

EFFECTO DEL TIEMPO DE PROMEDIO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN AIRE

MAZZEO, NICOLÁS A.^{1,2} Y PINEDA ROJAS, ANDREA L.^{1,3}

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). ²Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda, Universidad Tecnológica Nacional. Av. Ramón Franco 5050. 1874. Avellaneda. Prov. Buenos Aires.
nmazzeo@fra.utn.edu.ar

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA), DCAO/FCEN, UMI-IFAECI/CNRS. Ciudad Universitaria. Pabellón II. 2do. piso. 1428. Ciudad de Buenos Aires.
pineda@cima.fcen.uba.ar

Resumen. *Los efectos adversos de los contaminantes del aire, generalmente dependen del tipo de sustancia considerada, del valor de su concentración y del tiempo de exposición (tiempo de promedio/muestreo). Sin embargo, este período, generalmente asociado con los datos procedentes de las estimaciones y del monitoreo de la calidad del aire, puede diferir del tiempo de promedio explícito en los estándares de calidad de aire. Existen algunos trabajos (con conclusiones no totalmente coincidentes) que incluyen factores de conversión de los valores (estimados o medidos) de la concentración media para un determinado tiempo de promedio a otros períodos de promedio. En este trabajo se resumen tres procedimientos destinados a transformar concentraciones medias (en un tiempo de promedio) a otro tiempo de promedio. Se efectúa una revisión de los factores de conversión sugeridos por 23 trabajos de diferentes autores. Finalmente, se proponen factores temporales de conversión destinados a utilizar en la práctica regulatoria.*

Palabras clave: Calidad de aire, concentraciones, tiempo de promedio, tiempo de muestreo

1. INTRODUCCIÓN

Contaminación, en el sentido general, puede ser definida como la introducción en el ambiente por el ser humano de sustancias y energía capaces de causar peligro en la salud humana, daño a los recursos vivientes y a sistemas ecológicos, a los materiales o interferir en el uso legítimo del ambiente. La contaminación del aire ha estado entre nosotros desde que el hombre encendió el primer fuego. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) [1], en el año 2014, el 92% de la población mundial residía en lugares donde no se respetaban los niveles guía de calidad de aire propuestos por ese organismo. Según estimaciones realizadas en el año 2012 [1], la contaminación atmosférica en ciudades y zonas rurales del planeta provoca anualmente, 3 millones de muertes prematuras.

Las estimaciones y mediciones de las concentraciones cuasi-instantáneas en aire de contaminantes emitidos desde una fuente puntual, presentan (en cierto lugar) variaciones temporales originadas, principalmente por la naturaleza turbulenta de la atmósfera. La

magnitud de estas variaciones depende de variables atmosféricas, de la configuración de la superficie del suelo, de la localización relativa del impacto de la pluma en la superficie del suelo, del punto de determinación de la concentración [2]. Adicionalmente, existen otras posibles causas, por ejemplo cambios temporales y espaciales, en las propiedades físicas y químicas de los contaminantes. En la mayoría de las aplicaciones de la contaminación del aire, la concentración cuasi-instantánea de contaminantes en aire no es importante, y por otra parte es difícil de determinar. Es más requerida y necesaria la concentración media.

Algunos seres vivos y materiales pueden ser afectados por los contaminantes del aire, y tienden a reaccionar a una forma integrada del valor cuasi-instantáneo de las concentraciones. Por otra parte, los efectos adversos [3] de la contaminación del aire están asociados con diferentes tiempos de promedio (Tabla I).

Efectos adversos	Escala de tiempo de promedio
Corrosión	1 año
Suciedad	1 mes
Salud	1 día
Visibilidad	1 hora
Deterioro de la vegetación	1 minuto

Tabla 1. Efectos adversos de los contaminantes del aire y tiempos de promedio [3]

Por ejemplo, los efectos de los contaminantes cancerígenos dependen del valor de la concentración perdurable durante tiempos largos de exposición de las personas. Estos efectos están asociados con el riesgo de la población a diferentes sustancias. El monóxido de carbono (CO) interfiere en la capacidad de la sangre para transportar oxígeno de los pulmones a los órganos y los tejidos del cuerpo humano. En la exposición humana al CO a tiempos relativamente cortos (por ejemplo 8 horas) el porcentaje de carboxi-hemoglobina en sangre no debe superar un nivel determinado.

