

ALTURA MÍNIMA DE CHIMENEA QUE PERMITA CUMPLIR CON NORMAS DE CALIDAD DE AIRE

Nicolás A. Mazzeo y Laura E. Venegas

RESUMEN

Se presenta una metodología para evaluar la altura mínima de una chimenea que permita que los contaminantes emitidos a la atmósfera, generen concentraciones en el aire que cumplan con las reglamentaciones vigentes de calidad de aire. Esta metodología se aplica a la evaluación de la altura de una chimenea de una hipotética industria a instalar en la ciudad de Buenos Aires, Argentina, o en una zona rural del Gran Buenos Aires, que emitiría óxidos de nitrógeno (NOx) a la atmósfera. En estas aplicaciones se utiliza el modelo de dispersión atmosférica AERMOD, suponiendo que los óxidos de nitrógeno emitidos se convierten totalmente en dióxido de nitrógeno en la atmósfera. Asimismo, se evalúa la "reserva atmosférica ambiental" que será preservada a partir del funcionamiento de la industria. Esta "reserva atmosférica ambiental" indica el "aire sin contaminar" que podría ser conservado para futuros emprendimientos. Se expresa como una fracción del estándar o de la norma de calidad de aire.

INTRODUCCIÓN

Las chimeneas posibilitan ventear a la atmósfera, efluentes gaseosos originados en distintos procesos industriales. Toda chimenea proyectada para una planta industrial deberá satisfacer las condiciones establecidas mediante el diseño mecánico y las normas de contaminación del aire fijadas por las reglamentaciones vigentes. Para ello, es necesario evaluar la altura mínima de la misma que posibilite cumplir con las normas de calidad de aire.

Luego de haber determinado la altura de una chimenea necesaria para que las concentraciones de los contaminantes emitidos cumplan con las reglamentaciones de calidad de aire, las alturas y diámetros de la construcción constituyen un grupo cuyas dimensiones deberán resultar de un balance entre la estabilidad estructural y el flujo de los gases que circulan por la chimenea.

La práctica de la buena ingeniería (GEP) (USEPA, 1986) limita la altura de la chimenea a ubicar en o cerca de edificios, para que los gases emitidos no sean afectados por la estela turbulenta generada por las construcciones. Sin embargo, no hace referencia a las dimensiones de chimeneas que no están afectadas por edificaciones.

Los modelos de dispersión atmosférica (Turner y Schulze, 2007) constituyen una herramienta ampliamente utilizada para calcular la altura de una chimenea que emite efluentes gaseosos a la atmósfera, cumpliendo con las normas de calidad de aire.

Diferentes autores han propuesto distintos métodos para

evaluar la altura mínima de chimeneas industriales que cumplan con las reglamentaciones de calidad de aire vigentes (Bierly y Hewson, 1962; Laikhtman, 1964; Leavitt y otros, 1971; Lucas, 1975; Holzworth, 1978; Nickola, 1979; Fortak, 1979; Klug, 1979; Venkatram, 1980; Stern, 1986; Berlyand, 1991; Venegas y Mazzeo, 1996; Arya, 2000; Schnelle y Dey, 2000; Turner y Schulze, 2007; Mazzeo y Venegas, 2009a,b).

La determinación de la altura mínima y ambientalmente adecuada de una chimenea, se fundamenta en aspectos geométricos, termodinámicos, dispersivos y meteorológicos. Es necesario integrar estos cuatro aspectos para que constituyan una metodología que permita calcular dicha altura. A estos aspectos deben adicionarse consideraciones logísticas y económicas (costo de la construcción).

En este trabajo se presenta y aplica una metodología destinada a evaluar la altura mínima y ambientalmente adecuada de una chimenea de una hipotética planta industrial, que emitiría óxidos de nitrógeno a la atmósfera continuamente y que se proyectaría instalar en la ciudad de Buenos Aires o en un área rural del Gran Buenos Aires. Se presenta el análisis de posibles alturas de chimeneas y de sus correspondientes "reservas atmosféricas ambientales". Se define "reserva atmosférica ambiental", "aire sin contaminar" que sería conservado para futuros emprendimientos. Esta reserva se puede expresar como una fracción de la norma o del estándar de calidad de aire correspondiente.

