

## UTILIZACION DE MODELOS DE DISPERSION ATMOSFERICA PARA LA ESTIMACION DE DOSIS DE EXPOSICION

Carolina L. Carrari<sup>\*</sup>, Lucrecia V. Aparicio<sup>\*</sup>, José A. Bandoni<sup>†</sup>, Stella M. Tonelli<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Planta Piloto de Ingeniería Química  
Camino "La Carrindanga" Km 7, 8000 Bahía Blanca, Argentina.  
Fundación del Sur para el Desarrollo Tecnológico  
12 de Octubre 1842, 8000 Bahía Blanca, Argentina.  
e-mail: [ccarrari@fundasur-uvt.org.ar](mailto:ccarrari@fundasur-uvt.org.ar) - [apariciol@fundasur-uvt.org.ar](mailto:apariciol@fundasur-uvt.org.ar) - [stonelli@plapiqui.edu.ar](mailto:stonelli@plapiqui.edu.ar)

<sup>†</sup>Planta Piloto de Ingeniería Química  
Camino. "La Carrindanga" Km 7, 8000 Bahía Blanca, Argentina.  
e-mail: [abandoni@plapiqui.edu.ar](mailto:abandoni@plapiqui.edu.ar)

**Palabras claves:** dispersión, dosis, isofleclas, gases tóxicos, accidentes industriales.

**Abstract.** Este trabajo explora la aplicación de herramientas informáticas de modelado de dispersión atmosférica en la elaboración y aplicación de Planes de Respuesta a Emergencias. Las legislaciones más recientes a nivel internacional destinadas a controlar riesgos tecnológicos han incorporado el criterio de dosis en la definición de las zonas de vulnerabilidad. Esto implica conocer la concentración y el tiempo al cual está expuesta una persona durante la emergencia. En este contexto, este trabajo desarrolla una implementación del cálculo de dosis en el modelo SLAB mediante la integración de un perfil lineal de concentración. Asimismo, se propone un algoritmo de cálculo que permite evaluar la dosis utilizando los resultados del programa ALOHA. Finalmente, se presentan dos ejemplos donde se aplican estas estrategias a la determinación de zonas de vulnerabilidad para diferentes casos reales. De los resultados obtenidos se concluye que a pesar de poseer una precisión limitada el algoritmo que utiliza ALOHA es una herramienta útil si no se disponen de modelos mas sofisticados. La alternativa de implementar el cálculo de la dosis en un modelo como SLAB se orienta a aportar una forma mas precisa de estimar este parámetro. La incorporación de otros perfiles de distribución de la concentración y el análisis de alternativas de nuevas resoluciones numéricas del modelo completo permitirán obtener estimaciones cada vez mejores.

## 1 INTRODUCCION

Las instalaciones industriales que procesan, manipulan o transportan sustancias peligrosas están expuestas a sufrir incidentes de diversa gravedad y, a pesar de las técnicas empleadas y las medidas adoptadas en la prevención de estos accidentes, no es posible reducir a cero el riesgo de que los mismos sucedan. Siempre existirá alguna probabilidad finita de que ocurra un fallo con consecuencias potencialmente graves para las personas. Para que las consecuencias de escapes de sustancias peligrosas sean mínimas es necesario desarrollar Planes de Respuesta a la Emergencia que permitan la protección de los posibles afectados. En el caso particular de las sustancias tóxicas (ya sean emisiones gaseosas o de vapores producidos por derrame de líquidos volátiles) es importante establecer el contorno de la nube formada, a fin de delimitar las zonas donde la concentración de esta sustancia pone en riesgo la integridad de las personas. Sin embargo, dado que estrictamente considerado el efecto de un tóxico es el resultado de la dosis del mismo, las legislaciones más recientes a nivel internacional destinadas a controlar riesgos tecnológicos, como por ejemplo la Directriz Básica Española<sup>1</sup>, han incorporado el criterio de dosis en la definición de las zonas de vulnerabilidad. Esto implica no sólo conocer la concentración a la que está expuesta una persona durante la emergencia sino también durante cuánto tiempo.

El modelado de los fenómenos de dispersión implica la resolución de los balances de masa, momento y energía, generando sistemas de ecuaciones a derivadas parciales cuya complejidad está asociada a la duración y tipo de la emisión (continua o discontinua; gaseosa o en dos fases), tipo de sustancia (densidad mayor o menor que el aire), condiciones atmosféricas, etc.. Estos modelos permiten la predicción, en un punto cualquiera de coordenadas  $(x,y)$  a cierta distancia de la fuente, de las concentraciones  $C$  de la sustancia emitida. Sin embargo, cuando se desea conocer la dosis es necesario que el modelo estime una nueva variable diferencial  $D(x,y)$  función de  $C$  y el tiempo de exposición a la misma  $t_{exp}$ . En general los modelos de simulación de dispersiones tóxicas implementados en los programas más difundidos no incluyen el cálculo de dosis o lo hacen utilizando metodologías simplificadas.

A continuación en este trabajo se presentan dos alternativas para la determinación de zonas de vulnerabilidad utilizando valores de dosis en lugar de la concentración. En primer término se desarrolla una implementación del cálculo de dosis  $D$  en el modelo Slab<sup>2</sup> y en segundo término, se propone un algoritmo de cálculo que permite evaluar la dosis utilizando los resultados del programa Aloha<sup>3</sup>, extensamente utilizado para la estimación de la concentración de tóxicos en la Respuesta a Emergencia.

## 2 MODELADO DE DISPERSION ATMOSFERICA

### 2.1 Características de la Dispersión de Gases

#### *Gases neutros y pesados:*

Las características de la sustancia liberada a la atmósfera (densidad, temperatura, presencia de gotas, etc.) determinan el comportamiento de la nube formada. Los gases que tienen características de sustentación similares a las del aire son denominados "neutros" y para predecir su dispersión se

utiliza un *modelo gaussiano*. En este modelo, el viento y la turbulencia atmosférica son las fuerzas que mueven las moléculas del gas a través del aire. Así, la nube es arrastrada en la dirección del viento formando una *pluma* como la esquematizada en la Fig. 1a. A causa del mezclado turbulento se difunde en la dirección transversal generando una curva con forma de campana para la concentración.

