

# ***Lección 6***

## ***La dispersión de las plumas y el modelado de la calidad del aire en exteriores***

### ***Meta***

Explicar los efectos y estimados de la altura de la chimenea y de la elevación y disposición de la pluma, y dar a conocer los modelos de la calidad del aire en exteriores.

### ***Objetivos***

Al finalizar esta lección, podrá:

1. Definir la elevación de la pluma y la altura efectiva de la chimenea.
2. Nombrar dos características de la chimenea y del efluente que influyen en la elevación de la pluma y explicar cómo la afectan.
3. Describir dos efectos aerodinámicos alrededor de las chimeneas y los edificios que pueden causar concentraciones elevadas de contaminación.
4. Enumerar cuatro tipos de modelos de calidad del aire en exteriores.
5. Identificar la ecuación gaussiana y describir brevemente su función.
6. Establecer cuatro condiciones para que una pluma sea gaussiana.
7. Dar un ejemplo de transporte de largo alcance de contaminantes del aire en exteriores.
8. Describir brevemente la diferencia entre los modelos de sondeo y los modelos refinados.

## ***Introducción***

Los contaminantes ingresan a la atmósfera de diversas maneras. Por ejemplo, cuando las plantas se descomponen, liberan metano. Los automóviles, los camiones y los autobuses emiten contaminantes por el escape del motor y durante el abastecimiento de combustible. Las centrales eléctricas y los hornos de las viviendas también.

El tipo de descarga de contaminación que ha recibido más atención es la que se libera desde fuentes puntuales como las chimeneas. Las chimeneas son de diferentes tamaños, puede tratarse de una pequeña chimenea en el techo de un edificio o de una chimenea elevada. Su función es descargar los contaminantes a suficiente altura desde la superficie terrestre para que estos puedan dispersarse bien en la atmósfera antes de llegar al suelo. Si bien todas son iguales, las chimeneas más altas dispersan mejor los contaminantes que las más pequeñas debido a que la pluma tiene que viajar a través de una capa atmosférica más profunda antes de llegar al nivel del suelo. A medida que la pluma viaja, se extiende y dispersa.

## ***Elevación de la pluma***

Los gases emitidos por las chimeneas muchas veces son impulsados por abanicos. A medida que los gases de escape turbulentos son emitidos por la pluma, se mezclan con el aire del ambiente. Esta mezcla del aire ambiental en la pluma se denomina **arrastre**. Durante el arrastre en el aire, la pluma aumenta su diámetro mientras viaja a sotavento. Al entrar en la atmósfera, estos gases tienen un *momentum*. Muchas veces se calientan y se vuelven más cálidos que el aire externo. En estos casos, los gases emitidos son menos densos que el aire exterior y, por lo tanto, flotantes. La combinación del *momentum* y la flotabilidad de los gases hace que estos se eleven. Este fenómeno, conocido como **elevación de la pluma**, permite que los contaminantes emitidos al aire en esta corriente de gas se eleven a una altura mayor en la atmósfera. Al estar en una capa atmosférica más alta y más alejada del suelo, la pluma experimentará una mayor dispersión antes de llegar a este.

La altura final de la pluma, conocida como **altura efectiva de chimenea** ( $H$ ), es la suma de la altura física de la chimenea ( $h_s$ ) y la elevación de la pluma ( $\Delta h$ ). En realidad, la elevación de la pluma se estima a partir de la distancia existente hasta la línea central imaginaria de la pluma y no hasta el borde superior o inferior de esta (figura 6-1). La elevación de la pluma depende de las características físicas de la chimenea y del efluente (gas de chimenea). La diferencia de temperatura entre el gas de la chimenea ( $T_s$ ) y el aire ambiental ( $T_a$ ) determina la densidad de la pluma, que influye en su elevación. Además, la velocidad de los gases de la chimenea, que es una función del diámetro de la chimenea y de la tasa volumétrica del flujo de los gases de escape, determina el *momentum* de la pluma.