BREVE DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Se considera una hipotética planta industrial que se propone instalar en la ciudad de Buenos Aires o en una zona rural del Gran Buenos Aires y que emitiría óxidos de nitrógeno (NOx) a la atmósfera desde una chimenea. Para los efectos prácticos de los cálculos que se efectúan en este trabajo, se considerará que los óxidos de nitrógeno se transformarán totalmente en dióxido de nitrógeno (NO₂) en un tiempo relativamente corto después de haber sido emitidos a la atmósfera.

Se supone que las concentraciones de fondo del NO₂ en el aire de la ciudad de Buenos Aires y en la zona rural del Gran Buenos Aires, en donde se proyecta localizar la chimenea, son 0,053mg/m³ y 0,0367mg/m³, respectivamente. En la determinación de la altura mínima y ambientalmente adecuada de la chimenea que posibilite aprovechar las propiedades de autodepuración de la atmósfera, se aplicó el modelo de dispersión atmosférica AERMOD (Cimorelli y otros, 2005). A los resultados del modelo se les aplicaron las iteraciones necesarias hasta determinar el valor de la

altura adecuada.

Los valores de parámetros característicos de la emisión a la atmósfera de los óxidos de nitrógeno procedentes de la hipotética chimenea utilizados en este trabajo, se incluyen en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Valores de los parámetros de la emisión de óxidos de nitrógeno

Parámetro	Valor
Concentración de NOx en gases de emisión	3.139 mg/Nm ³
Temperatura de los gases	126° C
Caudal volumétrico de gases	65,3 Nm ³ /s
Diámetro interno de la chimenea	2,2 m

El estándar de calidad de aire para el dióxido de nitrógeno (tiempo de promedio: 1 hora) para la ciudad de Buenos Aires, es 0,376 mg/m³ (el valor del percentil 98 deberá ser inferior al estándar) establecido por el Decreto 198/06, reglamentario de la Ley N° 1.356. La norma de calidad de aire para el dióxido de nitrógeno (período de tiempo: 1 hora) para la Provincia de Buenos Aires, es 0,367mg/m³ (no puede ser superado más de una vez al año) establecido por la Resolución N° 242/97 de la Secretaría de Política Ambiental (hoy Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible) de la Provincia de Buenos Aires.

Se estimaron 8.760 valores de alturas "ambientalmente adecuadas" de la chimenea, utilizando para la ciudad de Buenos Aires, la información meteorológica horaria de la estación Aeroparque Buenos Aires Aero y para el Gran Buenos Aires, los valores horarios de la estación Ezeiza Aero.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

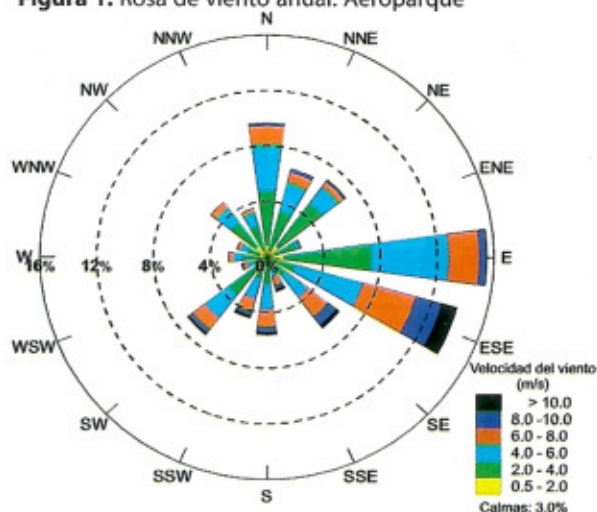
Las dos zonas propuestas para instalar la hipotética industria difieren en las características del terreno, las condiciones atmosféricas, los valores de los estándares y de las normas de calidad de aire establecidos por las reglamentaciones vigentes y en las concentraciones de fondo correspondientes a cada zona de futura localización. Teniendo en cuenta esto, se analizarán y discutirán separadamente los resultados correspondientes a las dos posibles localizaciones y posteriormente, se compararán los mismos.