Cuando se derrama un gas "*denso*", es decir un gas cuya densidad es mayor que la del aire o se encuentra a muy baja temperatura, el comportamiento inicial difiere sustancialmente del de un gas neutro. En un primer momento el gas se desploma debido a que es más pesado que el aire que lo rodea. La nube se desplaza en la dirección del viento extendiéndose debido a la gravedad. Más adelante en la dirección del viento la nube se diluye, su densidad se aproxima a la del aire y se comporta como gas neutro (Fig. 1.b)

### ***Pérdidas Continuas y Discontinuas***

Si el orificio por donde se produce la pérdida es relativamente pequeño o la masa contenida en el recipiente es muy grande, el tiempo de duración del derrame será grande. En estas condiciones los gases se dispersarán en la atmósfera formando una *pluma* que alcanzará su máxima extensión y se mantendrá durante todo el tiempo que dure el derrame. Este escenario se conoce como *pérdida continua* (Fig. 1 c). Cuando la rotura es muy grande o catastrófica o la masa contenida en el recipiente es pequeña, la liberación de prácticamente toda la masa se realiza en forma muy rápida, formándose una nube denominada "*puff*" que no se haya unida a la fuente del derrame y se aleja en la dirección del viento modificando su tamaño y posición a medida que el tiempo transcurre como se grafica en la Fig. 1 d. Este escenario es considerado como una *pérdida instantánea*.

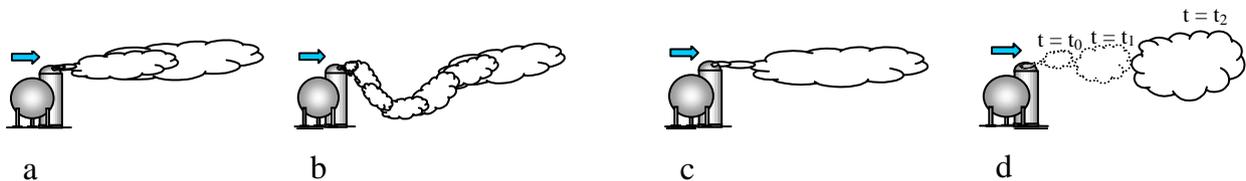


Figura 1: Dispersión de gases, **a** Gas neutro **b** Gas denso **c** Pérdida Continua **d** Pérdida Instantánea

A continuación se describen brevemente dos modelos utilizados en el desarrollo de este trabajo, haciendo mayor hincapié en el modelo SLAB dentro del cual se implementó el cálculo de las dosis de exposición.

## **2.2 Modelo SLAB**

El modelo planteado pertenece a la familia de *modelos de caja* y fue originalmente formulado por Zeman <sup>4</sup>. Sus sucesivas modificaciones se informan en numerosas publicaciones entre las que encuentra las de Ermak y Chan <sup>5 y 6</sup>.

### 2.2.1 Emisiones Continuas

Para este caso se asume la formación de una nube como la esquematizada en la Fig. 2.

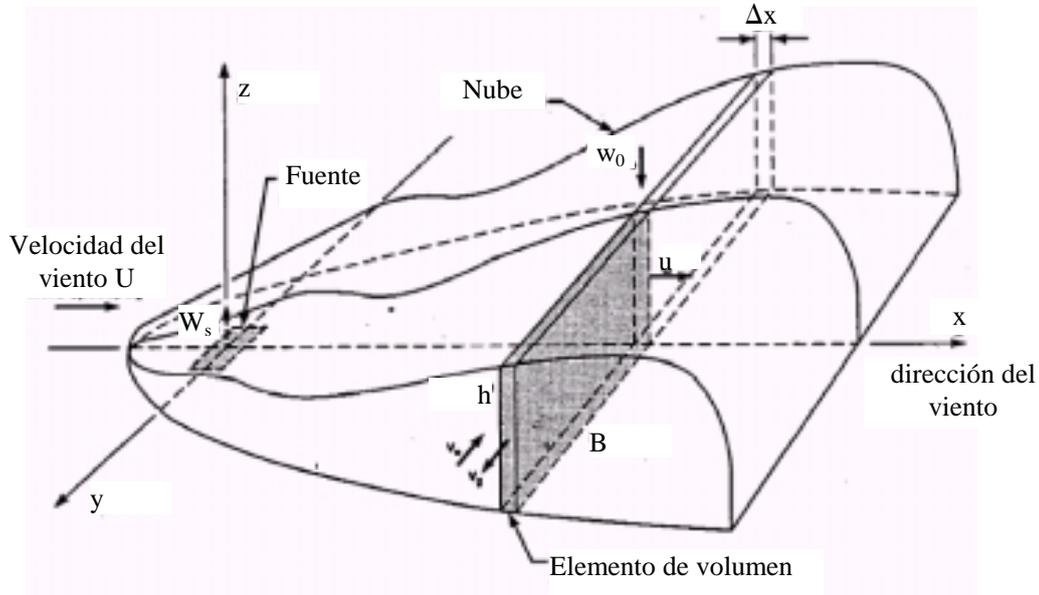


Figura 2: Forma de la nube para una emisión continua

SLAB resuelve 6 ecuaciones diferenciales de conservación promediadas en el plano transversal y emplea el concepto de “entrainment” de aire para contemplar el efecto del mezclado turbulento:

Sustancia emitida: 
$$\frac{d(UBhm)}{dx} = \rho_s W_s B_s \quad (1)$$

Masa total: 
$$\frac{d(\rho UBh)}{dx} = \rho_s W_s B_s + \rho_a (V_e h + W_e B) \quad (2)$$

Energía: 
$$\frac{d(\rho UBh C_p T)}{dx} = \rho_s W_s B_s C_{ps} T_s + \rho_a (V_e h + W_e B) C_{pa} T_a + f_{cp} + f_t \quad (3)$$

