
Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Rosario - Departamento de Ingeniería Química

Cátedra: Área Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos

DIFUSIÓN
DE
CONTAMINANTES GASEOSOS
EN LA
ATMÓSFERA

ALEJANDRO S.M. SANTA CRUZ

Rosario – 2000



**ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA:
DETERMINACIÓN
DE LOS
PARÁMETROS DE DISPERSIÓN**

Unidad

2

1. Clases de Estabilidad Atmosférica

Los parámetros atmosféricos son críticos para el uso de modelos de difusión de contaminantes. En efecto, los coeficientes de dispersión que aparecen en las fórmulas Gaussianas, están determinados por el mezclado o poder dispersivo del flujo turbulento dentro de la capa límite atmosférica. Para este propósito, **Pasquill [1]** propuso un método que permite determinar los coeficientes de dispersión a partir de una clasificación sencilla de las condiciones atmosféricas, definidas como categorías de estabilidad. La ventaja de esta clasificación es que para aplicarla, solamente es necesario utilizar información convencional suministrada por el servicio meteorológico local. **Pasquill** propuso seis categorías de estabilidad, a saber:

<i>A</i>	<i>extremadamente inestable</i>
<i>B</i>	<i>moderadamente inestable</i>
<i>C</i>	<i>ligeramente inestable</i>
<i>D</i>	<i>neutral</i>
<i>E</i>	<i>ligeramente estable</i>
<i>F</i>	<i>moderadamente estable</i>

El método permite asociar a cualquier situación atmosférica, alguna de las seis categorías anteriores. Los factores determinantes de las clases de estabilidad son:

- * La velocidad del viento.
- * La nubosidad.
- * El flujo neto de radiación que llega a la Tierra, que afecta al gradiente térmico vertical (*lapse rate*), a la presencia o ausencia de actividad convectiva y a la dinámica de la capa de mezclado.

Los dos primeros parámetros se miden de manera rutinaria en cualquier estación meteorológica, la insolación en cambio no, pero puede calcularse a partir de parámetros astronómicos como se detallan más adelante.

Posteriormente, **Gifford [2]** caracteriza las clases de estabilidad propuestas por **Pasquill** como alguna de las nueve clases que se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 1

<i>Velocidad del viento en superficie (m/seg)</i>	<i>Insolación durante el día</i>			<i>Condiciones nocturnas</i>	
				<i>Nubosidad</i>	
	<i>Fuerte</i>	<i>Moderada</i>	<i>Débil</i>	>4/8	<4/8
<2	A	A-B	B		
2	A-B	B	C	E	F
4	B	B-C	C	D	E
6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Por consiguiente, una estratificación neutral cuando el flujo neto de radiación es cero, bajo condiciones de densa nubosidad, ya sea de día o de noche, sin considerar la velocidad del viento, define una clase de estabilidad tipo D. Una inversión térmica durante la noche, dará lugar a una pobre dispersión bajo las condiciones de estabilidad E o F, de acuerdo al grado de nubosidad y a la velocidad del viento. Las clases de estabilidad A, B y C representan las condiciones diurnas con cantidades variables de radiación ingresante a la Tierra. Con bajas velocidades de vientos y fuerte radiación ingresante, estabilidad tipo A, se produce una intensa actividad convectiva y fuerte mezclado. Esta última genera una capa de mezclado bien desarrollada de altura finita cubierta por una capa de inversión elevada. Flujos más bajos de radiación ingresante o velocidades de vientos más altas, se corresponden con una actividad convectiva moderada, tipo B, o con una actividad ligeramente convectiva, tipo C, o con algunos de los tipos intermedios A-B, B-C y C-D. Los valores de σ_y y σ_z se determinan a partir de gráficas suministradas originalmente por **Gifford**. En ellas se muestran, en forma separada para cada σ , las curvas para los diferentes tipos de estabilidad.

Los valores de los coeficientes de dispersión para los tipos A-B, B-C y C-D se obtienen promediando los valores de σ_y y σ_z para ambas clases de estabilidad. Conviene destacar, que de acuerdo a los estudios realizados por **Gifford**, estos valores de σ_y y σ_z son apropiados para procesos de difusión a baja altura y para emisiones de gases que no experimentan fuerzas

de flotación sobre terreno abierto.

Por otra parte **Turner** [3], redefine nuevamente las categorías de estabilidad de **Pasquill** de un modo tal que permite calcularlas utilizando la misma información meteorológica convencional, pero haciendo uso de aquella que rutinariamente se codifica en los partes meteorológicos. Establece siete categorías de estabilidad en lugar de las seis de **Pasquill**, y establece a su vez, la siguiente correspondencia entre categorías como puede apreciarse en la Tabla 2:

TABLA 2

<i>Según Turner</i>	<i>Según Pasquill</i>	<i>Denominación</i>
1	A	Extremadamente inestable
2	B	Moderadamente inestable
3	C	Ligeramente inestable
4	D	Neutral
5	E	Ligeramente estable
6	F	Moderadamente estable
7		Extremadamente estable

Según **Turner** la categoría 7 es nueva y por eso se la denomina extremadamente estable y no tiene correspondencia con categoría alguna de **Pasquill**. Es necesario destacar que ambas clasificaciones utilizan la misma información para su determinación y que en conjunto representan de igual modo la capacidad de dispersión de la atmósfera. No obstante la clasificación de **Pasquill** goza de gran reputación por ser la primera clasificación racional de clases de estabilidad, porque sus resultados están avalados por mediciones y las desviaciones estándar del modelo Gaussiano se calcularon en función de sus seis clases. Además, la clasificación de **Turner** tiene la ventaja de adaptarse fácilmente al uso sistemático de la información meteorológica tal cual se la codifica. Esto último presenta una ventaja adicional ya que hace uso in extenso de un gran número de datos meteorológicos.

Golder realizó un estudio para determinar cual es la correspondencia real entre ambas clasificaciones y llegó a la siguiente conclusión (ver Tabla 3):

TABLA 3

<i>Correspondencia según Golder</i>	
<i>Turner</i>	<i>Pasquill</i>
1	A
2	B
3	C
4	D
5	
6	E
7	F

Por otra parte, **Golder** estima que la categoría 5 se presenta muy pocas veces. Esto último pudo ser comprobado por **Berri [4]** en un estudio realizado en la Argentina con datos del período 1971/1975 de 38 estaciones meteorológicas. En ellas se determinó que la frecuencia de la categoría 5 representa siempre, excepto en un sólo caso sobre 38, un mínimo relativo de la frecuencia de ocurrencia de las categorías 4 y 6.

Golder concluye que las condiciones en que se da la ocurrencia de la categoría 5 de **Turner** representa un intermedio entre las condiciones asociadas a las categorías 4 y 6 de **Pasquill**. Por consiguiente, como metodología de cálculo debería emplearse la clasificación de Turner para la determinación de la clase de estabilidad, pero usando la correspondencia propuesta por **Golder** para la determinación final de la categoría según **Pasquill**.

La Tabla 4 permite obtener la categoría de estabilidad en función de dos parámetros básicos: la velocidad del viento y un índice de radiación neta, **RN**.