En general, los tiempos de promedio involucrados en las normas establecidas para proteger la salud de las personas varían entre 10 min y 24 h. En la Tabla II se incluyen diferentes tiempos de promedio de los niveles guía sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [4] y de los estándares de calidad de aire locales (Resolución N° 403/13 de la Agencia de Protección Ambiental (APRA) [5] de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Resolución 242/97 de la Secretaría de Política Ambiental (SPA) de la Provincia de Buenos Aires [6]) para el monóxido de carbono, dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y material particulado cuyo diámetro es menor o igual a 10 µm (PM10).

Contaminante	OMS	Res. 403/APRA/13	Res. 242/97
CO	1 h	1 h	1 h
	8 h	8 h	8 h

SO ₂	10 min 24 h	3 h 24h	3 h 24h
NO ₂	1 h	1 h	1 h
O ₃	8 h	1 h 8 h	1 h
PM10	24 h	24 h	24 h

Tabla 2. Tiempos de promedio de los valores guía (OMS) [4], de los estándares para la ciudad de Buenos Aires (Res. 403/APRA/13) [5] y de las normas de calidad del aire (Res. 242/97, SPA (Prov. Buenos Aires) [6] para diferentes contaminantes básicos.

Considerando la diversidad de tiempos de promedio incluidos en las reglamentaciones de calidad de aire y las limitaciones inherentes a los métodos de muestreo y a los modelos de dispersión atmosférica para obtener valores de concentraciones de contaminantes en aire promediados en períodos coincidentes con los de las regulaciones, se plantea la necesidad de encontrar procedimientos de conversión para las concentraciones medias (para un tiempo de promedio) a otros tiempos de promedio.

El objetivo de este trabajo es efectuar una revisión de las principales metodologías destinadas a transformar concentraciones medias para un tiempo de promedio/muestreo a otro período. Para ello, se revisó y utilizó información teórica y experimental presentada en 23 trabajos científicos y técnicos. Por último, se efectúa una propuesta de factores de conversión destinados a transformar las concentraciones medias (correspondientes a un tiempo de promedio) en concentraciones medias asociadas con otros tiempos de promedio y que podrían ser incluidos en reglamentaciones argentinas y extranjeras.

2. ASPECTOS CONCEPTUALES DEL TIEMPO DE PROMEDIO EN RELACIÓN CON PLUMAS ORIGINADAS POR EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES PUNTUALES DE EMISIÓN

El ejemplo más simple para comprender el efecto del tiempo de promedio en la concentración de un contaminante, probablemente sea el de la emisión desde una fuente puntual. En la Figura 1 [7] se presenta una representación esquemática que ilustra el efecto del tiempo de promedio/muestreo sobre la concentración media de contaminantes emitidos desde una fuente puntual. En la Figura 1(a) se visualizan los “contornos ideales” de tres plumas correspondientes a una emisión cuasi-instantánea (tiempo de promedio muy pequeño), y a tiempos de promedio iguales a 10 minutos y 1 hora. En la Figura 1(b) se presentan esquemas de las variaciones de las concentraciones con la distancia transversal al viento (y) para los tres tipos plumas incluidos en la Figura 1(a). Cuando el tiempo de promedio aumenta se incrementa el desvío estándar de la distribución de concentración respecto el eje de coordenadas y, disminuyendo la concentración media. Las principales causas de estas variaciones están vinculadas con las fluctuaciones de la dirección del viento y de la componente transversal de la intensidad de la turbulencia atmosférica.

De esta forma, modificando del tiempo de promedio variará la concentración media de contaminantes en aire. Esta concentración media es representativa del tiempo de promedio correspondiente. Generalmente, se define factor de conversión como el cociente entre las máximas concentraciones medias (correspondientes a un determinado tiempo de promedio) y las mismas correspondientes a otros tiempos de promedio (en este trabajo 1 hora).

