

M-46

Criterios de muestreo de aerosoles en relación con la salud

Stella Moreno-Grau, Luis Negral, I Costa-Gómez, JM Moreno

Filiación
Stella.Moreno@upct.es

INTRODUCCIÓN

Las partículas que transmiten el virus SARS-CoV-2 se encuentra en el rango que va de los nanómetros a los micrómetros. El virus se encuentra en las partículas de diversa talla que salen de los individuos infectados como aerosoles. Su comportamiento será por lo tanto el de los aerosoles. Entendemos por aerosol atmosférico al conjunto de partículas sólidas y líquidas suspendidas en un medio gaseoso, el aire, que pueden ser observadas y medidas.

El tamaño de la partícula es una propiedad esencial, pues va a determinar su comportamiento en el seno del gas. Las partículas grandes, sedimentan, velocidades de sedimentación significativas presentan las partículas a partir de las 10 μm de d_{ae} . Las partículas muy pequeñas, de menos de 1 μm de d_{ae} , se comportan como gases, para su estudio se aplica la teoría cinético molecular de los gases. A las partículas con d_{ae} entre 1 y 10 μm se les aplican las ecuaciones del flujo continuo. Para partículas relativamente pequeñas, los datos experimentales no concuerdan con los teóricos, debido a que estas partículas la fuerza de fricción es menor que la teórica, por lo que tienen mayor velocidad de sedimentación y hay que introducir un factor de modificación en la ecuación, conocido como Coeficiente de corrección de Cunningham. Las partículas grandes tendrán altas velocidades de sedimentación, mientras que las pequeñas tendrán elevados coeficientes de difusión o movimiento Browniano.

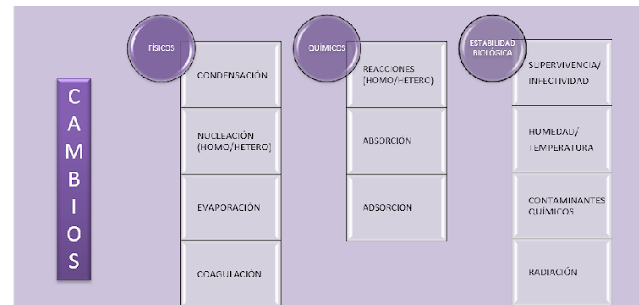
Tradicionalmente, se ha considerado que las partículas de más de 5 μm como "gotas" con poca posibilidad de mantenerse en suspensión. Mientras que las partículas menores pueden mantenerse en suspensión durante horas o días. Los aerosoles atmosféricos son polidispersos, inestables y multicomponentes, su concentración y propiedades cambian con el tiempo. La figura 1 recoge un esquema de los cambios físicos y químicos y la estabilidad biológica en la fase particulada.

CRITERIOS DE MUESTREO DE AEROSOLES EN RELACIÓN CON LA SALUD HUMANA

Si lo que queremos abordar es un estudio que evalúe los efectos del aerosol sobre la salud humana pensando en que la vía de entrada es la respiratoria, lo primero

que tenemos que conocer es cómo se comportan las partículas en el aparato respiratorio. La preocupación por este problema surge en Higiene Industrial, ante las enfermedades que desarrollan los trabajadores expuestos a polvos, como los mineros (silicosis, saturnismo, hidrargirismo, etc.), enfermedades que han sido reconocidas desde la antigüedad, así ya las describieron Hipócrates, Galeno, Plinio el Viejo, Agrícola, Paracelso o Bernardo Ramazzini, que es considerado el padre de la medicina del trabajo. Es a lo largo del siglo XX cuando se van a ir asentando una serie de conceptos, que han dado lugar a la definición de las diversas fracciones del aerosol atmosférico, consensuadas internacionalmente.

