

77



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"ESTUDIO DE LA DISPERSION DE GASES EMITIDOS A LA ATMOSFERA POR FUENTES LINEALES Y MOVILES UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ARMANDO PEREZ DELGADO

DIRECTOR DE TESIS: ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ



MEXICO, D. F.

2000

282720



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/221/99

Señor
ARMANDO PEREZ DELGADO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

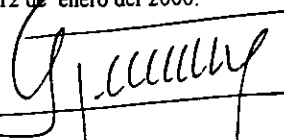
"ESTUDIO DE LA DISPERSION DE GASES EMITIDOS A LA ATMOSFERA POR FUENTES LINEALES Y MOVILES UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO"

- I. INTRODUCCION**
- II. GENERALIDADES DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA**
- III. FACTORES METEOROLOGICOS**
- IV. MODELO DE DISPERSION ATMOSFERICA**
- V. MODELO GAUSSIANO PARA FUENTES PUNTUALES, MOVILES Y LINEALES**
- VI. PROGRAMA DE COMPUTO PARA LA OBTENCION DE LA DISPERSION ATMOSFERICA DE GASES EMITIDOS POR FUENTES LINEALES Y MOVILES**
- VII. APLICACION DE LOS MODELOS EN LA INGENIERIA CIVIL**
- VIII. CONTROL DE PARTICULAS**
- IX. CONTROL DE GASES**
- X. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 12 de enero del 2000.
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/GMP/nll

A mis padres:

Armando Pérez Oropeza
Rosa Delgado de Pérez

*Cariñosamente comparto con ustedes
el presente trabajo, que es el resultado
de la confianza y apoyo me han
brindado siempre.*

Armando Pérez Delgado

INDICE

1 GENERALIDADES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

- 1.1 *Clasificación de los contaminantes atmosféricos.*
- 1.2 *Características y efectos de los principales contaminantes atmosféricos.*
- 1.3 *Legislación para prevención y control de la contaminación del aire.*

2 FACTORES METEOROLÓGICOS

- 2.1 *Radiación solar.*
- 2.2 *Circulación del viento.*
- 2.3 *Condiciones de estabilidad atmosférica.*
- 2.4 *Perfil de la velocidad del viento.*
- 2.5 *Turbulencia.*
- 2.6 *Características de los tipos de plumas de emisión.*

3 MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

- 3.1 *Modelos de difusión turbulenta.*
- 3.2 *Modelo Gaussiano.*
- 3.3 *Modelo estadístico de dispersión.*
- 3.4 *Modelo de caja.*
- 3.5 *Modelo de Gifford-Hanna.*
- 3.6 *Modelo de Levy-Cárdenas.*
- 3.7 *Modelo de Lamb-Levy-Burkle.*

4 MODELO GAUSSIANO PARA FUENTES PUNTALES, MÓVILES Y LINEALES

- 4.1.0 *Deducción matemática del modelo.*
 - 4.1.1 *Deducción de la ecuación tipo Gaussiano de dispersión*
 - 4.1.2 *Estimado de las desviaciones normales.*
 - 4.1.3 *Cálculo de la altura efectiva de la chimenea.*
 - 4.2.0 *Fuente puntual al nivel del suelo*
 - 4.2.1 *Fuente puntual a la altura H por encima del nivel del suelo.*
 - 4.2.2 *Concentración máxima a nivel del suelo.*
 - 4.2.3 *Determinación de la altura requerida de la chimenea.*
 - 4.3.0 *Fuentes lineales y móviles*
-

**5 PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA DISPERSIÓN
ATMOSFÉRICA DE GASES EMITIDOS POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES**

- 5.1 Estructura del programa.
- 5.2 Elaboración del programa.

6 APLICACIÓN DE LOS MODELOS EN LA INGENIERÍA CIVIL

- 6.1 Ejemplo de aplicación en la operación de una autopista.

7 CONTROL DE PARTICULAS

- 7.1 Distribución y fuentes de materia particulada.
- 7.2 Eficiencia de colección de partículas.
- 7.3 Velocidad terminal o de asentamiento.
- 7.4 Mecanismos de colección de partículas.

8 CONTROL DE GASES

- 8.1 Adsorción.
- 8.2 Absorción.
- 8.3 Combustión de gases contaminantes
- 8.4 Incineración de gases por flama directa.
- 8.5 Incineración térmica de gases de gases.
- 8.6 Incineración catalítica de gases.

9 CONCLUSIONES

INTRODUCCIÓN

Las actividades socioeconómicas, implican por lo general un impacto ambiental. Por ejemplo, la construcción de grandes proyectos para la generación de energía eléctrica y la irrigación, la explotación de yacimientos minerales, los corredores industriales y los desarrollos turísticos conllevan grandes efectos sobre el medio circundante.

Sin una adecuada evaluación de su impacto, tales proyectos degradan el ambiente y pueden producir desplazamientos de núcleos poblacionales, inutilizando tierras aptas para la agricultura y afectan recursos renovables y no renovables.

El impacto ambiental puede reducirse al mínimo, si se considera la dimensión ambiental en el diseño y desarrollo del proyecto y en la operación de los ya existentes. En este contexto, la aplicación de estudios de impacto ambiental es prioritaria para el desarrollo sostenido del país.

Entre las metodologías que se dispone para efectuar las evaluaciones de impacto ambiental, se tienen técnicas de identificación, de interpretación y de predicción.

Las técnicas de identificación incluyen: listas de chequeo, matrices causa-efecto y redes.

Para la interpretación de los resultados cabe utilizar los propios métodos de evaluación o modelos de síntesis y, sobre esta base, puede calcularse la evaluación neta del impacto ambiental y la evaluación global de los impactos.

Los métodos de predicción cubren un amplio espectro. Suelen usarse modelos matemáticos, físicos-matemáticos o físicos (modelos escala) complementados con una serie de ensayos y pruebas experimentales, tomados los datos *in situ*. Con estos métodos puede realizarse una predicción de efectos y evaluar las alteraciones del biotipo y de la biocenosis del ecosistema que se considera. Generalmente estas predicciones están basadas en modelos conceptuales de cómo funciona el universo, por lo que resultan adecuados para los impactos geobiofísicos.

Los métodos de predicción son, quizás, los más tecnológicos y los que se emplean más en la evaluación de impactos físicos en el aire y en el agua.

El presente trabajo se refiere al estudio y aplicación de un método de predicción que es un modelo físico-matemático, de tipo Gaussiano, aplicado a la determinación de la incidencia ambiental de la emisión de contaminantes desde fuentes móviles y lineales a la atmósfera, en la calidad del aire del entorno de dicha fuente.