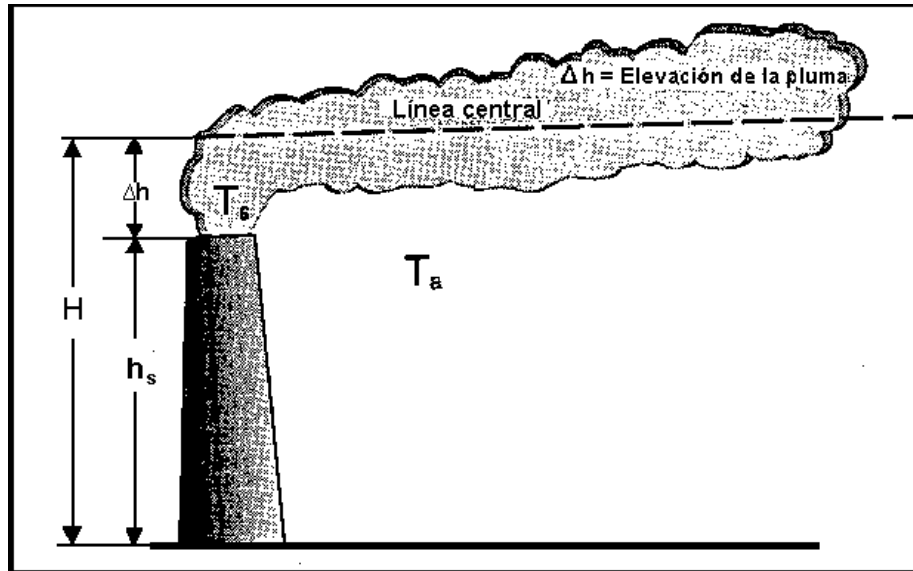


Figura 6-1. Elevación de la pluma

## ***Momentum* y flotabilidad**

La condición de la atmósfera, incluidos los vientos y el perfil de la temperatura a lo largo del recorrido de la pluma, determinará en gran medida la elevación de la pluma. Dos características de esta influyen en su elevación: el *momentum* y la flotabilidad. La velocidad de salida de los gases de escape emitidos por la chimenea contribuyen con la elevación de la pluma en la atmósfera. Este *momentum* conduce el efluente hacia el exterior de la chimenea a un punto en el que las condiciones atmosféricas empiezan a afectar a la pluma. Una vez emitida, la velocidad inicial de la pluma disminuye rápidamente debido al arrastre producido cuando adquiere un *momentum* horizontal. Este fenómeno hace que la pluma se incline. A mayor velocidad del viento, más horizontal será el *momentum* que adquirirá la pluma. Por lo general, dicha velocidad aumenta con la distancia sobre la superficie de la Tierra. A medida que la pluma continúa elevándose, los vientos más fuertes hacen que se incline aún más. Este proceso persiste hasta que la pluma parece horizontal al suelo. El punto donde la pluma parece llana puede ser una distancia considerable de la chimenea a sotavento. La velocidad del viento es importante para impulsar la pluma. Mientras más fuerte, más rápido será el serpienteo de la pluma.

La elevación de la pluma causada por su flotabilidad es una función de la diferencia de temperatura entre la pluma y la atmósfera circundante. En una atmósfera inestable, la flotabilidad de la pluma aumenta a medida que se eleva, lo cual hace que se incremente la altura final de la pluma. En una atmósfera estable, la flotabilidad de la pluma disminuye a medida que se eleva. Por último, en una atmósfera neutral, permanece constante.

La pluma pierde flotabilidad a través del mismo mecanismo que la hace serpentear, el viento. Como se muestra en la figura 6-2, la mezcla dentro de la pluma arrastra el aire atmosférico hacia su interior. A mayor velocidad del viento, más rápida será esta mezcla. El arrastre del aire ambiental hacia la pluma por acción del viento, le “quita” flotabilidad muy rápidamente, de modo que durante los días con mucho viento la pluma no se eleva muy alto sobre la chimenea.

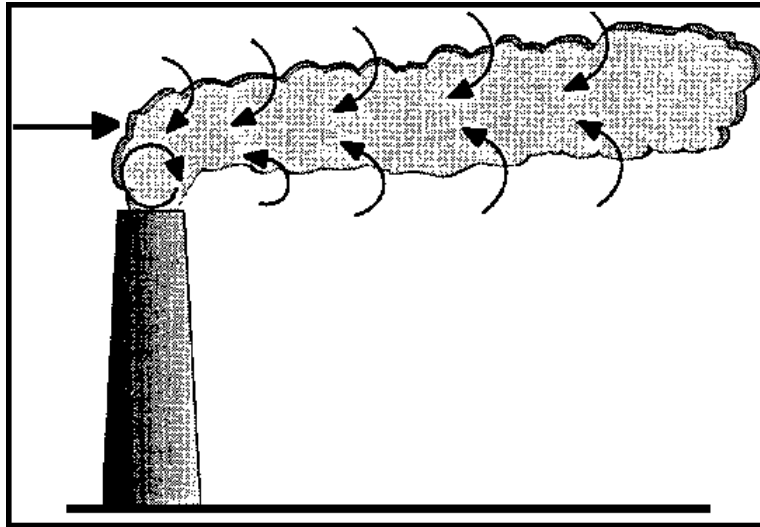


Figura 6-2. Influencia de la velocidad del viento en el arrastre.

### ***Efectos de la fuente en la elevación de la pluma***

Debido a la configuración de la chimenea o a los edificios adyacentes, es posible que la pluma no se eleve libremente en la atmósfera. Algunos efectos aerodinámicos causados por el modo en el que se mueve el viento alrededor de los edificios adyacentes y de la chimenea pueden impulsar a la pluma hacia el suelo en lugar de permitir que se eleve en la atmósfera.