Momento-x: 
$$\frac{d(\rho U^2 Bh)}{dx} = -0.5 \alpha_g g \frac{d[(\rho - \rho_a) Bh^2]}{dx} + \rho_a (V_e h + W_e B) U_a + f_u \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Momento-y: } \frac{d(\rho(\rho_g Bh)}{dx} &= g[(\rho - \rho_a)h^2] + f_{vg} && \text{(nube con boyancia negativa)} \\ V_g \approx 0 &&& \text{(nube con boyancia positiva)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Momento-z: } \frac{d(\rho(\rho_c Bh)}{dx} &= -g[(\rho - \rho_a)hB] + f_w && \text{(nube con boyancia negativa)} \\ W_c = \frac{-V_g Z_c}{B} &&& \text{(nube con boyancia positiva)} \end{aligned} \quad (6)$$

donde:

$B$	Ancho medio	$T$	Temperatura
$C_p$	Calor específico	$U$	velocidad de la nube en la dirección del viento
$f_{pc}$	Energía de cambio de fase	$V_e$	velocidad de “entrainment” horizontal
$F_u$	Fricción en dirección horizontal (dirección del viento)	$V_g$	velocidad gravitatoria transversal de la nube en el sentido horizontal
$f_{vg}$	Fricción en dirección transversal	$W_e$	velocidad de “entrainment” vertical
$f_w$	Fricción en dirección vertical	$W_s$	velocidad de inyección vertical del material emitido.
$H$	Altura	$x$	distancia en la dirección del viento
$M$	Fracción másica	$\rho$	Densidad

Los subíndices “a” y “s” se refieren al aire y a la fuente de emisión respectivamente.

Además, se utilizan 3 ecuaciones de estructura que permiten describir la distribución tridimensional de concentraciones.

$$\text{Ecuaciones de ancho medio: } U \frac{dB}{dx} = \frac{\rho_a}{\rho} V_e + V_g \quad (7)$$

$$U \frac{db}{dx} = \frac{V_g b}{B} \quad (8)$$

$$\text{Parámetro de altura: } U \frac{dZ_c}{dx} = W_c \quad (9)$$

La solución de este sistema de ecuaciones permite obtener la concentración promediada en el plano transversal,  $C(x)$  y la distribución de concentraciones tridimensional  $C(x,y,z)$ .

$$C(x, y, z) = 2 * B * h * C(x) * C_1(y, b, \beta) * C_2(z, Z_c, \sigma) \quad (12)$$

donde:

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{y+b}{\sqrt{2\beta}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{y-b}{\sqrt{2\beta}} \right) \right]$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2$$

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{y+b}{\sqrt{2\beta}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{y-b}{\sqrt{2\beta}} \right) \right]$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \left( \frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\sigma} \left[ \exp \left( -\frac{(z-Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) + \exp \left( -\frac{(z+Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) \right]$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} h/12 & Z_c > h/2 \\ (h-Z_c)^2/3 & Z_c \leq h/2 \end{cases}$$

siendo  $B$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $\beta$ ,  $Z_c$ , y  $\sigma$  funciones de  $x$ .

### 2.2.2 Emisiones Instantáneas

En emisiones discontinuas los balances de conservación se plantean en estado no estacionario. La variable independiente es el tiempo de transporte del centro y la nube se asume con una geometría como la indicada en la Fig. 3.

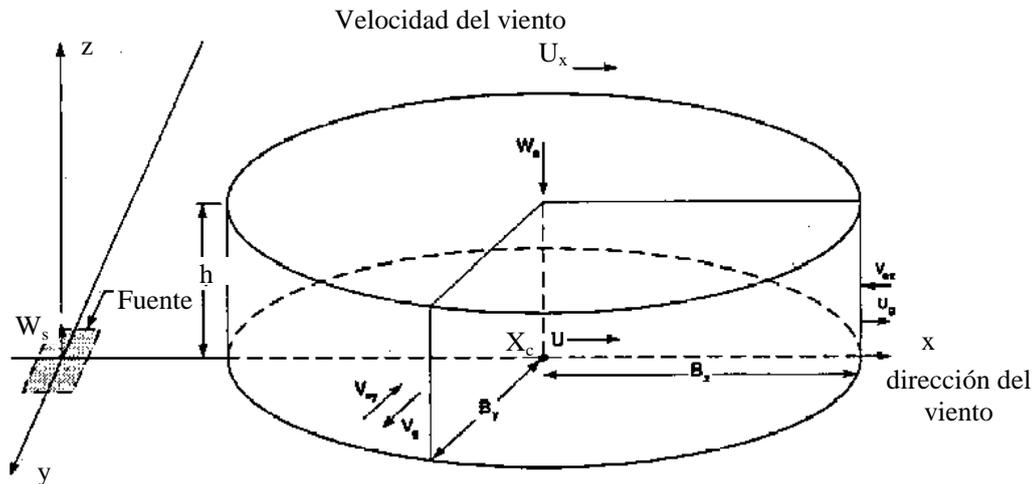


Figura 3: Forma de la nube para una emisión instantánea

Especie:

$$\frac{d\rho B_x h m B_y}{dt} = \rho_s W_s B_s^2 \quad (13)$$

$$\text{Masa: } \frac{dB_y \rho B_x h m}{dt} = \rho_s W_s B_s^2 + \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] \quad (14)$$

$$\text{Energía: } \frac{dB_y}{dt} \rho B_x h C_p T = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_y] C_{pa} T_a + (f_{cp} + f_t) B_x + \rho_s W_s B_s^2 C_{ps} T_s \quad (15)$$

$$\text{Mom.-x (traslación): } \frac{d\rho B_x h U B_y}{dt} = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] U_a + f_u B_x \quad (16)$$

$$\text{Mom.-x (gravedad): } \frac{d\rho B_x h U_g B_y}{dt} = g [(\rho - \rho_a) h^2] B_y + B_x f_{vg} \quad (\text{nube boyancia negativa}) \quad (17)$$

