

DISPERSION DE CONTAMINANTES EMITIDOS DESDE UNA FUENTE ELEVADA Y CONTINUA
EN LA CAPA LIMITE ATMOSFERICA.

Ana G. Ulke y Nicolás A. Mazzeo (*)

Departamento de Meteorología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Uno de los objetivos de la meteorología aplicada a la contaminación del aire es la predicción de la dispersión de los contaminantes. Los modelos de calidad del aire permiten estimar cuantitativamente la difusión atmosférica relacionando las emisiones de contaminantes con sus concentraciones en el aire. En este trabajo se considera el caso de una emisión continua de contaminantes desde una fuente elevada en una capa límite atmosférica estratificada térmicamente. El modelo propuesto utiliza la ecuación bidimensional semiempírica de difusión-advención con perfiles verticales del viento y de la difusividad turbulenta que permiten incluir las condiciones de estabilidad atmosférica y las características del terreno. Mediante métodos numéricos de resolución se obtiene la distribución espacial de la concentración de los contaminantes en el aire, para diferentes alturas de emisión, condiciones meteorológicas y topográficas. Por su interés práctico, se analiza la influencia de los factores mencionados sobre la concentración en superficie a distintas distancias de la fuente. Las concentraciones obtenidas se comparan con las que predice el modelo gaussiano. Los resultados indican un comportamiento satisfactorio del modelo propuesto.

ABSTRACT

Air quality models transform pollutant emissions into concentrations. In this paper, the continuous emissions of pollutants from elevated sources in a thermally stratified atmospheric boundary layer are considered. The model consists of the bidimensional semiempirical advection-diffusion equation with vertical profiles of the wind and turbulent diffusivity which allow to include stability conditions and roughness. The spatial distribution of concentrations is obtained from numerical methods for different emission heights and meteorological and topographical conditions. The influence of these factors on the ground level concentration is analyzed. Concentrations obtained are compared with those predicted by the Gaussian model. The results show an acceptable behavior of the proposed model.

(*) Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET

1. INTRODUCCION

La dispersión atmosférica depende, entre otros, de los siguientes factores: naturaleza física de los contaminantes, velocidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica, nivel de turbulencia, topografía y tipo de emisión. Simultáneamente con el transporte por el viento y la mezcla turbulenta, pueden verificarse transformaciones químicas y procesos de eliminación de los contaminantes de la atmósfera.

Mediante la simulación de los procesos mencionados, los modelos de difusión atmosférica transforman datos de emisión en distribuciones de la concentración de los contaminantes en el aire.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas se utiliza el modelo gaussiano (ver Pasquill y Smith, 1983). Sin embargo, este modelo no incorpora la estructura de la capa límite atmosférica. Asimismo, para su aplicación es necesario estimar valores de los coeficientes de dispersión. Para ello se emplean generalmente conjuntos de curvas empíricas (ver Hanna y otros, 1982) que, en muchos casos prácticos se aplican en condiciones muy distintas de las que fueron obtenidos los datos experimentales en las que se basan.

Gran parte de las investigaciones destinadas a obtener modelos de predicción de la dispersión atmosférica utiliza la ecuación semiempírica de difusión-advección.

En este trabajo, se considera el problema de una emisión continua de contaminantes desde distintas alturas en diferentes condiciones de rugosidad del terreno y estabilidad atmosférica.

En general, las soluciones analíticas de la ecuación de difusión para una emisión elevada, con perfiles verticales del viento y la difusividad turbulenta variables, se han obtenido sólo en casos muy limitados (ver Smith, 1957, Peters y otros, 1971).

Empleando técnicas de diferencias finitas es posible subsanar dichas restricciones e incorporar una descripción más representativa y amplia de las condiciones meteorológicas y topográficas.

En este trabajo, mediante métodos numéricos aplicados a la ecuación semiempírica de difusión, se obtiene el campo bidimensional de la concentración y se analiza su dependencia de la altura de emisión, la rugosidad del terreno y la estabilidad atmosférica. Los resultados obtenidos se comparan con los provenientes del modelo gaussiano.