El **flujo descendente de la chimenea** puede producirse cuando la razón entre la velocidad de salida de la chimenea y la del viento es pequeña. En este caso, la presión baja en la estela de la chimenea puede hacer que la pluma descienda detrás de la chimenea. Cuando esto sucede, la dispersión de los contaminantes disminuye, lo que puede determinar concentraciones elevadas de contaminantes inmediatamente a sotavento de la fuente.

A medida que el aire se mueve sobre y alrededor de los edificios y otras estructuras, se forman olas turbulentas. Según la altura de descarga de una pluma (altura de la chimenea), es probable que esta sea arrastrada hacia abajo en esta área de la estela. Esto se conoce como **flujo descendente aerodinámico** o **entre edificios** de la pluma y puede conducir a

concentraciones elevadas de contaminantes inmediatamente a sotavento de la fuente. La figura 6-3 ilustra estos efectos.

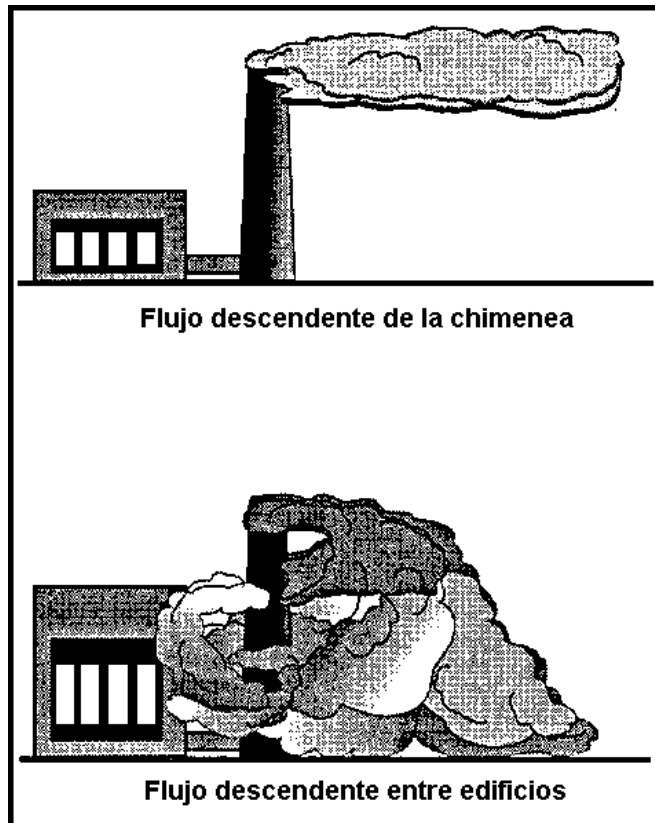


Figura 6-3. Dos ejemplos de flujo descendente

## Fórmulas

La elevación de las plumas ha sido tema de estudio durante muchos años. Las fórmulas más usadas son las desarrolladas por Gary A. Briggs. La ecuación 6-1 incluye una de estas, la que se aplica a las plumas dominadas por la flotabilidad. Las fórmulas de la elevación de la pluma se usan en plumas con temperaturas *mayores* que la del aire ambiental. La **fórmula de Briggs para la elevación de la pluma** es la siguiente:

$$\Delta h = \frac{1,6F^{1/3}x^{2/3}}{\hat{u}} \quad \text{Ec.6-1}$$

Donde:  $\Delta h$  = Elevación de la pluma (sobre la chimenea)  
 $F$  = Flujo de flotabilidad (véase a continuación)  
 $\hat{u}$  = Velocidad promedio del viento

x	=	Distancia a sotavento de la chimenea/fuente
g	=	Aceleración debido a la gravedad (9,8 m/s <sup>2</sup> )
V	=	Tasa volumétrica del flujo del gas de la chimenea
T <sub>s</sub>	=	Temperatura del gas de la chimenea
T <sub>a</sub>	=	Temperatura del aire ambiental

$$\text{Flujo de flotabilidad} = F = \frac{g}{P} V \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad \text{Ec. 6-2}$$

Como se dijo anteriormente, las fórmulas de elevación de la pluma sirven para determinar la línea central imaginaria de esta. La línea central está donde se producen las *mayores concentraciones* de contaminantes. Existen varias técnicas para calcular las concentraciones de contaminantes lejos de la línea central.

En la siguiente sección se tratan los principios que se deben considerar para obtener estimados cuantificables de dispersión.

## ***Estimados de dispersión***

Como se mencionó en la sección anterior, las fórmulas de la elevación de la pluma se usan para determinar la línea imaginaria de esta. Si bien la concentración máxima de la pluma existe en esta línea central, las fórmulas mencionadas no permiten obtener información sobre cómo varían las concentraciones de contaminantes fuera de esta línea central. Se deberán efectuar, entonces, estimados de dispersión para determinar las concentraciones de contaminantes en un punto de interés.

