

Chapter Title: DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

Book Title: Introducción a la contaminación atmosférica

Book Author(s): Héctor Torquera González

Published by: Ediciones UC

Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1bhkqvz.8>

JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content in a trusted digital archive. We use information technology and tools to increase productivity and facilitate new forms of scholarship. For more information about JSTOR, please contact support@jstor.org.

Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use, available at <https://about.jstor.org/terms>



Ediciones UC is collaborating with JSTOR to digitize, preserve and extend access to *Introducción a la contaminación atmosférica*

JSTOR

Capítulo 5

Dispersión de contaminantes en la atmósfera

DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

5.1 Introducción

La legislación ambiental exige explícitamente que todos los proyectos que sean sometidos a evaluación de impacto ambiental (EIA) y cuyas emisiones a la atmósfera sean significativas, deberán aplicar “modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos” que sean capaces de “representar las variaciones espaciales y temporales” de los impactos en calidad del aire del proyecto en estudio. Además, se requiere que se “determine el punto de máximo impacto ambiental” y que se verifique que el proyecto evaluado no sobrepase la normativa ambiental vigente en dicha ubicación, al considerar la situación actual y la situación “con proyecto”. En resumen, se trata de un enfoque preventivo, aplicable a los proyectos que involucran grandes emisiones a la atmósfera, tales como centrales termoeléctricas a carbón, refinerías de cobre, fábricas de cemento, plantas siderúrgicas, etcétera.

Este capítulo tiene por objetivo explicar en qué consiste el fenómeno de dispersión de contaminantes en la atmósfera, de qué manera se puede representar aproximadamente mediante modelos de dispersión con diversos grados de complejidad, y cómo se puede decidir qué modelos son más apropiados para cada situación que se pueda dar en un estudio de impacto ambiental. Se incluye algunos ejemplos de cálculo sencillos para entender cómo operan los modelos más simples.

La atmósfera contiene una mezcla de gases y partículas sólidas que varían en tamaño desde menos de una milésima de milímetro hasta un milímetro o más (Tabla 5.1).

TABLA 5.1
Composición química de los primeros 100 km de la atmósfera. Fuente: Jacobson (2005)

Gas	% en volumen	ppmv
Composición fija		
Nitrógeno (N2)	78,08	780.000
Oxígeno (O2)	20,95	209.500
Argón (Ar)	0,93	9.300
Neón (Ne)	0,0015	15
Helio (He)	0,0005	5
Kriptón (Kr)	0,0001	1
Xenón (Xe)	0,000005	0,05
Composición variable		
Vapor de agua (H2O)	0,00001-4,0	0,1-40.000
Dióxido de carbono (CO2)	0,0375	375
Metano (CH4)	0,00017	1,7
Ozono (O3)	0,000003-0,001	0,03-10

Esta mezcla se modifica a través de un cambio continuo y dinámico, en el cual grandes cantidades de materiales son añadidas a la atmósfera mediante numerosos procesos naturales y humanos que constituyen las emisiones atmosféricas ya discutidas en el curso (Capítulo 1).

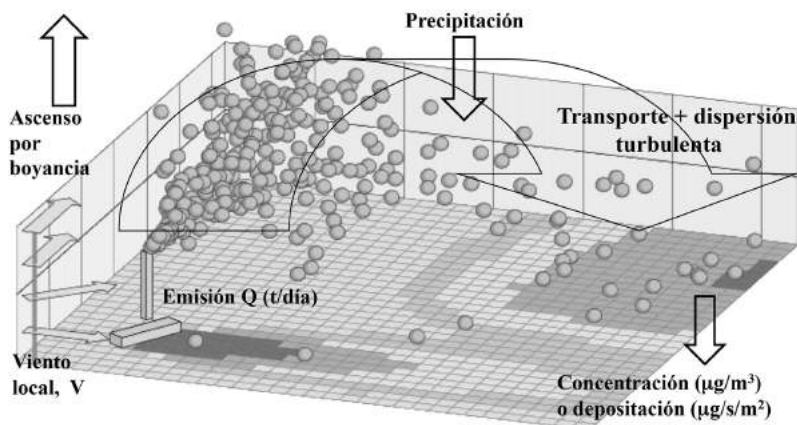
Al mismo tiempo, los contaminantes son removidos de la atmósfera a través de procesos de depositación, tales como sedimentación gravitacional, interacciones con objetos superficiales como plantas y edificios, o lavado por acción de la lluvia (**Figura 5.1**). Estos procesos fueron modelados explícitamente en el caso del material particulado, cuando se mostró cómo construir un modelo aproximado de la relación emisión-concentración para el material particulado (Capítulo 3).

La contaminación atmosférica se preocupa de estimar el destino de aquellos contaminantes una vez que han sido emitidos, y considera casos como emisiones naturales, industriales y accidentales. En esta parte del curso nos enfocaremos en la estimación de impactos asociados a las emisiones industriales, pero la metodología es igualmente aplicable a cualquier tipo de emisión a la atmósfera.

El objetivo de este capítulo es entregar herramientas que nos permitan estimar la variabilidad espacial y temporal que poseen los impactos a la calidad

FIGURA 5.1

Representación gráfica del proceso de dispersión atmosférica



del aire causados por fuentes emisoras importantes. Para poder hacer esto vamos a tener que conocer la variabilidad temporal de las emisiones, su localización geográfica, así como una descripción más detallada de la meteorología, que incluya aspectos tales como la turbulencia atmosférica.

El resultado final consiste en estimar impactos locales, los cuales pueden ser significativos y afectar a una parte importante de la población cercana a zonas con altas emisiones. Sin embargo, y debido a la complejidad asociada, no consideraremos la presencia de reacciones químicas entre los distintos contaminantes.

Puesto que la mayoría de los contaminantes se emite muy cerca de la superficie de la tierra, el comportamiento de la capa límite planetaria controla el transporte y dispersión de los contaminantes, determinando las concentraciones resultantes (Lyons y Scott, 1990).

5.2 Estructura vertical de la tropósfera

Como se ha visto anteriormente, la atmósfera se caracteriza por tener movimientos a distintas escalas temporales y espaciales (macroescala, mesoescala y microescala, Capítulo 4). La interacción de todos estos movimientos genera un campo vectorial de vientos (3D) que varía en el tiempo, sin alcanzar jamás un estado estacionario. Este movimiento se caracteriza por poseer turbulencia, esto es, movimientos irregulares e intermitentes del campo de vientos que se

traducen en intercambios de masas de aire en direcciones perpendiculares a la del flujo principal del aire. Estos movimientos irregulares son causados por la naturaleza caótica de las ecuaciones de movimiento de la atmósfera (Lorenz, 1963), es decir, para cualquier diferencia (por infinitesimal que sea) de condiciones iniciales de velocidad, presión, etcétera, las trayectorias de dos partículas de aire difieren exponencialmente en el tiempo, lo que es la característica típica del caos.

Consideremos el caso de aire que sopla sobre una superficie: las partículas de fluido cercanas a la superficie son frenadas por esta, la cual se comporta como un sumidero de momentum (es decir, sobre la superficie la velocidad relativa del viento es cero). Esto provoca un perfil vertical de la velocidad del viento, de modo que a medida que nos alejamos de la superficie, la fricción disminuye y eventualmente se alcanzan las condiciones de viento geostrófico. Para caracterizar la zona de la tropósfera más cercana al suelo, se han definido varias componentes o capas en ella, las que se describen a continuación (**ver Figura 5.2**), y que se basan en la estabilidad de cada zona, descrita por el gradiente $d\theta_v/dz$.

5.2.1 La subcapa viscosa (*viscous sublayer*)

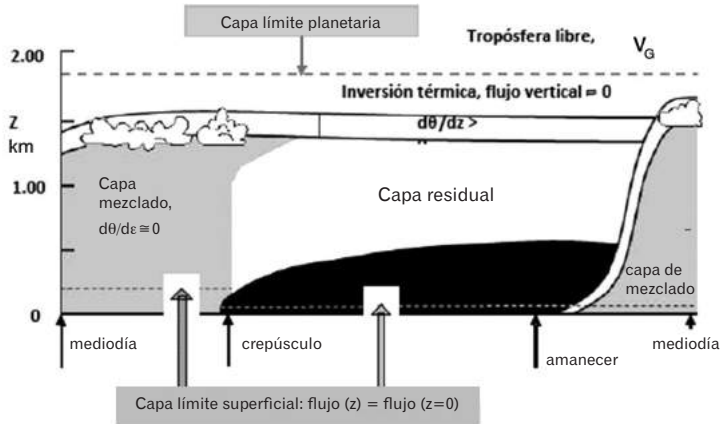
Esta capa se extiende solo unas décimas de micrón por sobre la superficie (sólida o líquida), incluyendo agua, tierra, vegetación, viviendas, etcétera. La transferencia de masa, calor y momentum ocurren por mecanismos moleculares (por ejemplo, ingreso de gases en tejidos vegetales, evaporación de humedad desde un suelo no saturado, reacción de un contaminante al contactarse con una superficie sólida o líquida). Estos mecanismos de transporte son lentos (relativos a la transferencia turbulenta); por lo tanto, esta capa presenta una alta resistencia al intercambio de gases y partículas entre la atmósfera y la superficie de la tierra.

5.2.2 La capa límite superficial (*surface boundary layer*)

Esta capa se extiende hasta aproximadamente unos 100 metros de altura en condiciones diurnas, pero puede ser tan baja como unos pocos metros durante inversiones nocturnas de temperatura. En el caso de terreno plano, los flujos verticales de masa, calor y momentum se asumen constantes en esta capa (es una manera indirecta de definirla). Así por ejemplo, se supone que los flujos de calor sensible (H) y de humedad (λE) son independientes de la altura

sobre el suelo. Además, se considera que la dirección del viento no cambia con la altura, estando dominada por el balance de fuerzas cerca del suelo, donde la fuerza de fricción es máxima.

FIGURA 5.2
Esquema de las zonas que componen la capa límite planetaria



5.2.3 La capa límite planetaria (*planetary boundary layer*)

Esta capa, que incluye a las dos anteriores, tiene un espesor que es del orden de 1.000-2.000 m durante el día, pero puede ser tan delgada como 100 m o menos durante las inversiones nocturnas, especialmente en invierno y/o antes del amanecer; cuando llueve se considera que llega hasta el borde inferior de la cobertura de nubes.

Dentro de esta capa, es necesario considerar el efecto de la fuerza de Coriolis, con lo cual la dirección del viento cambia con la altura (efecto de cizalle o *wind shear*), ya que se produce una reducción considerable de la fuerza de roce, que disminuye desde un valor máximo a nivel del suelo hasta prácticamente cero al tope de la capa límite planetaria. Es decir, en el tope de la capa límite planetaria se puede suponer que el viento está determinado por la ecuación del viento geostrófico (4.17).