La aplicación del modelo que se presenta es básica en la evaluación del impacto ambiental de diversos proyectos y constituye una valiosa herramienta en la etapa de planeación de los mismos. Por ejemplo, cuando el proyecto propuesto consiste en la operación y construcción de vías de comunicación (carreteras, caminos, aeropuertos y rutas marítimas) relativamente cercana a un núcleo urbano, el modelo puede simular la dispersión de contaminantes liberados por una fuente (una chimenea ó escape) en la atmósfera y la incidencia que tales emisiones van a tener en la calidad del aire (concentración de

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Introducción

contaminantes) a cualquier nivel sobre la superficie del suelo en los distintos puntos en el entorno de la fuente, pudiéndose prever la posible afectación a la población por la distribución de contaminantes.

Integrado por nueve capítulos, de los cuales el primero es la presente introducción, el documento inicia propiamente con el Capítulo 1 con las "Generalidades sobre la contaminación atmosférica" incluyendo información sobre los tipos, características y efectos de los contaminante atmosféricos. Por otra parte, se describe el marco legal existente en materia de prevención y control de la contaminación del aire.

Debido a la cercana relación que existe entre la contaminación del aire y ciertas condiciones atmosféricas, es necesario estudiar los aspectos fundamentales de meteorología, los cuales se abordan en el Capítulo 2, titulado Factores Meteorológicos.

Se han desarrollado diversos modelos empíricos de dispersión. Estos modelos o ecuaciones, son descripciones matemáticas del transporte meteorológico y de la dispersión de contaminantes del aire en un área y permiten estimar concentraciones de contaminantes en corredor de emisiones a nivel del suelo. En el Capítulo 3 se describen los modelos más usuales, entre ellos el de difusión turbulenta; estadístico de predicción; el de caja; de Griford-Hanna; de Levy-Cardenas; y de Lamb-Levy-Burke. Aunque se dan algunas generalidades del modelo Gaussiano en éste Capítulo, en el Capítulo 4 se trata en forma particular, ya que de acuerdo a la bibliografía utilizada, es el más empleado debido a que tiene un buen soporte físico-matemático y en general, los resultados obtenidos parecen ser los mas ajustados a los fenómenos reales.

El Capítulo 5 es la parte medular del presente documento, ya que es aportación original del autor. El cual consiste en un programa de computo realizado en lenguaje Visual Basic Versión. 6 Microsoft. El programa calcula, con base en el modelo Gaussiano, concentraciones de contaminantes utilizando la información meteorológica y de la fuente de emisión. La presentación de los resultados se da en forma numérica y gráfica, obteniéndose por superposición una evaluación del impacto del proyecto en la calidad del aire de la zona.

Se realizo un ejemplo de aplicación del modelo de dispersión móviles y lineales utilizando el programa y realizando su correspondiente prueba de escritorio para una mayor facilidad en el manejo del programa desarrollado, los elementos anteriormente descritos corresponden al Capítulo 6 "Aplicación de los modelos en la Ingeniería Civil".

Finalmente, los Capítulos 7 y 8 se refieren a las medidas de mitigación que pueden aplicarse para el impacto en la calidad del aire, en particular, el Control de partículas y el Control de gases.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El aire es una mezcla de gases que rodean a la Tierra en una capa relativamente delgada. La mayor parte del aire (95%) se encuentra dentro de los primeros 20 Km sobre el nivel del mar, por encima de los cuales su densidad se desvanece de forma gradual en el vacío del espacio. La mayor parte de las actividades del hombre se realizan dentro de los primeros 2 Km de la atmósfera, los contaminantes generados por estas actividades se filtran directamente en la troposfera, la cual tiene un espesor de 8 Km en los polos y cerca del doble en el ecuador, donde son mezclados y transportados.

Los componentes principales del aire son: nitrógeno (78%), oxígeno (20.94%), argón (0.93%), así como pequeñas cantidades de helio, neón, criptón, xenón, hidrógeno y óxido nítrico.

Para que los gases y partículas se consideren contaminantes sus concentraciones deben exceder en forma significativa a las concentraciones del medio ambiente en condiciones normales

1.1 Clasificación de los contaminantes atmosféricos

Los contaminantes del aire pueden ser clasificados de acuerdo a su origen, composición química o al estado de la materia. A continuación se describen cada una de las clasificaciones.

Clasificación de acuerdo al origen de los contaminantes

Los contaminantes pueden ser considerados como primarios o secundarios de acuerdo a su origen.

Los contaminantes primarios son emitidos directamente a la atmósfera permaneciendo en su forma original, entre ellos se encuentran los óxidos de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos (HC).

Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera por reacciones fotoquímicas, por hidrólisis o por oxidación entre los contaminantes primarios y las sustancias químicas que se encuentran usualmente en la atmósfera, de este tipo son el ozono (O_3) y el nitrato de peroxiacetilo (NPA), entre otros.

Clasificación de acuerdo al estado de la materia

Los contaminantes pueden también clasificarse como partículas o gases. Las partículas suspendidas en la atmósfera se dividen en sólidas y líquidas; entre ellas se incluye vapores, humo, neblina, polvo, niebla y aerosoles.

Los gases incluyen vapores de sustancia que son líquidas o sólidas a temperatura y presión normales. Los gases contaminantes más comunes son: óxidos de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y óxidos en general.

1.2 Clasificación y efectos de los principales contaminantes atmosféricos

Las sustancias en el aire son contaminantes cuando sus concentraciones son suficientes para causar efectos adversos sobre el hombre y su ambiente. Estos efectos pueden ser directos o indirectos. Los efectos directos ocurren como consecuencia de la interacción entre un contaminante y un receptor, pudiendo ser inmediatos si las concentraciones son elevadas o se pueden desarrollar como resultado de la exposición continua a niveles de contaminación más elevados que los comunes. Los efectos indirectos surgen como resultado de cambios en las propiedades físicas del sistema atmosférico de la Tierra.

Los principales contaminantes atmosféricos son: partículas, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y oxidantes fotoquímicos.

1.2.1 Partículas

Partícula es un término que se emplea para describir las materias sólidas y líquidas, dispersas y transportadas por el aire, mayores que las moléculas individuales (aproximadamente 0.002µm de diámetro) pero menores a 500µm de diámetro. Las partículas con estas dimensiones tienen una vida media en suspensión que varía desde unos cuantos segundos hasta varios meses.

Las partículas pueden ser clasificadas y estudiadas de acuerdo a sus características físicas, químicas y biológicas. Las características físicas incluyen tamaño, modo de formación, propiedades de asentamiento y propiedades ópticas.

Las características químicas incluyen su composición orgánica y las características biológicas se refieren a su clasificación como bacterias, virus, esporas, polen, etc.

Características físicas

El tamaño es una de las propiedades físicas más importantes de las partículas, La unidad de medición es el micrómetro (µm) que es equivalente a 1/1000 de mm.

La materia particulada frecuentemente se divide en subclases de acuerdo a su tamaño, que incluye polvo fino (menor de 100 µm de diámetro), polvo grueso (más de 100 µm de diámetro), vapores (0.001 - 1µm de diámetro) y neblinas (0.1 - 10µm de diámetro). Las partículas mayores de 50µm pueden ser observadas a simple vista, mientras que las menores a 0.005µm solamente se pueden observar mediante un microscopio electrónico.