TABLA 4

<i>Velocidad del viento (nudos)</i>	<i>Índice de radiación neta (RN)</i>						
	4	3	2	1	0	-1	-2
0-1	1	1	2	3	4	6	7
2-3	1	2	2	3	4	6	7
4-5	1	2	3	4	4	6	7
6	2	2	3	4	4	5	6
7	2	2	3	4	4	4	5
8-9	2	3	3	4	4	4	5
10	3	3	4	4	4	4	5
11	3	3	4	4	4	4	4
>12	3	4	4	4	4	4	4

Durante la noche el índice de radiación depende exclusivamente de la nubosidad y durante el día depende de un índice de insolación, ***In***, que depende a su vez de la energía solar que llega a la superficie terrestre, la cual no se mide en todas las estaciones meteorológicas sino en las redes especiales de medición de radiación solar. Por consiguiente, la insolación debe ser estimada de acuerdo a lo propuesto por **Turner**: El índice de insolación ***In*** se calcula en función de la altura del sol sobre el horizonte, de acuerdo con la Tabla 5:

TABLA 5

<i>Altura del sol sobre el horizonte (h)</i>	<i>Insolación</i>	<i>Índice de insolación</i>
60<h	Fuerte	4
35<h<60	Moderada	3
15<h<35	Ligera	2
h<15	Débil	1

El índice de insolación, ***In***, da una idea de la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre en ausencia de nubes, por consiguiente, el parámetro que se necesita, ***RN***, se calcula en función del índice de insolación corregido por nubosidad. Se definen los siguientes parámetros:

N : Nubosidad expresada en octavos de bóveda celeste cubierta por nubes.

H : Altura del techo de nubes (en pies), que representa la altura sobre el terreno de la base de las nubes más bajas.

Estos parámetros son los datos de rutina que aporta el servicio meteorológico. El esquema de cálculo para determinar RN es el siguiente:

1) Durante el día o la noche.

Si $N = 8/8$ y $H < 7000$ entonces $RN = 0$ en Tabla 4.

2) Durante la noche (definida desde una hora antes de la puesta del sol hasta una hora después de la salida)

a) $N \leq 3/8$ entonces $RN = -2$ en Tabla 4.

b) Si $N > 3/8$ entonces $RN = -1$ en Tabla 4.

3) Durante el día.

Se determina I_n de la Tabla 5, y se corrige así:

a) Si $N \leq 4/8$ entonces $RN = I_n$

b) Si $N > 4/8$, I_n se modifica así:

i) Si $H < 7000$ entonces $RN = I_n - 2$.

ii) Si $7000 < H < 16000$ entonces $RN = I_n - 1$.

iii) Si $N = 8/8$ y $H \geq 7000$ entonces $RN = I_n - 1$.

Si como consecuencia de las modificaciones resultare $RN \leq 0$ entonces $RN = 1$.

Los datos que se requieren para determinar las categorías de estabilidad de Turner son entonces:

a) Intensidad del viento.

b) Cantidad de cielo cubierto (expresado en octavos).

c) Cantidad de cielo cubierto por nubes bajas (en octavos).

d) Cantidad de cielo cubierto por nubes medias (en octavos).

e) Techo de nubes.

f) Latitud y longitud geográfica de la estación.

g) Mes, día y hora de la observación.

h) Ángulo de declinación solar.

Los datos de los apartados f), g) y h) se necesitan para el cálculo de la altura del sol sobre el horizonte, h , que se expresa así:

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\tau) \quad (1)$$

donde φ es la latitud del lugar, δ es el ángulo de declinación solar y τ es el ángulo horario que es el arco occidental de Ecuador comprendido entre el meridiano del lugar y el meridiano celeste del sol. Este ángulo se calcula así:

$$\tau = \left[\frac{\left(T - TZ + \frac{ET}{60} - 12 \right) \pi}{12} \right] - L \quad (2)$$

donde T es el tiempo medio local expresado en horas y fracción, TZ es el huso horario de la hora oficial argentina, ET es la ecuación del tiempo expresada en minutos que representa la diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo medio local y L es la longitud geográfica de la estación meteorológica expresada en radianes. El ángulo de declinación solar δ , como la ecuación del tiempo ET , se hallan calculadas para cada día del año en el Almanaque Náutico. Ambos parámetros varían año tras año. Dado que esta variación es muy pequeña, ambos parámetros pueden calcularse mediante desarrollos en series de Fourier con datos del año central de la década 1970 - 1980. Por consiguiente,

$$\begin{aligned} \delta = & 0.394886 + 3.805891 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{365}\right) - 22.943248 \operatorname{cos}\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \\ & + 0.040673 \operatorname{sen}\left(\frac{4\pi n}{365}\right) - 0.389320 \operatorname{cos}\left(\frac{4\pi n}{365}\right) \\ & + 0.080215 \operatorname{sen}\left(\frac{6\pi n}{365}\right) - 0.156401 \operatorname{cos}\left(\frac{6\pi n}{365}\right) \\ & + 0.004609 \operatorname{sen}\left(\frac{8\pi n}{365}\right) - 0.010095 \operatorname{cos}\left(\frac{8\pi n}{365}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

Por otra parte se obtiene:

$$\begin{aligned}
ET(n) = & 0.01 - 7.325231 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{365}\right) + 0.62453 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \\
& - 9.454213 \operatorname{sen}\left(\frac{4\pi n}{365}\right) - 3.003515 \cos\left(\frac{4\pi n}{365}\right) \\
& - 0.329089 \operatorname{sen}\left(\frac{6\pi n}{365}\right) - 0.074446 \cos\left(\frac{6\pi n}{365}\right) \\
& - 0.0188244 \operatorname{sen}\left(\frac{8\pi n}{365}\right) - 0.012167 \cos\left(\frac{8\pi n}{365}\right) \\
& - 0.017286 \operatorname{sen}\left(\frac{10\pi n}{365}\right) - 0.005083 \cos\left(\frac{10\pi n}{365}\right) \\
& - 0.011172 \operatorname{sen}\left(\frac{12\pi n}{365}\right) - 0.003857 \cos\left(\frac{12\pi n}{365}\right) \tag{4}
\end{aligned}$$

El número del día del año n , se cuenta a partir del 1ro. de Enero y en forma correlativa. Los desarrollos de Fourier se realizaron hasta un número de armónicos tal que explican el 95% de la varianza. A partir de los datos de mes, día y hora de la observación es posible determinar el ángulo de declinación solar δ y la ecuación del tiempo ET mediante las Ecuaciones (3) y (4), respectivamente. Durante el día, definido como el intervalo de tiempo comprendido entre una hora después de la salida del sol hasta una hora antes de la puesta del sol, se determina el ángulo horario τ mediante la Ecuación (2). Con este dato más los datos geográficos de latitud y longitud es posible calcular la altura del sol sobre el horizonte, h , mediante la Ecuación (1). De esta manera es posible hallar el índice de insolación In de la Tabla 5. Este valor se corrige por nubosidad, de acuerdo a lo ya establecido, obteniéndose el índice de radiación RN , y, finalmente, de la Tabla 4, se obtiene la categoría de estabilidad a partir del índice RN y la velocidad del viento.

2. Determinación de los Coeficientes de Dispersión

2.1 Coeficientes de dispersión para emisiones continuas

Para propósitos prácticos, σ_y y σ_z se calculan como sigue:

$$\sigma_y = a x^b \tag{5a}$$

$$\sigma_z = c x^d \tag{5b}$$

para valores de a , b , c y d consignados en la Tabla 6 (ver referencia [5]). La Ecuación (5b)

está ajustada para distancias comprendidas entre 100 y 10000 m.

TABLA 6

<i>Clases de Estabilidad</i>	<i>Coefficientes</i>			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
A	0.527	0.865	0.28	0.90
B	0.371	0.866	0.23	0.85
C	0.209	0.897	0.22	0.80
D	0.128	0.905	0.20	0.76
E	0.098	0.902	0.15	0.73
F	0.065	0.902	0.12	0.67

Notas:

- i) Los valores de σ_y son valores promediados sobre un intervalo de **10 minutos**.
- ii) Los valores de σ_z corresponden a un valor de longitud de rugosidad $z_0 = 0.1m$ y $H < 20m$.
- iii) Los valores de σ_y y σ_z se expresan en metros.