Localización en la ciudad de Buenos Aires

En la **Figura 1** se presenta la distribución de frecuencias porcentuales anuales de ocurrencia de distintas direcciones de viento para diferentes rangos de velocidades en la estación meteorológica Aeroparque Buenos Aires Aero. Se observa que los vientos más frecuentes provienen del este (15,5 %) y del este-sudeste (13,9 %) y los menos fre-

cuentes proceden del oeste-sudoeste (1,9 %). La mayor frecuencia (1,2 %) de vientos más altos (mayores que 10,0 m/s) corresponde a la dirección este-sudeste. El porcentaje de calmas es 3,05 %. La velocidad media anual del viento es 4,51 m/s.

Figura 1. Rosa de viento anual. Aeroparque



En la **Figura 2** se presentan las concentraciones máximas totales (concentración máxima calculada más concentración de fondo) de NO₂ en aire a nivel del suelo para las

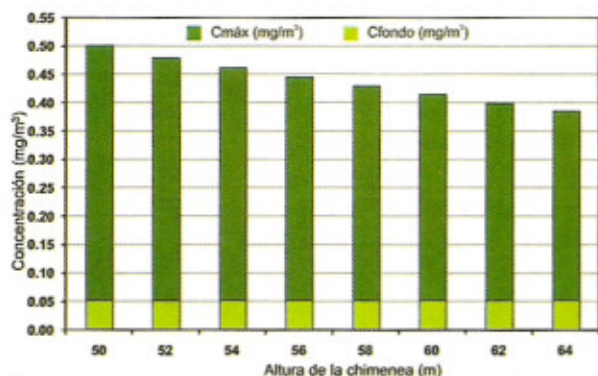


Figura 2. Concentraciones máximas totales de NO₂ en el aire a nivel del suelo

emisiones de NO_x provenientes de ocho alturas (h) de chimeneas (50 m, 52 m, 54 m, 56 m, 58 m, 60 m, 62 m y 64 m). Las concentraciones máximas totales se pueden ajustar a la siguiente expresión (R²=0,999):

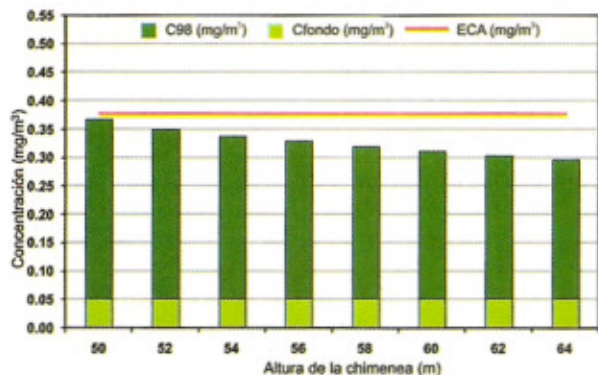


Figura 3. Concentraciones de dióxido de nitrógeno en aire correspondientes al percentil 98

$$C_{máx} (\text{mg}/\text{m}^3) = 1,21069 - 0,0208382 h + 0,0001115 h^2 \quad [1]$$

donde las alturas de la chimenea (h) están expresadas en metros.

Debido a que la reglamentación de calidad de aire (tiempo de promedio: 1 h) establece que el valor de la concentración NO₂ en aire del percentil 98 no puede ser superior al valor del estándar (0,376 mg/m³) establecido por el Decreto 198/96, reglamentario de la Ley N° 1.356, se calcularon y graficaron los valores correspondientes al percentil 98 para las ocho alturas de chimeneas consideradas (Figura 3).

En la Figura 3 se observa que, para todas las hipotéticas alturas de chimeneas, se cumple con el estándar de calidad de aire.