$$U_g \approx 0 \quad (\text{nube boyancia positiva})$$

$$\text{Momento-y: } \frac{d\rho B_x h V B_y}{dt} = g [(\rho - \rho_a) h^2] B_y + B_x f_{vg} \quad (\text{nube boyancia negativa}) \quad (18)$$

$$V_g \approx 0 \quad (\text{nube boyancia positiva})$$

$$\text{Momento-z: } \frac{d\rho B_x h W_c B_y}{dt} = -g [(\rho - \rho_a) h B_x B_y] + B_x f_w \quad (\text{nube boyancia negativa}) \quad (19)$$

$$W_c = \left( -\frac{V_g}{B_y} - \frac{U_g}{B_x} \right) Z_c \quad (\text{nube boyancia positiva})$$

$$\text{Centro de masa: } \frac{dX_c}{dt} = U - \frac{\rho_s W_s B_s^2 X_c}{\rho B_x B_y h} \quad (20)$$

Los factores de forma de la nube se representan a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ancho medio } \frac{dB_y}{dt} = \frac{\rho_a}{\rho} V_{ey} + V_g \quad \text{y} \quad \frac{db_y}{dx} = \frac{V_g b_y}{B_y} \quad (21)$$

$$\text{Largo medio: } \frac{dB_x}{dt} = \frac{\rho_a}{\rho} V_{ex} + V_g \quad \text{y} \quad \frac{db_x}{dx} = \frac{U_g b_x}{B_x} \quad (24)$$

Para hallar la distribución de concentraciones volumétricas tridimensional dependiente del tiempo  $C(x,y,z,t)$ , se combina la concentración volumétrica  $C(t)$  con los parámetros de estructura del puff.

$$C(x, y, z, t) = 4 * B_x * B_y * h * C(t) * C_1(x - X_c, b_x, \beta_x) * C_1(y, b_y, \beta_y) * C_2(z, Z_c, \sigma) \quad (25)$$

donde:

$$C_1(x - Z_c, b_x, \beta_x) = \frac{1}{4b_x} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x - X_c + b_x}{\sqrt{2\beta_x}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x - X_c - b_x}{\sqrt{2\beta_x}} \right) \right]$$

$$B_x^2 = b_x^2 + 3\beta_x^2$$

$$C_1(y, b_y, \beta_y) = \frac{1}{4b_y} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{y + b_y}{\sqrt{2\beta_y}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{y - b_y}{\sqrt{2\beta_y}} \right) \right]$$

$$B_y^2 = b_y^2 + 3\beta_y^2$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \left( \frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\sigma} \left[ \exp \left( -\frac{(z - Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) + \exp \left( -\frac{(z + Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) \right]$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} h/12 & Z_c > h/2 \\ (h - Z_c)^2 / 3 & Z_c \leq h/2 \end{cases}$$

siendo  $b_y, \beta_y, b_x, \beta_x, Z_c$ , y  $\sigma$  son funciones de  $t$ .

### 2.3 Programa ALOHA

El programa ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) fue desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) y la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). ALOHA utiliza el modelo gaussiano para predecir la dispersión de gases neutros considerando una distribución de la concentración como la indicada en la Fig. 4.

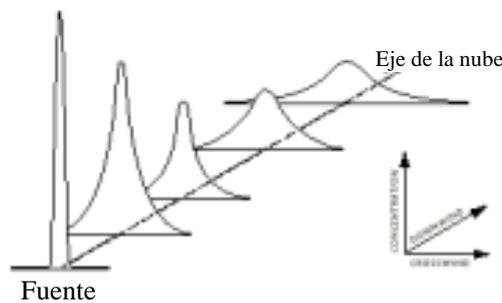


Figura 4: Distribución de concentraciones del modelo gaussiano

Para el caso de los gases pesados, ALOHA realiza los cálculos de dispersión utilizando una versión simplificada del modelo DEGADIS<sup>7</sup>. Este modelo fue elegido por ser aceptado en forma generalizada y haber sido extensamente probado por sus

autores.

Los modelos implementados en ALOHA permiten considerar dispersiones originadas en fuentes continuas o instantáneas.

Como resultado de la resolución de los modelos implementados se obtiene la distancia máxima a la cual se alcanza determinada concentración de interés. A partir de esta información el programa establece el contorno de la nube formada para la concentración elegida (valor umbral) y predice, en forma gráfica, el perfil de concentración y la dosis para cualquier punto de coordenadas  $(x,y)$  a cierta distancia de la fuente. En la Fig. 5 se esquematiza la información gráfica provista por ALOHA.