2.2 Corrección de σ_z por rugosidad del terreno

Pasquill [5], propuso un método para tener en cuenta la rugosidad de la superficie terrestre; en particular, el efecto de ésta sobre el coeficiente de dispersión en la dirección z . La rugosidad incluye el efecto de la vegetación exuberante, los cultivos, los edificios, etc. sobre el coeficiente de dispersión σ_z . Este autor propuso la siguiente corrección (ver Tabla (7)):

$$\sigma_z = c_{z_0} c x^d \quad (6)$$

con

$$c_{z_0} = (10 z_0)^{0.53 x^{-0.22}} \quad (7)$$

TABLA 7

<i>Superficies planas</i>	Áreas abiertas con pocos árboles.	$z_0 = 0.03\text{m}$
<i>Granjas, praderas, terrenos para labranza, etc.</i>	Aeropuertos, tierras arables, áreas abiertas con muchos árboles.	$z_0 = 0.10\text{m}$
<i>Áreas cultivadas</i>	Invernaderos, áreas abiertas con densa vegetación, casas dispersas, etc.	$z_0 = 0.30\text{m}$
<i>Áreas residenciales</i>	Área con alta densidad de casas bajas, áreas arboladas, zonas industriales con obstáculos no demasiado grandes.	$z_0 = 1.00\text{m}$
<i>Áreas urbanas</i>	Ciudades con edificios elevados, áreas industriales con obstáculos grandes.	$z_0 = 3.00\text{m}$

Dado que el coeficiente de corrección por rugosidad depende de x , para muchas aplicaciones sería conveniente recalcular los coeficientes c y d para cada nuevo valor de z_0 mediante la utilización de la Ecuación (5b), obteniéndose los valores corregidos del coeficiente de dispersión vertical. En la Tabla (8) se muestran los nuevos coeficientes c' y d' corregidos por rugosidad del terreno.

TABLA 8

	$Z_0 = 0.03\text{ m}$		$Z_0 = 0.10\text{ m}$		$Z_0 = 0.30\text{ m}$		$Z_0 = 1.00\text{ m}$		$Z_0 = 3.00\text{ m}$	
	c'	d'	c'	d'	c'	d'	c'	d'	c'	d'
A	0.193	0.932	0.28	0.90	0.383	0.873	0.550	0.842	0.760	0.814
B	0.160	0.891	0.23	0.85	0.317	0.822	0.455	0.792	0.631	0.763
C	0.155	0.830	0.22	0.80	0.308	0.771	0.441	0.740	0.612	0.712
D	0.139	0.791	0.20	0.76	0.276	0.732	0.395	0.701	0.548	0.673
E	0.104	0.761	0.15	0.73	0.207	0.702	0.296	0.671	0.411	0.643
F	0.083	0.701	0.12	0.67	0.164	0.642	0.236	0.611	0.327	0.583

2.3 Corrección por tiempo promedio de medición

Si se toma una instantánea de una pluma, se observará una banda humosa distorsionada por efecto del viento. Sin embargo, si se toma, por ejemplo, una foto con un tiempo de exposición de *10 minutos*, el *flameo* de la pluma producirá una pluma más ancha y más regular (ver Figura (1)).

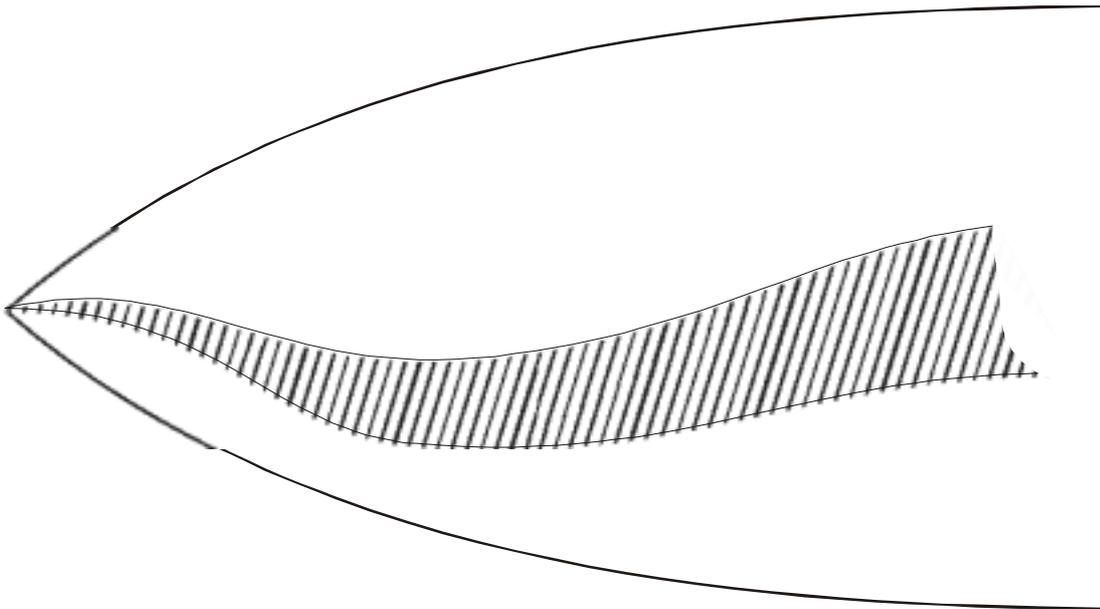


Figura 1: Representación esquemática de una pluma. La parte sombreada representa la forma de la pluma en un instante determinado, el contorno más ancho la forma promedio sobre 10 minutos.

Este efecto influye la medición y, lo que es más importante, la cantidad de gas contaminante que una persona aspira. Si se efectúa una medición de corta duración en una emisión instantánea, se determinará una elevada concentración. Sin embargo, si se efectúa una medición de la concentración promediada durante, por ejemplo, un intervalo de *10 minutos*, la concentración será considerablemente más baja. Este efecto puede calcularse introduciendo el siguiente factor de corrección (ver referencia [6]):

$$\sigma_y = c_{t'} a x^b \quad (8)$$

donde

$$c_{t'} = \left(\frac{t'}{600} \right)^{0.2} \quad (t' \text{ en segundos}) \quad (9)$$

No obstante, σ_y no puede ser más pequeño que el correspondiente a una fuente instantánea.

Por otra parte esta corrección sólo es aplicable al coeficiente de dispersión lateral. El factor c_l tiene un valor mínimo de 0.5.

2.4 Correcciones que tienen en cuenta las dimensiones de la fuente

Se introduce el concepto de fuente virtual. Para ello se selecciona un punto A una distancia x_v *viento arriba* de la fuente extensa ubicada en B, de tal manera que si hubiese una fuente puntual ubicada en A, generaría una pluma que tendría exactamente el ancho $2L_y$ de la fuente real (ver Figura (2)).