En la Figura 4 se grafican las "reservas atmosféricas ambientales" (RAA) ("aire sin contaminar" que podría ser conservado para futuros emprendimientos). La reserva at-

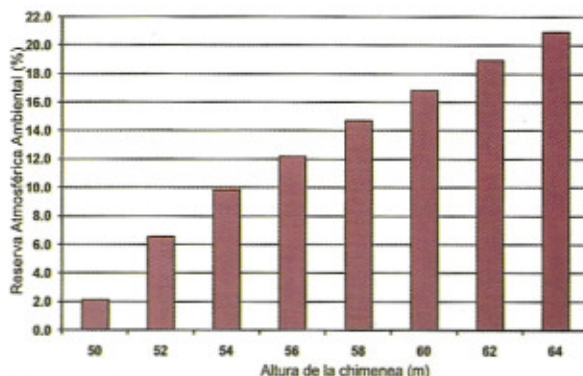


Figura 4. Reservas atmosféricas ambientales asociadas a las diferentes alturas de chimenea consideradas

mosférica ambiental está expresada como porcentaje del estándar de calidad de aire y aumenta con la altura de la chimenea.

Las reservas atmosféricas ambientales (expresadas como una fracción porcentual del estándar para el tiempo de promedio de 1 hora de calidad de aire) se pueden ajustar a la siguiente función polinómica (R²=0,9972):

$$RAA (\%) = -191,6 + 5,90901 h - 0,0405 h^2 \quad [2]$$

donde las alturas de la chimenea (h) están expresadas en metros.

A partir de los resultados de las Figuras 3 y 4, se encuentra que la altura (requerida para el cumplimiento del estándar de calidad de aire) de la chimenea de la hipotética planta industrial que se propone instalar en la ciudad de Buenos y que emitiría óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera, deberá ser igual o mayor que 50 m y que la reserva atmosférica ambiental sería superior al 2,17 % del estándar (tiempo de promedio: 1 hora) de calidad de aire establecido para el dióxido de nitrógeno.

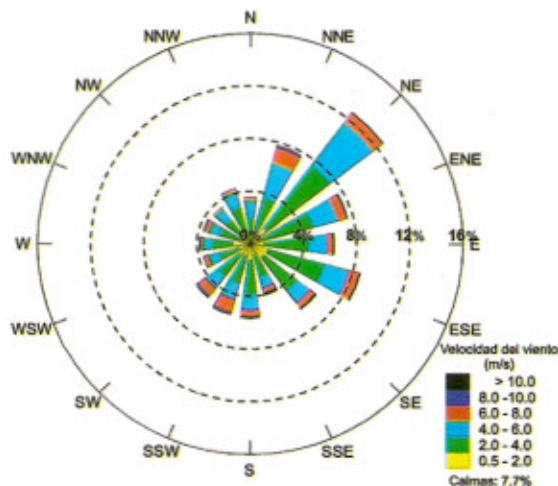


Figura 5. Rosa de viento anual. Ezeiza

Localización en la zona rural del Gran Buenos Aires

En la **Figura 5** se presenta la distribución de frecuencias porcentuales anuales de ocurrencia de distintas direcciones de viento, para diferentes rangos de velocidades en la estación meteorológica Ezeiza Aero. Se observa que los vientos más frecuentes provienen del nordeste (12,6 %) y los menos frecuentes proceden del noroeste (3,5 %). La mayor frecuencia (0,11 %) de vientos con velocidad mayor que 10,0 m/s, corresponde a la dirección sur-sudeste. El porcentaje de calmas es del 7,7 %. La velocidad media anual del viento es 3,5 m/s.

En la **Figura 6** se presentan las concentraciones máximas totales (concentración máxima calculada más concentración de fondo) de NO₂ en aire a nivel del suelo, para las emisiones de NOx provenientes de ocho alturas (h) de chimeneas (60 m, 62 m, 64 m, 66 m, 68 m, 70 m, 72 m y 74 m).

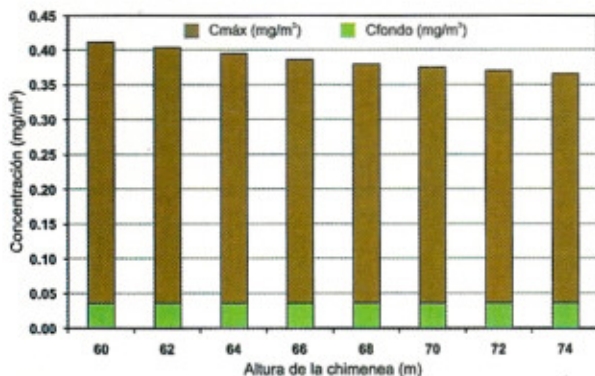


Figura 6. Concentraciones máximas totales de NO₂ en el aire a nivel del suelo

Las concentraciones máximas totales se pueden ajustar a la siguiente expresión (R²=0,999):

$$C_{máx}(mg/m^3) = 1,012275 - 0,0165502h + 0,0000991h^2 \quad [3]$$

donde las alturas de la chimenea (h) están expresadas en metros.