5.2.4 La capa superficial de mezclado (*mixing layer*)

Esta es la capa en la cual ocurre el mezclado turbulento de los contaminantes. Esta capa puede desaparecer en condiciones nocturnas de enfriamiento

radiativo (atmósfera estable y estratificada), pero en condiciones diurnas y alta insolación se puede extender hasta 4 km de altura en zonas áridas. El tope de esta capa se denomina la *altura de mezclado*, y su máximo valor diario ocurre en las tardes (ver **Figura 4.17**).

Durante el día, esta capa se suele llamar también la capa límite convectiva (*convective boundary layer*), ya que en esas condiciones la capa de mezclado crece al recibir el flujo de calor sensible H , el cual determina el máximo valor de altura que se alcanza cada día, y que a su vez depende de características locales, tales como nubosidad, ángulo de elevación solar, humedad del suelo y perfil de temperatura al amanecer. En el caso del período nocturno, puede haber suficiente viento para generar turbulencia en forma mecánica, de manera que se mantiene una capa de mezclado superficial por las noches.

5.2.5 ¿Cómo caracterizar la capa límite planetaria?

Es claro que es necesario conocer cómo se mueve el aire en esta capa, ya que aquí es donde se presenta la dispersión de la mayoría de las emisiones atmosféricas. Sin embargo, la estructura de esta capa límite es tremendamente compleja (Holton, 1992). La variabilidad en las características superficiales (rugosidad, albedo, humedad, uso, etcétera) y en la atmósfera misma (humedad, nubosidad, precipitación) produce una infinidad de condiciones de borde. Como las soluciones de las ecuaciones dinámicas involucradas (Continuidad, Navier Stokes y Energía para p , T y V) dependen de dichas condiciones de borde, esto implica diferentes soluciones para cada día, por ejemplo.

5.3 Conservación de masa en condiciones turbulentas

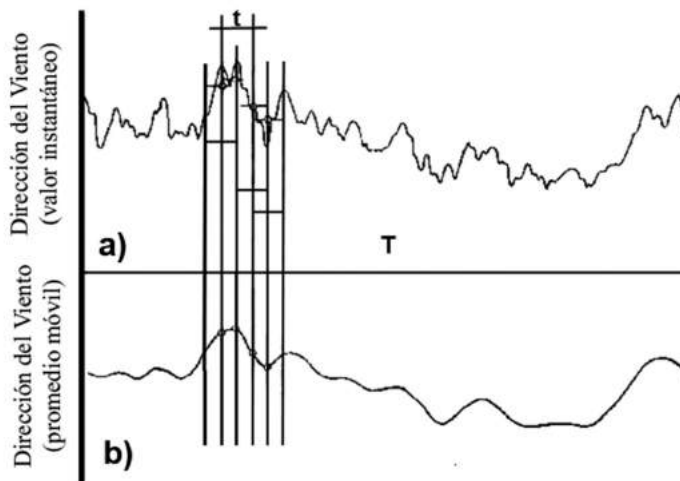
5.3.1 Características de la turbulencia atmosférica

La turbulencia en la atmósfera (al igual que en el caso de los líquidos) es un fenómeno complejo, el cual requiere ser descrito en forma estadística, debido a la naturaleza estocástica del fenómeno. La **Figura 5.3** muestra un registro de mediciones de la dirección del viento en un punto fijo en el espacio. Es característico que los datos tomados cada un minuto (por ejemplo) muestren gran variabilidad, es decir, el valor medido en el intervalo i no es un buen predictor de lo que pasará en el intervalo ' $i + 1$ '. Esto se hace más notorio al considerar mediciones cada 1 segundo, por ejemplo.

La situación graficada en el panel superior de la **Figura 5.3** mejora si tomamos por ejemplo, una media móvil de 60 minutos y conseguimos una curva suavizada, lo que equivale a aplicarle un filtro a los datos. Ahora se obtiene una curva que es más simple de analizar, pero al costo de usar la velocidad promedio ($\langle \vec{V} \rangle$) y no la velocidad instantánea \vec{V} , la cual no es predecible. Las mediciones del viento permiten constatar las siguientes características de la turbulencia:

FIGURA 5.3

Un registro instantáneo de (a) la dirección del viento y (b) su promedio móvil. El promedio móvil se calcula sobre un intervalo t , siendo T el período total de muestreo



- La velocidad horizontal posee variabilidad en dirección (σ_θ), y en magnitud: $(\sigma_{vel})^2 = (\sigma_u)^2 + (\sigma_v)^2$
- La magnitud σ_{vel} es comparable al promedio de la magnitud del viento horizontal.
- El viento vertical (w) es de magnitud muy pequeña, pero σ_w es comparable a σ_u y σ_v
- $(\sigma_u)^2 \approx (\sigma_v)^2 \approx (\sigma_w)^2$ (hipótesis de la turbulencia isotrópica).
- La energía cinética de la turbulencia se define como la suma $ECT = (\sigma_u)^2 + (\sigma_v)^2 + (\sigma_w)^2$
- La ECT es generada de manera térmica (radiación incidente) y de manera mecánica (acción del viento).

Luego, el síntoma característico de la turbulencia es que las componentes del viento son aleatorias, y por lo tanto no son predecibles.

Desde el punto de vista de la dispersión de los contaminantes, nos interesa saber cómo cambia en el tiempo la concentración de un compuesto químico de interés, al ser transportado por el campo de vientos. Si aplicamos el principio de conservación de masa a un determinado volumen de control, llegamos a la siguiente ecuación fundamental (Seinfeld y Pandis, 2006, Capítulo 18).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c\vec{V}) + R - S \quad \text{Ecuación 5.1}$$

En donde c es la concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]; \vec{V} , el vector velocidad del viento [m/s]; R representa todos los procesos de generación química neta en el volumen de control, [$\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{s}$]; y S todos los posibles sumideros (transformación química, depositación húmeda o seca), en [$\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{s}$]. Sin embargo, la ecuación (5.1) no es directamente aplicable en la práctica, dado que las componentes de la velocidad son variables aleatorias, debido a su naturaleza turbulenta. Luego, solo podemos resolver las variables como *cantidades promedio* sobre un elemento de volumen y en un intervalo temporal.

El análisis estándar consiste en descomponer todas las magnitudes que aparecen en la ecuación (5.1) en la siguiente forma (descomposición de Reynolds):

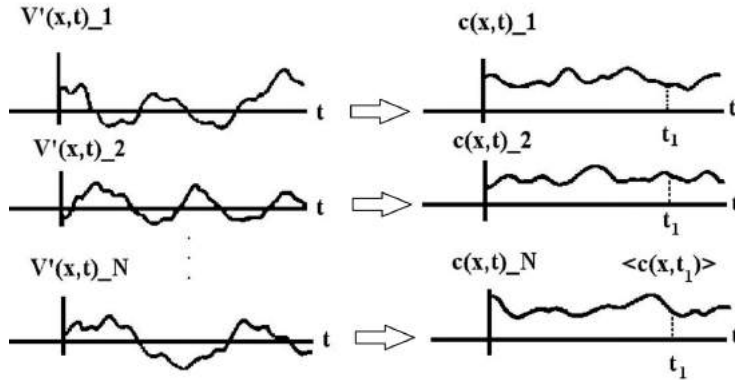
$$\begin{aligned} c &= \langle c \rangle + c' ; & \vec{V} &= \langle \vec{V} \rangle + \vec{V}' \\ R &= \langle R \rangle + R' ; & S &= \langle S \rangle + S' \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

En donde $\langle \dots \rangle$ representa un promedio en una escala de tiempo finita (como en el caso de una “media móvil”, por ejemplo) y el valor $(\dots)'$ representa una fluctuación instantánea respecto a dicha media. En el lenguaje de procesos estocásticos, $\langle f \rangle$ representa la tendencia de f obtenida mediante una ventana o filtro apropiado y f' representa la componente aleatoria de f , la cual cambia en el tiempo de acuerdo a alguna ley de probabilidad (Gaussiana, de Poisson, etcétera). Al introducir esta definición, la ecuación básica (5.1) queda como

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} = -\langle \vec{V} \rangle \cdot \nabla \langle c \rangle - \nabla \cdot \langle c' \vec{V}' \rangle + \langle R \rangle - \langle S \rangle \quad \text{Ecuación 5.3}$$

FIGURA 5.4

Ejemplos de posibles perturbaciones de la velocidad media en la posición x y las correspondientes concentraciones instantáneas $c(x, t)$ como funciones del tiempo



Es común en la literatura especializada que se omita destacar que se trabaja con promedios temporales, así que la notación utilizada puede diferir significativamente de la introducida en la ecuación (5.3).

Las mediciones del viento poseen una componente estocástica (o no resuelta) \vec{V}' que es *del mismo orden de magnitud* que $\langle \vec{V} \rangle$. Por lo tanto, el término $\langle c' \vec{V}' \rangle$ es importante, ya que corresponde al *transporte turbulento*, distinto del *transporte advectivo* dado por el primer término del lado derecho de (5.3). La componente aleatoria \vec{V}' se puede minimizar, pero nunca eliminarse por completo (Zannetti, 1990). Como \vec{V}' es una variable estocástica, existe una familia infinita de funciones \vec{V}' que satisfacen las ecuaciones de conservación. La **Figura 5.4** describe esta situación, y allí se muestra que cada miembro de la familia genera una concentración $c(x, t)$ diferente. En una cierta posición espacial y temporal, el promedio de todas las posibles realizaciones de \vec{V}' nos da el promedio teórico $\langle c(x, t) \rangle$.

Naturalmente, si pudiésemos medir \vec{V}' y $c(x, t)$ continuamente y en todas partes, podríamos evaluar qué realización de \vec{V}' ocurrió en cada caso. Puesto que no tenemos esta información, debemos asumir que todo \vec{V}' es teóricamente aceptable, lo cual nos lleva a estimar $\langle c \rangle$ y no c , como se pudiera presumir. Por lo tanto, *cualquiera* que sea el modelo de dispersión de contaminantes empleado, por completo y complejo que sea, el modelo solo puede estimar la concentración media o más probable en una cierta zona dada, donde se supone que se conocen las emisiones y la meteorología con suficiente confiabilidad. Esto se

conoce como la incertidumbre o error intrínseco de todo modelo de dispersión (Zannetti, 1990). En otras palabras, todos los modelos de dispersión resuelven en forma más o menos exacta una ecuación física aproximada.

El transporte por flujo turbulento es un término difícil de ser tratado, dado que corresponde a las correlaciones dinámicas entre las fluctuaciones en concentraciones y velocidad del viento⁴⁵. El tratamiento usual que se hace es de tipo paramétrico, es decir, se han buscado relaciones físicas “apropiadas” para manejar esta magnitud. La manera clásica de tratar este término ha sido el introducir coeficientes de dispersión turbulenta (o de remolino), por analogía con la difusión molecular:

$$\langle c'V_i' \rangle = -K_i \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial i} \quad i=x,y,z \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Esta analogía permite hacer uso de soluciones ya conocidas para problemas de difusión molecular, pero tiene el problema que no es una aproximación exacta (Venkatram, 1993; Pal Arya, 1999). Además, el mero cambio de notación no ha resuelto el problema: ahora necesitamos estimar cuantitativamente esos coeficientes. En particular, el que más interesa es el de dispersión en la dirección vertical (K_z), ya que normalmente las variaciones de concentraciones son mayores en la dirección vertical que en el plano horizontal, donde domina el transporte advectivo (excepto en el caso de atmósfera muy estable, con vientos débiles o calmas). Para aplicaciones sencillas (una fuente, contaminante inerte) es posible explotar más a fondo la analogía de la ecuación (5.4) con la ecuación de difusión clásica. Esto es lo que veremos en la siguiente sección.