Los estimados de dispersión se determinan mediante ecuaciones de distribución y/o modelos de calidad del aire. Estos estimados generalmente son válidos para la capa de la atmósfera más cercana al suelo, donde se producen cambios frecuentes de la temperatura y de la distribución de los vientos. Estas dos variables tienen un importante efecto en la forma de dispersión de las plumas. Por lo tanto, las ecuaciones de distribución y los modelos de calidad del aire mencionados anteriormente deben incluir estos parámetros.

## ***Modelos de dispersión de calidad del aire***

Los modelos de dispersión de calidad del aire consisten en un grupo de ecuaciones matemáticas que sirven para interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por la dispersión y por el impacto de las plumas. Estos modelos incluyen los estimados de dispersión mencionados anteriormente y las diferentes condiciones meteorológicas, incluidos los factores relacionados con la temperatura, la velocidad del viento, la estabilidad y la topografía. Existen cuatro tipos genéricos de modelos: gaussiano, numérico, estadístico y físico. Los modelos **gaussianos** emplean la ecuación de distribución gaussiana (véase la discusión sobre distribución

gausiana a continuación) y son ampliamente usados para estimar el impacto de contaminantes no reactivos. En el caso de fuentes de áreas urbanas que presentan contaminantes reactivos, los modelos **numéricos** son más apropiados que los gaussianos pero requieren una información extremadamente detallada sobre la fuente y los contaminantes, y no se usan mucho. Los modelos **estadísticos** se emplean cuando la información científica sobre los procesos químicos y físicos de una fuente están incompletos o son vagos. Por último, están los modelos **físicos**, que requieren estudios de modelos del fluido o en túneles aerodinámicos del viento. La adopción de este enfoque implica la elaboración de modelos en escala y la observación del flujo en estos. Este tipo de modelos es muy complejo y requiere asesoría técnica de expertos. Sin embargo, en el caso de áreas con terrenos complejos y condiciones del flujo también complejas, flujos descendentes de la chimenea, y edificios altos, esta puede ser la mejor opción.

La selección de un modelo de calidad del aire depende del tipo de contaminantes emitidos, de la complejidad de la fuente y del tipo de topografía que rodea la instalación. Algunos contaminantes se forman a partir de la combinación de contaminantes precursores. Por ejemplo, el ozono en el nivel del suelo se forma cuando los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) actúan bajo la acción de la luz solar. Los modelos para predecir las concentraciones de ozono en el nivel del suelo emplearían la tasa de emisión de COV y  $\text{NO}_x$  como datos de entrada. Además, algunos contaminantes reaccionan fácilmente una vez que son emitidos en la atmósfera. Estas reacciones reducen las concentraciones y puede ser necesario considerarlas en el modelo. La complejidad de la fuente también desempeña un papel en la selección. Algunos contaminantes pueden ser emitidos desde chimeneas bajas sujetas a flujos descendentes aerodinámicos. Si este es el caso, se debe emplear un modelo que considere el fenómeno. En la dispersión de las plumas y los contaminantes, la topografía es un factor importante que debe ser considerado al seleccionar un modelo. Las plumas elevadas pueden tener un impacto en áreas de terrenos altos. Las alturas de este tipo de terrenos pueden experimentar mayores concentraciones de contaminantes debido a que se encuentran más cerca de la línea central de la pluma. En el caso que existan terrenos elevados, se debe usar un modelo que considere este hecho.

## ***Distribución gaussiana***

De los cuatro tipos de modelos de dispersión mencionados anteriormente, el gaussiano, que incluye la **ecuación de distribución gaussiana** (ecuación 6-3) es el más usado. La ecuación de distribución gaussiana emplea cálculos relativamente simples, que sólo requieren dos parámetros de dispersión ( $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ ) para identificar la variación de las concentraciones de contaminantes que se encuentran lejos del centro de la pluma, D.B. Turner, 1970. Esta ecuación determina las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo sobre la base de las variables atmosféricas de tiempo promedio (por ejemplo, la temperatura y la velocidad del viento). Por lo tanto, no es posible obtener un “cuadro” instantáneo de las concentraciones de la pluma. Sin embargo, cuando se emplean promedios de tiempo de diez minutos a una hora para estimar las variables atmosféricas de tiempo promedio necesarias en la ecuación, se puede asumir que las concentraciones de contaminantes en la pluma están distribuidas normalmente, como se señala en la figura 6-4.

$$c = \frac{Q}{2ps_y s_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{s_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{s_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{s_z}\right)^2} \right\} \quad \text{Ec.6-3}$$

Donde:

- $\chi$  = concentración del contaminante en el nivel del suelo ( $\text{g/m}^3$ )
- $Q$  = masa emitida por unidad de tiempo
- $\sigma_y$  = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección y (horizontal)
- $\sigma_z$  = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección z (vertical)
- $u$  = velocidad del viento
- $y$  = distancia en dirección horizontal
- $z$  = distancia en dirección vertical
- $H$  = altura efectiva de la chimenea