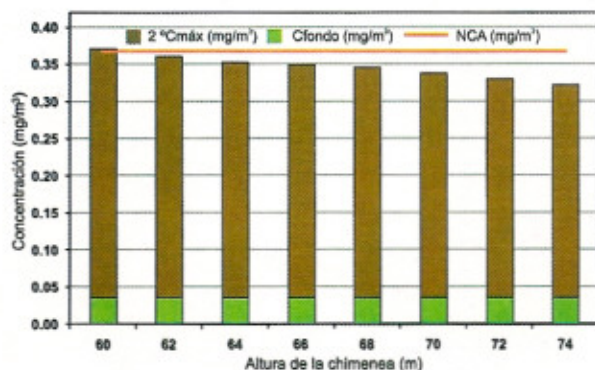


Figura 7. Concentraciones de dióxido de nitrógeno en aire correspondientes al segundo valor más alto

Debido a que la norma de calidad de aire (período de tiempo: 1 h) establece que el valor de la norma (0,367 mg/m³) no puede ser superado más de una vez al año, se calcularon y graficaron los segundos valores más altos correspondientes a las ocho alturas de chimeneas (**Figura 7**).

Se observa que las emisiones de NOx a la atmósfera provenientes de todas las hipotéticas alturas de chimeneas, excepto h= 60 m, cumplen con la norma de calidad (período de tiempo: 1 hora) del aire establecida para el dióxido de nitrógeno.

En la **Figura 8** se grafican las "reservas atmosféricas ambientales" ("aire sin contaminar" que podría ser conservado para futuros emprendimientos). La reserva atmosférica ambiental, expresada como porcentaje del estándar de calidad de aire, aumenta con la altura de la chimenea.

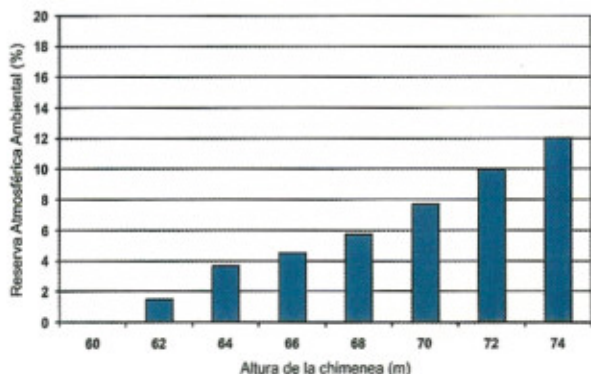


Figura 8. Reservas atmosféricas ambientales asociadas a las diferentes alturas de chimeneas consideradas

Las reservas atmosféricas ambientales (expresadas como una fracción porcentual del estándar para el tiempo de promedio de 1 hora de calidad de aire) se pueden ajustar a la siguiente expresión (R²=0,992):

$$RAA (\%) = 0,684327 (h-60) + 0,011736 (h-60)^2 \quad [4]$$

donde las alturas de la chimenea (h) están expresadas en metros.

A partir de los resultados de las **Figuras 7 y 8**, se encuentra que la altura (requerida para el cumplimiento de la norma de calidad de aire) de la chimenea de la hipotética planta industrial que se propondría instalar en una zona rural del Gran Buenos y que emitiría óxidos de nitrógeno (NOx) a la atmósfera, deberá ser igual o mayor que 62 m y que la reserva atmosférica ambiental sería superior al 1,52 % de la norma (tiempo de promedio: 1 hora) de calidad de aire para el dióxido de nitrógeno.