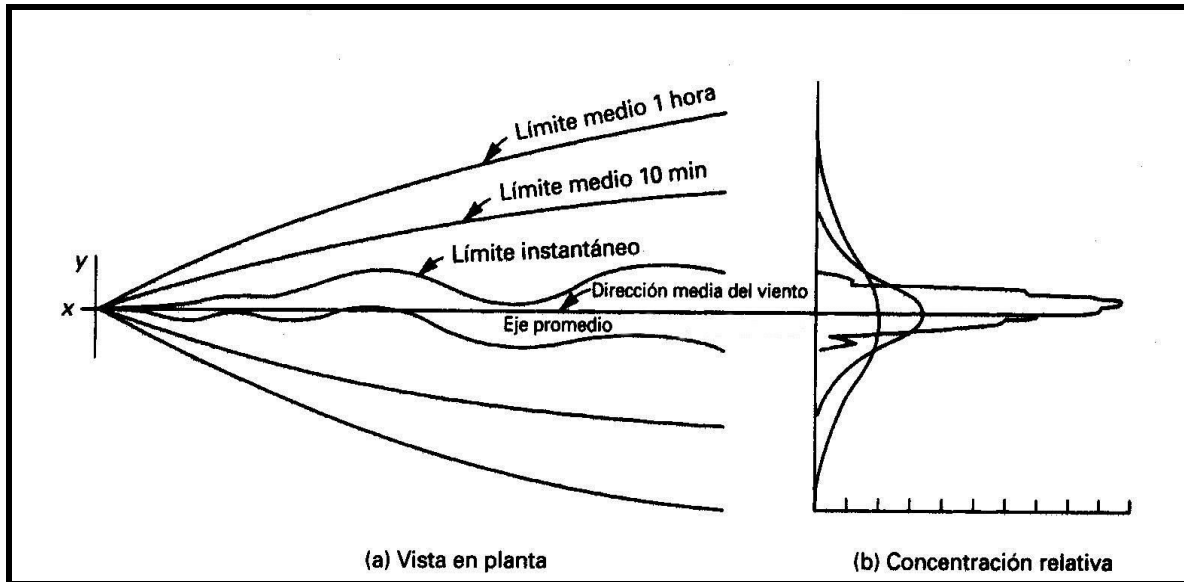


Figura 1. (a) Contornos de plumas de contaminantes en aire para diferentes tiempos de promedio (cuasi-instantáneo, 10 minutos, 1 hora). (b) Variaciones transversales de la concentración de contaminantes en aire. [7]

3. TIEMPO DE PROMEDIO Y CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES EN AIRE

El efecto del tiempo de promedio sobre el valor medio de la concentración de un contaminante en aire fue estudiado por diferentes autores, por ejemplo [8], [9], [10], [11], [12]. Para obtener este efecto, se han desarrollado algunas formulaciones teóricas y empíricas. Los valores obtenidos por diferentes autores (por ejemplo, [8], [9], [10], [11], [12]) dependen de las suposiciones utilizadas en el desarrollo de las mismas. Entre las metodologías formuladas se destacan las siguientes tres:

- a) La aplicación del modelo de la pluma fluctuante [11]. Gifford ([10], [11]) introdujo la modelación de concentraciones de contaminantes en aire para escalas de tiempo de promedio pequeñas, utilizando el modelo de la pluma fluctuante. Gifford [13] estableció que el valor de la relación entre la concentración “pico” (P) y la concentración media (M) puede encontrarse entre 1 y 5 para el caso en que la fuente y el receptor estén ubicados a la misma altura. Sykes [14] aplicó el modelo de la pluma fluctuante para examinar el efecto del tiempo de promedio sobre la varianza de los contaminantes promediados temporalmente.
- b) El efecto del tiempo de promedio sobre la distribución de probabilidad de ocurrencia de la

concentración de contaminantes en el aire fue encarado por Venkatram [12]. En ese trabajo, Venkatram propuso un modelo simple integrado por series temporales de la concentración de contaminantes en aire para analizar el efecto del tiempo de promedio sobre la distribución de probabilidad de la concentración de contaminantes en el aire. Sin embargo, de acuerdo con Venkatram [12], también aumenta la probabilidad de encontrar valores nulos. De esta manera, se conservará el valor del “promedio”. El objetivo es determinar la probabilidad de que la concentración media (tiempo de promedio pequeño) pueda ser excedida. De esa manera, se podría expresar en función de la probabilidad de superar un determinado valor en lugar de obtener “el valor” correspondiente.