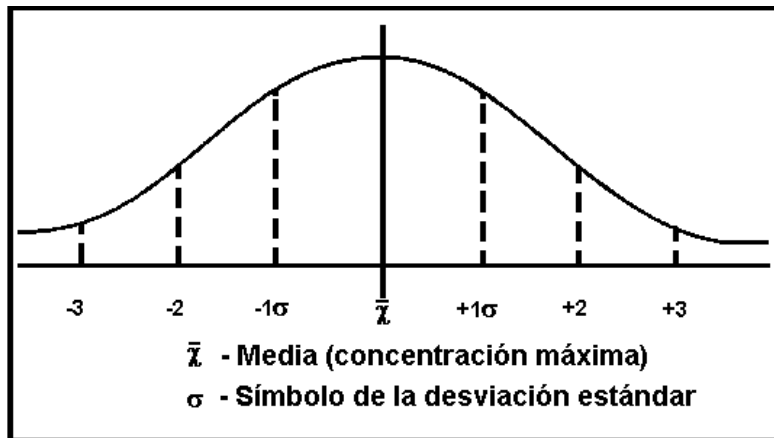


Figura 6-4. Distribución gaussiana

La distribución gaussiana determina el tamaño de la pluma a sotavento de la fuente. La figura 6-5 muestra una representación esquemática de la pluma gaussiana. El tamaño de la pluma depende de la estabilidad de la atmósfera y de su propia dispersión en dirección horizontal y vertical. Los coeficientes de la dispersión horizontal y vertical ( $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , respectivamente) sólo representan la desviación estándar de la normal en la curva de distribución gaussiana en las direcciones y y z. Estos coeficientes de dispersión,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , son funciones de la velocidad del viento, de la cubierta de nubes y del calentamiento de la superficie por el sol. Para la distribución gaussiana es necesario que el material en la pluma se mantenga. En otras palabras, se debe dejar que el borde de la pluma se refleje desde el suelo sin perder ninguna contaminación. Además, la distribución gaussiana y la elevación de la pluma dependen de que el suelo sea relativamente plano a lo largo del recorrido. Como se expuso anteriormente, la topografía afecta el flujo y la estabilidad atmosférica del viento. Por consiguiente, un terreno desigual debido a la presencia de cerros, valles y montañas afectará la dispersión de la pluma y

la distribución gaussiana deberá ser modificada.

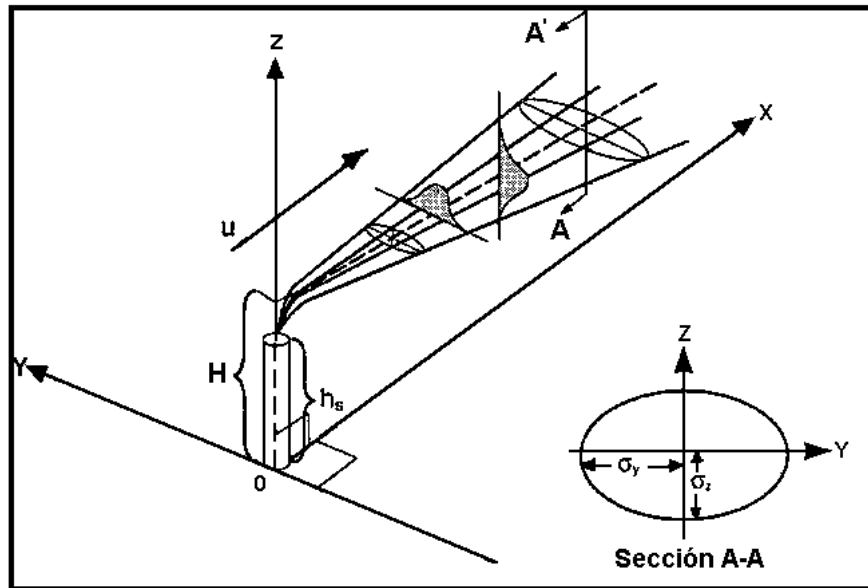


Figura 6-5. Representación esquemática de la pluma gaussiana  
Fuente: Turner 1970.

Para obtener el modelo de una pluma mediante la distribución gaussiana, es necesario que:

- La dispersión de la pluma tenga una distribución normal (esto es, una distribución acampanada, como se muestra en la figura 6-4)
- La tasa de emisión ( $Q$ ) sea constante y continua
- La velocidad y la dirección del viento sean uniformes
- La reflexión total de la pluma se produzca en la superficie