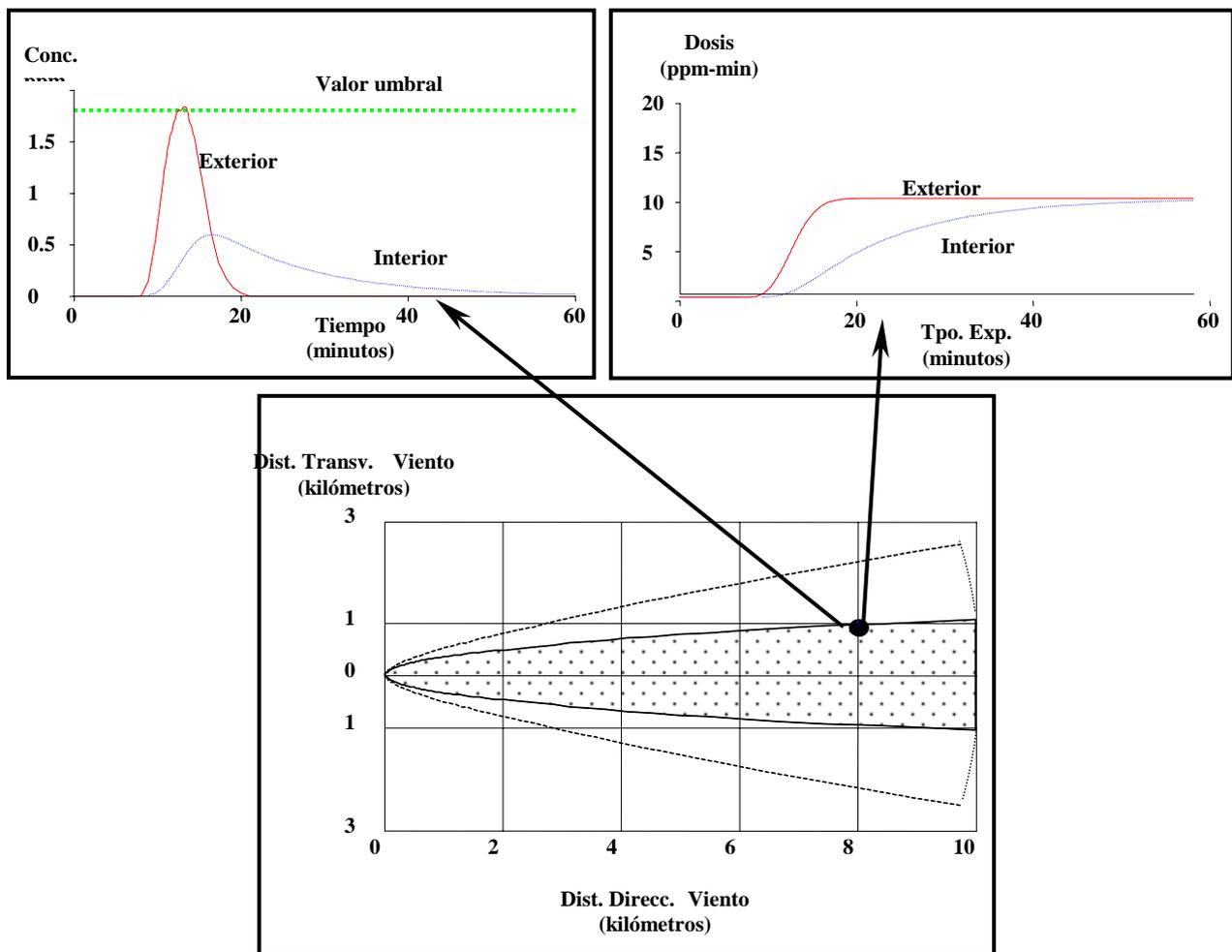


Figura 5: Información provista por ALOHA para diferentes puntos de la nube

### 3 CALCULO DE DOSIS DE EXPOSICIÓN

Los modelos de dispersión en general resuelven las ecuaciones de balance y determinan los valores de concentración  $C(x,y,z,t)$  con origen en el centro del incidente y en el momento de inicio de la fuga. Conocida la distribución espacial y/o temporal de estos *efectos físicos* es posible asociarlos a un *nivel de daño* (leve, grave o fatal) a personas ubicadas a diferentes distancias del incidente mediante el concepto de *vulnerabilidad*. La vulnerabilidad es estimada con técnicas estadísticas ya que no toda la población es igualmente sensible a un efecto de la misma intensidad.

#### 3.1 Definición de Dosis

La variable representativa del daño inmediato originado por la liberación de productos tóxicos es la *dosis*,  $D$ , definida como:

$$D = \int_0^{t_{exp}} C^n dt \quad (26)$$

donde:  $C$  concentración de la sustancia en el aire en  $t$   
 $t_{exp}$  tiempo de exposición  
 $n$  exponente que depende de la sustancia química  
 $t$  tiempo

Sin embargo, dado que no siempre se encuentran disponibles los perfiles de concentración en el tiempo es habitual definir valores máximos de dosis admisibles como:

$$D_{max} = C_{max}^n \cdot t_{exp} \quad (27)$$

donde:  $C_{max}$  concentración máxima de la sustancia en el aire  
 $t_{exp}$  tiempo de exposición  
 $n$  exponente que depende de la sustancia química

Para el caso de la Respuesta a Emergencias como valores umbrales de la concentración se definen los índices denominados AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), propuestos por la EPA, que definen valores de dosis máximas. Estos índices determinan tres niveles de daño: 1, 2 y 3. Dentro de cada uno de estos niveles se definen valores de concentración para diferentes períodos de referencia: 5 minutos, 10 minutos, 30 minutos, 1, 4 y 8 horas.

### 4 ESTRATEGIAS PARA EL CÁLCULO DE DOSIS

#### 4.1 Implementación del cálculo de dosis en SLAB

En el caso de emisiones instantáneas, para cada distancia  $x$  sobre el eje central del puff, el programa calcula las concentraciones en diferentes posiciones transversales de la nube

(dirección y). Por lo tanto, para determinar la dosis en una determinada posición (x,y,z) se debe establecer el perfil de concentraciones y el tiempo de duración de la nube, es decir el tiempo que ésta tarda en pasar en toda su longitud por ese punto.

Si se asume que la forma de la nube es elipsoidal, se la puede representar a través de la ecuación:

$$\frac{x^2}{B_x^2} + \frac{y^2}{B_y^2} = 1 \quad (27)$$

donde:  $B_x$  largo medio de la nube, y  
 $B_y$  ancho medio de la nube.

De esta forma, cualquier distancia CU paralela al eje x entre puntos del contorno de la nube se puede expresar como:

$$CU = 2 * x = 2 * B_x * \sqrt{1 - \left(\frac{y}{B_y}\right)^2} \quad (28)$$

En el programa SLAB se define la duración ( $t_{cd}$ ) del puff en función de la longitud máxima (eje central) de éste, considerando que se traslada a la velocidad del viento. Esta situación está representada por la siguiente ecuación:

$$t_{cd} = \frac{2 * B_x}{U} \quad (29)$$

donde  $U$  es la velocidad del viento en (m/s).