Figura 1. Fase particulada, cambios físicos y químicos. Estabilidad biológica



El análisis de las diferentes zonas de las vías respiratorias humanas permite definir alguna de las fracciones en masa que penetran hasta diferentes regiones y los convenios de muestreo de aerosoles. La fracción inhalable, fracción de la masa de las partículas del aerosol total que se inhala a través de la nariz y la boca. La fracción torácica, fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe. La fracción respirable, fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran en las vías respiratorias no ciliadas. Pudiendo definir también, la fracción extratorácica como fracción de la masa de las partículas inhaladas que no penetran más allá de la laringe y la fracción traqueobronquial, fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe pero que no alcanzan las vías respiratorias no ciliadas. En cuanto a la terminología, el término inhalable es el que se ha aceptado internacionalmente, aunque se considera sinónimo de inspirable, se aconseja no utilizar esta

denominación. Estas fracciones definen, por convenio internacional, los criterios para los equipos de muestreo centrados en las fracciones de interés: criterio inhalable, torácico, respirable, extratorácico y traqueobronquial, y que pretenden el diseño de los equipos de muestreo de manera que se ajuste a las curvas aceptadas para cada criterio.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

En el año 1913 se publica un estudio de McCrea, en el que presenta los resultados de las partículas encontradas en los alveolos pulmonares de mineros muertos en Sudáfrica. Cuando se consulta este dato en muchas referencias bibliográficas se indica que en este estudio McCrea afirma que las partículas resultaron inferiores a las 7 µm. Sin embargo, en Internet se puede tener acceso al documento original, su lectura permite comprobar que lo que dice es que la mayor parte de las partículas, el 70 %, tenían un tamaño inferior a 1 µm. Que el diámetro del resto estaba en el rango 1 – 8,5 µm, que en un estudio detallado de muchas preparaciones encontró que solo una parte despreciable de partículas tenían diámetros mayores de 8,5 µm y que el diámetro mayor encontrado era de 10,5 µm. Cita el trabajo de otro investigador (Watkins-Pitchford) que encuentra en los pulmones de mineros muertos de silicosis que las partículas tienen como diámetro máximo 10 µm, y muy pocas alcanzan las 12 µm.

En 1968 ACHIH publicó la curva de aerosol inhalable, las partículas que penetran en las vías respiratorias superiores con la inhalación (rosa). En 1973 se publica la curva de la deposición alveolar del aerosol inhalable, las partículas que quedan retenidas a nivel del alveolo pulmonar (naranja), como se observa las partículas más pequeñas, que sí que penetran hasta esa región, no quedan allí retenidas, sino que vuelven a salir con la exhalación.

Además, en las décadas de 1970-1980 se hicieron diferentes ensayos en túneles de viento para definir la eficiencia de aspiración de la cabeza humana. En estos estudios se puede apreciar la fuerte influencia que tiene la velocidad del viento sobre la eficiencia de aspiración, incrementándose de modo notable la inhalación de partículas grandes, mayores de 30 µm cuando aumenta la velocidad del viento. También se observa cómo para velocidades de viento pequeñas, los resultados de los diferentes estudios realizados son similares. Esto llevó a pensar en la posibilidad de encontrar un algoritmo que permitiera calcular la inhalabilidad en función del diámetro aerodinámico equivalente de las partículas (Vincent, 1989):

$$1 - 0.15[\log \log (1 + d_{ae})]^2 - 0.10 \log \log (1 + d_{ae}) \quad \text{ISO1981,1983}$$

$$I = 0.5[1 + e^{-0.06d_{ae}}] \text{ para } 0 < d_{ae} < 100 \mu\text{m}, \text{ ACGIH 1985}$$

La primera definición de polvo respirable la hace el British Medical Research Council, BMRC, en el año 1952, como "*fracción de partículas sólidas de un aerosol industrial capaz de alcanzar los alveolos pulmonares y de causar neumoconiosis*"*, recomendando que la medida de la concentración se realizara en masa. La BMRC estableció una curva para el aerosol respirable con la mediana en las 5 µm. Valor que fue asumido en el año 1959 como criterio de muestreo para el aerosol respirable en la Conferencia Internacional sobre Neumoconiosis, celebrada en Johannesburgo.