5.4 La solución clásica para difusión y los modelos de dispersión gaussianos

Consideremos una chimenea que descarga una emisión constante a la atmósfera. Ubiquemos la descarga de la chimenea en el origen de un sistema de coordenadas cartesianas, de modo que la dirección del viento queda definida

⁴⁵ Hay anemómetros de respuesta rápida que permiten medir las fluctuaciones de la velocidad y de la concentración, y así medir los flujos turbulentos de humedad, de contaminantes que depositan, etcétera, por lo que esos términos no son cantidades misteriosas, sino perfectamente medibles. Sin embargo, esos equipos son costosos, por lo que no forman parte de redes de monitoreo meteorológico estándar.

por el eje x , la altura por el eje z , y la coordenada y representa la dirección horizontal perpendicular al viento.

Para una masa M de material descargada en el origen de coordenadas en $t = 0$ en forma instantánea, y que posteriormente difunde en todo el volumen de acuerdo a la ley de Fick, la concentración en toda posición y tiempo viene dada por la expresión (Crank, 1986; Cussler, 1984):

$$c(x,y,z,t) = \frac{M}{8(\pi Dt)^{3/2}} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Dt}\right\} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Y esto indica que los perfiles de concentración son normales respecto a las tres coordenadas espaciales. Este perfil se puede comparar con datos experimentales para ver qué tan válida es la ecuación (5.5). Tomemos por ejemplo, un viento de 15 km/h, un coeficiente de difusión $D = 0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$ y una distancia de 10 km viento abajo de la fuente. En tales circunstancias, la masa emitida en $t = 0$ ha requerido un tiempo de viaje de aproximadamente $10 \text{ km}/(15 \text{ km/h}) = 40$ minutos para recorrer dicha distancia. La ecuación (5.5) predice que la distancia o ancho típico de la curva gaussiana será de $l \approx \sqrt{4Dt}$, lo cual entrega el resultado $l = 30 \text{ cm}$, es decir, ¡3.000 veces menor que el ancho observado de 1 km! Este factor de 3.000 es un gran error, y la explicación para esta discrepancia es la turbulencia, ya que las fluctuaciones del viento hacen crecer el ancho del penacho más rápidamente que lo que se deduciría a partir de la teoría de difusión clásica (Cussler, 1984).

Consideremos la situación que se presenta en la Figura 5.5 (Zannetti, 1990). Si consideramos la concentración de contaminante en un punto (o receptor) x_0 , podemos observar (desde arriba) en un cierto momento que el penacho tiene la forma instantánea mostrada en la figura 5.5 a), la cual da origen al perfil instantáneo de concentración, en la dirección y perpendicular al viento, mostrado en 5.5 b). Si esperamos un tiempo prudente (una hora, por ejemplo), el penacho pasará a diferentes distancias y del receptor, lo cual origina una distribución de impactos instantáneos.

Debido a la naturaleza aleatoria de las fluctuaciones de la dirección horizontal del viento, la distribución media de las concentraciones a lo largo del eje 'y' se podrá describir mediante una distribución gaussiana, pero ahora es claro que el ancho de dicha distribución (o su desviación estándar) va a depender de cuán lejos esté la fuente y de las condiciones locales de estabilidad

de la atmósfera. La **Figura 5.6** muestra la representación clásica de un penacho gaussiano; notar que el eje x está alineado con la dirección media del viento en una hora dada, por lo que se trata de un eje móvil.

FIGURA 5.5

- a) Vista instantánea de un penacho;
 b) perfil instantáneo de concentraciones en la dirección perpendicular al flujo;
 c) perfil promedio de concentraciones para un período de una hora

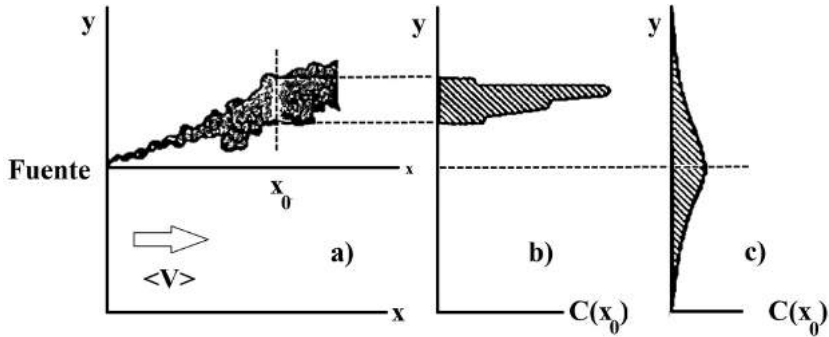
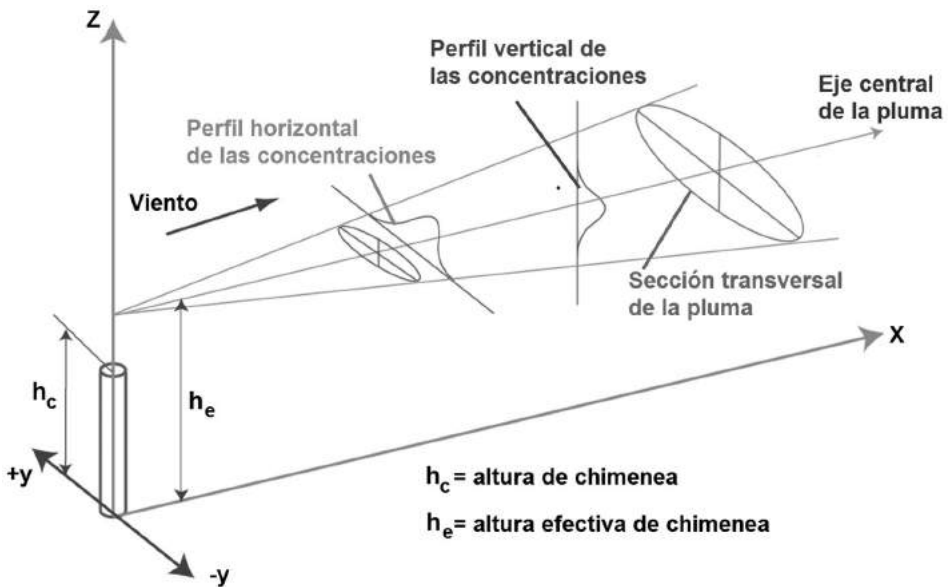


FIGURA 5.6

Sistema de coordenadas para describir el penacho de una chimenea usando la ecuación gaussiana



La **Figura 5.7** muestra la situación de dispersión de un penacho de una fuente puntual bajo distintas condiciones de estabilidad atmosférica. Se aprecia que la magnitud de la dispersión del penacho en la dirección vertical es la que más está afectada por las condiciones meteorológicas imperantes, y que la magnitud del penacho *siempre crece* a medida que nos alejamos de la fuente emisora. Las mejores condiciones de dispersión son aquellas en las cuales la temperatura disminuye con la altura sobre el suelo, de modo que $-dT_v/dz \geq \Gamma$, lo que promueve la mezcla vertical de contaminantes.

Recíprocamente, cuando hay una inversión térmica presente, la temperatura aumenta con la altura, lo que bloquea el movimiento vertical de las masas de aire (estratificación de la atmósfera, Capítulo 4), llevando a las peores condiciones de dispersión; esto puede ocurrir de día durante períodos de inversión por subsidencia, o bien de noche por enfriamiento radiativo del aire más cercano al suelo. En tales casos, la estabilidad atenúa las oscilaciones verticales del penacho, prácticamente suprimiéndolas en los casos más extremos.

Para aprovechar las soluciones analíticas que ya se conocen, como la ecuación (5.5), se toma la perspectiva *pseudoestacionaria*, en la cual se supone que el tiempo de viaje del penacho hasta llegar a la posición x viene dado por $x/\langle V \rangle$, donde $\langle V \rangle$ es la velocidad media del viento medida a la altura de la descarga de la chimenea.

Además, suponiendo que en la dirección x se puede despreciar la dispersión con respecto a la advección, se deduce que en condiciones turbulentas el penacho sigue siendo gaussiano, y la concentración queda descrita por la expresión

$$\langle c(x, y, z) \rangle = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z - h_e)^2}{\sigma_z^2} \right) \right\} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Donde h_e corresponde a una altura efectiva o de estabilización del penacho, determinada por el balance de la boyancia y momentum de la emisión.

El factor de normalización A se determina imponiendo que el flujo total de contaminante a través de un plano vertical perpendicular al movimiento del penacho es igual a la tasa de emisión de la fuente Q [$\mu\text{g/s}$], de modo que

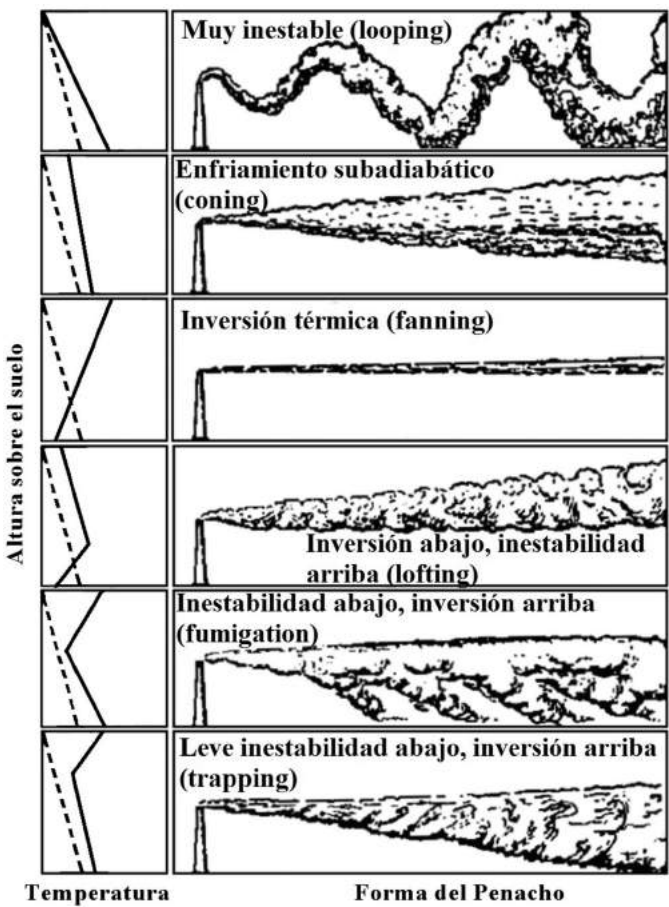
$$A = \frac{Q}{2\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Las desviaciones estándar σ_y y σ_z que aparecen en las anteriores expresiones (5.6) y (5.7) varían tanto con la distancia a la fuente como según las condiciones meteorológicas existentes.