2. EL MODELO DE DISPERSION ATMOSFERICA

2.1 Presentación

Se utiliza la ecuación semiempírica de difusión-advención, para una fuente puntual y continua (ver Pasquill y Smith, 1983):

$$\bar{u}(z) \frac{\partial C(x,z)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(z) \frac{\partial C(x,z)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

donde x está orientada en la dirección del viento, z es la coordenada vertical, \bar{u} es la velocidad media del viento, K es el coeficiente de difusividad turbulenta y C es la concentración lateral integrada.

Se considera que los contaminantes están confinados en la capa de mezcla y que no existe depósito de material en el suelo ni reacciones químicas.

La variación vertical del coeficiente de difusividad turbulenta, en la capa límite atmosférica, en condiciones estables y neutrales se puede expresar mediante la siguiente relación empírica (ver Ulke y Mazzeo, 1987):

$$K(z) = k u_* z \left[1 + 6.9 \left(\frac{z}{h} \right) \left(\frac{h}{L} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

donde k es la constante de von Kármán, L la longitud de Monin-Obukhov, h la altura de la capa de mezcla y la velocidad de fricción, u_* , varía con la altura de acuerdo con:

$$u_*(z) = u_{*0} \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (3)$$

siendo u_{*0} su valor en superficie.

A partir de la aplicación de la hipótesis del transporte-gradiente y las formas funcionales (2) y (3) se obtiene el perfil vertical de la velocidad del viento en la capa:

$$\bar{u}(z) = \frac{u_{*0}}{k} \left\{ \ln \frac{z}{z_0} - \left(1 - 6.9 \frac{h}{L} \right) \left(\frac{z - z_0}{h} \right) - \frac{6.9}{2} \frac{h}{L} \left[\left(\frac{z}{h} \right)^2 - \left(\frac{z_0}{h} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

donde z_0 es la longitud de rugosidad.

2.2 Resolución

La expresión (1) se aproxima mediante un esquema de diferencias finitas propuesto por Van Buijtenen y otros (1973).

Los incrementos espaciales en las direcciones vertical y horizontal se

82 DISPERSION DE CONTAMINANTES

consideran variables a fin de describir en forma apropiada la difusión cerca de la fuente.

Utilizando para los puntos de retículo en las direcciones z y x los subíndices j y n respectivamente, el esquema mencionado aproxima los términos de la ecuación (1) en la forma:

$$\bar{u}(z) \frac{\partial C}{\partial x} = U_j \frac{C_{n+1,j} - C_{n,j}}{x_{n+1} - x_n} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K(z) \frac{\partial C}{\partial z} \right] = \frac{2 K_j(z^+) (C_{n+1,j+1} - C_{n+1,j})}{(z_{j+1}^+ - z_{j-1}^+) (z_{j+1}^+ - z_j^+)} - \frac{2 K_j(z^-) (C_{n,j} - C_{n+1,j-1})}{(z_{j+1}^- - z_{j-1}^-) (z_j^- - z_{j-1}^-)} \quad (6)$$

En estas expresiones $K_j(z^+)$ es el valor de $K(z)$ en la altura $(z_{j+1}^+ + z_j^+)/2$ y $K_j(z^-)$ el correspondiente a $(z_j^- + z_{j-1}^-)/2$.

Si (5) y (6) se sustituyen en (1), reordenando, se obtiene:

$$c_j C_{n+1,j-1} + a_j C_{n+1,j} + b_j C_{n+1,j+1} = d_j C_{n,j} \quad (7)$$

siendo

$$c_j = \frac{-2 K_j(z^-)}{(z_{j+1}^- - z_{j-1}^-)(z_j^- - z_{j-1}^-)} \quad b_j = \frac{-2 K_j(z^+)}{(z_{j+1}^+ - z_{j-1}^+)(z_{j+1}^+ - z_j^+)}$$

$$d_j = \frac{U_j}{x_{n+1} - x_n} \quad a_j = d_j - c_j - b_j$$

con $0 \leq j \leq N$ y $C_{n+1,-1} = C_{n+1,N+1} = 0$.

El sistema de ecuaciones algebraicas resultante puede resolverse mediante fórmulas de recurrencia. De este modo, es posible obtener la distribución espacial de la concentración lateral integrada $C(x,z)$ para diferentes alturas de emisión, condiciones de rugosidad y estabilidad atmosférica.

En especial, debido a su interés práctico, se muestra la influencia de estos factores sobre la variación de la concentración a nivel del suelo con la distancia a la fuente.