Las partículas de más interés en el estudio de la contaminación del aire son del rango de 0.01µm a 100µm, dentro del cual están las emanaciones metalúrgicas, el polvo de cemento, el carbón negro, cenizas volátiles y los vapores de ácido sulfúrico. Las partículas menores a 1µm no tienden a sedimentarse rápidamente.

Tipos de partículas

Las partículas se dividen en polvo, humos, emanaciones, cenizas volátiles, vapores y sprays (roclos).

Polvos.- Son partículas sólidas pequeñas formadas por la ruptura de masas mayores mediante trituración, molienda, o detonación, que pueden provenir directamente del proceso o del manejo de materiales como el carbón, cemento o granos. Pueden ser el producto de un proceso mecánico como el aserradero de madera o una tolvanera capaz de suspender las partículas en el aire o en algún otro gas sin llegar a disolverse, depositándose posteriormente bajo la influencia de la gravedad.

Humos.- Son partículas sólidas finas resultado de la combustión incompleta de materiales orgánicos como el carbón, la madera o el tabaco, constituido principalmente por el carbón y algún otro material combustible. Tiene diámetros dentro del rango de 0.5 de 1 μm .

Emanaciones.- Son partículas sólidas finas (frecuentemente óxidos metálicos como el de zinc) formados por la condensación de vapores de materiales sólidos, producto de la destilación, sublimación, calcinación o del modelado de materiales. Su rango de tamaño es de 0.003 a 0.3 μm . Se floculan y agrupan hasta sedimentarse.

Cenizas volátiles.- Consisten en partículas no combustibles finamente separadas suspendidas en gases emanados por chimeneas proveniente de la combustión de carbón. Inertes en el carbón, estas sustancias minerales o metálicas se desprenden cuando se quema la parte orgánica del carbón. Las cenizas volátiles comparte todas las características de las partículas estudiadas, ya que como el polvo, su tamaño varía de 1 a 1000 μm , al igual que los humos son resultados de la combustión y al igual que las emanaciones contienen metales inorgánicos o sustancias minerales.

Vapores.- Se forman por partículas líquidas o gotas pequeñas generadas por la condensación de algún vapor, la dispersión de algún líquido, o el resultado de alguna reacción química (como la formación de vapor de ácido sulfúrico). Los vapores generalmente miden menos de 10 μm de diámetro. La visibilidad disminuye considerablemente con altas concentraciones de vapor, denominándosele niebla.

Aerosoles.- Consisten en partículas líquidas formadas por la atomización de líquidos fuente, como los pesticidas y herbicidas. El rango de tamaño de los rocíos es de 10 a 1000 μm .

Efectos de las partículas

Dependiendo de su composición química y estado físico, las partículas causan grandes daños, los cuales van desde ensuciar las superficies pintadas, ropa y materiales textiles, hasta corrosividad de los materiales.

Se conoce poco sobre los efectos producidos sobre la vegetación; sin embargo, se ha observado que las partículas que contienen fluoruro causan daño a las plantas, y el óxido de magnesio que cae en terrenos agrícolas afecta el crecimiento de la planta.

La salud de los animales puede verse afectada cuando éstos se alimentan de plantas cubiertas con partículas tóxicas. Los compuestos tóxicos pueden ser absorbidos por los tejidos de las plantas o pueden permanecer en su superficie. Las partículas de fluoruro depositadas en las plantas causan en los animales que las ingieren fluorosis. El ganado vacuno y bovino que se alimenta de plantas con partículas de arsénico han sido víctimas de envenenamiento.

Las partículas, solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro muy grave para la salud. Los contaminantes entran al cuerpo humano por las vías respiratorias. Se ha estimado que

**ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO**

Capítulo 1

Generalidades sobre la contaminación atmosférica

más del 50% de las partículas entre 0.01 y 0.1µm que penetran en las cavidades pulmonares se depositarán allí.

Es difícil determinar con exactitud los efectos de las partículas sobre la salud humana, debido a la cantidad de combinaciones y concentraciones de partículas que existen, pero se ha visto que el tiempo de exposición es un factor determinante. Se ha observado también que la exposición a las partículas en combinación con otros contaminantes, como el SO₂ produce un mayor deterioro en la salud que la exposición a cada contaminante en forma separada.

Cuadro 2.1 Efectos observados de las partículas

Concentración	Tiempos de medición	Efectos
60-180 µg/m ³	Medida geométrica anual, con SO ₂ humedad.	Aceleración en la corrosión de las láminas de acero y zinc.
75 µg/m ³	Media anual	Norma de la calidad del aire ambiente
150 µg/m ³	Humedad relativa menor del 70%	Visibilidad reducida a 8 Km.
100-150 µg/m ³		Luz solar directa reducida en un tercio
80-100 µg/m ³	Con niveles de sulfatación de 30 mg/cm ² /mes	Puede ocurrir un aumento en la tasa de mortalidad de personas mayores de 50 años.
100-130 µg/m ³	Con SO ₂ > 120 µg/m ³	Es posible que los niños experimenten un aumento en la incidencia de las enfermedades respiratorias
200 µg/m ³	Promedio de 24 h y SO ₂ > 250 µg/m ³	La morbilidad de los obreros industriales puede ser causa de un aumento en el ausentismo.
260 µg/m ³	Máximo una vez en cada 24 h	Norma de la calidad del aire ambiente.
300 µg/m ³	Máximo de 24 h y SO ₂ > 630 µg/m ³	En los pacientes con bronquitis crónica se puede presentar agravamiento de los síntomas.
700 µg/m ³	Promedio de 24 h y SO ₂ > 715 µg/m ³	Puede ocurrir un número excesivo de muertes y un considerable aumento de las enfermedades.

Un creciente volumen de evidencia indica que gran parte de las partículas en la atmósfera es de naturaleza carcinogénica, especialmente cuando se asocia con el tabaquismo. En el Cuadro 2.1 se muestra un resumen de los efectos que causan las partículas.

1.2.2 Monóxido de Carbono

Es un gas incoloro, inodoro, insípido y químicamente estable; bajo condiciones normales, su tiempo estimado de permanencia en la atmósfera es de dos a cuatro meses. Se forma por un proceso incompleto de combustión del carbono o de sus compuestos.

Fuentes de emisión.- Es común que se forme en los vehículos con motores de combustión interna, en consecuencia, este producto se acumula en las zonas urbanas, cerca de las vías rápidas y de las calles de gran movimiento y su concentración varía conforme aumenta o disminuye la circulación.

Efectos.- A los niveles de concentración en que se encuentra en el aire urbano, no parece afectar a las plantas pero con altas concentraciones se convierte en un veneno para los seres humanos, ya que interfiere con el transporte de oxígeno en la sangre, causando la muerte a concentraciones mayores de 750 ppm.

La combinación del monóxido de carbono con la hemoglobina se denomina carboxihemoglobina (COHb). Esto se debe a que la hemoglobina tiene una afinidad por CO de aproximadamente 210 veces su afinidad por el oxígeno.