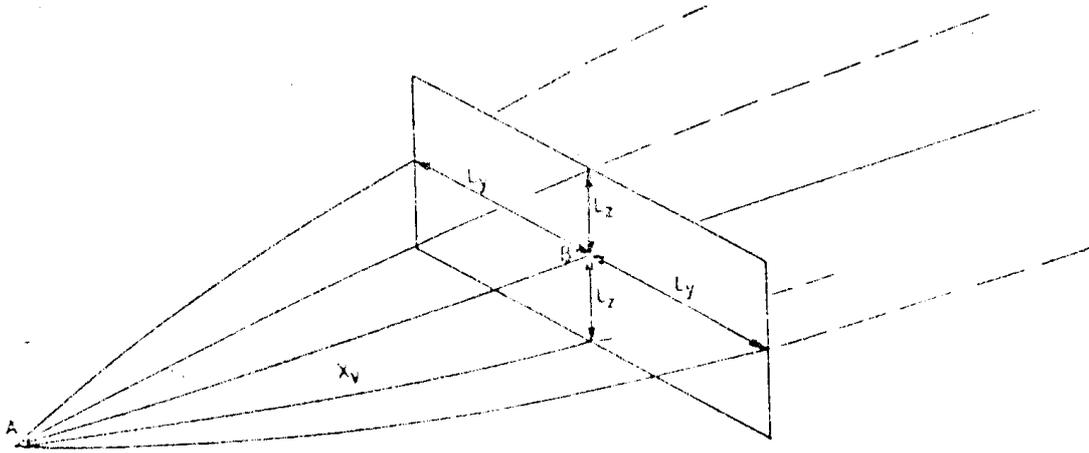


Figura 2: Representación esquemática de una fuente virtual puntual.

¿Cómo se define el ancho de la pluma a una distancia x_v de la fuente puntual? Es la *distancia normal de un punto del espacio (ubicado en el plano X-Y), donde la concentración ha caído a un 10% de su valor máximo* (en el eje de la pluma), *al eje x*. Entonces se puede escribir:

$$C(x, y, z) = C_{m\acute{a}x}(x) f(x, y, z) \quad (10)$$

donde $C_{m\acute{a}x}$ representa la concentración a lo largo del eje de la pluma ($f(x, 0, 0) = 1$).

Se busca determinar la distancia x_{vy} para la cual en $y = L_y$ y $z = 0$ se verifica que:

$$\frac{C(x_{vy}, L_y, 0)}{C_{m\acute{a}x}(x)} = 0.1 \quad (11)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación (11) y la expresión de la concentración para una fuente continua puntual a nivel del suelo, resulta:

$$\frac{C(x_{v_y}, L_y, 0)}{C_{m\acute{a}x}} = f(x_{v_y}, L_y, 0) = \exp\left(-\frac{L_y^2}{2\sigma_y^2}\right) = 0.1 \quad (12)$$

En forma equivalente

$$\ln 0.1 = -2.303 = -\left(\frac{L_y}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)^2 \quad (13)$$

Por consiguiente, despejando σ_y queda

$$\sigma_y(x_{v_y}) = \frac{L_y}{2.15} \quad (14)$$

Esto significa que un punto donde la concentración ha caído a un **10%** de la concentración máxima es considerado como el límite de la fuente. Si la concentración de contaminante sobre la fuente no se distribuye según una Gaussiana, pero es homogénea, puede tomarse como punto de partida la siguiente relación:

$$\sigma_y(x_{v_y}) = \frac{L_y}{1.25} \quad (15)$$

Por otra parte, igualando los segundos miembros de las Ecuaciones (8) y (14), resulta

$$c' a x_{v_y}^b = \frac{L_y}{2.15} \quad (16)$$

de donde se obtiene:

$$x_{v_y} = \left(\frac{L_y}{a c' 2.15}\right)^{1/b} \quad (17a)$$

Análogamente, resulta

$$x_{v_z} = \left(\frac{L_z}{c' 2.15}\right)^{1/d'} \quad (17b)$$

En las Ecuaciones (17a) y (17b) el factor **2.15** posiblemente pueda reemplazarse con el factor **1.25**. La Ecuación (17b) implica que la fuente se halla a una altura $h = L_z$ sobre el suelo. Para distancias donde $\sigma_z \gg L_z$, la aproximación con $h = 0$ en la Ecuación (28) de la Unidad 1

(o Ecuación (29) si se calcula la concentración a nivel del suelo) es suficientemente segura. En algunos casos el procedimiento vía fuente virtual puntual puede utilizarse sólo si x_{vy} y x_{vz} son iguales. Para más información ver referencias [3] y [5].

Finalmente, a los fines de determinar el campo de concentraciones de contaminantes, los valores deben adaptarse a la situación en cuestión, esto es, al hecho que se tiene una fuente extensa, de manera que en la Ecuación (28) de la Unidad 1 se deben insertar las siguientes expresiones:

$$\sigma_y(x) = \sigma_y(x + x_{vy}) c_{t'} = c_{t'} a (x + x_{vy})^b \quad (18)$$

$$\sigma_z(x) = \sigma_z(x + x_{vz}) C_{z_0} = c' (x + x_{vz})^{d'} \quad (19)$$

donde x_{vy} y x_{vz} se determinan de acuerdo con las Ecuaciones (17a) y (17b).

2.5 Determinación de curvas de isoconcentraciones

En razón de determinar la superficie donde la concentración es más alta que un valor límite dado, se procede a determinar la curva de isoconcentraciones.



Figura 3: Contorno de concentración para una fuente puntual, real o virtual.

Dada una fuente puntual continua, puede calcularse la distancia perpendicular al eje de la pluma (ver Figura (3)) para una concentración límite dada, a partir de la siguiente expresión:

$$C_{contorno} = C_{m\acute{a}x}(x) \exp\left(-\frac{y^2(x)}{2\sigma_y^2(x + x_{vy})}\right) \quad (20)$$

En forma equivalente

$$\ln\left(\frac{C_{m\acute{a}x}}{C_{contorno}}\right) = \frac{y^2(x)}{2\sigma_y^2(x + x_{vy})} \quad (21)$$

de donde

(22)

$$y(x) = \sigma_y (x + x_{vy}) \sqrt{2 \ln \frac{C_{m\acute{a}x}}{C_{contorno}}} \text{ para } h = 0 \text{ donde:}$$

$C_{m\acute{a}x}$ = Concentración sobre el eje de la pluma.

$C_{contorno}$ = Concentración límite dada.

x_{vy} = Distancia virtual. Ésta debe utilizarse en el cálculo de $C_{m\acute{a}x}(x) = C(x, 0, 0)$ de acuerdo con la Ecuación (28) de la Unidad 1.

$$C_{m\acute{a}x} = C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \bar{u} \sigma_y (x + x_{vy}) \sigma_z (x + x_{vz})} \quad (23)$$

Si se considerase la altura h de la fuente, entonces

$$y(x) = \sigma_y (x + x_{vy}) \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{m\acute{a}x}}{C_{contorno}} \right) - \frac{h^2}{\sigma_z^2 (x + x_{vz})}} \quad (24)$$

Si $\sigma_z \gg h$ entonces se recupera la Ecuación (22).

A través de la integración de la Ecuación (24) puede calcularse la superficie de la mitad del contorno. Esta integración suministra la siguiente expresión (para las dos mitades):

$$S = \frac{a c_{t'} \sqrt{2\pi}}{b + d'} \left(\frac{Q}{\pi \bar{u} C_{contorno} a C_{t'}} \right)^{\frac{b+1}{b+d'}} \left(\frac{b + d'}{b + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ para } h = 0 \quad (25)$$

Para poder utilizar la Ecuación (25) para una fuente con dimensiones no despreciables se debe asumir que $x_{vy} = x_{vz}$. En este caso, la superficie puede calcularse con suficiente exactitud evaluando la superficie del triángulo entre el punto virtual y la fuente extensa, siempre que ésta no represente una parte significativa del valor suministrado por la expresión (25). Se obtiene entonces el siguiente valor corregido:

$$S' = S - x_{vy} L_y \quad (26)$$

2.6 Cantidad de gas en el rango de explosión para emisiones continuas

Dos variables son de particular importancia desde el punto de vista del riesgo de explosión de una nube de gas:

- 1) La cantidad de gas en el rango de explosión en un instante determinado.
- 2) La distancia máxima para la cual todavía es posible que se produzca una ignición retar-

dada. Ésta puede estimarse calculando la distancia máxima más allá de la cual una concentración puede considerarse segura.