c) El procedimiento más utilizado en este tema consiste en aplicar la siguiente ecuación semi-empírica ([15], [16]):

$$C(t_a)/C(t_b) = (t_b/t_a)^p \quad (1)$$

donde $C(t_a)$ y $C(t_b)$ son las concentraciones medias de contaminantes en aire correspondientes a tiempos de promedio t_a y t_b , respectivamente y p es un exponente empírico [2].

La ecuación (1) se basa en la siguiente expresión [17]:

$$\sigma(t_a)/\sigma(t_b) = (t_b/t_a)^p \quad (2)$$

donde $\sigma(t_a)$ y $\sigma(t_b)$ son los desvíos estándares de la distribución lateral de la concentración de contaminantes con el eje y correspondientes a tiempos de promedio t_a y t_b , respectivamente y p es un exponente empírico [17].

El aspecto fundamental cuando se utiliza la ecuación (1) consiste en la valorización del exponente p . Existen algunas evidencias de que el valor de p depende, entre otros factores, de la estabilidad atmosférica ([9], [15], [16], [17]). En Argentina, se utiliza un valor constante de p (independientemente de la estabilidad atmosférica) = 0.2 ([6], [18]).

Generalmente, se acepta que las concentraciones calculadas por los modelos de dispersión atmosférica, corresponden implícitamente a un tiempo de promedio de las mismas de 1 hora. Este valor es controvertido [17]. La US.EPA ([21], [22]) para propósitos regulatorios considera que el valor del tiempo de promedio de las concentraciones estimadas por los modelos de dispersión atmosférica es 1 hora, en lugar de 10 minutos como propusieron Briggs [19] y Gifford [20].

4. VALORES DEL EXPONENTE p DE LA ECUACIÓN (1)

Los valores del exponente p incluido en la ecuación (1) han sido objeto diferentes valoraciones y de controversias durante varias décadas ([15], [16]). Los valores de p presentados por diferentes autores (por ejemplo [15], [16]) se encuentran comprendidos en el intervalo 0.1 (correspondiente a atmósfera estable), y 1.0 cuando la atmósfera es inestable.

Como se manifestó anteriormente, el valor de p utilizado en Argentina es 0.2 independientemente de las condiciones de estabilidad atmosférica ([6], [18]). En la Tabla III

se presentan los valores medios, máximos y mínimos del exponente p incluido en la ecuación (1) para diferentes clases de estabilidad de la atmósfera, presentados por diferentes autores. Estos estadísticos resumen los valores de p presentados en 23 trabajos publicados. Se observa que los mismos varían entre 0.17 y 0.75. Los valores medios calculados a partir de dicho conjunto de valores, varían entre 0.21 (clase F: moderada estabilidad atmosférica) y 0.65 (clase A: marcada inestabilidad atmosférica).

Clase de estabilidad atmosférica [2]	Valor medio	Valor máximo	Valor mínimo
A- Marcada inestabilidad	0.65	0.75	0.50
B- Moderada inestabilidad	0.52	0.55	0.50
C- Leve inestabilidad	0.44	0.52	0.38
D- Neutralidad	0.35	0.45	0.25
E- Leve estabilidad	0.27	0.44	0.18
F- Moderada estabilidad	0.21	0.35	0.17
Todas las estabilidades	0.2	---	---

Tabla 3. Valores medios, máximos y mínimos del exponente p para diferentes clases de estabilidad de la atmósfera.

Los valores medios de p se incluyen en la Figura 2.