Afortunadamente, la formación de carboxihemoglobina (COHb) en el torrente sanguíneo es un proceso reversible. Cuando cesa la exposición, el CO que se combinó con la hemoglobina es liberado espontáneamente, y la sangre queda libre de la mitad de su monóxido de carbono en un lapso de 3 a 4 horas en pacientes saludables. Hasta llegar a su nivel normal de 0.4 por ciento de COHb producido por el cuerpo humano.

1.2.3 Óxido de Azufre (SO₂)

El dióxido de azufre (SO₂) y el trióxido de azufre (SO₃) son los óxidos del azufre dominantes en la atmósfera. El SO₂ es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una sensación gustatoria a concentraciones de 0.3 a 1.0 ppm en el aire. A concentraciones mayores de 3.0 ppm, tiene un olor acre, es sofocante e irritante.

Fuentes de emisión.- El SO₂ es un contaminante del tipo primario que se produce en la combustión de carbón y petróleo que lo contienen. Se convierte parcialmente a trióxido de azufre o ácido sulfúrico mediante procesos fotoquímicos o catalíticos en la atmósfera.

Algunos procesos industriales emiten trióxido de azufre (SO₃) el cual se forma también en la atmósfera en pequeñas cantidades. El trióxido de azufre forma ácido sulfúrico con la humedad del aire.

Efectos.- Los compuestos de azufre son responsables de los daños más importantes ocasionados a los materiales. Producen un aumento en el tiempo de secado de una capa de pintura y menor duración cuando se aplica en presencia de SO₂. Por lo general los óxidos de azufre aceleran la corrosión del metal al formar primero ácido sulfúrico ya sea en la atmósfera o sobre la superficie del metal, llegando a tener un aumento de 1.5 a 5 veces en una atmósfera urbana con respecto a un ambiente rural.

Los ácidos sulfurosos son capaces de atacar una amplia variedad de materiales de construcción, incluyendo caliza, mármol, pizarras de techo y morteros. Se forman sulfatos bastante solubles, que luego lava la lluvia. Los textiles de nylon son susceptibles a los contaminantes de la atmósfera.

Cuadro 2.2 Efectos observados de los óxidos de azufre

Concentración	Efectos
0.03 ppm. Promedio anual	Lesiones crónicas en plantas
0.037-0.092 ppm, media anual	Acompañadas por partículas a una concentración de $185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puede haber un aumento en la frecuencia de síntomas respiratorios y enfermedades pulmonares.
0.11-0.19 ppm, media en 24 h	Con un nivel bajo de partículas puede haber un aumento en la admisión de personas de edad mayor en los hospitales, debido a trastornos respiratorios. Aumento en la tasa de corrosión de los metales.
0.19 ppm, media en 24 h	Con niveles bajos de partículas puede haber un aumento en la mortalidad.
0.25 ppm, media en 24 h	Acompañado por partículas a una concentración de $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puede haber un aumento en la tasa diaria de mortalidad, así como una marcada elevación en la tasa de morbilidad.
0.3 ppm, en 8 h	Algunos árboles muestran lesiones.
0.52 ppm, promedio en 24 h	Acompañado por la presencia de partículas puede ocurrir un aumento en la tasa de mortalidad.

El hombre y varias especies de animales, reaccionan ante el dióxido de azufre (SO_2) con bronco constricción, este efecto sobre los bronquios se puede evaluar en términos de un ligero aumento en la resistencia en el conducto de aire. El ácido sulfúrico es un irritante mucho más potente para el hombre que el dióxido de azufre. El óxido de azufre en combinación con partículas y humedad relativa es un peligro potencialmente serio para la salud. En el Cuadro 2.2 se presentan datos típicos de concentración y efectos asociados sobre la salud.

1.2.4 Hidrocarburos (HC)

Los compuestos orgánicos que contienen solamente carbón e hidrógeno son clasificados como hidrocarburos.

Fuentes de emisión.- Las mayores fuentes de compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos) son los automóviles y otras fuentes móviles, de las cuales se expelen al aire pequeñas cantidades de combustibles no quemado. También la producción de petróleo, refinación y evaporación de solventes usando en la fabricación de pinturas emiten hidrocarburos a la atmósfera. Las principales fuentes naturales de hidrocarburos son los incendios forestales, áreas geotérmicas, gas natural de depósitos petrolíferos y depósitos de carbón.

Efectos.- Los hidrocarburos no parecen causar ningún daño corrosivo apreciable en los materiales. Las partículas o el hollín procedente de los hidrocarburos no quemados, ensucian las superficies.

De todos los hidrocarburos, solo el etileno tiene efectos adversos sobre las plantas ante concentraciones ambientales conocidas; su efecto principal es inhibir el crecimiento de las plantas.

No se han encontrado efectos adversos de hidrocarburos gaseosos sobre la salud del hombre a concentraciones ambientales, a excepción de los hidrocarburos aromáticos que se encuentran en el hollín y los alquitranes los cuales tienen propiedades cancerígenas.

Los hidrocarburos no quemados, en combinación con los óxidos de nitrógeno y en presencia de la luz solar, forman oxidantes fotoquímicos, componentes del smog fotoquímico, los que tienen efectos adversos en la salud del hombre y de las plantas.

1.2.5 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

De los seis o siete óxidos de nitrógeno, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) son importantes contaminantes del aire.

Fuentes de emisión.- Se forman cuando se quema cualquier combustible a muy alta temperatura. También los átomos de nitrógeno presentes en algunos combustibles pueden contribuir a la emisión de óxidos de nitrógeno.

Efectos.- El NO ni el NO₂ causan daños directos a los materiales, sin embargo, el NO₂ puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico que puede ser causa de considerable corrosión en las superficies metálicas, El dióxido de nitrógeno absorbe la luz visible y a una concentración de 0.25 ppm causará apreciable reducción de la visibilidad.

El dióxido de nitrógeno a una concentración de 0.5 ppm en un periodo de 10 a 12 días ha detenido el crecimiento de plantas tales como el frijol pinto y el tomate. Experimentos con naranjas sin semilla muestran que se reduce el rendimiento ante una prolongada exposición del NO₂ a concentraciones de 0.25 a 1.0 ppm.

En el ser humano el dióxido de nitrógeno actúa como un fuerte irritante y a iguales concentraciones es más dañino que el NO. Sin embargo, a concentraciones encontradas en la atmósfera, el NO₂, es sólo

potencialmente irritante y potencialmente relacionado con la fibrosis pulmonar crónica. Se ha observado un aumento de bronquitis en niños de 2 a 3 años de edad a concentraciones por debajo de 0.01 ppm.

En combinación con hidrocarburos no quemados, los óxidos de nitrógeno reaccionan con la luz solar y forman el smog fotoquímico.

1.2.6 Oxidantes Fotoquímicos

Los agentes fotoquímicos, ozono (O₃), nitrato de peroxiacetilo (NPA), nitrato de peroxibencilo (NPB), y otras trazas de sustancias que pueden oxidar el ión yoduro de yoduro de potasio, se conocen como oxidantes fotoquímicos.

