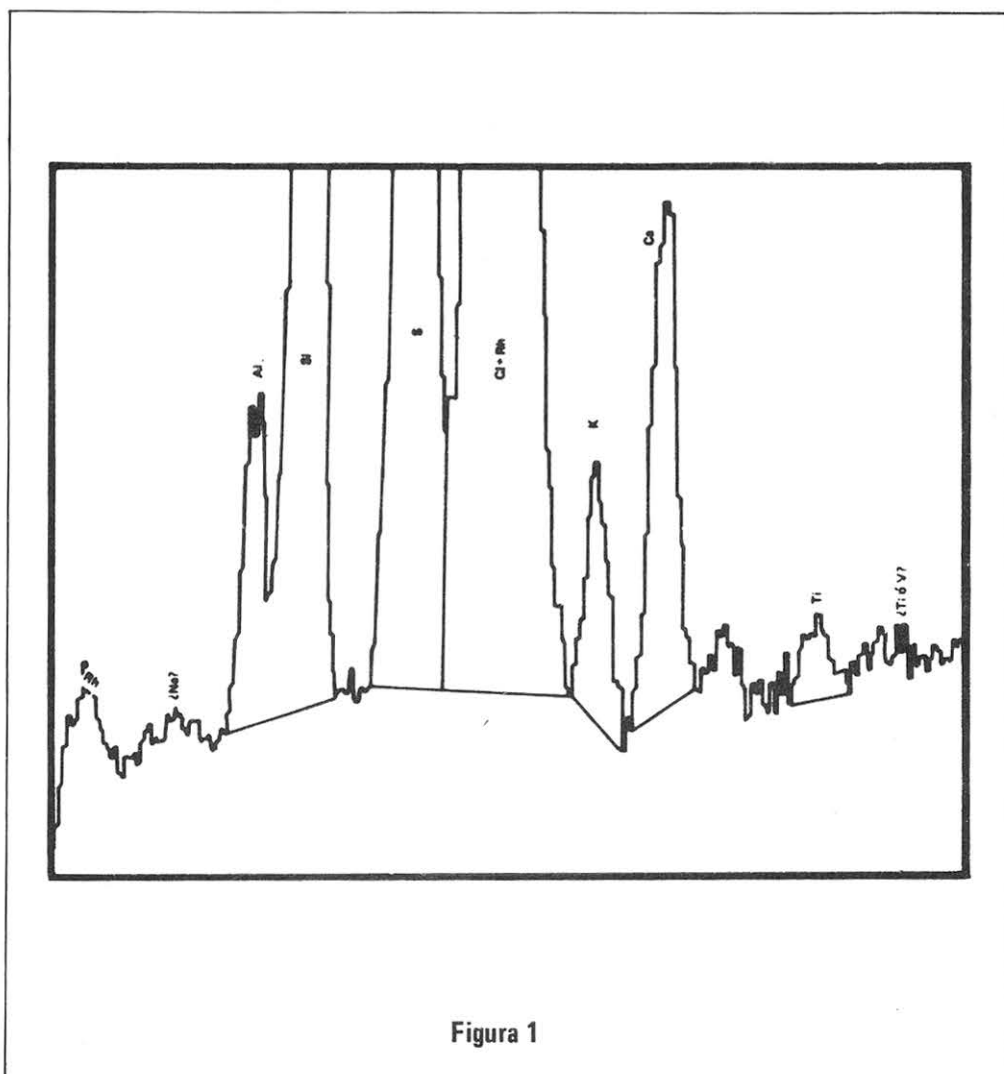
En la Tabla N° 1 se presentan los resultados obtenidos en esta forma para las concentraciones de (aluminio + silicio) y de azufre referidas a las de hierro.

Estos resultados tienden a demostrar que no hay contribución térrica significativa al azufre presente en la atmósfera de Santiago, y que el azufre no está preferencialmente presente en las fracciones gruesa o fina separadas por el ciclón utilizado en este trabajo.<sup>4</sup>

En cuanto a las concentraciones relativas sumadas de aluminio y silicio hay indicaciones de que son menores en la fracción gruesa de las muestras de aire que en la fracción fina, que a su vez parece presentar las mismas concentraciones relativas que las muestras de suelos. La dispersión de los resultados no permite extraer conclusiones definitivas.

Las concentraciones más altas de (aluminio + silicio) relativas al hierro se presentaron en los meses de enero y febrero de 1981, dentro del período investigado. Las concentraciones relativas de azufre no presentaron una tendencia clara.

Los resultados preliminares aquí presentados justifican una investigación cuantitativa más prolongada de estos problemas. Tales investigaciones están en curso.