Comparación de los resultados correspondientes a las dos localizaciones

Las alturas de las chimeneas ambientalmente adecuadas y las correspondientes reservas atmosféricas ambientales obtenidas, difieren según la localización de la hipotética industria, sea en la ciudad de Buenos Aires o en una zona rural del Gran Buenos Aires.

Teniendo en cuenta que las características de la emisión (Tabla 1) son iguales para las dos localizaciones, los valores de las alturas mínimas de la chimenea y de las reservas atmosféricas ambientales, dependerán de algunos aspectos principales: las características del terreno, las condiciones meteorológicas locales, las reglamentaciones vigentes sobre calidad de aire en los dos distritos y los valores de la contaminación de fondo correspondientes. Las características del terreno son, urbano para la ciudad de Buenos Aires y rural para la zona considerada del Gran Buenos Aires.

En las Figuras 1 y 5 se presentan las rosas de viento anuales, correspondientes a la ciudad de Buenos Aires y la zona rural del Gran Buenos Aires. Se pueden apreciar notables diferencias entre ellas. También se presentan valores medios diferentes de la velocidad del viento (4,51 m/s en la ciudad de Buenos Aires y 3,5 m/s en la zona rural del Gran Buenos Aires) y del porcentaje de calmas (3,05 % en la ciudad de Buenos Aires y 7,7 % en la zona rural del Gran Buenos Aires). Existen otras diferencias en las condiciones atmosféricas entre ambas localizaciones que no se analizan en este trabajo, especialmente, en la estabilidad atmosférica y en la altura de la capa de mezcla. Todas estas diferencias determinan distintos efectos sobre la dispersión de contaminantes en la atmósfera. También influyen la contaminación de fondo existente en cada lugar y las diferentes condiciones de cumplimiento de los estándares o normas de calidad de aire.

En la Tabla 2 se presentan las alturas de chimeneas que posibilitan el cumplimiento de las reglamentaciones vigentes de calidad de aire y de reservas atmosféricas ambientales asociadas, para la localización de la hipotética

industria en la ciudad de Buenos Aires y en la zona rural del Gran Buenos Aires.

En la Tabla 2 se puede observar que los valores de la altura de la chimenea a localizar en la ciudad de Buenos Aires, son menores a los de la chimenea a instalar en el Gran Buenos Aires. También se puede apreciar que las reservas atmosféricas ambientales remanentes en el caso de la ubicación en la ciudad de Buenos Aires, son mayores que las que quedarían en el Gran Buenos Aires.

CONCLUSIONES

Se presenta una metodología basada en la aplicación del modelo de dispersión atmosférica AERMOD y las iteraciones de los resultados obtenidos, para calcular la altura mínima de una chimenea industrial que cumpla con las reglamentaciones vigentes de calidad de aire.

Esta metodología fue aplicada para evaluar la altura de una chimenea de una hipotética planta industrial que emitiría continuamente óxidos de nitrógeno a la atmósfera y que se proyectaría instalar en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires o en un área rural del Gran Buenos Aires.

También se evalúan sus correspondientes "reservas atmosféricas ambientales", definidas como el "aire sin contaminar" que sería conservado para futuros emprendimientos. Esta reserva está expresada como una fracción de la norma o del estándar de calidad de aire correspondiente.

Los resultados obtenidos pueden resumirse de la siguiente manera:

a) Localización en la ciudad de Buenos Aires

Se requiere una altura de la chimenea no menor a 50 m, con una reserva atmosférica ambiental superior al 2,17 % del estándar (tiempo de promedio: 1 hora) de calidad de aire para el dióxido de nitrógeno.

b) Localización en una zona rural del Gran Buenos Aires
Se requiere que la altura de la chimenea sea igual o mayor que 62 m, con una reserva atmosférica ambiental mayor que el 1,52 % de la norma (tiempo de promedio: 1 hora) de calidad de aire para el dióxido de nitrógeno.

Los valores obtenidos en este trabajo son válidos para el ejemplo y las condiciones presentadas en el mismo, lo cual significa que los resultados obtenidos no pueden ser generalizados y que en cada caso particular se deberá aplicar la metodología expuesta.

Por otra parte, en este trabajo no se consideraron los aspectos económicos relacionados con la construcción de la chimenea.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por Proyecto CONICET PIP-..... Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por la información meteorológica suministrada.