En la Sección (5) se discute el efecto de las fluctuaciones de la concentración sobre la evaluación del riesgo de explosión de una nube de gas. La conclusión es que no se puede hablar de concentración segura ya que la probabilidad de ignición y la energía liberada en la explosión decrece a medida que la concentración se vuelve más baja. A falta de datos suficientes, el usuario deberá proceder a calcular las variables antes mencionadas. Por consiguiente, la cantidad de gas en el rango de explosión se calcula sobre la base de concentraciones promedio. La concentración segura a ser elegida debe examinarse según el caso, dependiendo del tipo de fuente emisora, de la probabilidad de una emisión, de la cantidad de sustancia que se espera pueda fugar, de la reactividad del gas en cuestión y del medio ambiente dentro del cual la fuente potencial esté localizada.

La energía liberada durante la explosión puede calcularse a partir de la cantidad de gas, m_{ex} , en el rango de explosión. Este dato sirve como dato de entrada para el cálculo de la onda de choque; m_{ex} puede calcularse por integración de la Ecuación (28) de la Unidad 1, siempre que $h = 0$ o $h \gg \sigma_z$ (pluma libre de la influencia del suelo; ver referencia [7]). Para una fuente puntual continua se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{m_{ex}}{Q} = \frac{(b + d')(x_2 - x_1)}{(b + d' + 1)\bar{u}} \quad (27)$$

donde:

x_1 = Máxima distancia al límite inferior de explosión LEL (Lower Explosion level).

x_2 = Máxima distancia al límite superior de explosión UEL (Upper Explosion Level).

Q = Flujo másico de gas.

Si para $x = 0$ la concentración es aún más baja que el UEL, entonces se debe adoptar $x_1 = 0$.

Para $h = 0$, x_1 y x_2 deben calcularse escribiendo de una manera diferente la Ecuación (28) de la Unidad 1 (sólo para la concentración en el eje de la pluma), así:

$$x_2 = \left(\frac{Q}{\pi \bar{u} a c' C_{LEL} c'} \right)^{\frac{1}{b+d'}} \quad (28)$$

donde C_{LEL} es la concentración correspondiente al LEL.

En forma análoga puede calcularse x_1 . Si la pluma está completamente libre del efecto del suelo, en el denominador de la Ecuación (28) debe agregarse un factor 2.

Para una fuente extensa, esto es, con dimensiones que no se pueden despreciar, la contribución de la fuente virtual debe ser sustraída nuevamente. Esto puede hacerse si se supone que $x_{vy} = x_{vz}$. Deben distinguirse dos casos:

a) La concentración máxima en la fuente es superior al UEL. Esta situación conduce a:

$$\frac{m_{ex}}{Q} = \frac{1}{u} \left[\frac{(b+d')(x_2 - x_1)}{b+d'+1} - \frac{x_v^{b+d'+1}}{b+d'+1} \left(\frac{1}{x_1^{b+d'}} - \frac{1}{x_2^{b+d'}} \right) \right] \quad (29)$$

b) La concentración máxima en la fuente es inferior al UEL. Esta situación conduce a:

$$\frac{m_{ex}}{Q} = \frac{1}{u} \left[\frac{(b+d')x_2}{b+d'+1} - x_v + \frac{x_v^{b+d'+1}}{(b+d'+1)x_2^{b+d'}} \right] \quad (30)$$

Dado que cálculo de m_{ex} es instantáneo, para el cálculo de x_v , x_1 y x_2 deben tomarse los valores de σ_y correspondientes a una emisión instantánea.

Nota: En las Ecuaciones (29) y (30), x_1 y x_2 se calculan a partir de la fuente puntual virtual.

2.7 Coeficientes de dispersión para emisiones instantáneas

Los coeficientes de dispersión para emisiones instantáneas se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma_{x_I} = e_I x^{f_I} \quad (31a)$$

$$\sigma_{y_I} = a_I x^{b_I} \quad (31b)$$

$$\sigma_{z_I} = c_I x^{d_I} \quad (31c)$$

Los datos en la literatura para estos parámetros son escasos en comparación con los correspondientes a las fuentes continuas de emisión. Los valores de σ_{x_I} se determinan en parte en forma teórica, en parte en forma experimental (ver referencias [8], [9], [10],[11], [12] y [13]). Dado lo limitado de los datos de los coeficientes de dispersión para las fuentes de emisión instantánea, los valores que pueden adoptar se resumen de la siguiente manera:

1) $\sigma_{x_I} = 0.13 x$ ($e_I = 0.13$ y $f_I = 1$) para todas las clases de estabilidad.

2) $a_I = a/2$ y $b_I = b$

3) $c_I = c$ y $d_I = d$

Los valores de σ_{y_I} se basan en primera instancia en la referencia [14], con una pequeña corrección para evitar discrepancias con el desarrollo de las Secciones (2.1) y (2.4).

El factor de corrección c_r , ya no se aplica más; en cambio se continúa aplicando el factor de corrección por rugosidad.

2.7 Tiempo de pasaje de una nube producida por una emisión instantánea

Dado que el tiempo de pasaje de una nube generada por una emisión instantánea depende de muchos factores, éste sólo puede estimarse con una exactitud limitada a partir de la velocidad del viento, de σ_{x_l} y de la medición inicial en la dirección x . Si se consideran como límites de la nube los correspondientes a una dada concentración C_g y se hace uso del concepto de fuente puntual virtual para la corrección de la medición inicial, se encuentra que:

$$t = \frac{2\sigma_{x_l}(x + x_{v_x})}{\bar{u}} \sqrt{2 \ln \left(\frac{C_{máx}}{C_g} \right)} \quad (32)$$

Ejemplo: Si se consideran como límites de la fuente los puntos del espacio donde la concentración ha caído a un 10% del valor máximo, esto es, $C_g = 0.1 C_{máx}$, entonces la Ecuación (32) se reduce a la siguiente expresión:

$$t = \frac{4.3 \sigma_{x_l}(x + x_{v_x})}{\bar{u}} \quad (33)$$

Se supone que el tiempo de emisión de la fuente es sólo una fracción del tiempo de pasaje de la nube, de manera que aquí no se calcula separadamente (ver referencia [15]).

2.8 Cantidad de gas en el rango de explosión para emisiones instantáneas

Con una fuente instantánea la cantidad de gas en el rango de explosión se calcula como sigue: Cerca de la fuente, si no se produce un mezclado apreciable, la concentración en una gran parte de la nube será mayor que el UEL; m_{ex} será pequeña. A medida que la dispersión progresa, m_{ex} se incrementará hasta un máximo que se alcanza cuando la concentración máxima se encuentre un poco por encima del UEL. Después de esto m_{ex} caerá nuevamente de manera gradual. Para una nube esférica se puede deducir que:

$$\frac{m_{ex}}{m} = erf \left[\sqrt{\ln \left(\frac{C}{C_2} \right)} \right] - erf \left[\sqrt{\ln \left(\frac{C}{C_1} \right)} \right] - \frac{2P_2}{P\sqrt{\pi}} \sqrt{\ln \left(\frac{C}{C_2} \right)} + \frac{2P_1}{P\sqrt{\pi}} \sqrt{\ln \left(\frac{C}{C_1} \right)} \quad (34)$$

donde:

m_{ex} = Cantidad de gas en el rango de explosión (no se considera el aire).

m = Cantidad total de gas que ha fugado.

C = Concentración máxima en el centro de la nube al instante en que se calcula m_{ex} .