**TABLA Nº 1.**  
**Abundancias relativas al hierro (escalas cualitativas)**

| muestras    | a                            | b                            | Observaciones        |
|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| aire (29)   | 1,52 ± 0,48<br>(0,87 - 2,39) | 0,81 ± 0,45<br>(0,34 - 2,04) | sin ciclón separador |
| aire (8)    | 2,00 ± 0,22<br>(1,75 - 2,42) | 0,80 ± 0,36<br>(0,47 - 1,56) | con ciclón separador |
| suelos (15) | 2,07 ± 0,57<br>(1,15 - 3,15) | 0,03 ± 0,01<br>(0,01 - 0,05) |                      |

Nota 1.  $a = (Al + Si)/Fe$ ;  $b = S/Fe$ .

Nota 2. Se presenta la dispersión de los datos (desviación típica y valores extremos).

Nota 3. Muestras sobre papel de filtro Whatman exento de cenizas.

---

### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es posible gracias a los subsidios de la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Santiago de Chile (Dicyt) y al apoyo material del Departamento de Física. La colaboración de los estudiantes señores P. Arriagada, A. Jaque, María Eugenia Cantillano, Lorena Melo, O. Fuentes y L. Poblete ha resultado indispensable. El profesor L.H. Rodríguez facilitó el uso del microscopio. Una de las estaciones de muestreo fue facilitada por el profesor J.R. Morales de la U. de Chile.

---

### BIBLIOGRAFÍA

1. Silo, C., Lissi, E., Rubio, M.A., 5º Congreso Internacional Aire Puro, Buenos Aires, R.A., octubre, 1980.
2. Préndez, M., (comunicación privada), Lissi, E., (comunicación privada).
3. Corn, M., Air Pollution, A.C. Stern (ed.), 3ª edición, Vol. I, Academic Press, 1976.
4. Trier, A., (en preparación).
5. Cadle, R.D., The Measurement of Airborne Particles, Wiley, 1975.
6. Friedlander, S.K., Smoke, Dust and Haze, Wiley, 1977.
7. IAEA Technical Report Series Nº 179, Viena, 1978.
8. Whitby, K.T., The Physical Characteristics of Sulfur Aerosols, Atmospheric Environment 12, (1978) 135.
9. Trier, A., (en preparación).

## PUBLICACIONES DEL AREA FISICA APARECIDAS EN "CONTRIBUCIONES CIENTIFICAS Y TECNOLOGICAS"

---

### Nº 12 Area de Física I

Contenido:

- "Relajación Paramagnética", por Ramón Hernández Pavez.
- "Estudio sobre el confinamiento de una columna de plasma que tenga una presión anisotrópica", por Michael Schaffer Moller.
- "Propiedades resistivas del estado intermedio de Superconductores Tipo I (plomo), por Hugo Levy Salazar.

---

### Nº 15 Area de Física II

Contenido:

- "Fusión por inducción sin crisol", por Michael J. Schaffer.  
Nota: Este número también fue editado en idioma Inglés con el título "Crucible-Free Induction Melting", by Michael J. Schaffer.

---

### Nº 26 Area de Física III

Contenido:

- "Análisis de un método para determinar la permeabilidad magnética de ferritas", por L. H. Rodríguez.
- "Diseño y construcción de un laser-Helio-Neón", por R. Pesse L. y N. Bravo S.
- "Determinación de temperaturas mediante sondas eléctricas" por R. Pesse L.
- "Detección por radiación ionizante con cristales CsI (T1)", por H. R. Costabal T.

---

### Nº 34 Area de Física IV

Contenido:

- "Método de Schroeder para medición de conductividad térmica", por Luis Hernández M. y Sergio Ortega R.
  - "Un estudio de la contaminación acústica en la ciudad de Santiago", por Hernán Costabal T. y Maximiliano Faúndez A.
  - "Análisis fotométrico de la variable Ex Hydrae", por Diana Comte S. y Maximiliano Faúndez A.
  - "Estudio preliminar de las estrellas peculiares A", por Maximiliano Faúndez A.
-



## **Nº 46 Area de Física V**

### **Contenido:**

- “Parámetro cristalino vs. presión A  $T = 0$  para Helio-4 Sólido”, por Patricio Vargas C.
  - “Abundancia de elementos químicos en S1-3”, por Maximiliano Faúndez A.
  - “Ondas electromagnéticas en metales”, por Ivonne Alvarez C. y Rolando Blest C.
  - “Análisis estadístico de la contaminación acústica en la ciudad de Santiago”, por Maximiliano Faúndez A.
- 

### **Número Especial**

“Actas Primer Simposio Chileno de Física Teórica”.

---