Estas cantidades cuantifican como crece el volumen del penacho de las emisiones, diluyendo a los contaminantes que transporta a medida que aumenta la distancia viento abajo de la fuente emisora. Más adelante en la **Figura 5.9** y la **Tabla 5.3** se indica la forma de esas curvas, cuando se caracteriza la estabilidad de la atmósfera usando categorías discretas.

FIGURA 5.7

Dispersión vertical de emisiones puntuales continuas y su relación con los perfiles verticales de temperatura del aire. Las líneas segmentadas corresponden al perfil adiabático de temperatura en una atmósfera seca y en reposo: $T(z) = T_0 - \Gamma z$



A distancias tales que $2,15 \cdot \sigma_z$ es mayor o igual a la altura efectiva h_e del penacho, hay que considerar el efecto de la superficie del suelo ($z = 0$). En tal caso el penacho comienza a tocar el suelo (punto 1 en **Figura 5.8**) y hay que conocer cómo interactúa el contaminante con el suelo (condición de borde del problema). Si el contaminante no se absorbe en la superficie, la ecuación gaussiana queda como

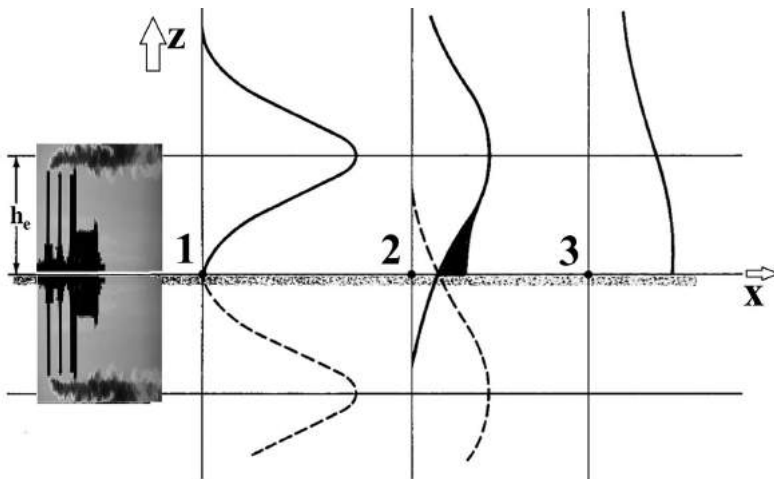
$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{Q}{2\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z - h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Ecuación 5.8

Lo cual corresponde a agregar una fuente virtual de la misma intensidad en $(0, 0, -h_e)$, tal como se muestra en la **Figura 5.8**. Esta condición de simetría impuesta por el suelo impermeable hace que el perfil satisfice $d\langle c(z) \rangle/dz = 0$ en $z = 0$. Esto hace que la concentración sea mayor que la dada por la ecuación (5.6) para $z = 0$, como se aprecia en los puntos 2 y 3 en la **Figura 5.8**.

FIGURA 5.8

Ejemplo de reflejo de un penacho real al tocar el suelo, obtenido añadiendo uno virtual (línea de segmentos), calculado mediante el método de las imágenes



Por otra parte, si la superficie es un absorbente perfecto, la ecuación gaussiana queda como

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{Q}{2\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) - \exp\left(-\frac{(z+h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Ecuación 5.9

Y en tal caso la concentración es menor que la dada por la ecuación (5.6) a nivel del suelo, ya que es cero allí, pero alcanza un máximo para $z > 0$.

Este tipo de modelos gaussianos es simple de usar, ya que ellos utilizan información meteorológica y de la fuente emisora que son sencillas de obtener. Esto los ha convertido en los modelos preferidos para hacer evaluaciones de impacto ambiental desde 1970. No obstante, estos modelos gaussianos no son apropiados cuando existen reacciones químicas o depositación de masa; en estos casos lejos de la fuente el penacho *no se puede aproximar* como una gaussiana. Esta misma limitación se presenta para la dispersión de gases densos (ejemplo: derrames de líquidos volátiles) o material particulado por sobre 10-20 micrones, en donde no se puede despreciar el efecto de la gravedad.

Las desviaciones estándar σ_y y σ_z constituyen la información clave para poder estimar concentraciones con ayuda de los modelos gaussianos. Esto se hace de acuerdo a un esquema desarrollado por Pasquill, en 1961, y modificado por Gifford (1961) y Turner (1970); el esquema se basa en el ajuste de un conjunto de experimentos de dispersión hechos con emisiones controladas, y está analizado en detalle por Venkatram (1996) y Pal Arya (1999). De acuerdo a condiciones de estabilidad atmosférica, dadas la velocidad del viento y la insolación, se establecen clases *discretas* de estabilidad atmosférica, a cada una de las cuales les corresponde valores medidos y tabulados de σ_y y σ_z a distintas distancias viento abajo de la fuente.

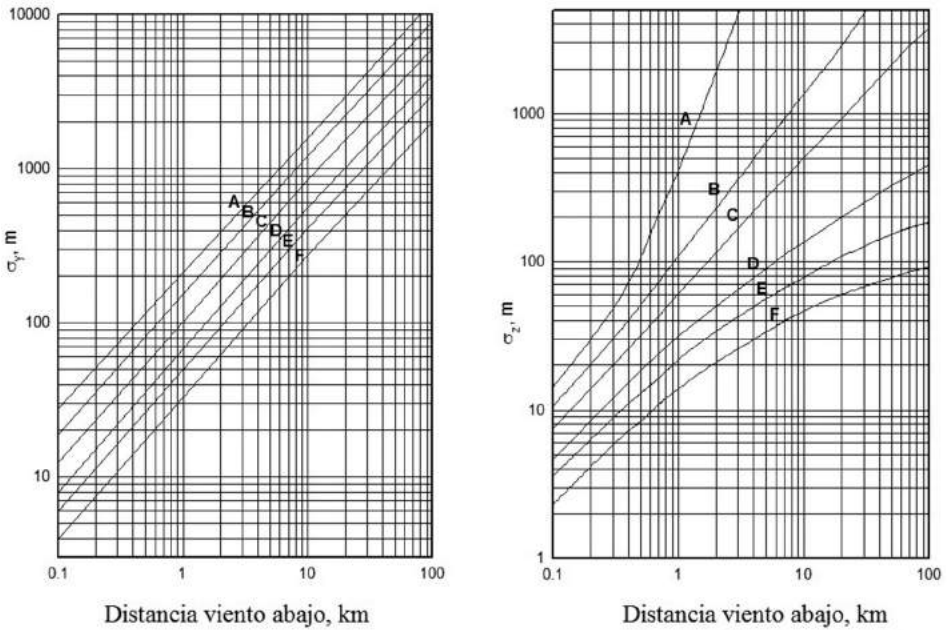
La **Figura 5.9** y la **Tabla 5.2** entregan la clasificación Pasquill-Gifford-Turner y ambas han sido construidas para promedios horarios de velocidad, nubosidad, etcétera. Notar que hay diferencias significativas entre ambas desviaciones estándar y que σ_z es mucho más sensible a la estabilidad atmosférica que σ_y . Ambas desviaciones estándar siempre crecen al aumentar la distancia a la fuente emisora, indicando la mayor o menor efectividad de la dispersión, según sean las condiciones de estabilidad dominantes. La **Tabla 5.3** entrega las expresiones estándar de las curvas de dispersión, en forma analítica.

TABLA 5.2
Clases de estabilidad definidas por Pasquill (1961)

Insolación y cobertura de nubes	Velocidad superficial del viento (m/s)				
	< 2	2 a < 3	3 a < 5	5 a < 6	> 6
Fuerte insolación diurna (*)	A	A-B	B	C	C
Moderada insolación diurna	A-B	B	B-C	C-D	D
Leve insolación diurna (#)	B	C	C	D	D
Día o noche nublada	D	D	D	D	D
Noche y cobertura de nubes ≥ 0,5	-	E	D	D	D
Noche y cobertura de nubes < 0,5	-	F	E	D	D

(*): Corresponde a ángulos de elevación solar de 60° o más. (#): Corresponde a elevaciones solares de 15 a 35°. Las condiciones no clasificadas corresponden a condiciones nocturnas con vientos muy débiles y ausencia de nubes, en las cuales se produce mucha oscilación de la dirección del viento, lo que añade incertidumbre a las predicciones de impactos ambientales. En todos los casos se supone que se trabaja con promedios horarios.

FIGURA 5.9
Curvas de dispersión dadas por el criterio de Pasquill-Gifford



La siguiente es una descripción de las seis clases de estabilidad atmosférica:

- Clase A: atmósfera muy inestable, con velocidades del viento menores a 3 m/s e insolación moderada a fuerte, cielos despejados.
- Clase B: atmósfera inestable, con insolación moderada a intensa, vientos entre 2 y 4 m/s, cielos despejados o levemente nublados.
- Clase C: atmósfera ligeramente inestable, insolación leve, velocidades de 2 a 5 m/s, cielos parcialmente nublados.
- Clase D: atmósfera neutral, corresponde típicamente a condiciones de nubosidad predominante, a veces en combinación con vientos superficiales intensos, mayores a 5 m/s.
- Clase E: atmósfera estable, condiciones nocturnas con vientos débiles, menores a 3 m/s.
- Clase F: atmósfera muy estable, vientos muy débiles, menores a 2 m/s.

La siguiente tabla entrega las expresiones analíticas de las curvas graficadas en la **Figura 5.9**.