## **Clasificaciones de estabilidad**

Como se señaló anteriormente, la estabilidad de la atmósfera depende de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire que la rodea. Por consiguiente, se pueden producir diferentes niveles de estabilidad según cuán grande o pequeña sea la diferencia de temperatura entre la porción de aire y el aire circundante. Como se describió en la lección 4, la atmósfera puede ser estable, condicionalmente estable, neutra, condicionalmente inestable o inestable. Sin embargo, para estimar la dispersión y los propósitos del modelo, estos niveles de estabilidad se clasifican en seis clases basadas en cinco categorías de velocidad del viento superficial, tres tipos de insolación diurna y dos tipos de nebulosidad nocturna. Estos tipos de estabilidad se denominan **clases de estabilidad Pasquill-Gifford**, incluidas en el cuadro 6-1. Como puede verse en el cuadro, las estabilidades A, B y C

representan las horas diurnas con condiciones inestables. La estabilidad D, los días o noches con cielo cubierto con condiciones neutrales. Las estabilidades E y F, las condiciones nocturnas estables, y se basan en la cantidad de cobertura de nubes. Por consiguiente, la clasificación A representa condiciones de gran inestabilidad y la clasificación F, de gran estabilidad.

<b>Cuadro 6-1. Clave para las categorías de estabilidad</b>					
<b>Viento superficial</b>	<b>Insolación</b>			<b>Noche</b>	
<b>Velocidad (a 10 m) (m/s)</b>		<b>Moderada</b>	<b>Ligera</b>	<b>Cobertura de nubes bajas* ≥ 4/8</b>	<b>Cobertura de nubes ≥ 3/8</b>
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

\* Ligeramente cubierto

Nota: Se deben asumir clases neutrales D para condiciones de cielo cubierto durante el día o la noche

En los modelos gaussianos, la dispersión de la pluma lejos de la línea central está representada por los coeficientes de dispersión,  $\sigma_y$  (horizontal) y  $\sigma_z$  (vertical). La dispersión de la pluma depende de la clasificación de estabilidad asignada al escenario bajo estudio. La figura 6-6 (a) muestra los valores que los modelos gaussianos emplean para la dispersión horizontal según la clasificación de la estabilidad y la distancia a sotavento de la chimenea. Como es de suponer, los coeficientes de dispersión horizontal aumentan a medida que las condiciones atmosféricas se hacen menos estables (van de F a A). De manera similar, la figura 6-6 (b) muestra los valores usados por modelos gaussianos para estimar la dispersión vertical. Si se comparan los dos gráficos, se puede observar que la clasificación de la estabilidad afecta la dispersión vertical más radicalmente que la horizontal. Los siguientes gráficos de los coeficientes de dispersión se pueden usar a fin de obtener valores para  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  empleados como datos de alimentación para la ecuación de distribución gaussiana.

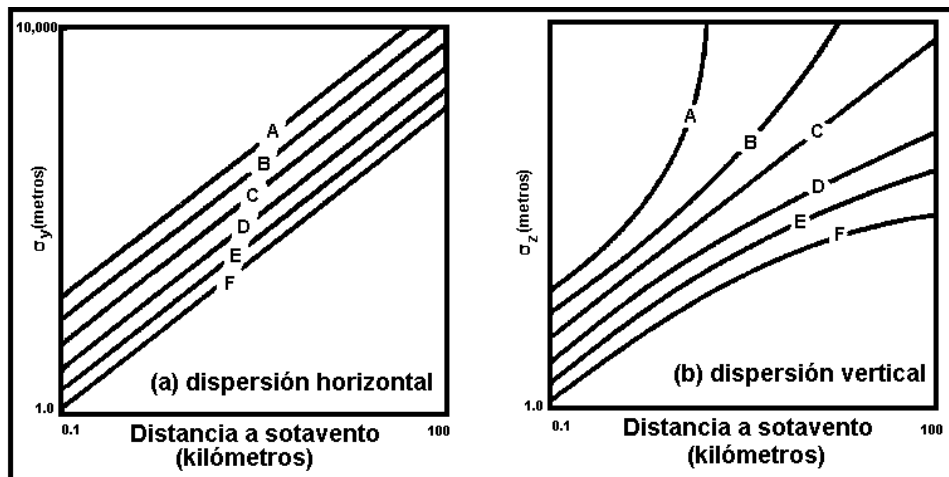


Figura 6-6. Coeficientes de dispersión horizontal y vertical

## ***Modelos de sondeo***

Para lugares ubicados a sotavento de la fuente en terrenos relativamente planos, las concentraciones de contaminantes se pueden determinar por medio de la ecuación gaussiana de distribución u otra similar. Sin embargo, el uso de modelos computarizados para la dispersión atmosférica simplifica mucho más los cálculos de la concentración de contaminantes y permite aplicarlos en escenarios más complejos. El análisis de modelos puede darse en dos niveles: un nivel de sondeo y otro refinado.

El modelo de sondeo se realiza antes del refinado para obtener un panorama inicial al del tipo de concentración de contaminantes que se producirá debido a una determinada fuente. Consiste en modelos simples que emplean técnicas y suposiciones de estimación relativamente sencillas. Por consiguiente, los resultados son conservadores, e indican que si se ejecuta un modelo refinado, los estimados de la concentración de contaminantes no deberán ser mayores. El modelado de sondeo generalmente se realiza en primer término, con vistas a eliminar cualquier fuente que implicará un problema para la calidad del aire, o no contribuirá con esta. En los análisis de modelado refinado, no es necesario considerar las fuentes que no representan ningún problema para calidad del aire.