En el año 1961 la Comisión de energía atómica, AEC, definió la fracción respirable como "*la proporción de polvo inhalado que penetra en las regiones o zonas no ciliadas de los pulmones*", fijando la mediana de esta distribución en un diámetro aerodinámico equivalente de 3,5 µm.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP, propone en el año 1965 el modelo de retención y deposición de aerosoles, proponiendo las tres zonas que corresponden con la región nasofaríngea; la traqueobronquial y la alveolar. Posteriormente, esta división fue modificada, para definir 5 regiones: La parte frontal de la nariz; la parte posterior de la nariz, la orofaringe y la laringe; la región torácica, dividida en tres regiones, la bronquial, la bronquiolar y la alveolar (Bailey et al., 2007). Estos estudios dosimétricos demostraron que las partículas pueden depositarse en diversas zonas del aparato respiratorio, causando enfermedades, mientras que hasta ese momento todos los estudios se habían centrado en el riesgo de contraer neumoconiosis, es decir, aquellas partículas que podían llegar a la zona no ciliada del aparato respiratorio (INSHT, 2006).

A finales de la década de los años 70 del siglo pasado y en la siguiente, se fueron adoptando los convenios para la toma de muestra de las fracciones inhalable, torácica y respirable, dando lugar a una segunda armonización internacional, que en Europa fue recogida en la norma EN-UNE-481 (1995), (tabla 1). Para el aerosol torácico la mediana de la distribución se sitúa en 10 µm, mientras que, para el criterio respirable, se sitúa en 4 µm (figura 2b). A nivel internacional se publicó la norma ISO 7708:1995 (figura 2a) y la ACGIH lo incorporó en la edición de los TLV del año 1995 (INSHT, 2006).

ACGIH en 1985 revisa su definición anterior de aerosol respirable y propone una curva en la que la mediana se encuentra en 3,5 µm. ISO considera la fracción alveolar como de espacial riesgo, en base a ello, ISO propuso

* Neumoconiosis, según la RAE, "género de enfermedades crónicas producidas por la infiltración en el aparato respiratorio del polvo de diversas sustancias minerales..."

una definición de esta fracción tomando como base la definición de la ACGIH, pero escalada por un factor de 0,714, por lo que la mediana de la distribución la sitúa en 2,5 μm (Vincent, 1989).

Tabla 1. Valores numéricos de los convenios inhalable, torácico y respirable como porcentaje del inhalable y del total, recogidos en la norma EN-UNE 481: 1993

D _{aer} μm	Inhalable	Torácico	Respirable	Inhalable	Torácico	Respirable
	%	%	%	%	%	%
	Como porcentaje del inhalable			Como porcentaje del total		
0	100	100	100	100	100	100
1	100	100	100	97,1	97,1	97,1
2	100	100	96,8	94,3	94,3	91,4
3	100	100	80,5	91,7	91,7	73,9
4	100	96,8	55,9	89,3	89,0	50,0
5	100	98,1	34,4	87,0	85,4	30,0
6	100	94,9	19,8	84,9	80,5	16,8
7	100	89,5	10,9	82,9	74,2	9,0
8	100	82,2	5,9	80,9	66,6	4,8
9	100	73,7	3,2	79,1	58,3	2,5
10	100	64,6	7,7	77,4	50,0	1,3
11	100	55,5	0,9	75,8	42,1	0,7
12	100	47,0	0,5	74,3	34,9	0,4
13	100	39,3	0,3	72,9	28,6	0,2
14	100	32,4	0,2	71,6	23,2	0,2
15	100	26,6	0,1	70,3	18,7	0,1
16	100	21,6	0,1	69,1	15,0	0
18	100	14,1	0	67,0	9,5	
20	100	9,1		65,1	5,9	
25	100	3,0		61,2	1,8	
30	100	1,0		58,3	0,6	
35	100	1,3		56,1	0,2	
40	100	0,1		54,5	0,1	
50	100	0		52,5	0	
60	100	--		51,4	--	
80	100	--		50,4	--	
100	100	--		50,1	--	