Fuente de emisión.- No son emitidos por alguna fuente en particular, pero se forman por reacciones complejas en la atmósfera que involucran a los compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos), a los óxidos de nitrógeno y la luz solar. Este puede ser un problema serio en áreas urbanas de climas templados a cálidos, como la Ciudad de México.

Efectos.- Los aerosoles formados durante las reacciones químicas que crean el smog causa una notable reducción de la visibilidad, y dan a la atmósfera un matiz parduzco.

El ozono ataca al hule sintético, con lo que reduce la vida de las llantas, el aislamiento de hule, etc. Se pueden colocar inhibidores del ozono dentro de los productos de hule. También ataca la celulosa de los textiles, reduciendo la resistencia de dichos artículos y al igual que los oxidantes en general, decoloran las telas.

Cuadro 2.3.a Efectos del ozono

OZONO			
Concentración ppm	Concentración µg/m ³	Exposición	Efectos
0.20	40	1 hora	Grietas en el hule estirado
0.03	60	8 horas	Daños en la vegetación
0.10	200	1 hora	Aumento en la resistencia a la respiración.
0.30	500	Horas continuas de trabajo	Irritación de la nariz y la garganta constricción de pecho.
2.0	3000	2 horas	Tos violenta

Tabla 3.2.b Efectos de los oxidantes fotoquímicos

OXIDANTES FOTOQUÍMICOS			
Concentración ppm	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Exposición	Efectos
0.05	100	4 horas	Daños a la vegetación.
0.10	200	4 horas	Irritación a los ojos
0.13	250	Máx. 1 hr diaria	Agravamiento de las enfermedades respiratorias.
0.30		2 horas	Impedimentos en el rendimiento los atletas.
0.08	180	Máx. de 1 hora	Normas para la calidad del aire.

Los oxidantes, principalmente el NPA y el NPB, causan severa irritación en los ojos y en combinación con el ozono irritan la nariz y la garganta, producen constricción del pecho, y a concentraciones altas producen fuerte tos e incapacidad de meditación. En el cuadro 2.3.a y 2.3.b de muestran los efectos observados del ozono y en general de los oxidantes fotoquímicos.

1.3 Legislación para prevención y control de la contaminación del aire producida por fuentes fijas

1.3.1 Problemática de la contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más trascendentes que afecta al país derivado principalmente de la dinámica de desarrollo. Se puede señalar como causas primordiales del problema el rápido crecimiento demográfico que ha experimentado México en las últimas décadas y a la tendencia de la población y de desarrollo industrial a concentrarse en unos cuantos polos de desarrollo.

Las grandes zonas urbanas presentan los problemas críticos de contaminación; el 40% del total de los contaminantes emitidos a la atmósfera se generan en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey.

En la zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el problema de la contaminación atmosférica reviste características graves como consecuencia de la excesiva concentración urbano-industrial y de las condiciones geográficas y meteorológicas de la región. En ella se localiza el 20% de los establecimientos industriales del país, el 40% de la inversión industrial y el 42% de la población económicamente activa.

1.3.2 Legislación

La legislación al problema de la contaminación atmosférica fue iniciada a partir del año de 1959, por la Dirección de Higiene Industrial de la SSA, y en la década de los sesenta la Secretaría de Salubridad y Asistencia, inició programas, orientados al estudio del problema de contaminación atmosférica. En 1971 se empieza a instrumentar con el Reglamento Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental originada por la Emisión de Humos y Polvos; posteriormente, en enero de 1972, por decreto presidencial se constituye la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SSA) dependencia que fue directamente responsable de la atención de este tipo de problemas. La Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental publicada en el diario oficial de marzo de 1971, fue la primera que se aplicó en el país con un carácter amplio e integral en el rubro ambiental. Esta ley y sus reglamentos, rigieron la prevención del medio ambiente; de sus reglamentos destaca el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos.

Posteriormente el Ejecutivo Federal consideró la conveniencia de proponer al Congreso de la Unión la nueva Ley Federal de Protección al Ambiente, que entró en vigor el 11 de febrero de 1982. En el contenido de esta Ley se estableció la integración de áreas o regiones ecológicas para la conservación de los ecosistemas en peligro de destruirse, la protección de la calidad del aire; y de los suelos, de la erosión, salinidad, desertificación y de la urbanización; Además consideró los efectos producidos por substancias químicas tóxicas, radioactivas, mismas que pueden modificar el clima en algunas regiones y provocar la desaparición o reducción de especies, de la flora y fauna.

Para fortalecer las bases constitucionales en materia ambiental, en agosto de 1987 se reformaron los artículos 27 y 63 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, elevando al más alto rango la preservación y restauración del equilibrio ecológico. La reforma consistió en descentralizar las atribuciones de la Ley en las instancias de gobierno Federal, Estatal y municipal para la protección de los recursos naturales.

La Ley Federal de Protección al Ambiente fue derogada en marzo de 1988, cuando entró en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, actualmente vigente, en donde se prevé el ordenamiento ecológico, definido como un proceso de planeación dirigido a evaluar y programar el uso del suelo y manejo de los recursos naturales en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su jurisdicción y soberanía. Esta Ley establece el ordenamiento ecológico general, a cargo de la federación y el ordenamiento ecológico local, encomendado a los Estados y Municipios de acuerdo a sus respectivas leyes.

La ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su Título Cuarto, Capítulo 1, referente a la prevención y control de la contaminación de la atmósfera, establece que para la protección a la atmósfera:

- Los gobiernos de los Estados y de los Municipios en los ámbitos de sus respectivas jurisdicciones, establecerán y operan con el apoyo técnico, en su caso, de SEMARNAP, sistemas de monitoreo de la calidad de aire. Dichos sistemas deberán contar con dictamen técnico previo de SEMARNAP. Esta promoverá, mediante acuerdos de coordinación, la incorporación de los reportes locales de monitoreo a la incorporación de los reportes locales de monitoreo a la información nacional cuya integración estará a cargo de la propia Secretaría.

**ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO**

Capítulo 1

Generalidades sobre la contaminación atmosférica

- Se integrará y mantendrá actualizados el inventario de fuentes fijas de contaminación, y evaluarán el impacto ambiental en los casos de jurisdicción local.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera, deben ser deducidas y controladas para lo cual la SEMARNAP en coordinación con la Secretaría de Salud, expedirá en lo referente a la salud humana, en las Normas Técnicas ecológicas correspondientes, especificando los niveles permisibles de emisión e inmisión por contaminante y por fuente de contaminación, de acuerdo con el reglamento respectivo.

Con motivo de la promulgación de la Ley, actualmente se cuenta con cuatro reglamentos: Impacto Ambiental; Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera; Residuos Peligrosos y Prevención y Control de la Contaminación Generada por los vehículos Automotores que circulan en el Distrito Federal y los Municipios de su Zona Conurbada.