TABLA 5.3

Ecuaciones para las desviaciones estándar de acuerdo a la clasificación P-G-T.
La distancia x está en metros

Clase de estabilidad	Dispersión horizontal σ_y (m)	Dispersión vertical σ_z (m)
Caso de condiciones rurales		
A	$0,22x(1+x/10^4)^{-0,5}$	$0,20x$
B	$0,16x(1+x/10^4)^{-0,5}$	$0,12x$
C	$0,11x(1+x/10^4)^{-0,5}$	$0,08x(1+2x/10^4)^{-0,5}$
D	$0,08x(1+x/10^4)^{-0,5}$	$0,06x(1+1,5x/10^3)^{-0,5}$
E	$0,06x(1+x/10^4)^{-0,5}$	$0,03x(1+3x/10^4)^{-1}$
F	$0,04x(1+x/10^4)^{-0,5}$	$0,016x(1+3x/10^4)^{-1}$
Caso de condiciones urbanas		
A-B	$0,32x(1+4x/10^4)^{-0,5}$	$0,24x(1+x/10^3)^{0,5}$
C	$0,22x(1+4x/10^4)^{-0,5}$	$0,20x$
D	$0,16x(1+4x/10^4)^{-0,5}$	$0,14x(1+3x/10^4)^{-0,5}$
E-F	$0,11x(1+4x/10^4)^{-0,5}$	$0,08x(1+1,5x/10^3)^{-0,5}$

5.4.1 Hipótesis (restricciones) implícitas en la ecuación del penacho gaussiano

Aquí conviene explicitar las hipótesis que nos han llevado a derivar la ecuación de dispersión gaussiana, ya que es importante tenerlas presente, puesto que no siempre se van a cumplir todas simultáneamente. A continuación se detallan las suposiciones del modelo (Lyons y Scott, 1990):

- 1) La fuente emite en forma continua, o bien por períodos mayores que los tiempos de transporte desde la fuente hasta el receptor de interés, de modo que la dispersión en la dirección x se ignora. Si el tiempo de emisión es corto, hay que considerar ya no un penacho continuo, sino un conjunto de *puffs* (ejemplo: caso de la antorcha en una refinería de petróleo o un venteo en una planta de celulosa).
- 2) El material emitido es un gas estable químicamente o un aerosol de tamaño menor a 20 micrones, el cual permanece suspendido en el aire por bastante de tiempo (ejemplos: CO, $MP_{2.5}$).
- 3) Se asume, salvo excepciones, que las concentraciones poseen distribuciones gaussianas en las coordenadas y y z .
- 4) Se suponen condiciones estacionarias durante el período de modelación (una hora usualmente). Esto no se cumple en condiciones rápidamente cambiantes como la llegada de brisa marina, el desarrollo de la circulación valle-montaña o un frente de baja presión.
- 5) Cuando la velocidad es muy baja (períodos de calma), cercana a cero, el modelo no se puede aplicar (notar que en tal condición, la concentración modelada puede crecer por sobre la concentración en la emisión misma!).
- 6) No se considera el efecto de los gradientes (verticales y horizontales) del viento en la dispersión. Esta aproximación es adecuada a cortas distancias de la fuente, pero a largas distancias (10 km o más) los errores pueden ser significativos, ya que siempre se asume que el penacho es rectilíneo, independiente de la topografía o circulaciones locales.
- 7) Los parámetros de dispersión σ_y y σ_z se asumen independientes de z y son funciones solo de x (o sea, de $\langle V \rangle$). Sin embargo, la difusividad turbulenta K_z varía con la altura. Además, σ_y y σ_z también son afectadas por la rugosidad del terreno, de modo que se alteran cuando la pluma pasa por sobre un lago o alrededor de un obstáculo, por ejemplo.
- 8) Todas las cantidades que aparecen en la formulación gaussiana son promedios sobre los mismos intervalos de tiempo (una hora usualmente).

5.4.2 ¿Cómo se aplican los modelos gaussianos?

A pesar del gran número de hipótesis simplificadoras que conducen a la ecuación gaussiana y a las limitaciones inherentes de estos modelos, ellos todavía son útiles si se desea conocer la *distribución estadística* de las concentraciones en un determinado lugar, causadas por una determinada fuente y moduladas en intensidad por las condiciones meteorológicas predominantes. En tal caso se aplica el modelo para una serie de situaciones meteorológicas y se calculan promedios e intervalos de variación de las concentraciones sobre todo un dominio espacial y temporal.

Este tipo de modelos se basan en la ecuación gaussiana básica (5.8), a la cual se le incorporan modificaciones para tener en cuenta:

- Tipo de fuente: lineal, área, puntual, combinaciones, etcétera
- Estimación del ascenso efectivo h_e del penacho
- Efectos aerodinámicos de cercanía de estructuras de altura comparable a la de las fuentes
- Topografía alrededor de las fuentes
- Características del suelo
- Información meteorológica de superficie y en altura
- Características del contaminante estudiado
- Situaciones de convección natural

El uso correcto de cualquiera de estos modelos toma un cierto tiempo, ya que se deben conocer tanto sus limitaciones de uso como la adecuada interpretación de los resultados. A continuación se presentan varios ejemplos de aplicación de modelos de este tipo.

Ejemplo 5.1

Se emite dióxido de azufre a una tasa de 160 g/s desde una chimenea con una altura efectiva de 60 m. La velocidad del viento a la altura de la emisión es de 6 m/s, y la clase de estabilidad atmosférica es D, suponiendo un día nublado. Calcule la concentración máxima a nivel del suelo a una distancia de 500 m desde la chimenea, en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$.

De la **Figura 5.8** se encuentra, para 0,5 km de la fuente y estabilidad D, que las desviaciones estándar σ_y y σ_z toman los valores de 36 y 18,5 m, respectivamente. Para la máxima concentración en el suelo se hace $y = 0$. Considerando que el SO_2 no se absorbe en el suelo (estimación conservadora), de la ecuación (5.8) se obtiene:

$$\langle c(500,0,0) \rangle = \frac{Q}{\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left(-\frac{h_e^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] = \frac{160 \times 10^6}{\pi(6)(36)(18,5)} \exp \left[-0,5 \left(\frac{60}{18,5} \right)^2 \right] = 66 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Ejemplo 5.2

Para los datos del ejemplo anterior, estime la concentración en el suelo en un punto ubicado a 50 m de la línea de máximos impactos, en dirección perpendicular al viento.

Para considerar la dispersión lateral en la dirección horizontal, ahora es necesario considerar el factor exponencial con $y \neq 0$ en la expresión anterior, por lo tanto:

$$\langle c(500,50,0) \rangle = 66 \times \exp \left[-0,5 \left(\frac{50}{36} \right)^2 \right] = 23 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Luego, al aumentar y en 10% respecto a la distancia viento abajo, la concentración se redujo en 60%, lo cual indica que, para poder localizar correctamente los máximos impactos ambientales es fundamental contar con buenas estimaciones de la dirección del viento. Como esta variable meteorológica posee mucha variabilidad en su medición, esto significa incertidumbre en la localización de los máximos impactos ambientales asociados a una determinada fuente.

Ejemplo 5.3

Para los datos de los ejemplos anteriores, estime en forma aproximada el perfil de máximas concentraciones en el suelo y el máximo valor de las concentraciones a nivel del suelo. De la ecuación desarrollada en el ejemplo anterior se deduce que la línea de máximos impactos sobre el suelo viene dada por la expresión:

$$\langle c(x,0,0) \rangle = \frac{160 \times 10^6}{\pi(6)\sigma_y \sigma_z} \exp \left[-0,5 \left(\frac{60}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

La siguiente tabla resume los cálculos hechos utilizando la **Figura 5.8**. Note que el factor pre-exponencial disminuye rápidamente con la distancia x , debido al aumento monótono de σ_y y σ_z . El factor exponencial, por el contrario, aumenta rápidamente desde un valor pequeño hasta muy cerca de 1,0 a medida que x crece. Puesto que estos dos factores se multiplican, debe existir un

máximo de concentración a nivel del suelo, el cual en este ejemplo se estima en 700 [µg/m³].

TABLA 5.4
Solución numérica aproximada de la localización del máximo impacto ambiental

x(km)	σ_y	σ_z	$Q/(\pi <V> \sigma_y \sigma_z)$	$-0,5(h_e/\sigma_z)^2$	$\exp[...]$	$<c>, [\mu\text{g}/\text{m}^3]$
0,5	36	18	13.090	5,55	0,0039	50
0,8	60	27	5.240	2,47	0.085	445
1,0	76	32	3.490	1,76	0,172	600
1,5	110	45	1.710	0,89	0,411	700
1,7	140	50	1.210	0,72	0,487	590
2,0	160	55	960	0,595	0,552	530
3,0	220	71	540	0,357	0,700	380
5,0	350	100	240	0,180	0,835	200
10,0	620	150	90	0,080	0,923	83

Notar que el método se vuelve laborioso cuando también consideramos que la velocidad del viento y la estabilidad cambian durante el día. En tal caso, lo más probable es que hora a hora el punto de máximo impacto ambiental tienda a moverse. Una manera de estimar con más rapidez la ubicación de la condición más desfavorable de dispersión consiste en utilizar un modelo computacional.

Ejemplo 5.4

Cuando tenemos el caso de una emisión de línea, causada por las emisiones del tráfico de una carretera, por ejemplo, o bien una serie de industrias localizadas a lo largo de un borde costero o fluvial, la dispersión de contaminantes también se puede modelar utilizando el enfoque gaussiano. Para esto se considera que la emisión proviene desde una fuente lineal coincidente con el eje de coordenadas y (horizontal). En tal caso, si x es la dirección perpendicular a la carretera o línea de emisión, la concentración causada por el viento que sopla en forma perpendicular a la carretera viene dada por

Ecuación 5.10

$$<c(x,0,0)>= \frac{2q}{(2\pi)^{1/2} <V_{\perp}> \sigma_z} \exp\left[-0,5\left(\frac{h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \int_{L1}^{L2} \frac{\exp(-0,5p^2)dp}{\sqrt{2\pi}}$$

En donde $L1 = y_1/\sigma_y$ y $L2 = y_2/\sigma_y$ son los extremos (estandarizados) de la carretera o línea de emisión. La integral en el lado derecho corrige por efectos del tamaño finito de la línea de emisión. Si se aproxima que la línea es muy larga, la integral de $L1$ a $L2$ tiende a 1,0, cosa que se puede anticipar de antemano si se conocen los valores numéricos de $L1$ y $L2$.

En la ecuación anterior, q corresponde a la intensidad de la emisión por unidad de longitud; por ejemplo, en $[g\ s^{-1}\ m^{-1}]$. La desviación horizontal no aparece en el primer factor del lado derecho, puesto que no puede haber variabilidades a lo largo de la coordenada y . Por la misma razón esta coordenada no aparece en el factor exponencial. En la ecuación (5.10) se supone que $\langle V_{\perp} \rangle$ es la componente del viento perpendicular a la carretera o línea de emisión.

Como aplicación de esta ecuación, calculemos la concentración total de hidrocarburos en un punto ubicado a 100 m viento abajo de una carretera. La velocidad del viento es $\langle V_{\perp} \rangle = 4\ m/s$, el flujo de tráfico es de 8.000 vehículos por hora y la velocidad media de estos es de 50 km/h. La emisión media de cada vehículo en dichas condiciones es de 0,02 g/s.

Supongamos que se trata de una carretera muy larga; primero se calcula el número de vehículos por unidad de longitud como $8.000\ [veh/h] / 50.000\ [m/h] = 0,16\ [veh/m]$. Luego, el factor de emisión q está dado por: $q = 0,16\ [veh/m] * 0,02\ [g/(s\ veh)] = 0,0032\ [g/(s\ m)]$. Suponiendo clase de estabilidad C y 100 m de distancia de la fuente, de la **Figura 5.8** se encuentra que la dispersión vertical es $\sigma_z = 7\ m$. Asumiendo $h_e = 0$, la ecuación anterior nos entrega el valor:

$$\langle c(x,0,0) \rangle = 91,2 \frac{\mu g}{m^3}$$

En caso de que el viento no sople en forma perpendicular a la línea de emisión, o que estemos en una red de muchas calles, que consideremos la variabilidad de estabilidad atmosférica y de flujos vehiculares, que los arcos de tráfico tengan curvatura o haya pasos sobre o bajo nivel, etcétera, es mejor utilizar un procedimiento computacional como el implementado en el modelo CALINE3 (Benson, 1991; Bartolucci, 1996).