## ***Modelo refinado***

El segundo nivel de análisis es el modelado refinado. Este nivel consiste en cálculos más analíticos y complejos. Requiere información más detallada sobre la fuente, las condiciones meteorológicas y el terreno, así como mejor número de datos de entrada. Mientras que los modelos de sondeo asumen el “peor de los casos” para las condiciones meteorológicas y

presupuestos simplificados sobre el terreno, los refinados incorporan información más completa sobre el terreno y la fuente, y emplean datos meteorológicos reales. Al incluir información más detallada en el modelo, se pueden obtener estimados más exactos y descriptivos sobre la concentración de los contaminantes para las áreas que rodean a la fuente.

## ***Transporte de largo alcance***

Los modelos gaussianos se consideran exactos para determinar las concentraciones de contaminantes hasta una distancia de 50 km de la fuente. Sin embargo, debido a diversas situaciones atmosféricas, los contaminantes pueden ser transportados más allá de 50 km. Algunos contaminantes como los compuestos de sulfuro, partículas finas y el ozono, que no se remueven rápidamente de la atmósfera, pueden ser transportados a distancias lejanas. Los modelos climáticos de gran escala y las variables atmosféricas tales como la luz solar y la precipitación pueden afectar el transporte de estos contaminantes. Las técnicas computarizadas para el análisis de trayectorias generalmente se usan para analizar el transporte y la transformación de estas sustancias. Estas técnicas consideran el flujo de una porción de aire contaminado.

# Ejercicios de revisión

1. ¿Verdadero o falso? La elevación de la pluma ( $\Delta h$ ) es la altura a la que se elevan los contaminantes sobre una chimenea y se mide desde la cima de la chimenea hasta el borde superior de la pluma.
  - a. Verdadero
  - b. Falso
2. La elevación de la pluma de una chimenea se produce por:
  - a. El calor y el tipo de contaminante
  - b. El *momentum* y la flotabilidad
  - c. La composición de la chimenea
  - d. Ninguna de las anteriores
3. ¿Verdadero o falso? La altura efectiva de la chimenea se determina al sumar la elevación de la pluma a la altura física de la chimenea.
  - a. Verdadero
  - b. Falso
4. En las ecuaciones de la elevación de la pluma, el término *momentum* generalmente implica:
  - a. La temperatura del aire ambiental, la velocidad del viento, la temperatura del gas de la chimenea
  - b. La velocidad del viento, la temperatura del gas de la chimenea, el diámetro de la chimenea
  - c. La velocidad del gas de la chimenea
  - d. El radio exterior de la chimenea
5. ¿Verdadero o falso? En las ecuaciones de la elevación de la pluma, los factores de flotabilidad siempre dependen de la diferencia entre la temperatura del gas de la chimenea y la del aire ambiental.
  - a. Verdadero
  - b. Falso
6. El proceso mediante el cual el aire atmosférico arrastrado hacia el interior de la pluma se mezcla dentro de esta se denomina \_\_\_\_\_. La velocidad con la que se produce este proceso es directamente proporcional a \_\_\_\_\_ .
7. Fórmulas de elevación de la pluma como las desarrolladas por Briggs se usan para:

- a. Plumas más frías que el aire ambiental
- b. Plumas más calientes que el aire ambiental
- c. Plumas que tienen la misma temperatura que el aire ambiental
- d. Ninguna de las anteriores

8. Enumere cuatro tipos de modelos de calidad del aire.

---



---



---



---

9. ¿Cuál de las siguientes ecuaciones es la ecuación gaussiana para estimar las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo dentro de una distancia de 50 km a partir de la fuente?

a. 
$$\Delta h = \frac{1,6 F^{1/3} x^{2/3}}{\hat{u}}$$

b. 
$$F = \frac{g}{\rho} V \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right)$$

c. 
$$c = \frac{Q}{2\rho s_y s_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{s_y}\right)^2} \left[ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{s_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{s_z}\right)^2} \right]$$

10. Una de las condiciones de la distribución gaussiana es que:

- a. La fuente emita contaminantes constantemente
- b. El terreno tenga una distribución logarítmica normal
- c. La distribución en la dirección horizontal sea bimodal
- d. Los contaminantes caigan fuera de la pluma inmediatamente después de la descarga de la fuente

11. El sigma y ( $\sigma_y$ ) y el sigma z ( $\sigma_z$ ) usados en las fórmulas de dispersión gaussiana se definen como:

- a. Presión atmosférica en los puntos y y z
- b. Desviaciones estándar de la concentración de contaminantes en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente
- c. Variaciones de temperatura en las direcciones y y z.
- d. Ninguna de las anteriores



# **Respuestas del ejercicio de revisión**

## **1. b. Falso**

La elevación de la pluma ( $\Delta h$ ) es la altura a la que se elevan los contaminantes sobre una chimenea y se mide desde la cima de esta hasta la línea central imaginaria de la pluma en lugar del borde superior de la chimenea.