En la Tabla IV se incluyen los valores de los factores de conversión $[(C(t_a)/C(t_b=1 \text{ h}))]$ obtenidos aplicando la ecuación (1) con los valores medios de p presentados en este trabajo (Tabla III), para los siguientes tiempos de promedio (t_a): 10 minutos, 3 horas, 8 horas y 24 horas y para las diferentes clases de estabilidad atmosférica.

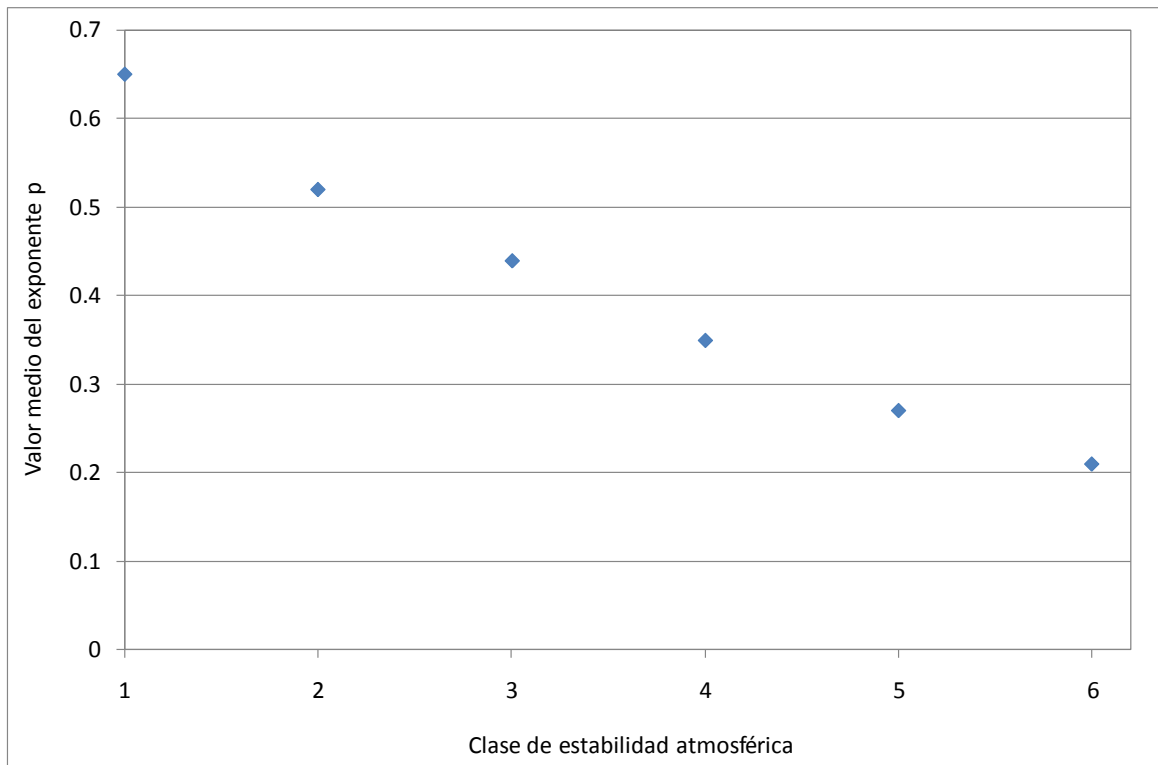


Figura 2. Valores medios del exponente p (ecuación (1)) obtenidos para cada clase de estabilidad atmosférica (1 = A, 2 = B, 3 = C, 4 = D, 5 = E, 6 = F) a partir de los valores publicados en la literatura.