Suponiendo condiciones de neutralidad atmosférica ($h/L=0$), $h=1000\text{m}$, $u_{10} = 0,45 \text{ m/s}$ y $k=0,41$ se analiza el comportamiento de la concentración a nivel del suelo para distintas alturas de emisión y rugosidades del terreno.

La intensidad de la emisión considerada fue $Q=10^3 \text{ g/s}$, mientras que las alturas (hf) varían entre 10m y 100m .

Los valores de z_0 empleados son los siguientes $=10^3 \text{ m}, 10^2 \text{ m}, 10^1 \text{ m}$ y $0,95\text{m}$.

Posteriormente, con el fin de estudiar la influencia de la estabilidad atmosférica, se considera $h=200\text{m}$, $u_{10} = 0,2 \text{ m/s}$, $0.4h/L \neq 10$, con rugosidades del terreno $z_0 = 10^{-3} \text{ m}$, 10^{-2} m y 10^{-1} m .

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 se presenta la variación de la concentración adimensional a nivel del suelo con la distancia, en condiciones de neutralidad atmosférica, para varias alturas de emisión, con $z_0 = 10^{-2} \text{ m}$. Asimismo, con fines comparativos se ha graficado la correspondiente a una emisión desde superficie y la que predice el modelo gaussiano, para el cual se consideran los valores de σ_z dados por la curva de Pasquill-Gifford (P-G), clase D (ver Turner, 1970).

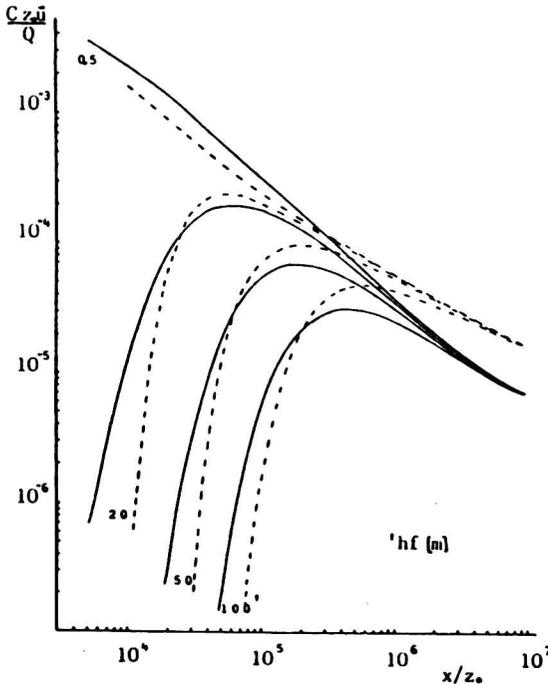


Figura 1. Variación con la distancia de la concentración en superficie en condiciones neutrales ($z_0 = 10^{-2} \text{ m}$).

---- modelo gaussiano — modelo numérico

Se observa que la concentración aumenta cuando la altura de emisión es menor y que a medida que crece la elevación de la fuente la distancia a la que se produce la concentración máxima en superficie es mayor, mientras que su valor

disminuye.

En general, los resultados obtenidos tienden a los correspondientes a una fuente ubicada en el suelo cuando las distancias son grandes. Esto indica que la altura de emisión solo es importante relativamente cerca de la fuente.

Asimismo, a mayores distancias se nota la influencia de la altura de la capa de mezcla sobre la dispersión vertical.

Con respecto a la comparación con la variación que predice el modelo gaussiano, se observan en todos los casos apartamientos en los valores de la concentración, siendo mayores cerca de la fuente, mientras que la relación se invierte cuando aumenta la distancia.

Por otra parte, para fuentes elevadas, en todos los casos considerados, la concentración máxima obtenida mediante las simulaciones numéricas es inferior a la que predice el modelo gaussiano. Además, para alturas de emisión pequeñas, la distancia a la que se produce el máximo es menor en el modelo gaussiano que en el numérico, ocurriendo lo contrario para mayores alturas.

Con el objeto de mostrar con mayor claridad lo expresado en el párrafo anterior y debido a su importancia en las estimaciones de calidad del aire cerca del suelo, en la Figura 2 se representó la variación de la concentración máxima (\hat{C}) y su distancia a la fuente (\hat{x}) con la altura de emisión, obtenida a partir de los resultados numéricos y los que provienen del modelo gaussiano, en condiciones neutrales.