## **2. b. Momentum y flotabilidad**

La elevación de la pluma de una chimenea se debe al *momentum* y a la flotabilidad.

## **3. a. Verdadero**

La altura efectiva de la chimenea se determina al sumar la elevación de la pluma a la altura física de la chimenea.

## **4. c. Velocidad del gas de la chimenea**

En las ecuaciones de la elevación de la pluma el término *momentum* generalmente implica la velocidad del gas de la chimenea.

## **5. a. Verdadero**

En las ecuaciones de la elevación de la pluma los factores de flotabilidad siempre dependen de la diferencia entre la temperatura del gas de la chimenea y la del aire ambiental.

## **6. Arrastre**

### **Velocidad del viento**

El proceso en el que el aire atmosférico impulsado hacia el interior de la pluma se mezcla dentro esta se conoce como “arrastre”. La velocidad con la que se produce este proceso es directamente proporcional a la velocidad del viento.

## **7. b. Plumas más calientes que el aire ambiental**

Fórmulas de elevación de la pluma como las desarrolladas por Briggs se usan para las plumas más calientes que el aire ambiental.

## **8. Gausiana**

**Numérica**

**Estadística**

**Física**

Los cuatro tipos de modelos de calidad del aire son: gaussiano, numérico, estadístico y físico.

9. c.

$$c = \frac{Q}{2p s_y s_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{s_y}\right)^2} \left[ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{s_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{s_z}\right)^2} \right]$$

La ecuación anterior es la ecuación gaussiana, que sirve para estimar las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo en una distancia de 50 km a partir de la fuente.

10. a. **La fuente emite contaminantes constantemente**

Una de las condiciones de la distribución gaussiana es que la fuente emita contaminantes constantemente.

11. b. **Las desviaciones estándar de la concentración de contaminantes en las direcciones horizontal y vertical**

El sigma y ( $\sigma_y$ ) y el sigma 2 ( $\sigma_z$ ), usados en las fórmulas de dispersión gaussiana, se definen como desviaciones estándar de la concentración de contaminantes en las direcciones horizontal y vertical respectivamente.

12. b. **A-B-C**

Las categorías de estabilidad Pasquill-Gifford A-B-C representan condiciones atmosféricas estables.

13. c. **D**

La categoría de estabilidad D de Pasquill-Gifford representa condiciones atmosféricas neutras.

14. a. **E-F**

Las categorías de estabilidad E-F de Pasquill-Gifford representan condiciones atmosféricas estables.

15. **Modelo de sondeo**  
**Modelo refinado**

El modelo del nivel de sondeo y el refinado son dos niveles en el análisis de modelos de la calidad del aire.

16. **d. Sólo b y c.**

El transporte de largo alcance de contaminantes:

- Puede estar influenciado por modelos climáticos de gran escala, la luz solar y la precipitación
  - Se analiza a través de técnicas computarizadas para estudiar trayectorias
17. El modelo en el nivel del sondeo es el primer paso y el modelado refinado el segundo en los análisis de modelado. El primero emplea técnicas de estimación relativamente simples y suposiciones que tienden a sobreestimar las concentraciones de contaminantes. Los resultados de los modelos de sondeo pueden indicar si el modelo refinado requiere o no técnicas más complejas.
18. El flujo descendente de la chimenea se produce cuando la pluma cae a sotavento detrás de la chimenea. Esto puede suceder cuando la velocidad de salida de la chimenea es pequeña en relación con la del viento. Las concentraciones elevadas de contaminación se pueden producir inmediatamente a sotavento de la fuente.
19. El flujo descendente aerodinámico o del edificio se puede producir cuando chimeneas bajas se encuentran cerca de edificios. La pluma puede ser impulsada hacia abajo en el área turbulenta de la estela formada por acción del movimiento del aire sobre y alrededor de los edificios. Las concentraciones elevadas de contaminación se pueden producir inmediatamente a sotavento de la fuente.

# ***Bibliografía***

Drake, R.L. y otros, 1979. *Mathematical Models for Atmospheric Pollutants*. EA-1131.  
Preparado para Electric Power Research Institute.

Hanna, S.R. y otros, 1982. *Handbook on Atmospheric Diffusion* (pp. 2-4). DOE/tic-11223.  
U.S. Department of Energy.

Pasquill, F. y otros, 1983. *Atmospheric Diffusion*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Turner, D.B., 1970. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. U.S. Environmental  
Protection Agency (Office of Air Programs).

U.S. Environmental Protection Agency. Guideline on Air Quality Models (revisado). En  
*Code of Federal Regulations – Protection of the Environment*. 40 CFR 51 Appendix W.  
Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.