Clase de estabilidad Atmosférica [2]	C(10min)/C(t _b =1 h)	C(3 h)/C(t _b =1 h)	C(8 h)/C(t _b =1 h)	C(24 h)/C(t _b =1 h)
A (marcada inestabilidad)	3.16	0.490	0.263	0.129
B (moderada inestabilidad)	2.57	0.565	0.334	0.187
C (leve inestabilidad)	2.42	0.617	0.358	0.208
D (neutralidad)	1.90	0.681	0.475	0.321
E (leve estabilidad)	1.63	0.743	0.568	0.421
F ((moderada estabilidad)	1.39	0.793	0.683	0.559
Independiente de la estabilidad atmosférica (p= 0.2)	1.43	0.803	0.660	0.530

Tabla 4. Valores del factor de conversión $[C(t_a)/C(t_b=1h)]$ para los siguientes tiempos de promedio (t_a): 10 minutos, 3 horas, 8 horas y 24 horas y para las diferentes clases de estabilidad atmosférica

En la Figura 3 se presentan los valores del factor de conversión $[C(t_a)/C(t_b=1 h)]$ presentados

en la Tabla IV.

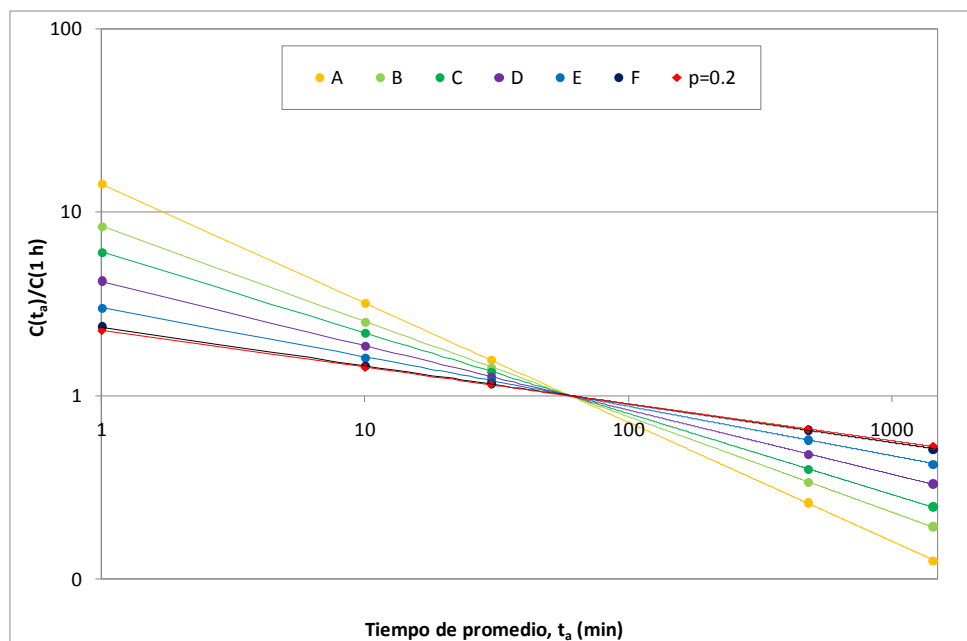


Figura 3. Valores de $[C(t_a)/C(1 h)]$ para diferentes tiempos de promedio (t_a): 10 minutos, 30 minutos, 8 horas y 24 horas, para cada clase de estabilidad atmosférica.

La relación entre los factores de conversión dependiente de la estabilidad atmosférica y los factores con $p = 0.2$ está comprendida en el siguiente rango de valores: 3.16 ($t_a= 10$ minutos y marcada inestabilidad atmosférica) $> [C(t_a)/C(1 h)] > 0.129$ ($t_a= 24$ horas y marcada inestabilidad atmosférica).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se plantea utilizar diferentes valores del exponente p de la ecuación (1) dependiendo de las condiciones de la estabilidad atmosférica, comprendidos entre 0.21 (moderada estabilidad atmosférica) y 0.65 (marcada inestabilidad atmosférica).

También, se obtuvieron los factores de conversión referidos al tiempo específico de 1 hora (tiempo de promedio implícito en las estimaciones numéricas de las concentraciones de contaminantes en aire resultantes de modelos de dispersión atmosférica propuestos para aplicar regulatoriamente por la US.EPA), utilizando los valores de p presentados en la Tabla I y para los siguientes tiempos de promedio: 10 minutos, 1 hora, 3 horas, 8 horas y 24 horas comparados con los factores estimados con $p= 0.2$ (incluido en las Resoluciones ENRE N° 13/97 y N° 242/97 Secretaría de Política Ambiental de la Provincia de Buenos Aires).