5.5 Modelos más avanzados que los gaussianos

Los modelos gaussianos se han popularizado mucho en las aplicaciones de estimaciones de impacto ambiental y en enfoques regulatorios, debido a la simplicidad de su formulación y a que requieren información meteorológica básica. Sin embargo, y como ya se ha visto en las secciones anteriores, estos modelos poseen una base científica que data de 1970 y, por lo tanto, no son herramientas actualizadas. En particular, hay dos problemas serios con los modelos gaussianos:

- 1) La hipótesis de viento uniforme hace que el penacho *siempre* se proyecte en forma rectilínea, lo cual es incorrecto cuando hay terreno de diferente altitud y/o presencia de cuerpos de agua en el dominio de interés. Estas características hacen que se produzcan circulaciones locales que distan mucho de ser representadas apropiadamente por un campo de vientos uniforme.
- 2) El modelo es incapaz de analizar el caso de los períodos de calmas (bajas velocidades del viento), ya que la ecuación diverge cuando la velocidad tiende a cero. Esta es una deficiencia grave, ya que los episodios críticos de contaminación (primaria o secundaria) casi siempre están asociados a situaciones de calmas o bajas velocidades del viento.

Para el caso del análisis de proyectos importantes, tales como planes de descontaminación de grandes zonas industriales y/o urbanas, es necesario ir más allá de la formulación gaussiana, ya que hay que considerar situaciones más realistas como que las emisiones descargadas en una cuenca afectan la calidad del aire en las cuencas vecinas, a través de la dinámica de la meteorología. Esto justifica el emplear modelos más avanzados, los cuales requieren mayor información meteorológica, características de la topografía, uso del suelo, incluyen más de una cuenca, etcétera. A continuación describiremos algunos de los modelos disponibles (ver tabla resumen al final de este capítulo).

5.5.1 Modelos de paquetes de aire

En general, los modelos de paquetes de aire o de *puffs* consideran la variación temporal de las emisiones, al representar la emisión de cada fuente puntual como un conjunto de paquetes de contaminantes (*puffs*), los cuales son transportados por el campo de vientos, se expanden al mezclarse con el aire que los rodea y en su interior se considera también las reacciones químicas

más importantes (ver figura siguiente). Estos modelos son aplicables a fuentes puntuales (principalmente) de cualquier tamaño. Entre los modelos disponibles, podemos citar: Hysplit, Stilt, Scipuff y Calpuff, que son aplicables a fuentes puntuales (principalmente) de cualquier tamaño.

FIGURA 5.10

Esquema de generación de puffs a partir de la fuente emisora.
Panel superior: caso de viento intenso; panel inferior: caso de viento débil



El modelo le sigue la pista a los distintos paquetes de contaminantes en su viaje por el dominio computacional, así que también se describe como un modelo de trayectorias. Se pueden modelar varios contaminantes en forma simultánea y las reacciones químicas también se incorporan de manera simplificada. Los algoritmos incluyen mecanismos de crecimiento del *puff* a lo largo de la trayectoria y también mecanismos de depositación seca y húmeda de contaminantes sobre la superficie del dominio modelado.

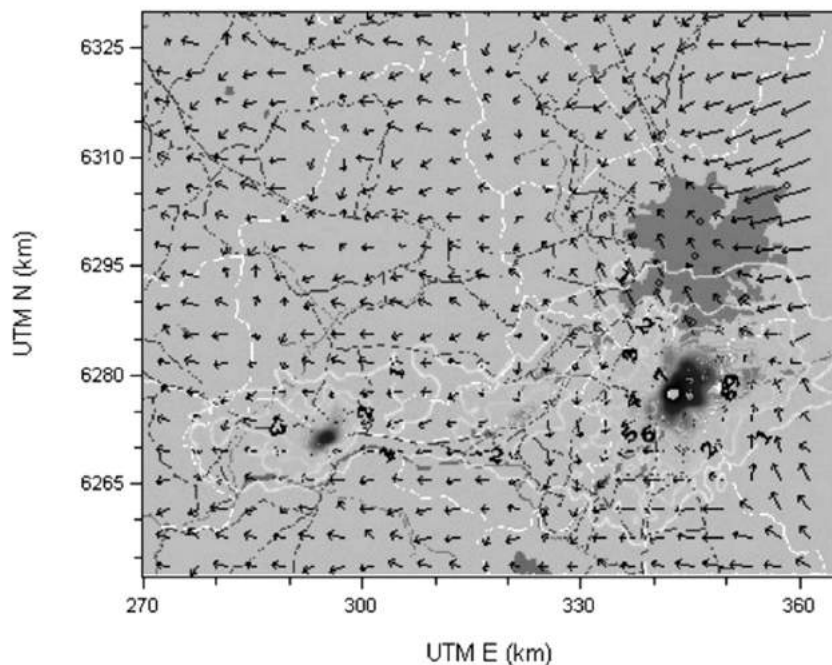
Estos modelos son particularmente superiores a los modelos gaussianos cuando se presentan situaciones de calmas (vientos muy débiles) o de recirculaciones del viento, lo que hace que se produzcan acumulaciones de contaminantes en algunas zonas, eventualmente produciéndose altos impactos localizados. Sin embargo, los modelos de *puffs* requieren información detallada de campos de vientos (y de alturas de mezclado), para lo cual se necesita disponer de datos de varias estaciones meteorológicas en forma simultánea, sobre todo si el terreno es complejo o hay cercanía de cuerpos de agua, o bien se pueden usar las salidas de modelos numéricos de pronóstico del tiempo que incluyen los campos de viento, temperatura, etcétera.

Como ejemplo, la siguiente figura muestra una simulación con los impactos de SO_2 (dióxido de azufre) asociados a tres grandes fuentes fijas ubicadas al sur del gran Santiago. Nótese que la forma de las isolíneas de concentración no sigue la forma estándar del penacho gaussiano, ya que incluyen procesos de recirculación del aire y acumulación de contaminantes que no se pueden representar con la formulación gaussiana.

FIGURA 5.11

Ejemplo de salida del modelo Calmet/Calpuff aplicado alrededor del Gran Santiago.

Se indican también los vectores de velocidad del viento y los impactos por SO_2 que se simularon para el invierno de 1998, usando los inventarios de emisiones correspondientes al año 2000. La figura comprende a una sola hora de simulación



5.5.2 Modelos de caja de Lagrange

Estos modelos consisten en una caja o masa de aire que es transportada por los campos de viento y en la cual se inyectan las emisiones que la caja recibe a lo largo de su trayectoria. Se debe disponer de meteorología detallada,

con alta resolución espacial y temporal (~ 1 km y ~ 1 h), la que normalmente se ha simulado en forma previa. Los modelos consideran usualmente reacciones químicas, depositación, múltiples contaminantes, etcétera, y requieren conocer el inventario de las emisiones a lo largo de la trayectoria, lo cual es más complejo que en el caso de una sola fuente emisora. Sin embargo, al ser transportada la caja por el viento, el término de transporte convectivo no aparece en la ecuación (5.1), lo que es una simplificación importante, pues el problema se reduce a integrar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (Pugh y otros, 2012).

5.5.3 Modelos de grilla de Euler

Estos modelos resuelven las ecuaciones de conservación de masa (5.1) para una o más especies en una grilla tridimensional fija en el espacio; son particularmente útiles para evaluar cómo las emisiones de una cuenca impactan a las cuencas vecinas, al considerar una región modelada que incluya las cuencas que se desea modelar para entender sus interacciones entre emisiones y concentraciones.

Estos modelos requieren inventarios de emisiones desagregados espacial y temporalmente sobre la grilla, condiciones iniciales y de borde para cada especie modelada y meteorología en tres dimensiones definida sobre los puntos de la grilla. La implementación del modelo es costosa en términos de recursos humanos y computacionales, y su uso se justifica en el caso de evaluar políticas de descontaminación a escala urbana y regional, tales como fotoquímica, aerosoles secundarios, visibilidad, etcétera.

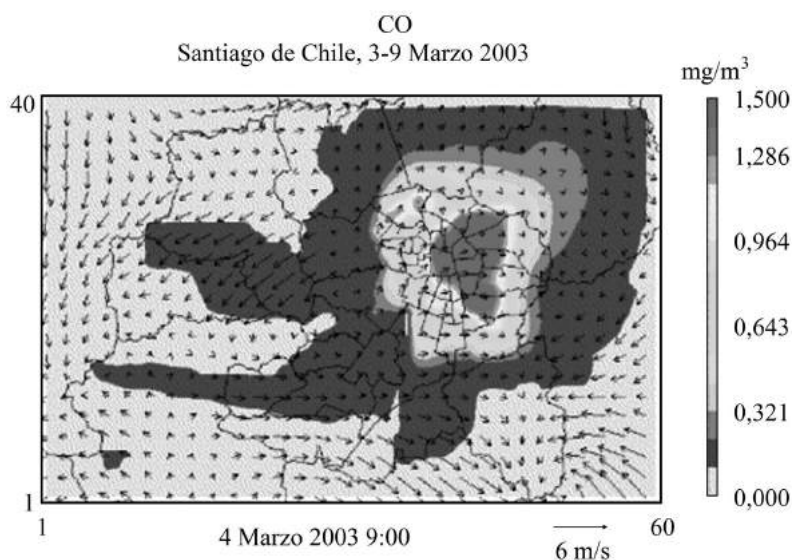
Entre los modelos que podemos citar, están WRF-Chem, Camx, Cmaq, Match, Stem, Airviro/Grid, entre otros. La mayoría de estos modelos son de dominio público y están accesibles a través de internet. Como ejemplo, la **Figura 5.12** muestra la simulación de la dispersión de emisiones de CO en Santiago, calculadas usando el modelo de dispersión Camx.

Los desarrollos modernos de los modelos de tipo euleriano consisten en “anidarlos” en modelos globales –desarrollados en principio para entender la dinámica y el transporte de contaminantes a gran escala o efectos del cambio climático–, los cuales entregan condiciones de borde de múltiples especies químicas y permiten así abordar problemas de escala regional como es el caso del ozono y el $\text{MP}_{2.5}$ mediante modelos como los citados al comienzo de esta sección. Esto es clave, porque las ecuaciones como (5.1) requieren de condiciones de borde e iniciales para poder ser resueltos numéricamente.

Otra aplicación que se ha popularizado es el pronóstico de calidad del aire, en que se combina el pronóstico numérico del tiempo a corto plazo (24 a 72 h) con un modelo de dispersión euleriano. De esta manera se puede mejorar un inventario de emisiones hasta conseguir un modelo operativo de pronóstico de calidad del aire. En la actualidad, la Dirección Meteorológica de Chile tiene un modelo de pronóstico del ozono operativo para Santiago, que se puede obtener desde el sitio web: <http://www.meteochile.gob.cl/modeloPOLYPHEMUSserie.html>.