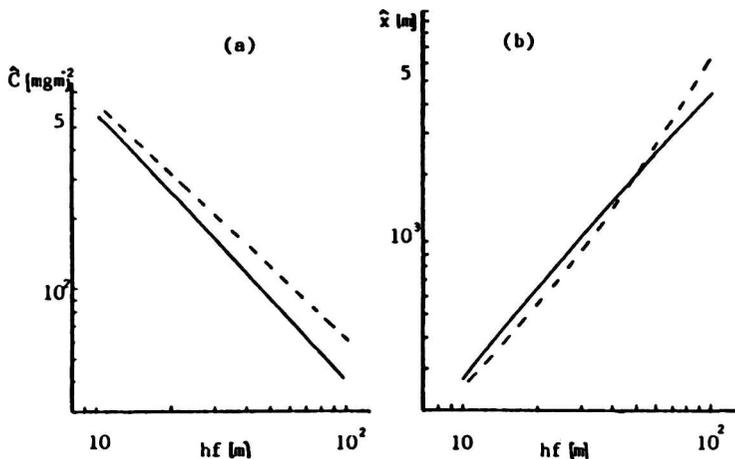


Figura 2. Variación de la concentración máxima en superficie (a) y de su distancia a la fuente (b) con la altura de emisión en condiciones neutrales ($z_0 = 10^{-1}$ m).

--- modelo gaussiano (D)

— modelo numérico

Comparando los resultados obtenidos con el modelo, en condiciones neutrales y con los valores de z_0 mencionados anteriormente, se puede observar la influencia de la rugosidad del terreno, para diferentes alturas de emisión (Fig. 3).

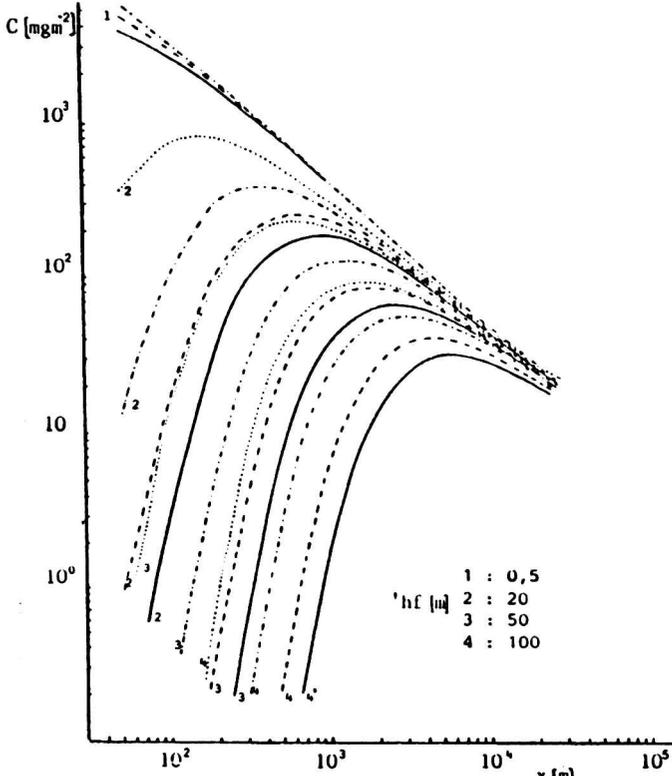


Figura 3. Variación de la concentración en superficie con la rugosidad del terreno en condiciones neutrales.

——— $z_0 = 10^3$ m - - - - $z_0 = 10^2$ m
 - - - $z_0 = 10^1$ m $z_0 = 0,95$ m

La concentración a nivel del suelo aumenta con z_0 , siendo su influencia mayor cerca de la fuente y cuando su altura es menor.

A grandes distancias se nota la influencia de la altura de la capa de mezcla. Es posible estudiar con mayor detalle el efecto de las características del terreno comparando los valores de la concentración a distancias fijas de la fuente. Para ello, en la Figura 4 se ha graficado la variación de C con la rugosidad, para $x=500$ m y $x=1000$ m, distintas alturas de emisión y condiciones de neutralidad atmosférica ($h/L=0$). Como se mencionara anteriormente, la influencia de z_0 disminuye con la altura de la emisión y la distancia a la fuente.