El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la contaminación de la Atmósfera (publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de noviembre de 1988) en su Capítulo III establece que:

Las emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generen por puentes móviles, no deberán exceder los niveles máximos permisibles de emisión que se establezcan en las Normas Oficiales Mexicanas Ecológicas que expida la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial y de Energía, Minas e Industria Paraestatal, tomando en cuenta los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente determinados por la Secretaría de Salud

Las normas técnicas ecológicas se definen como:

El conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Federación que establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente; además de que uniforman principios, criterios, políticas y estrategias en la materia, su aplicación y vigilancia corresponderá a las autoridades federales, estatales o municipales, en el ámbito de sus respectivas jurisdicciones territoriales, así como en los términos que se establezcan en su propia legislación.

Las fuentes móviles generan contaminantes, dentro de los que se encuentran, entre otros, las partículas, el monóxido de carbono, el bióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. Algunos de estos contaminantes reaccionan con otros compuestos, formando otros contaminantes con características toxicológicas más severas al ambiente que los arrojados desde la fuente. La emisión de dichos contaminantes produce deterioro a la calidad del aire si rebasa ciertos límites, por lo que se hizo necesario el control de dichas emisiones a través del establecimiento de los niveles máximos permisibles, que asegurasen que no se originen alteraciones significativas al ambiente.

Los fabricantes de vehículos automotores deberán aplicar los métodos, procedimientos, partes, componentes y equipos que asegurasen que no se rebasaran los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera que establezcan las NOM-ECOL. Los concesionarios de transporte público federal deberán tomar las medidas necesarias, para asegurar que las emisiones de sus vehículos no rebasaran los niveles máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera, que establezcan la NOM-ECOL.

Para la determinación de los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera, se tomó en consideración la ubicación de la fuente fija, la optimización de los procesos de combustión, las tecnologías de control actuales, así como la aplicación de combustibles de la mejor calidad.

Dentro de las Normas Oficiales Mexicanas ECOL más relevantes concernientes a la determinación de los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes se encuentran las siguientes:

**NORMA OFICIAL MEXICANA
NOM-041-ECOL-1999**

Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

Tabla 1. Establece los límites máximos permisibles de emisión de gases provenientes del escape de los vehículos de pasajeros (automóviles particulares ó familiares) en circulación en función del año-modelo.

Año-Modelo del vehículo	Hidrocarburos (HC) ppm	Monóxido de Carbono (CO) % Vol	Oxígeno (Máx.)
1986 y anteriores	500	4.0	6.0
1987 - 1993	400	3.0	6.0
1994 y posteriores	200	2.0	6.0

**ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO**

Capítulo 1

Generalidades sobre la contaminación atmosférica

Tabla 2 Establece los límites máximos permisibles de emisión de gases por el escape de los vehículos de usos múltiples utilitarios, camiones ligeros, camiones medianos y camiones pesados en circulación en función del año-modelo

Año-modelo del vehículo	Hidrocarburos (HC) ppm	Monóxido de Carbono (CO) %Vol.	Oxígeno (Max.) (O ₂) %Vol.
1985 y anteriores	600	5.0	6.0
1986-1991	500	4.0	6.0
1992-1993	400	3.0	6.0
1994 y posteriores	200	2.0	6.0
Taxis colectivos, Microbuses y todo tipo de transporte público de pasajeros, cualquier año	100	1.0	6.0

**NORMA OFICIAL MEXICANA
 NOM-42-ECOL-1999**

Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas natural, gas L.P. y diesel de los mismos, con peso bruto vehicular que no exceda los 3,856 kilogramos.

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles de Emisión para vehículos nuevos que utilizan gasolina, gas natural y gas L.P.,

Tipo de vehículo	Año-Modelo	HC g/km	CO g/km	NOx g/km
Automóvil familiar	2000 y anteriores	0.250	2.110	0.620
	2001 y posteriores	0.156	2.110	0.250
Camiones pasajero y de carga.	2000 y anteriores	0.630	8.750	1.440
	2001 y posteriores	0.200	2.740	0.680

Tabla 2. Límites Máximos Permisibles de Emisión para vehículos nuevos que utilizan Diesel.

Tipo de vehículo	Año-Modelo g/km	HC g/km	CO g/km	NOx g/km
Automóvil	2000 y anteriores	0.250	2.110	0.620
	2001 y posteriores	0.156	2.110	0.620
Camiones de carga y de pasajeros.	2000 y anteriores	0.630	0.750	1.440
	2001 y posteriores	0.240	3.110	0.620

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 1

Generalidades sobre la contaminación atmosférica

Para conocer la calidad del aire y poder tener un control de la contaminación ambiental se utiliza el método del muestreo el cual se inició alrededor de los años sesenta, con una red mundial de monitoreo ambiental que sigue operando; está constituida por 16 analizadores que miden partículas suspendidas. Además, a partir de 1985 se puso en operación la Red Automática de Monitoreo Ambiental, integrada por 25 estaciones que miden el contenido en el aire de dióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y partículas suspendidas.

La calidad se evalúa con base en las mediciones realizadas para cada uno de los contaminantes y se expresa en función del denominado Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

También se ha concertado con dependencias federales, estatales y municipales el programa de Contingencias Ambientales: su objetivo es prevenir y atender episodios de contaminación en caso de que se presenten condiciones atmosféricas desfavorables, basándose en los valores que se tengan observados en el IMECA.

Las medidas de control, tales como la instalación de dispositivos anticontaminantes, empleo de materias primas y combustibles ambientalmente limpios así como las encaminadas a la protección y conservación de recursos naturales son también un parte importante para preservar el equilibrio ecológico.

Para el control de la contaminación y el deterioro de los recursos naturales, se considera que los responsables de las fuentes tienen la obligación de mejorar los procesos e instalar equipos de control de emisiones y descargas a los niveles fijados en las normas técnicas ecológicas.

CAPÍTULO 2

FACTORES METEOROLÓGICOS

Todos los contaminantes del aire emitidos por fuentes puntuales y distribuidas son transportadas, dispersos, o concentrados debido a la condiciones atmosféricas y topográficas. El ciclo de estancia aérea se inicia con la emisión de los contaminantes, seguido por su transporte y difusión en la atmósfera. El ciclo se completa cuando los contaminantes se depositan sobre la vegetación, el ganado, las superficies del suelo, de el agua u otros objetos, cuando son arrastrados de la atmósfera por la lluvia o cuando se escapan al espacio. En algunos casos los contaminantes depositados se pueden volver a introducir en la atmósfera por la acción del viento.

En aquellas regiones donde las condiciones topográficas y meteorológicas conducen a la acumulación y concentración de los contaminantes, como en el caso del Valle de México, los contaminantes pueden acelerar el deterioro de los materiales, y afectando la salud pública, así como a la vegetación en el área.

La dispersión de un contaminante en la atmósfera es el resultado de tres mecanismos dominantes: 1) el movimiento medio general del aire que transporta el contaminante en la dirección del viento; 2) las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan el contaminante en todas direcciones, y 3) la difusión de masa debido a los gradientes de concentración. Además, las características aerodinámicas generales, como el tamaño, forma y peso, afectan la tasa a la que las partículas de contaminantes no gaseosos se asientan en el terreno o son mantenidas en el aire.