Esta proposición puede extenderse al cálculo del tiempo de paso de la nube para puntos fuera del eje ( $t_d$ ) teniendo en cuenta la ecuación (28), con lo que resulta:

$$t_d = \frac{CU}{U} = \frac{2 * B_x * \sqrt{1 - \left(\frac{y}{B_y}\right)^2}}{U} \quad (30)$$

Una persona expuesta a la nube, percibe inicialmente los efectos de concentraciones bajas que irán aumentando gradualmente hasta llegar a un valor máximo para luego decrecer a cero, una vez que la nube pasó totalmente.

Asumiendo un perfil de concentraciones lineal la dosis en el punto (x,y,z) durante un tiempo de exposición  $t_d$  queda definida como:

$$D(x, y, z) = \frac{C^n * t_d}{2} \quad (31)$$

## 4.2 Cálculo de dosis utilizando ALOHA

El programa ALOHA es muy utilizado por los organismos gubernamentales en la elaboración de Planes de Respuesta a Emergencia ya que la información que proporciona permite predecir la extensión de la huella y con ello delimitar las zonas donde la concentración pone en riesgo la integridad de las personas. Sin embargo, como ya se mencionara, en la actualidad la tendencia mundial es el empleo de la dosis para establecer estas zonas, es decir, que los valores umbrales de concentración tienen asociado un tiempo de exposición. En el caso de ALOHA, la evaluación de la dosis se realiza para tiempos de exposición de una hora, lo cual representa una limitación ya que, en general, los tiempos asociados a los valores umbrales de exposición pública son inferiores. No obstante, es factible utilizar los resultados de ALOHA adaptándolos a tiempos de exposición diferentes, para lo cual se propone el siguiente algoritmo de cálculo:

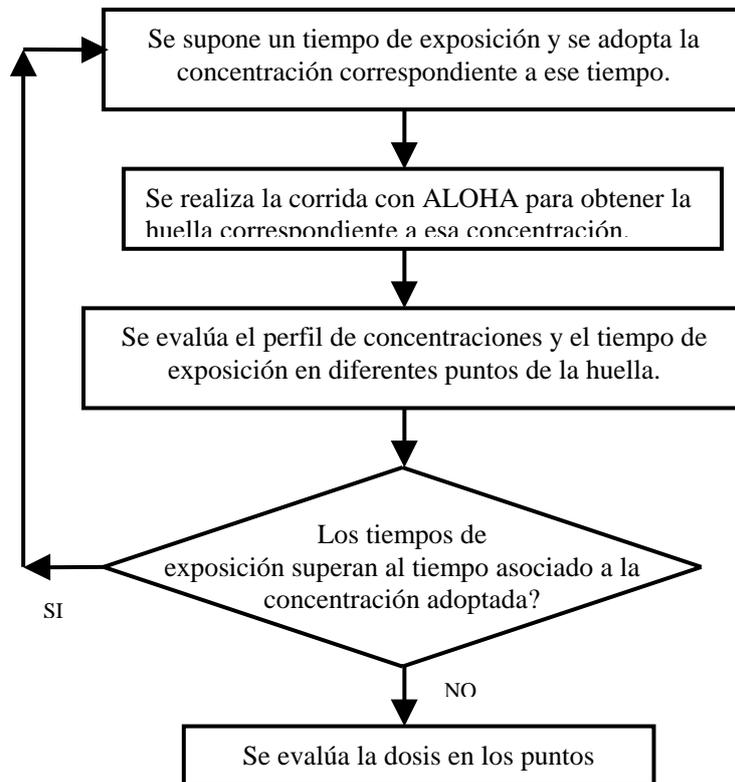


Figura 6: Algoritmo de cálculo para la estimación de la dosis utilizando el programa ALOHA

## 5 APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA ELABORACIÓN DE PLANES DE RESPUESTA A EMERGENCIAS

Las metodologías de cálculo de dosis propuestas a partir de los programas SLAB y ALOHA fueron aplicadas en la definición de zonas de vulnerabilidad, con el objeto de elaborar Planes de Respuesta a Emergencias. A continuación se presentan dos ejemplos de la aplicación de estos conceptos a dos casos reales utilizados para realizar un Análisis de Consecuencias<sup>8</sup> en la ciudad de Bahía Blanca.

### 5.1 SLAB

El cálculo de dosis propuesto utilizando el programa SLAB fue probado con la simulación de una pérdida de cloro, considerando una estabilidad atmosférica Neutra. Para el caso del cloro el exponente de dosis  $n$  es 2. Para un valor de concentración umbral de 2.8 ppm y la huella calculada se muestra en la Figura 7.

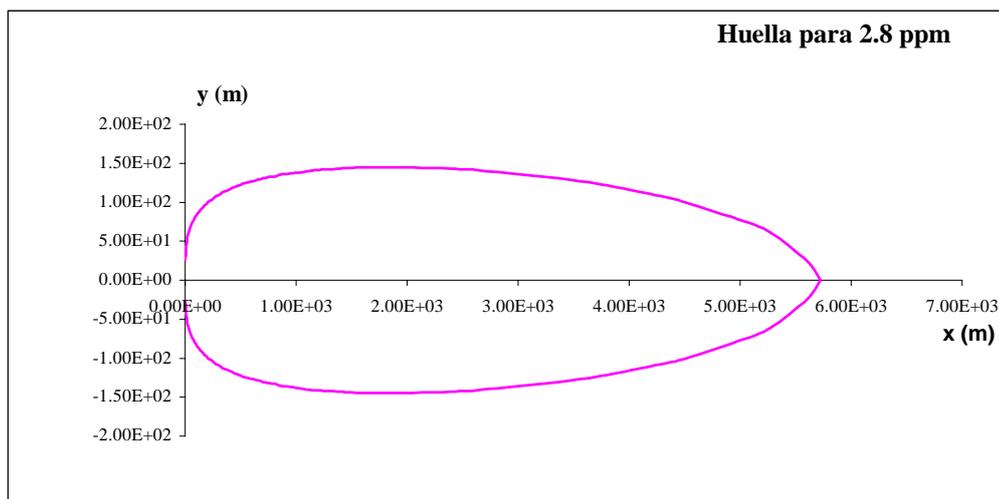


Figura 7: Huella correspondiente a 2.8 ppm

Las dosis correspondientes a diferentes puntos de la huella se presentan en la Tabla 1.