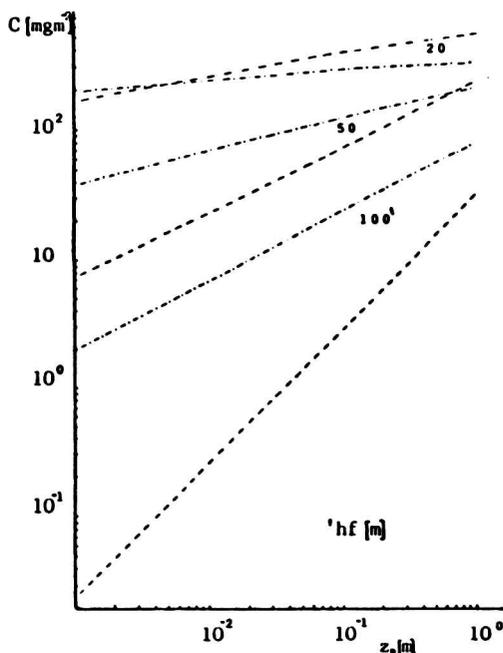


Figura 4. Variación de la concentración en superficie con la rugosidad del terreno a distancias fijas de la fuente ($h/L=0$).

--- $x = 500m$ -.-. $x = 1000m$

En la Figura 5 se presentan los valores de la concentración adimensional a nivel del suelo obtenidos suponiendo condiciones de estabilidad atmosférica, con $z_0=10^2 m$, para distintas alturas de emisión.

En general, la influencia de la estabilidad aumenta con la altura de emisión.

En el caso de la mayor altura de emisión, la concentración en superficie disminuye con la estabilidad. Este comportamiento se observa en las demás alturas solamente en los tramos iniciales. A medida que crece la distancia a la fuente, la relación mencionada se invierte tanto más cerca cuanto menor es su elevación y la concentración aumenta cuando las condiciones atmosféricas son más estables, como ocurre en todo el rango considerado si se supone una emisión desde el suelo.

Por otro lado, para cada fuente elevada, la distancia a la que se encuentra la concentración máxima se incrementa con h/L , mientras que, excepto para alturas de emisión pequeñas, su valor disminuye con la estabilidad.

Junto con los valores provenientes de las simulaciones numéricas se han graficado, con fines comparativos, los que predice el modelo gaussiano para las clases estables E y F.

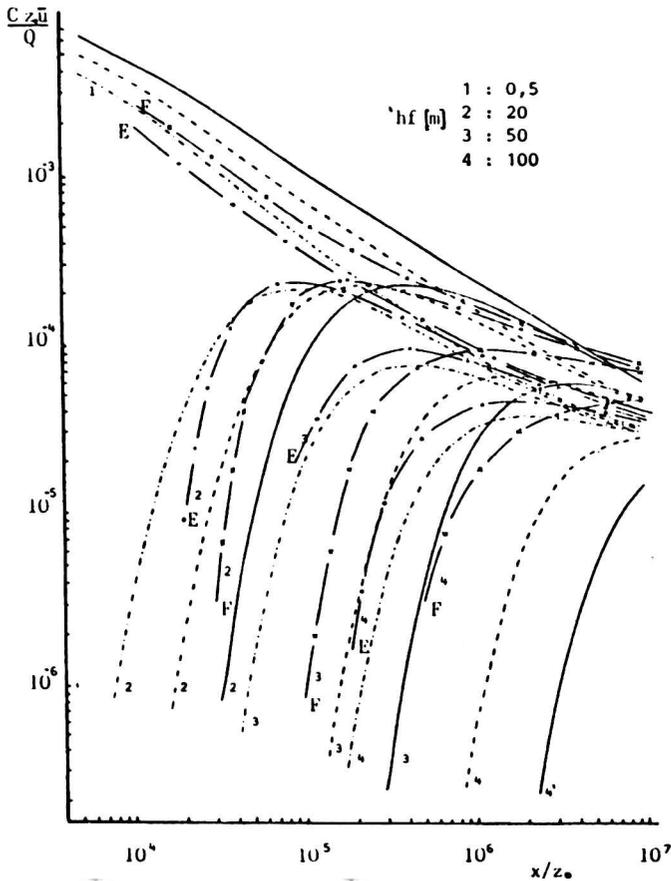


Figura 5. Variación de la concentración en superficie con la estabilidad atmosférica ($z_0=10^{-2}$ m).