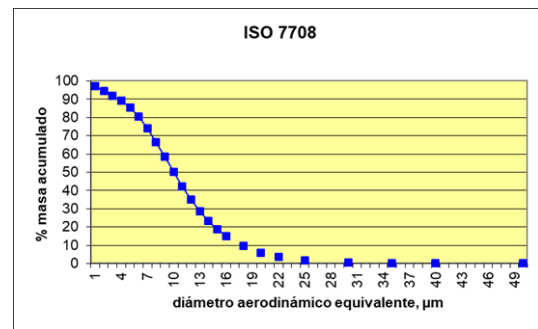
Por otro lado, la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (USEPA) basándose en un examen de los datos de calidad del aire, la deposición en el tracto respiratorio y los efectos en la salud recomendó en el año 1982 la adopción de un indicador con una selección específica de tamaño (PM10), que fue propuesto en el año 1984 (USEPA, 1986). En el año 1986, consideró que no era necesario mantener otros indicadores alternativos para partículas de mayor tamaño, eliminando de los estándares de calidad del aire las partículas totales en suspensión en el año 1987, considerando que la fracción PM10 es conservadora en relación con el rango de deposición de las partículas en la región traqueobronquial (USEPA, 1986), (1987).

En el año 1997 se introdujo por parte de la USEPA el valor límite para las partículas PM25. La fracción PM25 del aerosol atmosférico se basa en el origen del aerosol atmosférico, en concreto en la composición (INSHT, 2006). Hay que señalar que PM2,5 y fracción fina no

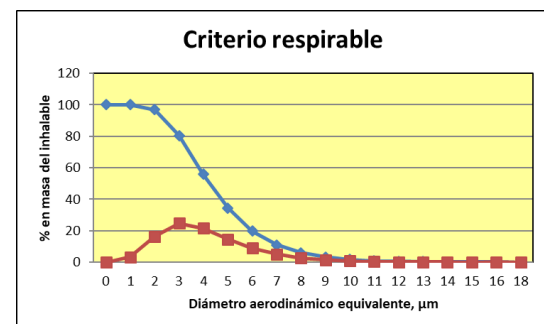
es exactamente equivalente (USEPA, 1999), ya que en las partículas PM2,5 hay una proporción de partículas pertenecientes a la clase modal grueso (partículas mayores de 2 μm).

Figura 2. a) ISO 7708 convenio de la fracción torácica. b) convenio de la fracción respirable

a)



b)



REFERENCIAS

1. Bailey, M. R., Ansoborlo, E., Guilmette, R. A., & Paquet, F. (2007). Updating the ICRP human respiratory tract model. *Radiation Protection Dosimetry*, 127(1-4), 31-34. doi:10.1093/rpd/ncm249
2. Baron, P.A., Willeke, K. (2001). *Aerosols Fundamentals*. In: *Aerosol Measurement. Principles, Techniques and Applications*. Edited by Klaus Willeke and Paul B. Baron. Van Nostrand Reinhold. New York. 45-60.
3. CSIC. 2020. Emisión y exposición a SARS-CoV-2 y opciones de filtración. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua-CSIC. Barcelona. https://www.csic.es/sites/default/files/informe_caracteristicas_sars-cov-2_y_opciones_filtracion_idaea-csic_15_abril.pdf. [14032022].
4. EN-UNE-481 (1995) *Atmósferas en los puestos de trabajo*. Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles. (Versión oficial EN 481:1993). AENOR. Madrid.
5. EN-UNE-12341 (2015). *Aire ambiente. Método de medición gravimétrico normalizado para la determinación de la concentración másica PM10 y PM2,5 de la materia particulada en suspensión*. Aenor. Madrid.