A continuación se describen los principales factores meteorológicos que intervienen en la dispersión de contaminantes atmosféricos.

2.1 Radiación solar

La máxima intensidad de la radiación solar tiene lugar con longitudes de onda entre 0.4 y 0.8 μm , que es esencialmente la porción visible del espectro electromagnético. Aproximadamente el 42% de esta energía es: 1) absorbida por la atmósfera alta; 2) reflejada al espacio por las nubes; 3) vuelta a dispersar por la atmósfera; 4) reflejada por la superficie terrestre; o 5) absorbida por el vapor de agua y la nubes. Aproximadamente el 47% de la radiación solar es absorbida por las superficies acuáticas y terrestres de nuestro planeta.

La Tierra, considerada aproximadamente como un cuerpo a 290° K (62°F) emite radiaciones de onda larga con su máxima intensidad entre 4 y 12 m (cerca de la región infrarroja). Tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono son transparentes para la mayoría de la radiación solar pero absorben la radiación de onda larga procedente de la superficie terrestre, esto causa un calentamiento de la atmósfera, que dependerá de la cantidad de H₂O y CO₂ presentes. Este efecto se conoce como el "efecto de invernadero".

Por otra parte, uno de los resultados de la industrialización en todo el mundo lo constituye el aumento en la emisión de partículas. Las partículas en la atmósfera tienden a bloquear el paso de la radiación solar hacia la superficie de la Tierra. Este efecto de bloqueo se opone al causado por el aumento en la concentración de CO₂ y vapor de agua en la atmósfera.

La insolación, es decir, la cantidad de radiación solar que llega a un área unitaria de la superficie terrestre, es función de la localización, la estación del año, la hora del día y la composición de la atmósfera sobre la superficie, siendo el factor más importante la variación del ángulo de incidencia de los rayos solares.

La cantidad de radiación solar incidente es absorbida en la superficie del terreno que es una función de la absorbanza de dicha superficie; esto es, si la superficie es de tierra, roca, agua, hielo, nieve, vegetación o cualquier otro elemento.

2.2 Circulación del viento

El calentamiento del suelo y la atmósfera de la Tierra por la radiación solar forma un sistema dinámico muy grande. El sobrecalentamiento diferencial del aire origina gradientes de presión horizontales. Los que a su vez conducen a un movimiento horizontal en la atmósfera. Por tanto, la diferencia de temperaturas entre la atmósfera en los polos y en el ecuador, y la existente entre los continentes y los océanos, es causa de los movimientos a gran escala del aire.

El aire tiende normalmente a fluir de las regiones de alta presión hacia las regiones de baja presión, lo que en plano horizontal significa usualmente de un área fría un área caliente.

La rotación de la Tierra altera esta situación, ya que debe tomarse en cuenta la fuerza de Coriolis originada por este movimiento. La velocidad del viento y la fuerza de Coriolis provocan que el viento tienda a soplar paralelamente a las curvas isobáricas. Los meteorólogos llaman a este viento ideal o conceptual el viento geostrofico.

En meteorología se hace referencia frecuentemente al viento gradiente, el cual está asociado con las curvas isobaras. En el hemisferio norte, el movimiento del viento contrario a la manecillas del reloj se llama ciclón y el movimiento en el sentido de las manecillas del reloj, alrededor de un centro de presión se denomina anticiclón.

Los vientos geostroficos y de gradiente constituyen conceptos de interés práctico en ausencia de una fuerza significativa de fricción. No obstante, el movimiento del aire cerca de la superficie terrestre está retrasado por los efectos de fricción de la rugosidad superficial. La región vertical entre la superficie de la tierra y los niveles superiores de la atmósfera donde resulta válido el concepto de viento gradiente se llama capa límite planetaria. La magnitud de retraso de la velocidad del viento con la altura y espesor de la capa límite son funciones de la rugosidad superficial del terreno, así como del gradiente de temperatura en la atmósfera inferior. Los contaminantes en esa parte inferior de la atmósfera serán arrastrados hacia arriba y, por lo general, se dispersarán sobre un amplia área. Además, según se eleva el aire, se enfriará como resultado de la disminución de la presión a mayores elevaciones.

El desplazamiento angular del viento es la capa límite planetaria teniendo una importante repercusión sobre el patrón de dispersión de los contaminantes procedentes de la chimeneas. Como la

fuerza de retraso por fricción varía con la altura del suelo, la cantidad de desplazamiento angular varía también con la altura. La fuerza de fricción en la capa límite tiene un máximo cerca de la superficie de la tierra y cae esencialmente a cero en la parte superior de la capa límite, donde predomina el viento geostrófico o el gradiente.

2.3 Condiciones de estabilidad

Una de las características más importantes de la atmósfera es su estabilidad; esto es, su tendencia a resistir el movimiento vertical, o suprimir la turbulencia existente. Esta tendencia influye sobre la capacidad de la atmósfera de dispersar los contaminantes que se emiten en ella.

Es conveniente definir una tasa de cambio como el valor negativo del gradiente de temperatura de la atmósfera.

La tasa de cambio adiabática seca, a la que se le asigna el símbolo Γ , está definida como:

$$\Gamma = -(dT/dz)$$

La tasa de cambio adiabática seca es sumamente importante en los estudios meteorológicos. Con base en los datos meteorológicos se ha definido una norma atmosférica internacional y se ha adoptado con fines de comparación como promedio en las latitudes medias, la temperatura disminuye linealmente con la elevación, hasta que se llega aproximadamente a 11,500m. Los promedios de temperatura son de 288°K al nivel del mar y de 217°K a 11,500m de altura. Por tanto el gradiente normal de temperatura es:

$$(dT/dz) = -0.0066^\circ\text{C/m}$$

Es de gran utilidad conocer el grado de estabilidad de la atmósfera para estimar la capacidad de ésta para dispersar los contaminantes. De aquí resulta que los contaminantes emitidos cerca del suelo tiende a permanecer ahí. El hecho de que exista un gran mezclado en la atmósfera baja depende del gradiente de temperatura y de la turbulencia mecánica debido a la acción cortante del viento. La posibilidad de que ocurra mezclado térmico se puede determinar por comparación del gradiente actual de temperatura (ambiental), también llamada tasa de cambio, con la tasa de cambio adiabática. A continuación se presenta los tipos de atmósfera que pueden presentarse.

Atmósfera inestable. - Se presenta cuando la tasa de cambio ambiental es mayor que la tasa de cambio adiabática seca (Γ), como se puede ver en la fig. 2.1.

Esto provoca que cuando una pequeña cantidad de aire (a una temperatura A) es transportado rápidamente hacia arriba su expansión se aproxima estrechamente a una expansión adiabática (temperatura B) y tiende a continuar su movimiento ascendente.