Tabla 2. Valores de la altura de la chimenea (h) y reservas atmosféricas ambientales (RAA) asociadas

Ciudad de Buenos Aires		Gran Buenos Aires	
h (m)	RAA	h (m)	RAA
50	2,17	60	0,00
52	6,59	62	1,52
54	9,84	64	3,70
56	12,20	66	4,52
58	14,72	68	5,74
60	16,87	70	7,73
62	18,97	72	9,98
64	20,97	74	12,07

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arya, S. P. (2000). Air pollution meteorology and dispersion. Oxford University Press, Oxford.
- [2] Berlyand, M. E. (1991). Prediction and regulation of air pollution. Kluwer Academic Publishers, Holland.
- [3] Bierly, E.W. and Hewson, E.W. (1962). Some restrictive meteorological conditions to be considered in the design of stacks. *J. Appl. Meteorol.*, 1, 383-390.
- [4] Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J. Wilson, R. B., Lee, R. F. Peters, W.D. and Brode, R. W. (2005). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulations and boundary layer characterization. *J. Appl. Meteorol.* 44, 682-693.
- [5] Fortak, H.G. (1979). On the effectiveness of extremely tall stacks. Proc. 10th Int. Tech. Meeting on Air Pollution Model and its Applications. NATO. Challenge of Modern Society. 108-119.
- [6] Holzworth, G. C. (1978). Estimated effective chimneys heights based on rawinsonde observations at selected sites in the United States. *J. Appl. Meteorol.* 17, 153-160.
- [7] Klug, W. (1979). Tall stacks. Impacts on the atmosphere. Proc. 10th Int. Tech. Meeting on Air Pollution Model and its Applications. NATO. Challenge of Modern Society. 122-134.
- [8] Laikhtman, D. I. (1964). Physics of boundary layer of the atmosphere. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- [9] Leavitt, J. M.; Carpenter, S. B.; Blackwell, J. P. and Montgomery, T.L. (1971). Meteorological program for limiting power plant stack emissions. *J. of the Air Poll. Control Assoc.* Vol.21, 7.
- [10] Lucas, D. H. (1975). The effect of emission height in very large areas of emission. *Atmos. Environ.* 9, 607-622.
- [11] Mazzeo, N. A. y Venegas, L. E. (2009a). Altura ambientalmente adecuada de una chimenea industrial-reserva ambiental atmosférica. *COPIME-La Revista*, 19, 32-39.
- [12] Mazzeo, N.A. y Venegas, L.E. (2009b). Chimenea industrial a instalar en una zona urbana o rural: evaluación de la altura ambientalmente adecuada. IX Jornadas de Vinculación Tecnológica, Avellaneda, Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- [13] Nickola, P. W. (1979). Field Measurements of the benefits of increased stack height. *J. Appl. Meteorol.* 18, 1296-1303.
- [14] Schnelle, K. B. and Dey, P. R. (2000). Atmospheric dispersion modeling compliance guide. McGraw-Hill, New York.
- [15] Stern, A.C. (ed.) (1986). Air pollution-Volume VIII. Academic Press, Inc, N.Y.
- [16] Turner, D. B. and Schulze, R. H. (2007). Practical guide to atmospheric dispersion modeling. Air & Waste Management Association-Trinity Consultants.
- [17] US EPA. (1986). Guideline for determination of good engineering practice stack height. EPA-450/4-80-023R.
- [18] Venegas, L. E. y Mazzeo, N. A. (1996). Análisis de riesgos ambientales asociados con diferentes alturas de chimeneas industriales. *Anales al 9º Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente*, 108-129.
- [19] Venkatram, A. (1980). The relationship between the convective boundary layer and dispersion from tall stacks. *Atmos. Environ.* 14, 763-767.

Nicolás A. Mazzeo y Laura E. Venegas son investigadores del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, y se desempeñan en la Facultad Regional Avellaneda, Universidad Tecnológica Nacional, Provincia de Buenos Aires. Pueden ser contactados en las direcciones electrónicas: <nmazzeo@fra.utn.edu.ar> y <lvenegas@fra.utn.edu.ar>, respectivamente.