6. Hinds, W.C. (2001). Physical and chemical changes in the particulate phase. En: Baron, P.A. y Willeke, K. Eds. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. 2 Ed. Wiley Interscience. New York. pp. 83-98.
7. Hofmann, W., Asgharian, B., & Winkler-Heil, R. (2002). Modeling intersubject variability of particle deposition in human lungs. *Journal of Aerosol Science*, 33(2), 219–235. doi:10.1016/S0021-8502(01)00167-7.
8. INSHT. (2006) Criterios y recomendaciones. Toma de muestra de aerosoles. Muestreadores de la fracción inhalable de materia particulada. CR-03/2006. Insituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. Madrid. Accesible on line en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/MetodosAnalisis/Ficheros/CR/CR_003_A06.pdf. [17032022].
9. John, W. (2001). Size distribution characteristics of aerosols. En: Baron P.A. y Willeke K. Eds. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. 2 Ed. Wiley Interscience. New York. pp. 99-116.
10. McCrea, J. (1913). The ash of silicotic lungs. The South African Institute for medical research. 8 pp. Accesible on line en: <https://archive.org/details/b22463586>. [14032022].
11. Ministerio de Sanidad. Evaluación del riesgo de la transmisión de SAR-CoV-2 mediante aerosoles. Medias de prevención y recomendaciones. 2020. https://www.msbsgob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/COVID19_Aerosoles.pdf. [14032022].
12. NTP 800. (2008). Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (V): recomendaciones para la toma de muestra de aerosoles. Zugasti Macazaga A. y Quintan San José M.J. INSHT. Madrid. Accesible on line en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/786a820/800%20web.pdf>. [14032022].
13. Norma CEN/TS 16868:2019 Ambient air. Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy-Volumetric Hirst Method. European Standard. ICS 13.040.20.
14. OEHHA (Air Resources Board and Office of Environmental Health Hazard Assessment). (2001). Report to the Air Quality Advisory Committee on the Review of the California Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter and Sulfates: Chapter 7: Critical review of the health effects of particulate matter. 107-227.
15. Pawliszyn, J. (Ed.). (2002). *Sampling and sample preparation for field and laboratory: fundamentals and new directions in sample preparation* (1st ed.). Amsterdam; Boston: Elsevier Science.
16. Reponen, T., Willeke, K., Grinshpun, S., Nevalainen, A. (2001). Biological particle sampling . En: Baron P.A. y Willeke K. Eds. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. 2 Ed. Wiley Interscience. New York. pp. 99-116.
17. Rose, V.E. History and philosophy of industrial hygiene. En: Walton, W.H. (1991). *Airborne Dust. In Mineral Fibers and Health* (Lidell, D. and Miller, K., pp. 55–78). Boca Raton: CRC Press.
18. Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: Wiley.
19. USEPA (1986). Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Updated Assessment of Scientific and Technical Information, Addendum to the 1982 OAQPS Staff Paper, Report Number EPA 450/05 86-012, Strategies and Air Standards Div., Ofc. of Air Quality Planning and Standards, US EPA, Research Triangle Park, NC. Accesible on line en: <https://nepis.epa.gov/Exec/QueryNET.exe/910113UH.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1986+Thru+1990&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C86thru90%5Ctxt%5C00000026%5C910113UH.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyURL#>. [29042018].
20. USEPA. (1987). Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. 40 CFR Part 5. Fed. Regist. 52: 24634–24669.
21. USEPA. (1996). Air Quality Criteria for Particulate Matter. EPA/600/P-95/001aF. United States Environmental Protection Agency. Washington DC. Vols. I a III. Accesible on line en: <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recorderdisplay.cfm?deid=2832>. [14032022].
22. USEPA. (1999). Air Quality Criteria for Particulate Matter. EPA/600/P-99/002a. United States Environmental Protection Agency. Washington DC. Accesible on line en: <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recorderdisplay.cfm?deid=12485>. [14032022].
23. Vargas Marcos, F., Ruiz de Adana, M., Marín Rodríguez, I., Moreno Grau, S. (2020). Transmisión del SARS-CoV-2 por gotas respiratorias, objetos contaminados y aerosoles (vía aérea). <https://www.sanidadambiental.com/wp-content/uploads/2020/09/Transmisi%C3%B3n-del-SARS-CoV-2-por-gotas-respiratorias-objetos-contaminados-y-aerosoles.pdf>. [14032022].
24. Vincent, J.H. (1989). *Aerosol sampling: science and practice*. Ed. Wiley. Chichester.
25. Vincent, J.H. (2007). *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*. John Wiley & Sons. Chichester.
26. Walton, W.H. (1991). Airborne Dust. In *Mineral Fibers and Health* (Lidell, D. and Miller, K., pp. 55–78). Boca Raton: CRC Press.
27. Wark, K., Warner, C.F. (1991). *Contaminación del Aire: Origen y Control*. Limusa Noriega. México. 193-202.
28. Whitby K.T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment* 12:135-159.