<b>Distancia (m)</b> X = direcc. del viento Y = direcc. perp. viento	<b>X = 500</b> <b>Y = 123</b>	<b>X = 1100</b> <b>Y = 140</b>	<b>X = 3900</b> <b>Y = 118</b>	<b>X = 5000</b> <b>Y = 7.6</b>	<b>X = 5720</b> <b>Y = 0</b>
<b>Tpo de exp.(min)</b>	5	8	20	24	27
<b>Dosis (ppm<sup>2</sup> min)</b>	18	28	78	94	104

Tabla 1: Valores de dosis para diferentes puntos del contorno de la huella

## 5.2 ALOHA

El procedimiento de cálculo de dosis fue utilizado en la definición de zonas de intervención y alerta para el Plan de Respuesta a Emergencias Tecnológicas<sup>8</sup> de la Municipalidad de Bahía Blanca. A modo de ejemplo se presenta el caso de una dispersión de ácido clorhídrico con condición atmosférica Estable. Los valores umbrales utilizados fueron los AEGL (Acute Exposure Guideline Level) que se definen como las concentraciones por encima de la cual se predice que la población puede experimentar:

**AEGL 1:** una incomodidad notable. Concentraciones por debajo del AEGL 1 representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve.

**AEGL 2:** efectos a largo plazo serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar. Concentraciones por debajo del AEGL 2 pero por encima del AEGL 1 representan niveles de exposición que pueden causar notable malestar.

**AEGL 3:** efectos amenazantes para la vida o la muerte. Concentraciones por debajo de AEGL 3 pero por encima de AEGL 2 representan niveles de exposición que pueden causar efectos a largo plazo, serios o irreversibles o impedir la capacidad de escapar.

Para el caso del HCl los valores de los AEGL son:

AEGL (ppm)	10 min	30 min	60 min	4 hs.	8 hs.
AEGL 1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
AEGL 2	100	43	22	11	11
AEGL 3	620	210	100	26	26

Tabla 2: Valores de AEGL para HCl

El ejemplo que se presenta corresponde al cálculo de la dosis para una concentración del valor del AEGL 2. Siguiendo el procedimiento, el primer tiempo de exposición supuesto es 10 minutos, con lo cual la concentración asociada es 100 ppm. La simulación del problema con ALOHA resulta en la siguiente huella mostrada en la Figura 8.

Los puntos marcados en el gráfico señalan la posición de la huella donde fueron evaluados el perfil de concentraciones y los tiempos de exposición. En todos los casos estos valores superan al tiempo de exposición seleccionado, por lo que se adopta 30 minutos como nuevo tiempo de exposición y la concentración asociada es 43ppm. La nueva simulación de la dispersión tóxica da como resultado huella esquematizada en la Figura 9.