FIGURA 5.12

Visualización de concentraciones de monóxido de carbono (CO) en la cuenca de Santiago, conjuntamente con vectores de vientos para las 9 AM del 4 de marzo, 2003



5.6 Resumen: ¿qué modelo de dispersión escojo?

Esta pregunta se debe hacer después de que se tiene claro qué es lo que se quiere modelar.

- Para EIA de proyectos en los cuales los contaminantes son primarios y no hay características de terreno muy complejo, un modelo gaussiano como Aermod es usualmente suficiente, siempre que se aplique con datos meteorológicos medidos en el mismo sitio donde se hace la modelación,

- y solo para contaminantes que no reaccionan y para distancias menores a 5 km del sitio de monitoreo meteorológico.
- Si las características del lugar indican problemas locales de recirculaciones y/o alta frecuencia de calmas (caso de un borde costero o un valle con mucho terreno complejo), con distancias a las fuentes emisoras mayores que 5 km, entonces un modelo de *puffs* entregará resultados más confiables, lo cual sugiere usar Calpuff, por ejemplo.
 - En general, los modelos avanzados de tipo lagrangeano o euleriano, solamente se justifican en un contexto de evaluación de planes de descontaminación o de impactos de grandes megafuentes, ya que los recursos requeridos para poder ejecutarlos son considerables, tal como se detalla en las tablas al final de este capítulo.
 - A menudo ocurre que las emisiones que se originan en una cuenca se dispersan hacia cuencas vecinas, transfiriendo impactos a distancias de cientos de kilómetros de las fuentes. Para estos casos se necesita aplicar modelos avanzados como los de tipo puff o euleriano para poder modelar esos fenómenos, con información meteorológica de buena calidad y alta resolución espacial y temporal, como se describe a continuación.

5.6.1 Información meteorológica necesaria

Para realizar una modelación de dispersión usando modelos gaussianos, se necesita información local de meteorología superficial, la que debe abarcar al menos un año continuo de datos horarios, de manera de incluir todas las posibles condiciones meteorológicas que se pueden dar en la zona modelada. La información debe ser analizada visualmente en forma de perfiles diarios de velocidad del viento, histogramas de la dirección del viento y rosas de los vientos, y estacionalidad anual de la meteorología, ya que es fundamental que esta información posea buena calidad. Por ejemplo, si hay un gran número de calmas del viento debido a una baja sensibilidad del anemómetro, esto complicará el resultado de la modelación porque los modelos gaussianos fallan en esos casos; si no hay información local de la nubosidad en la zona (cobertura de nubes, altura de la base de ellas)⁴⁶, esto impedirá que se realice una modelación confiable.

⁴⁶ Se puede obtener información de cobertura de nubes y altura de la base de ellas en los archivos Synop, disponibles por ejemplo en: <http://www.ogimet.com/synopsc.phtml> o bien en el resumen de datos globales superficiales de NCAR, disponibles en: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds461.0/>.

Si se necesita modelar con modelos más avanzados que los gaussianos, es necesario también disponer de información meteorológica en altura, la que puede ser obtenida a partir de radiosondeos cercanos, si es que ellos están disponibles⁴⁷, o bien emplear modelos del tiempo tales como MM5⁴⁸ o WRF⁴⁹. En estos casos es necesario analizar los datos en altura para revisar su estacionalidad (caso de radiosondeos) o bien evaluar la calidad de las modelaciones meteorológicas comparándolas con mediciones en altura hechas con globos radiosonda, globos cautivos, sondeadores acústicos o lidars (Muñoz y Alcañaz, 2012). Esto es necesario para estimar la incertidumbre en la meteorología que se ocupará posteriormente en la modelación de la dispersión de las emisiones. Esta tarea de modelar la meteorología es compleja, especialmente en dominios de modelación donde hay terreno heterogéneo, con grandes variaciones de elevación de terreno y/o presencia de características topográficas como cadenas montañosas, borde costero o presencia de lagos; para poder resolver adecuadamente estas características topográficas, se debe emplear alta resolución espacial (1 x 1 km) en esas modelaciones.

5.6.2 Listado de modelos disponibles

En esta sección nos interesa entregar recomendaciones con respecto a los modelos que se pueden emplear. En orden creciente de complejidad y de requerimientos de información y recursos humanos, el orden a seguir en la aplicación de modelos se presenta en la siguiente tabla.

⁴⁷ Por ejemplo, se pueden obtener los radiosondeos en la página web: <http://www.esrl.noaa.gov/raobs/>, o bien se pueden usar los datos del reanálisis de datos de NCAR: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/> calculados cada 6 horas con resolución de 1°.

⁴⁸ Disponible en la página web: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

⁴⁹ Disponible en la página web: <http://www.wrf-model.org/index.php>

TABLA 5.5

Resumen de modelos emisión-concentración, en orden creciente de complejidad

Modelo	Principio en que se basa	Requerimientos de información
Lineal	Regresión lineal empírica entre emisiones y concentraciones.	Emisiones agregadas y concentraciones medias, ambas en la misma base temporal (anuales normalmente).
Caja	Balance de masa simplificado en la zona de estudio. ⁵⁰	Emisiones agregadas y concentraciones medias, ambas en la misma base temporal (anuales normalmente). Además, se requiere disponer de datos locales de meteorología.
Gaussianos (Caline, Aermod).	Aproximación pseudoestacionaria a cada fuente individualizada.	Fuentes emisoras detalladas en ubicación espacial y patrones temporales de emisiones. Datos locales de meteorología superficial y de altura.
Receptor (CMB, Unmix, PMF)	Balance de masa aplicado a cada compuesto químico, medido en una campaña de mediciones repetidas en el tiempo, en una o más ubicaciones geográficas. ⁵¹	Se aplica generalmente al material particulado, con medición analítica de concentraciones de metales (AA, ICP, PIXE, XRF) en MP, de carbono orgánico y elemental y de otros contaminantes medidos simultáneamente. En el caso de los COV se emplea GC-MS, complementados con DOAS o cartuchos de adsorción para medir los COV en forma extensiva.
Modelos de Puffs (Calpuff, Scipuff)	Modelamiento detallado de las emisiones de fuentes fijas y areales utilizando paquetes de emisiones (<i>puffs</i>). ⁵²	Fuentes emisoras detalladas en ubicación espacial y patrones temporales de emisiones. Datos locales de meteorología superficial y de altura.
Modelos lagrangeanos (Hysplit, ⁵³ stilt) ⁵⁴	Se simulan las concentraciones en una caja transportada por el campo de vientos locales.	Modelamiento detallado de las trayectorias del viento, se requiere generalmente el uso de modelos meteorológicos avanzados para obtener campos de viento de buena precisión.
Fotoquímico fase gaseosa (WRF-Chem, CAMx, ⁵⁵ CMAQ) ⁵⁶	Resolución numérica de las ecuaciones de conservación para múltiples especies gaseosas, inorgánicas (CO, NO, NO ₂ , HNO ₃) y orgánicas (COV).	Inventarios de emisiones espacial y temporalmente desagregados, incluyendo composición química detallada de cada tipo de fuente. Se requiere utilizar software de procesamiento de inventarios de emisiones, e información de alta confiabilidad de factores de emisión de fuentes industriales y vehiculares.
Fotoquímico para gases y material particulado. (WRF-Chem, CAMx, CMAQ)	Ídem caso anterior, más simulación de aerosoles primarios y secundarios (orgánicos e inorgánicos).	También se debe contar con gran cantidad de datos de concentraciones ambientales en la ciudad y en su entorno (<i>background</i>), tanto de gases más abundantes como de especies traza. Las condiciones de borde se deben obtener de un modelo de mayor escala, es decir, modelos globales como Mozart, GEOS-Chem, etcétera.

⁵⁰ Ver por ejemplo el modelo de caja desarrollado por material particulado en el Capítulo 3.

⁵¹ Para más detalles, referirse a la sección de modelos de receptor del Capítulo 3.

⁵² Disponible en la página web: <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>

⁵³ Disponible en la página web: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

⁵⁴ Disponible en la página web: <http://stilt-model.org/pmwiki/pmwiki.php>

⁵⁵ Disponible en la página web: www.camx.com

⁵⁶ Disponible en la página web: www.cmaq-model.org

5.7 Referencias

- 1) Bartolucci S. (1996). *Efectos de fuentes móviles sobre la calidad del aire en torno a vías de transporte*, Memoria de Título de Ingeniero Civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- 2) Benson, P. E. (1991). "A review of the development and application of the CALINE3 and CALINE4 models", *Atmospheric Environment* 26B, N° 3, pp. 379-390.
- 3) Crank, J. (1986). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Oxford Science Publications.
- 4) Cussler, E.L. (1984). *Diffusion: Mass Transfer in fluid systems*. Nueva York: Cambridge University Press.
- 5) Dubernet, F. (1996). *Modelación de dispersión de contaminantes sobre topografía compleja*, Memoria de Título de Ingeniero Civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- 6) Fifield, P.J. y F.W. Haines. *Environmental Analytical Chemistry*. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1995.
- 7) Gallardo, L. (1994). *Modelación atmosférica con orientación a dispersión de contaminantes*, Apuntes de curso, Departamento de Geofísica, U. de Chile, Santiago, Chile, 13-16 junio 1994.
- 8) Griffiths, R.F. "Errors in the use of the Briggs parameterization for atmospheric dispersion coefficients". *Atmospheric Environment*, 28, N° 17 (1994), 2861-2865.
- 9) Holton, J.R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. San Diego, CA: Academic Press, 1992.
- 10) Lorenz, E.N. "Deterministic nonperiodic flow". *J Atmos Sci* 20 (1963), 130-141.
- 11) Lyons T.J. y W.D. Scott. *Principles of Air Pollution Meteorology*. Boca Raton, FL: CRC Press Inc., 1990.
- 12) Mohan, M. y T.A. Siddiqui. "Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification". *Atmospheric Environment* 32, N° 21 (1998), 3775-3781.
- 13) Muñoz, R. y R. Alcañiz. "Variability of Urban Aerosols over Santiago, Chile: Comparison of Surface PM10 Concentrations and Remote Sensing with Ceilometer and Lidar". *Aerosol and Air Quality Research* 12 (2012), 8-19.
- 14) Nieuwstadt, F.T. y otros. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modeling*. Dordrecht, Holanda: Reidel Publ. Co., 1982.