C_1 = Límite superior de explosión (UEL).

C_2 = Límite inferior de explosión (LEL).

$$erf(x) = \text{Función error} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt .$$

$\ln(x)$ = Logaritmo natural de x .

Si $C < C_1$ la Ecuación (34) se reduce a:

$$\frac{m_{ex}}{m} = erf \left[\sqrt{\ln \left(\frac{C}{C_2} \right)} \right] - \frac{2P_2}{P\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{\ln \left(\frac{C}{C_1} \right)} \right] \quad (35)$$

La Ecuación (35) es aplicable a una nube para la cual las dimensiones en las direcciones x , y y z tienen las mismas proporciones que σ_x , σ_y y σ_z ; en otros términos, si se puede hacer con una distancia virtual.

La altura h de la fuente debe ser igual a θ o suficientemente grande para que la nube pueda considerarse libre de la influencia del suelo ($h \gg \sigma_z$). Se puede demostrar que el valor máximo de m_{ex}/m de acuerdo con la Ecuación (35) sólo depende de la razón $P_1:P_2$. Si se definen las siguientes variables:

$$v \equiv \frac{P_1}{P_2} \quad v_1 \equiv \frac{\ln(v)}{v^2 - 1} \quad v_2 \equiv \frac{v^2 \ln(v)}{v^2 - 1}$$

se puede deducir que:

$$\left(\frac{m_{ex}}{m} \right)_{máx} = erf \left[\sqrt{v_2} \right] - erf \left[\sqrt{v_1} \right] - \frac{2\sqrt{v_2}}{\sqrt{\pi}} \exp(-v_2) + \frac{2\sqrt{v_1}}{\sqrt{\pi}} \exp(-v_1) \quad (36)$$

Véase la Sección (5) para una discusión general acerca de la estimación de una distancia segura a una fuente de gas combustible.

3. Pérdidas por Adsorción sobre la Superficie

Si bien los gases pueden ser removidos de la atmósfera por diversos mecanismos, por ejemplo, mediante reacciones químicas con otros gases, lavado por lluvia o adsorción en el suelo, debe ponerse particular atención a este último mecanismo. Este mecanismo puede ser operativo siempre que el gas en cuestión interactúe de alguna forma con la superficie terrestre. Dado que las sustancias

tóxicas no son por lo general químicamente inertes, algún tipo de adsorción podría esperarse. Aquí se habla de sustancias tóxicas debido a que el efecto para estas sustancias será de mayor importancia práctica que el efecto debido a sustancias combustibles.

Frecuentemente al proceso de adsorción sobre el suelo se lo caracteriza con el término *deposición*. En el pasado, se encontró que los efectos de una calamidad producida por sustancias tóxicas eran más pequeños que lo que uno podría esperar sobre la base del sistema de **Pasquill**. La pérdida por deposición depende de las condiciones de la emisión, de la naturaleza del gas dispersado así como de la superficie terrestre. La pérdida por deposición puede describirse suponiendo que el flujo material a través de la superficie de contacto es proporcional a la concentración prevaleciente sobre él, esto es,

$$\phi = u_d C \quad (37)$$

donde:

ϕ = Flujo de pérdida ($\text{kg m}^{-2} \text{seg}^{-1}$).

C = Concentración (kg m^{-3}).

u_d = Constante de proporcionalidad o velocidad de deposición (m seg^{-1}).

Para el dióxido de azufre, para el que una superficie cubierta con vegetación se comporta como un sumidero ideal, la velocidad de deposición es del orden de 0.01 m seg^{-1} . La pérdida por deposición puede calcularse de dos maneras en el modelo de la pluma Gaussiana:

1. Con la ayuda del modelo de *depleción de la fuente* (ver, referencia [14]). En este modelo la magnitud de la fuente emisora en el modelo de la pluma Gaussiana se corrige por pérdida con la ayuda de la Ecuación (37).
2. Con la ayuda del modelo de *depleción superficial* (ver, referencia [16]). En este caso la pérdida por deposición se simula suponiendo en cada punto una fuente negativa que disemina su merma de material de una manera similar al sistema de Pasquill.

Ambos modelos pronostican a gran distancia una pérdida del mismo orden de magnitud. El resultado se indica en la Figura (4) (ver ref. [14]) para una emisión producida desde la superficie de la tierra, para una velocidad del viento de 1 m/seg y una tasa de deposición de 0.01 m/seg . Esta figura suministra el factor de reducción de la intensidad de la fuente emisora en función de la distancia recorrida por la nube dispersada. Los resultados para otras velocidades de viento y tasas de deposición pueden calcularse con la ayuda de:

$$R_1 = (R_1)_0^{\frac{u_d}{0.01u}} \quad (38)$$

donde:

R_I = Factor de reducción de intensidad de la fuente para una velocidad de viento de \bar{u} m seg^{-1} y una tasa de deposición de u_d m seg^{-1} .

$(R_I)_0$ = Factor de reducción de intensidad de la fuente para una velocidad de viento de I m seg^{-1} y a una tasa de deposición de 0.01 m seg^{-1} , como se indica en la Figura(4).

\bar{u} = Velocidad del viento (m seg^{-1}).

u_d = Velocidad o tasa de deposición (m seg^{-1}).

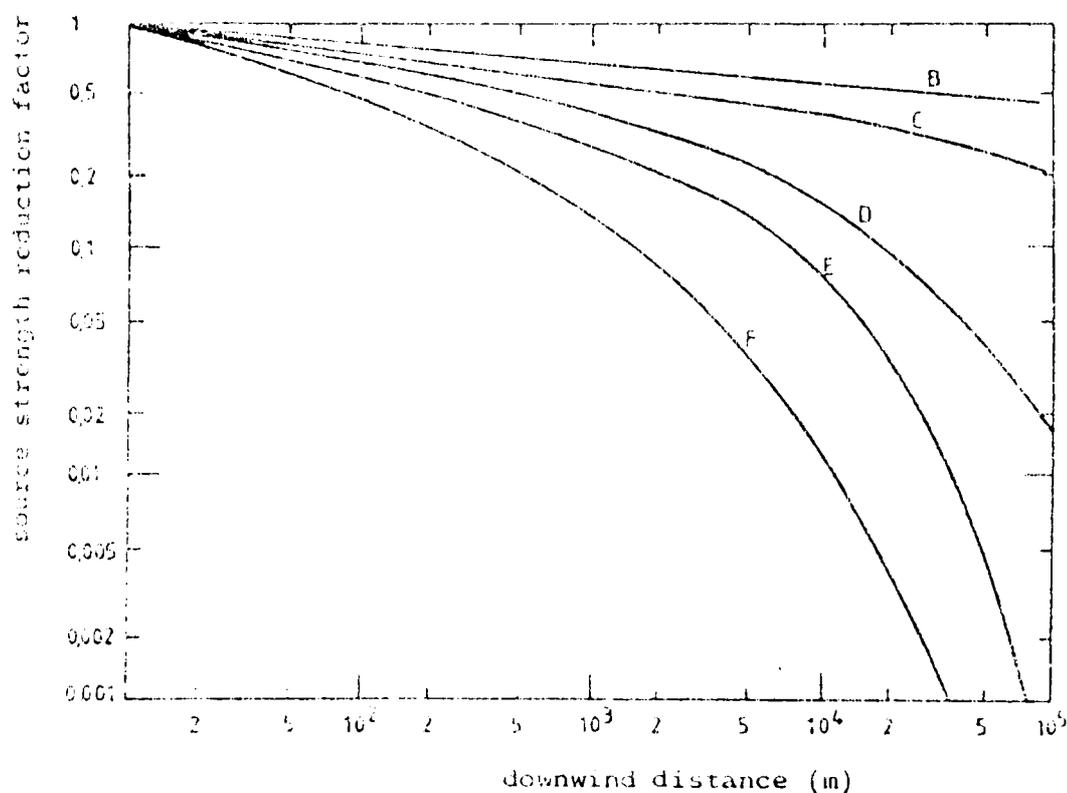


Figura 4: Factor de reducción de la magnitud de la fuente emisora en función de la distancia viento abajo para una velocidad del viento de 1 m/seg. y una velocidad de deposición de 0.01 m/seg (para una fuente a nivel del suelo).