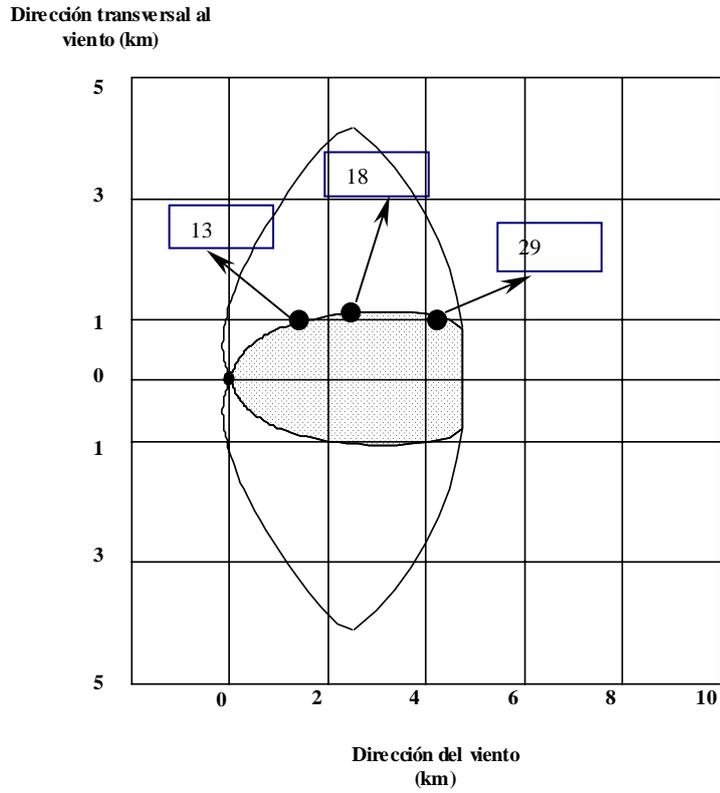


Figura 8: Huella para la concentración AEGL 2

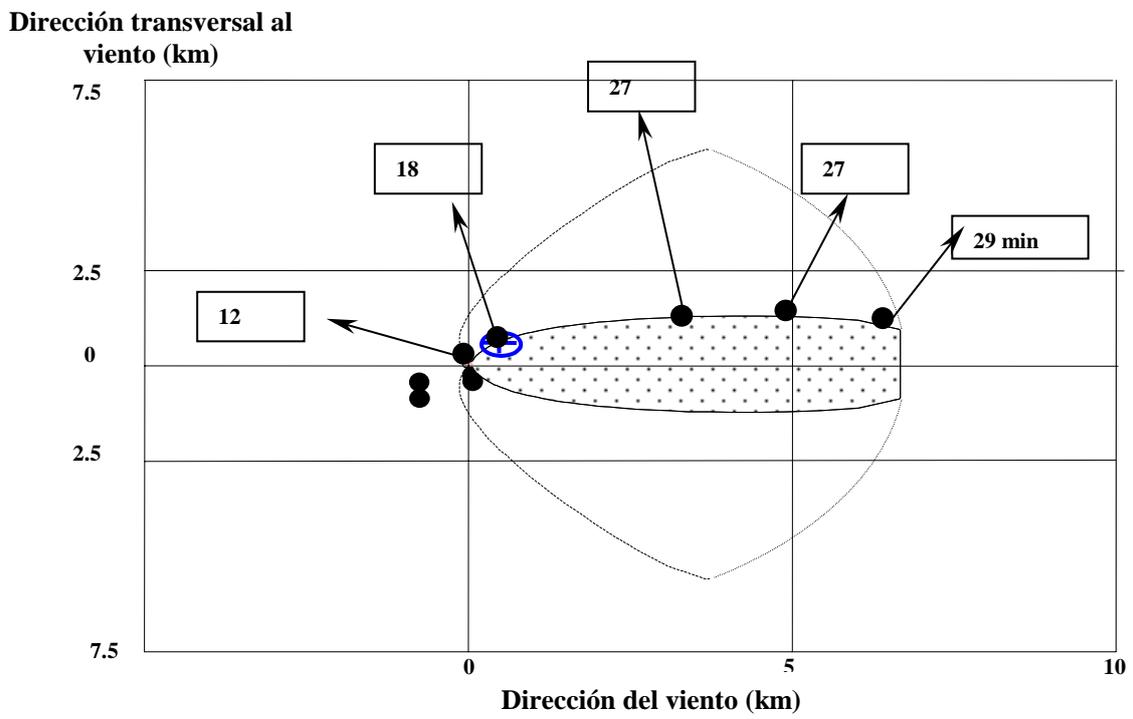


Figura 9: Huella para la nueva concentración AEGL 2

En este caso los tiempos de exposición calculados son menores que el tiempo adoptado por lo que se selecciona esta última huella como la correspondiente al AEGL 2 y se evalúa la dosis en los puntos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3:

<b>Dosis máxima permitida (<math>D_{max}</math>):</b> 1290 ppm min	<b>Distancia (m)</b> X = direcc. del viento Y = direcc. perp. viento	<b>X = 500</b> <b>Y = 592</b>	<b>X = 1000</b> <b>Y = 842</b>	<b>X = 4000</b> <b>Y = 1260</b>	<b>X = 6000</b> <b>Y = 1160</b>	<b>X = 6700</b> <b>Y = 950</b>
	<b>Tpo de exp.(min)</b>	12	18	27	27	29
	<b>Dosis (ppm min)</b>	197	209	451	555	485

Tabla 3 Valores de dosis para diferentes puntos del contorno de la huella

## 6 CONCLUSIONES

El modelado de la dispersión de sustancias tóxicas en la atmósfera permite estimar la forma y cantidad en que estas sustancias se distribuyen en las cercanías del punto de emisión y de que manera pueden llegar a afectar a las personas expuestas. Una de las aplicaciones más concretas de esta información es el desarrollo de Planes de Respuesta a Emergencia que permiten, a través de la consideración de diferentes escenarios posibles, definir zonas de peligro para la población. Los criterios mas modernos en este sentido reconocen que no resulta suficiente definir valores de concentración máximos sino que estos valores dependerán fuertemente del tiempo que las personas estén expuestos a los mismos. Ello implica un modelado mas riguroso de la dispersión, que debe ser considerado como un fenómeno no estacionario cuyos efectos serán función no sólo de la distancia a la que se encuentre un individuo de la fuente de emisión sino también del tiempo en que se desarrolle el evento. En este contexto este trabajo introduce la idea de utilizar un procedimiento para hacer el cálculo de la dosis utilizando los resultados obtenidos del programa ALOHA desarrollado por la EPA. Este método es poco eficiente por basarse en un procedimiento iterativo por prueba y error y su precisión esta limitada por los datos que se obtienen directamente de gráficos. Sin embargo, tiene la ventaja de utilizar un programa muy difundido entre el personal asignado a responder a este tipo de emergencias y es una herramienta útil si no se disponen de modelos mas sofisticados.

La alternativa de implementar el cálculo de la dosis en un modelo como SLAB se orienta a aportar una forma mas precisa de estimar este parámetro. En este trabajo se presenta una primera aproximación al cálculo de la dosis mediante la integración de un perfil lineal de la concentración. La incorporación de perfiles que modelen en forma mas rigurosa la distribución de la concentración y el análisis de alternativas de nuevas resoluciones numéricas del modelo completo permitirán obtener estimaciones mas realistas.

A nivel de aplicación, estas mejoras en el modelado permitirían trazar curvas de isodosis y

no isofleclas como comúnmente se realiza. Ello implica determinar con mayor precisión diferentes zonas de vulnerabilidad para las personas lo que resulta de vital importancia en el caso de la Respuesta a Emergencias.

## 7 REFERENCIAS

- [1] “*Drectriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que Intervienen Sustancias Peligrosas*”, España, (2002).
- [2] D. Ermark. *SLAB. User's Manual*. Department of Energy USA, (1990).
- [3] EPA y NOAA. *ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) V.5.2.3*. USA, (2000).
- [4] Zeman, O. “The dynamics and modeling of heavier-than-air cold gas releases”, *Atmos. Environ.*, 16, 741, (1982).
- [5] Ermak, D. L. and Chan, S. T. “A Study of Heavy Gas Effects on the Atmospheric Dispersion of Dense Gases”, *Air Pollution Modelling and its Application V*, Plenum Press, 723-742., (1985).
- [6] Ermak, D. L. and Chan, S. T, “Recent Developments on the FEM3 and SLAB Atmospheric Dispersion Models”, *Proceedings of the IMA Conference on Stably Stratified Flows and Dense Gas Dispersion*, Chester, England, (1986).
- [7] Less, F. P. *Loss Pevention in the Process Industries*, Vol. 1, 2nd Edition, Butterworth Heinemann, (1996).
- [8] L. Aparicio y S. Tonelli. “Cálculo de Consecuencias de Escapes Tóxicos utilizando el criterio de dosis”. Proceso APELL Bahía Blanca. Secretaría de Política Urbano Ambiental. MBB. Junio 2003.