modelo gaussiano, $\text{---}\bullet\text{---}$ E $\text{---}\text{---}$ F	modelo numérico, h/L { $\text{---}\text{---}$ 1 $\text{---}\text{---}$ 5 $\text{---}\text{---}$ 10
---	--

Se puede observar que para las fuentes más elevadas, las concentraciones obtenidas numéricamente son menores que las que provienen del modelo gaussiano. En el caso de emisiones desde menor altura, esta relación se verifica en los tramos iniciales y se invierte posteriormente, tanto más cerca cuanto más baja es la fuente. Finalmente, para una fuente en superficie, a todas las distancias consideradas los resultados obtenidos mediante el modelo gaussiano son menores que los de la solución numérica.

En general, los apartamientos entre ambos modelos se incrementan con la estabilidad atmosférica.

La influencia de la altura de la capa de mezcla se manifiesta en mayor grado

cuando las condiciones atmosféricas se acercan a la neutralidad y no varía con la elevación de la fuente.

Con respecto a la predicción de la concentración máxima y su distancia a la fuente, es posible analizar los apartamientos entre ambos modelos con mayor claridad en la Figura 6, donde se ha graficado la variación de \hat{C} y \hat{x} con la altura de emisión, para condiciones estables.

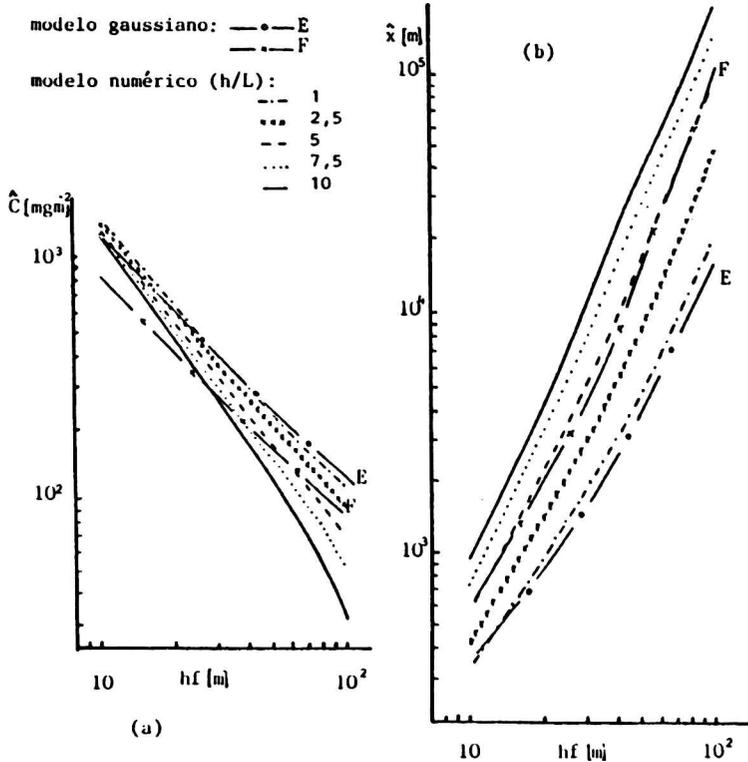


Figura 6. Variación de la concentración máxima en superficie (a) y de su distancia a la fuente (b) con la altura de emisión en condiciones estables ($z_0=10^{-2}\text{m}$).

Se puede observar que para la clase E, el valor de \hat{C} es inferior en el modelo numérico que en el gaussiano, excepto para las fuentes de menor elevación. En condiciones más estables (clase F) la relación se mantiene sólo para las alturas de emisión más grandes, siendo el valor proveniente de las soluciones numéricas superior al del modelo gaussiano para un mayor rango de alturas de emisión.

En cuanto a \hat{x} , el modelo de la pluma gaussiana lo ubica más cerca de la fuente y

esta diferencia se incrementa con la altura de emisión.

La influencia de la rugosidad del terreno sobre la concentración a nivel del suelo para condiciones de estabilidad puede observarse en la Figura 7.