La tasa de deposición depende de la naturaleza del gas dispersado y de la superficie terrestre. En el caso de un gas pobremente absorbido, las propiedades de la superficie terrestre determinarán la medida o grado de la deposición. En el caso de un gas completamente absorbido, para el que la superficie terrestre se comporta como un sumidero ideal, la difusión turbulenta será el factor determinante para la velocidad de deposición. En el primer caso, la tasa de deposición será virtualmente independiente de la estabilidad atmosférica, mientras que en el segundo caso, las condiciones

atmosféricas (la estabilidad y la velocidad del viento) serán los factores determinantes de la velocidad de deposición. La tasa de deposición se incrementa con una estabilidad decreciente y es aproximadamente proporcional a la velocidad del viento.

4. Dispersión de Gases Pesados

Para el cálculo de la dispersión de gases pesados no se conocen todavía métodos de cálculo bien fundados. Desde un punto de vista cualitativo, las principales diferencias del proceso de difusión en la atmósfera de un gas más pesado que el aire con respecto a uno más liviano o neutro son las siguientes:

- 1) Cerca de la fuente emisora el gas se esparcirá hacia abajo debido al efecto de la gravedad terrestre en una forma comparable a como lo haría un líquido. Aparte del hecho que la nube adoptaría una forma muy plana o chata, el gas podría fluir a través de zanjas o pendientes del terreno o contra la dirección del viento (si éste no es muy intenso). Existe por consiguiente un gran efecto inicial de las dimensiones de la fuente.
- 2) Debido a su diferencia con la densidad del aire circundante, el proceso de mezclado se hace difícil y el gas pesado, por lo general, será absorbido con un cierto retardo por la corriente de aire ubicada sobre él.
- 3) Cuando el gas pesado ha sido absorbido por la corriente de aire provocará un gradiente de densidad (efecto comparable con una gran inversión térmica), como resultado del cual la intensidad de la turbulencia en la dirección vertical será reducida en gran medida. Esto significa que un efecto resultará perceptible a una gran distancia de la fuente emisora.

En la literatura específica se han tratado en detalle los fenómenos antes descriptos. El efecto mencionado en el Punto (1) ha sido tratado por diversos autores (ver referencias [13], [17], [18], [19] y [20]). El efecto discutido en el Punto (2) ha sido tratado en los trabajos referenciados en [19], [21], [22] y [23]. De aquí surge que el mejor enfoque parece ser tratar la absorción de un gas pesado hacia la corriente de aire de la misma forma que un proceso de evaporación, en otros términos, caracterizarlo por una velocidad de absorción (m/seg), que puede ser transformada en una fuerza emisora por metro cuadrado por segundo. La cuestión de cómo podría calcularse esa velocidad de absorción a partir de los datos relativos a la fuente emisora sólo ha sido parcialmente solucionada. La magnitud de esa tasa de absorción se conoce a partir de los experimentos. El aspecto relativo al Punto (3) parece ser el más difícil de resolver hasta el momento debido a la carencia de datos experimentales (ver referencias [13], [19], [22] y [24]). La máxima distancia a la cual el fe-

nómeno será todavía perceptible es una incógnita.

5. Fluctuaciones en la Concentración

En la práctica, las fluctuaciones que se observan en la concentración del contaminante se deben a los movimientos turbulentos de la atmósfera. Este fenómeno está estrechamente vinculado con el *flameo* (*meandering*) de la pluma, mencionado en la Sección (2.3) (ver referencia [25] para una discusión general sobre el tema). Debido a la gran importancia que tienen las fluctuaciones para la evaluación de fuego o de explosión serán discutidas a continuación.

Cuando ocurren fluctuaciones en la concentración, puede suceder que la concentración promedio durante un período de tiempo caiga fuera del rango de explosión, pero podrían existir concentraciones locales (o puntuales) que estén dentro del rango de explosión. Por lo tanto, si la concentración promedio durante un período determinado de tiempo ha caído al nivel del LEL, la probabilidad de explosión no es todavía cero, dado que todavía podrían ocurrir concentraciones por encima del LEL.

Por otra parte, las fluctuaciones en la concentración pueden ser la causa de la existencia de zonas con una mezcla no combustible de gas que yacen en la parte de la nube donde las concentraciones promedio sobre un lapso determinado de tiempo están dentro de los límites de explosión. Después de la ignición, el proceso de combustión puede detenerse momentáneamente a pesar a que la cantidad gas en el rango de inflamabilidad no se ha quemado totalmente. En los trabajos de **Fay y Lewis [18]** y de **Harris et al. [26]** se presentan discusiones acerca de las fluctuaciones en la concentración basadas en el análisis de datos experimentales (ver referencias [19] y [27]). **Fay y Lewis [18]** tomaron como punto de partida para el estudio, la medición de la evolución de la concentración en función del tiempo en varios puntos *viento abajo* del lugar en el que se hizo fugar durante un breve intervalo de tiempo diversas cantidades de gas natural licuado sobre una superficie acuática (ref. [19]). En el trabajo de **Harris et al [26]**, la discusión se basó en los datos experimentales de la referencia [19] y en las mediciones de concentración en una serie de experimentos en los que al LNG se le permitía difundir sobre la superficie terrestre (ref. [27]).

Fay y Lewis [18] concluyeron que la probabilidad de distribución de la concentración es *lognormal* siempre que se desprecien los intervalos de tiempo durante los cuales la concentración es cero. Sobre la base de esto, calcularon la probabilidad de medir gas localmente combustible como una función de la concentración promedio en el tiempo sobre el punto (ver Figura (5)).