De esta comparación se encuentra que la relación entre la concentración con los valores de p incluidos en la Tabla I y la concentración usando $p =0.2$ está comprendida en el siguiente

rango de valores: $3.16 (t_a= 10 \text{ minutos y marcada inestabilidad atmosférica}) > C (\text{con } p \text{ variable})/C (\text{con } p= 0.2) > 0.129 (t_a= 24 \text{ horas y marcada inestabilidad atmosférica})$. O sea, las diferencias porcentuales pueden llegar hasta el 121% (por exceso) y hasta el 76% (por defecto).

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo ha sido realizado en el marco del Proyecto de Investigación CONICET-PIP0304: Estudio de la calidad del aire en áreas urbanas.

REFERENCIAS

- [1] OMS, Calidad del Aire Ambiente (exterior) y salud (2016), disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> (consultado el 21 de abril de 2017).
- [2] Arya S. P. Air Pollution Meteorology and Dispersion. Oxford University Press, Inc. New York. USA. (1999).
- [3] Stern A. C. Utilization of air pollution models. In Proceedings of Symposium on multiple-source urban diffusion models (Ed. Arthur C. Stern). Research Triangle Park. North Carolina. USA. (1970).
- [4] OMS. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02. (2006).
- [5] Agencia de Protección Ambiental del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. Res. 403/APRA/13. (2013).
- [6] Secretaría de Política Ambiental de la Provincia de Buenos Aires. Resolución 242/97. Boletín Oficial N° 23389. Ministerio de Gobierno y Justicia de la Provincia de Buenos Aires. Argentina. (1997).
- [7] Espert Alemany V. y López Jiménez P.A. Dispersión de contaminantes en la atmósfera. Alfaomega (México) - Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España). (2004).
- [8] Nonhebel, G. Gas purification processes. George Newnes Ltd. England. (1964).
- [9] Hino, M. Maximum ground-level concentration and sampling time. Atmos. Environ. , 2, 149-165. (1968).
- [10] Gifford F. A. Peak to average concentration ratios according to a fluctuating plume dispersion model. Int. J. Air Poll. 3, 253-260. (1960)
- [11] Gifford F. A. Peak to mean concentration ratios according to a “top-hat” fluctuating plume dispersion model. ATDL Contribution N° 45. NOAA Research Laboratories. Air Resources. Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory. Oak Ridge, Tennessee. USA. (1970).
- [12] Venkatram A. Accounting for averaging time in air pollution modeling. Atmos. Environ. 36, 2165-2170. (2002).
- [13] Gifford F. A. Statistical properties of fluctuating plume dispersal model. Advances in

- Geophysics (Ed. E. N. Frenkiel and P. A. Sheppard), Vol. 6, 117-137. Academic Press, N.Y. USA. (1959).
- [14] Sykes R. I. The variances in time-averaged samples from an intermittent plume. *Atmos. Environ.* 18, 121-123. (1984).
- [15] Schnelle, K. B. and Dey P. R. *Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide*. Mc Graw-Hill. N.Y. USA. (2000).
- [16] Beychok M. R. *Fundamentals of Stack Gas Dispersion*. Third Edition. Irvine. California. USA. (2005).
- [17] De Visscher A. *Air Dispersion Modeling. Foundations and Applications*. Wiley. N. J. USA. (2014).
- [18] Ente Nacional Regulador de la Electricidad. Resolución ENRE 13/97. (1997).
- [19] Briggs G.A. *Diffusion Estimation of Small Emissions*. Contribution N° 79. Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory, Oak Ridge, TN. USA. (1973).
- [20] Gifford. F. Turbulent diffusion-typing schemes: A review. *Nuclear Safety*, 17, 68-85. (1976).
- [21] U.S.EPA. *SCREEN3 Model User's Guide*. EPA-454/B-95-004. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.USA. (1995).
- [22] U.S.EPA. *AERSCREEN User's Guide*. EPA-454/B-16-004. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. USA. (2004).