- 15) Pal Arya, B. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Boca Ratón, Florida: CRC Pub. Co., 1999.
- 16) Pugh, T.A.M., M. Cain, J. Methven, O. Wild, S.R. Arnold, E. Real, K.S. Law, K. M. Emmerson, S M. Owen, J.A. Pyle, C.N. Hewitt y A.R. MacKenzie. "A Lagrangian model of air-mass photochemistry and mixing using a trajectory ensemble: the Cambridge Tropospheric Trajectory model of Chemistry and Transport (CiTT y CAT) version 4.2". *Geosci Model Dev* 5 (2012), 193-221.
- 17) Smith, F.B. "The relation between Pasquill stability P and Kazanski-Monin stability ? (in neutral and unstable conditions)". *Atmospheric Environment* 13 (1979), 879-881.
- 18) Turner, B. "A Diffusion Model for an Urban Area". *J Applied Meteorology* 3 (1964), 83-91.
- 19) U.S. EPA. *Interim Procedures for Evaluating Air Quality Models: Experience with Implementation*. EPA-450/4-85-006. United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1985a.
- 20) U.S. EPA. *Summary of Complex Terrain Model Evaluation*. EPA/600/09, American Meteorological Society, Research Triangle Park, NC, 1985b.
- 21) U.S. EPA. *Guideline on Air Quality Models*. EPA-450/2-78-027R, United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1986.
- 22) Venkatram, A. "The parameterization of the vertical dispersion of a scalar in the atmospheric boundary layer". *Atmospheric Environment* 27A, N° 13 (1993), 1963-1966.
- 23) Venkatram, A. "An examination of the Pasquill-Gifford-Turner dispersion scheme". *Atmospheric Environment* 30, N° 8 (1996), pp. 1283-1290.
- 24) Wang, I.T. "Determination of transport wind speed in the Gaussian plume diffusion equation for low-lying point sources". *Atmospheric Environment* 30, N° 4 (1996), pp. 661-665.
- 25) Wark, K. y C.F. Warner. *Air Pollution, its Origin and Control*, 2nd ed. Nueva York: Harper & Row, 1981.
- 26) Wesely, M.L. "Parameterization of Surface Resistance to Gaseous Dry Deposition in Regional Scale Numerical Models". *Atmospheric Environment* 23, N° 6 (1989), 1293-1304.
- 27) Zannetti, P. *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

5.8 Problemas propuestos

- 1) Haga una representación gráfica de cómo se dispersa una emisión descargada a nivel del suelo (ejemplo, transporte urbano) para las diversas condiciones meteorológicas descritas en la **Figura 5.7**. ¿Hay una correlación entre la estabilidad atmosférica y los máximos impactos a nivel del suelo?
- 2) La mañana del 21 de marzo del 2011 llegó una “nube tóxica” a la escuela La Greda, ubicada aproximadamente a 2.000 metros de la fundición de cobre Codelco-Ventanas (ver siguiente figura), donde los síntomas respiratorios en los afectados fueron similares a la inhalación de SO_2 en concentraciones superiores a $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, de acuerdo a estudios de exposición controlada en humanos.



Las mayores emisiones de SO_2 en la zona provienen de la fundición de cobre Codelco-Ventanas y corresponden a la chimenea de la fundición y a la chimenea de la planta de ácido. Las características de las fuentes son:

- Chimenea: Emisión anual: 10.000 t, $h_e = 150$ m.
- Chimenea planta de ácidos: emisión anual: 2.000 t/año, $h_e = 30$ m.

Los datos disponibles indican que el viento soplaba esa mañana directamente desde la fundición hacia el sector de La Greda, y que la velocidad del viento era de 1,5 m/s. Un experto en meteorología indica que en

esas horas del día, la estabilidad atmosférica solo pudo ser clase C, D o E. Calcule el aporte de las dos chimeneas a las concentraciones en La Greda, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para las condiciones de estabilidad atmosférica C, D y E, asumiendo que la altura de mezclado es mucho mayor que las alturas de ambas chimeneas. La fórmula de dispersión de un penacho gaussiano, cuando no hay reflexión con la altura de mezclado (pero sí con el suelo) se puede expresar como:

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{Q}{2\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

- 3) Cuando la altura de mezclado h es comparable en orden de magnitud a la altura de emisión h_e de la fuente, hay que modificar la ecuación del penacho gaussiano para poder considerar esta condición de borde más realista al tope de la altura de mezcla ($z = h$). La concentración que resulta para una reflexión total en el suelo ($z = 0$) está dada por la ecuación

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi} \langle V \rangle \sigma_y h} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \cos\left(\frac{n\pi h}{h}\right) \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 \frac{\sigma_z^2}{2}\right] \right\}$$

Utilice esta expresión para estimar los impactos históricos (a nivel del suelo) causados por las emisiones de la antigua Central Renca, que emitía 1.700 toneladas de SO_2 al año, desde una chimenea con altura efectiva de 50 metros. Suponga condiciones de invierno, con un día nublado, una altura de inversión de 200 metros, una velocidad promedio del viento de 1 m/s, y distancias viento abajo de 1, 1,5 y 2 km desde la fuente. Comente sus resultados, comparándolos con la norma horaria de SO_2 más exigente, de 267 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, vigente en Japón.

NOTA: no es necesario calcular muchos términos de la sumatoria, ya que estos decaen rápidamente con el índice n en la exponencial.

- 4) En la industria de la celulosa Kraft se emplean compuestos sulfurados como catalizadores del proceso de digestión de la madera. Uno de tales compuestos es el metil mercaptano (CH_3SH), que posee un nivel de detección del olor igual a 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Este compuesto se presenta fundamentalmente en los riles que se envían a tratamiento; en estas condiciones se puede suponer que las emanaciones de CH_3SH consisten en una emisión

de línea. Calcule los máximos impactos ambientales viento abajo de una línea de conducción de riles de una planta de celulosa Kraft; suponer que la emisión de CH_3SH es de 150 t/año, que la línea de transporte de riles posee una longitud de 250 m, la velocidad del viento es de 1,5 m/s y que las condiciones de estabilidad son clase D. Haga sus cálculos para las siguientes distancias viento abajo de la línea de conducción de riles: 100 m; 500 m; 1.000 m y 3.000 m. ¿A qué distancia viento abajo se puede suponer que no se alcanza a detectar el mal olor?

- 5) Se propone instalar en una zona rural una planta de celulosa y papel. Las condiciones del proyecto son tales que se va a emitir 500 kg/día de H_2S , desde una chimenea. La comunidad más cercana se encuentra a 2 km de la planta, y en esa ubicación la concentración ambiental de H_2S no debe exceder los 30 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], para prevenir problemas de olores. Usted ha analizado las características del viento y ha detectado las siguientes condiciones en las cuales el viento sopla hacia el pueblo:
- $V = 5$ m/s, clase de estabilidad D
 - $V = 2$ m/s, clase de estabilidad E
 - $V = 3$ m/s, clase de estabilidad B

Usando esta información, calcule qué altura h_c debería tener la chimenea para prevenir problemas de olores en el pueblo. Explique claramente el desarrollo de su respuesta.

- 6) Cuando se considera la dispersión de material particulado, es necesario corregir la ecuación gaussiana original para tomar en cuenta la velocidad de depositación gravitacional de las partículas (U_D) y el hecho de que el suelo es un sumidero para las partículas. En tal caso, se ha propuesto la siguiente ecuación:

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{Q}{2\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - h_e + xU_D / \langle V \rangle}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

Utilice la expresión anterior para estimar los máximos impactos de las emisiones de la planta de pellet de CMP S.A. en el valle del Huasco. Las emisiones de la planta son de 4.600 t/año de material particulado. Considere un receptor ubicado a una distancia de 2,5 km de la chimena emisora, la cual tiene una altura equivalente de 40 m. Suponga condiciones

de estabilidad C y una velocidad media del viento de 2,5 m/s. Calcule la máxima concentración de PM_{10} en dicha ubicación. Calcule además la tasa de sedimentación total de material particulado en dicho receptor (es el producto de la concentración a nivel del suelo por la velocidad de sedimentación); exprese su resultado en $mg/m^2/día$ y compare con la norma establecida en el DS N° 4 del Ministerio de Agricultura, que es de $150 mg/m^2/día$. ¿Cuál de los dos problemas (concentración o depositación) es más serio y por qué?

NOTA: la norma de MP_{10} es de $150 \mu g/m^3$.

Para los parámetros de dispersión, considerar clase de estabilidad C y las ecuaciones de la Tabla 5.3; el terreno es rural. Se conocen los siguientes datos de la distribución de tamaños de partícula emitidos por la planta de Huasco:

Tamaño de partícula (μm)	Porcentaje en masa	Velocidad de depositación UD (m/s)
1	43,4	4×10^{-5}
2,5	26,2	2×10^{-4}
5	11,4	7×10^{-4}
10	12,7	3×10^{-3}
15	3,7	7×10^{-3}
20	2,6	1×10^{-2}

- 7) Una complicación que surge a menudo en los cálculos usando modelos gaussianos simples es cómo manejar de manera sencilla las inversiones térmicas. La siguiente metodología permite simplificar los cálculos:
- Calcular la altura x^* cuando la pluma alcanza la inversión térmica usando la expresión:

$$\sigma_z(x^*) = 0,47 \cdot (Z_i - h_e)$$

Donde Z_i es la altura de la inversión térmica y h_e la altura efectiva de la pluma.

- Luego se calculan las concentraciones de la siguiente forma:

- i) Para $x < x^*$ se asume la ecuación básica:

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{Q}{2\pi \langle V \rangle \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

- ii) Para $x > 2x^*$, se puede usar la expresión de mezclado vertical completo, con lo cual la concentración está dada por:

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \langle V \rangle \sigma_y Z_i} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

- iii) Para $x^* < x < 2x^*$, interpolar linealmente entre las concentraciones calculadas en x^* y $2x^*$ con las dos ecuaciones anteriores.

Calcule (y grafique) las concentraciones de SO_2 a nivel del suelo en función de la distancia x viento abajo de una central termoeléctrica que opera quemando carbón en una zona rural y que emite 24.000 toneladas/año de SO_2 , con $h_e = 150$ m. Asuma que la velocidad del viento es de 3 m/s, que la clase de estabilidad es E y que la altura de inversión es de 300 m sobre el suelo. Considere las siguientes distancias viento abajo de la fuente: desde 500 a 5.000 m, con intervalos de 500 m.

- 8) En febrero de 2004 entró en operaciones una planta de Celulosa en San José de la Mariquina, provincia de Valdivia, y desde entonces ha habido reclamos por malos olores por parte de vecinos de San José, Lanco, Máfil e incluso Valdivia. El mapa siguiente indica las localidades respectivas.



Considere que las emisiones de sustancias malolientes consisten principalmente de metil mercaptano (CH_3SH), el cual tiene un nivel de detección por las personas de solamente $10 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$. La planta produce 700.000 toneladas anuales de celulosa Kraft y emite 92 toneladas al año de CH_3SH (de acuerdo al EIA), con una altura efectiva de emisión (h_e) de 25 metros sobre el suelo.

Las condiciones más desfavorables de dispersión se producen desde el anochecer hasta la madrugada, con alturas de mezclado (h) del orden de 100 metros sobre el nivel del suelo, y velocidades de 1 m/s.

Cuando la altura de mezclado h comparable en orden de magnitud a la altura de emisión h_e de la fuente, hay que modificar la ecuación del penacho gaussiano para poder considerar esta condición de borde más realista al tope de la altura de mezcla ($z=h$). La concentración que resulta para una reflexión total en el suelo ($z = 0$) está dada por la ecuación

$$c(x, y, z) = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi} \sigma_y \sigma_z h} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \cos\left(\frac{n\pi h_e}{h}\right) \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 \frac{\sigma_z^2}{2}\right] \right\}$$

Evalúe los reclamos de los vecinos en cada caso.