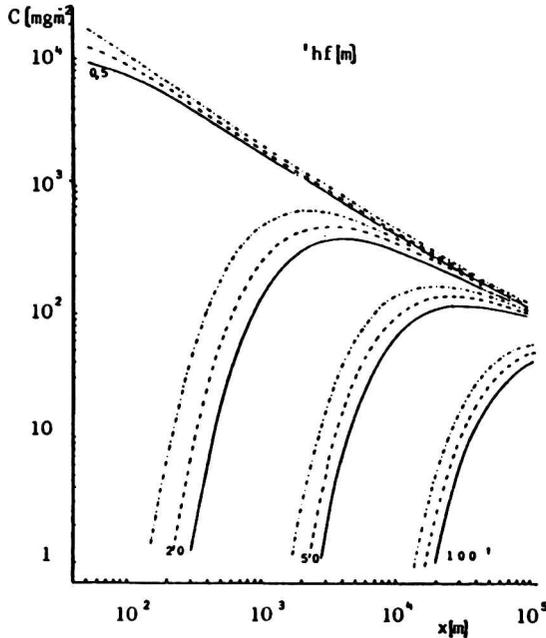


Figura 7. Variación de la concentración en superficie con la rugosidad del terreno en condiciones estables ($h/L=7.5$)

— $z_0 = 10^{-3}$ m - - - $z_0 = 10^{-2}$ m ···· $z_0 = 10^{-1}$ m.

Comparando con la Figura 3, se observa un comportamiento cualitativo similar al descrito para condiciones neutrales, y que los apartamientos debidos a las características del terreno disminuyen cuando las condiciones atmosféricas son más estables.

4. CONCLUSIONES

Se analiza el problema de la emisión continua de contaminantes desde distintas alturas en una capa límite atmosférica en condiciones de estabilidad.

En la estimación de los valores de la concentración es necesario considerar la influencia de la variación vertical de la velocidad del viento y del coeficiente de difusividad turbulenta, de la altura de la emisión, de la rugosidad del terreno y de las condiciones de estabilidad.

90 DISPERSION DE CONTAMINANTES

El modelo propuesto, basado en la resolución numérica de la ecuación bidimensional semiempírica de difusión-advención, permite incluir estos factores en forma cuantitativa utilizando los conocimientos de la estructura de la capa límite atmosférica.

La concentración de los contaminantes en el aire a nivel del suelo es una variable de interés práctico. El análisis de su comportamiento posibilita las siguientes conclusiones:

- la influencia de la altura de emisión disminuye con la distancia a la fuente,
- las características del terreno afectan la dispersión del material emitido especialmente cerca de la fuente, cuando su altura es menor y las condiciones atmosféricas son cercanas a la neutralidad,
- la influencia de la estabilidad aumenta con la altura de la emisión, resultando, para fuentes elevadas, menor la concentración en superficie cuando las condiciones atmosféricas son más estables,
- se obtiene la variación de la concentración máxima y su ubicación respecto a la fuente en función de la altura de emisión, la estabilidad atmosférica y la rugosidad del terreno, de importancia en las estimaciones de calidad del aire,
- la comparación del modelo propuesto con el gaussiano es cualitativamente satisfactoria,
- en una próxima etapa se compararán los resultados del modelo con datos observacionales, lo que permitirá completar su evaluación.

5. BIBLIOGRAFIA

- Hanna, S.R., Briggs, G.A. y Hosker, R.P., 1982: Handbook on Atmospheric Diffusion, Tech. Inf. Center US Dept. of Energy DOE/TIC-11223.
- Pasquill, F. y Smith, F.B., 1983: Atmospheric Diffusion, John Wiley and Sons, New York.
- Peters, L.K. y Klinzing, G.E., 1971: The effect of variable diffusion coefficients and velocity on the dispersion of pollutants, Atmos. Environment, 5, 497-504.
- Smith, F.B., 1957: The diffusion of smoke from a continuous elevated point-source into a turbulent atmosphere, J. Fluid Mech., 2, 49-76.
- Turner, D.B., 1970: Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, USDHEW, Environmental Health Service.
- Ulke, A.G. y Mazzeo, N.A., 1987: Dispersión de contaminantes emitidos desde superficie en una capa límite atmosférica estratificada térmicamente, Anales del II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología.
- Van Buijtenen, C.J.P., Holland, J. y Van Leeuwen, D., 1973: A numerical diffusion model for continuous releases, Boundary-Layer Met., 5, 275-283.