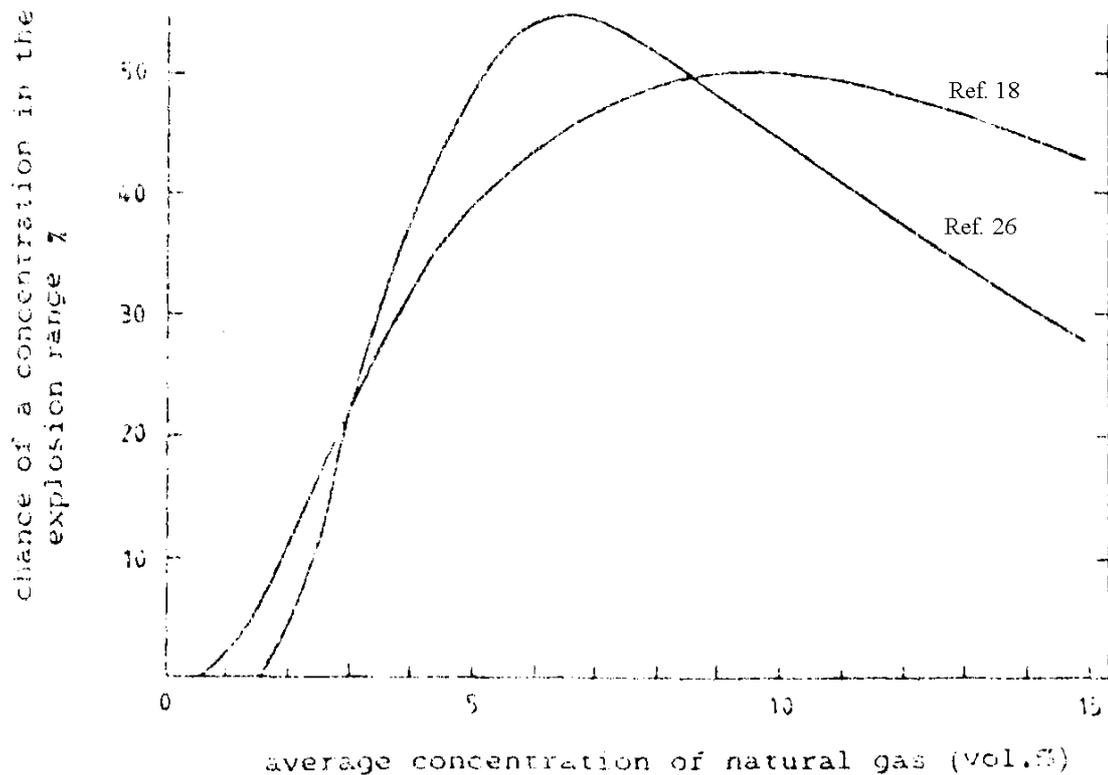


Figura 5: Probabilidad que una concentración se encuentre en el rango de explosión en función de la concentración promedio en el tiempo (para gas natural).

En el trabajo de **Harris et al. [26]** se consideró que la distribución de probabilidad de las concentraciones es normal y calcularon la desviación estándar de esta distribución a partir de mediciones de la concentración y observaciones visuales de experimentos realizados (ver, por ejemplo, [19] y [27]). Estos investigadores estimaron la probabilidad de que se produzca una nube localmente combustible en función de la concentración promedio en el tiempo. Los análisis discutidos se basan en un número limitado de datos relativos a experimentos donde la intensidad de la fuente emisora es fuertemente dependiente del tiempo, lo cual hace muy difícil la determinación de una concentración promedio en el tiempo. De todas maneras, estos pocos datos permiten concluir en qué medida las distribuciones de probabilidad son una función del tamaño de la nube de gas y de parámetros que afectan la turbulencia atmosférica, tales como la rugosidad superficial y la estabilidad atmosférica.

Debe señalarse que los resultados presentados en la Figura (5) corresponden al gas natural y no pueden ser utilizados para otros gases. Aparte de la probabilidad que una dada concentración sea superada, que ya se ha discutido, otras dos probabilidades juegan un rol importante. En primer lugar, existe una probabilidad de estar en la pluma o nube. Esta probabilidad se describe en la literatu-

ra como *intermitencia*. En segundo lugar, existe una probabilidad que después de la ignición la llama se apague. A partir de lo discutido previamente, es claro que no se puede determinar un valor científicamente fundado para establecer un nivel de concentración segura.

Referencias

1. F. Pasquill. *The Estimation of the Dispersion of Windborne Material*, Meteorol. Mag., **90**, pp. 33-49 (1961).
2. F. A. Gifford, Jr. *Use of Routine Meteorological Observation for Estimating Atmospheric Dispersion*, Nuclear Safety, **2**, pp. 47-51 (1961).
3. B. Turner. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, Public Health Service Publication Nro. 999-AP-26 (N.T.I.S. PB-191482), Revised 1970.
4. G. Berri. *Aspectos de la Difusión Atmosférica en la República Argentina*, Proceedings of the 5th. International Clean Air Congress IUAPPA (1982).
5. F. Pasquill. *Atmospheric Diffusion*, Ellis Horwood Ltd., Chichester (1974).
6. Commissie TNO voor het onderzoek ten dienste van het Milieubeheer, Modellen voor de berekening van de Verspreiding van Luchtverontreiniging, Staatsuigeverij (1976).
7. D. Burgess et al. *Volume of Flammable Mixture Resulting from the Atmospheric Dispersion of a Leak or Spill*, 15th Int. Symp. on Combustion, Tokyo (1974).
8. G. A. Beals. *Guide to Local diffusion of Air Pollutants*, Tech. Report 214 Air Weather Service USAF, NTIS AD 726984, May 1971.
9. P. J. Drivas and F. H. Shair. *Dispersion of an Instantaneous Crosswind Line Source of Tracer Released from an Urban Highway*, Atm. Env., **8**, 475-485 (1974).
10. P. G. Saffman. *The Effect of Windshear on Horizontal Spread from an Instantaneous Ground Source*, Quart. J. R. Met. Soc., **88**, pp. 382 (1962).
11. J. B. Tyldesley and C. E. Wallington. *The Effect of Wind Shear and Vertical Diffusion on Horizontal Dispersion*, Quart. J. R. Met. Soc., pp. 158-174 (1965).
12. P. C. Chatwin. *The Dispersion of a Puff of Passive Contaminant in the Constant Stress Region*, Quart. J. R. Met. Soc., **94**, pp. 350-360 (1968).
13. A. P. Van Ulden. *On the Spreading of a Heavy gas Released Near the Ground*, First Int. Loss Prevention Symp., Delft, 28-30, May 1974.
14. D. H. Slade, Meteorology and Atomic Energy (1968).
15. N. E. Bowne. *Diffusion Rates*, J. Air Poll. Contr. Ass., **24**, pp. 832-835 (1974).
16. T. W. Horst. *A Surface Depletion Model for Deposition from a Gaussian Plume*, Atm. En., **11**, 41-46 (1977).
17. A. E. Germeles and E. M. Drake. *Gravity Spreading and Atmospheric Dispersion of LNG Vapor Clouds*, Proceedings of the 4th. Int. Symp. on Transport of Hazardous cargoes by Sea and Inland Waters, Jacksonville, pp. 519-539, USA, 26-30 October 1975.
18. J. A. Fay and D. H. Lewis Jr. *The Inflammability and Dispersion of LNG Vapors*, Proceedings of the 4th. Int. Symp. on Transport of Hazardous cargoes by Sea and Inland Waters, Jacksonville, pp. 489-498, USA, 26-30 October 1975.
19. Esso Research and Engineering Co. *Spills of LNG on Water: Vaporization and Downwind Drift of Combustible Mixtures*, Report Nro. EE61-72, sponsored by API, May 1972.
20. Science Appl. Inc. *LNG-terminal Risk Assesment Study for Point Conception*, Calif., Report SAI-75-616-LJ, Science Appl. Inc., 1200 Prospect Street, la Jolla, California.
21. R. G. Picknett. *Field experiments on the Behaviour of Dense Clouds*, Chemical De-

- fense Establishment, Porton Report Ptn IL/1154/78/1. Available through Health and Safety Executive, Red Hill, Sheffield S3 7HQ, England.
22. P. H. M. Riele. *Atmospheric Dispersion of Heavy Gases Emitted at or Near Ground Level, 2nd. Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Heidelberg, Fed. Rep. of Germany, 6-9 Sept. 1977.
 23. R. A. Cox and R. Roe. *A Model of the Dispersion of Dense Vapor Clouds*, ver ref. [22].
 24. A. Kneebone and L. R. Prew. *Shipboard Jettison Tests of LNG onto the Sea*, Third Conference on LNG, Washington (1972).
 25. G. T. Csanady. *Turbulent Diffusion in the Environment*, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht (1973).
 26. S. Harris, W. G. May and W. McQueen. *The Persistence of Visible Fog from an LNG Spill*, Fall Meeting of the Comb. Inst. (East States Section), Upton N.Y. (1975).
 27. A.G.A. Project IS-3-1; LNG Safety Program, Report on Phase II, July 1974.