Si la misma cantidad de aire se dispersara hacia abajo (a una temperatura E), debido a su mayor densidad, la pequeña porción de aire continuará su movimiento descendente. La condición que se acaba de describir es inestable, ya que cualquier perturbación en la dirección vertical tiende a aumentar.

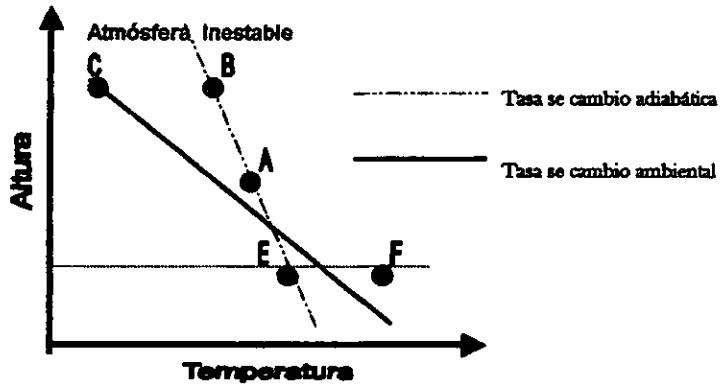


Fig. 2.1 *Atmósfera inestable*

Atmósfera neutral: Cuando la tasa de cambio ambiental es aproximadamente la misma que la tasa de cambio adiabática se dice que la atmósfera tiene una estabilidad neutral (Fig. 2.2).

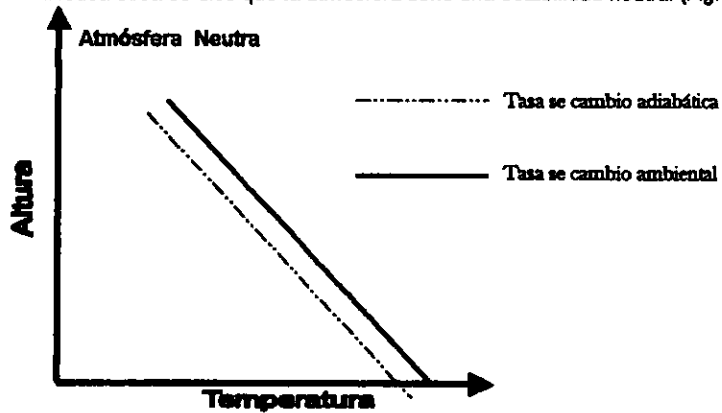


Fig. 2.2 *Atmósfera neutral*

Cualquier porción de aire que es rápidamente arrastrada hacia arriba o hacia abajo tendrá la misma temperatura que el ambiente a la nueva altura. Por tanto, no existe tendencia alguna para un movimiento vertical adicional debido a diferencias térmicas, y la porción de aire desplazada permanecerá en su posición de desplazamiento.

Atmósfera estable. - Si la tasa de cambio ambiental es menor que la tasa de cambio adiabática seca, la atmósfera es subadiabática (Fig. 2.3). La atmósfera estable se presenta cuando la superficie del suelo está más fría que el aire que está sobre él. Luego, las capas de aire próximas al se enfrían y no puede ocurrir el mezclado vertical.

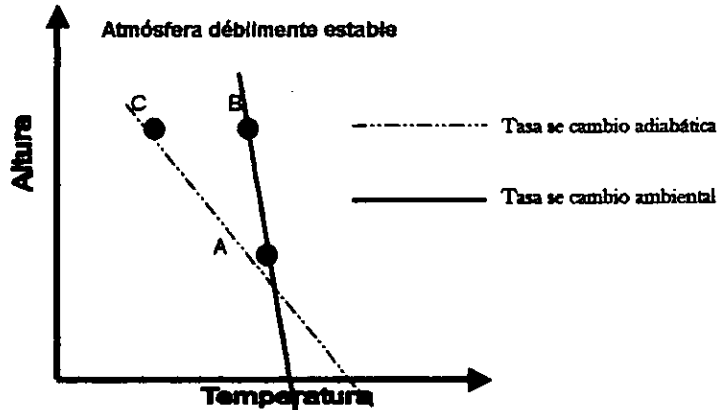


Fig. 2.3 *Atmósfera estable*

Esto repercute de la siguiente forma: cualquier porción de aire súbitamente desplazada verticalmente tendrá la tendencia a regresar a su posición original. Por ejemplo, un elemento de aire desplazado de la posición A a la posición C, será más denso que en el ambiente en B. Por tanto, tendrá la tendencia a descender nuevamente a su altura original.

Atmósfera fuertemente estable. - Esta condición se conoce también como una inversión (Fig.2.4). Se caracteriza por aumentar la temperatura considerablemente conforme aumenta la temperatura, esto es, tiene un gradiente positivo de temperatura relativamente grande. Su efecto principal es la reducción de la dispersión vertical de los contaminantes y por tanto el aumento de las concentraciones locales.

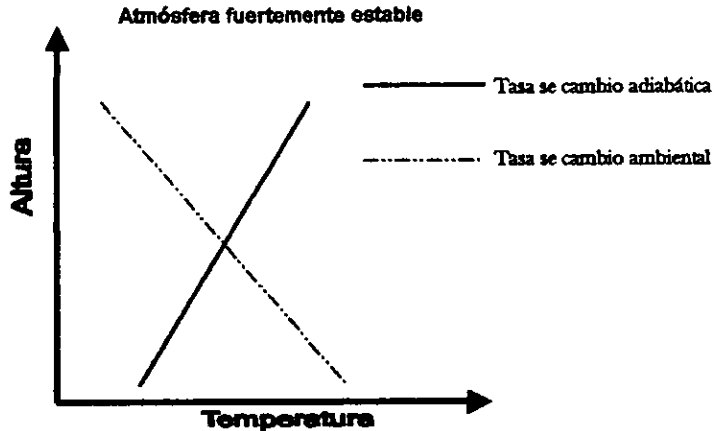


Fig. 2.4 *Atmósfera fuertemente estable*

2.4 Perfil de velocidad del viento

Como ya se mencionó, el movimiento del aire cerca de la superficie del terreno está retrasado por los efectos de fricción proporcionales a la rugosidad de la superficie. Por tanto, la naturaleza del suelo, la localización y la densidad de los árboles, la situación y tamaño de los lagos, ríos, colinas y edificios produce diferentes gradientes de velocidad del viento en la dirección vertical.

La capa de aire (llamada capa límite planetaria) que está influida por la fricción con la superficie terrestre se extiende desde algunos cientos de metros hasta varios kilómetros por encima de la superficie del suelo. La temperatura de esta capa límite es mayor en el caso de condiciones inestables que en el caso de condiciones estables. De este modo, los contaminantes se dispersarán sobre una mayor distancia vertical en condiciones atmosféricas inestables. Esto lleva a una reducción general de la concentración de los contaminantes en una determinada región en la dirección del viento que viene de la fuente de contaminación. No obstante, las fluctuaciones turbulentas en una atmósfera inestable, puede provocar concentraciones instantáneas que exceden las de una atmósfera estable.

Debido a que son más estable las condiciones atmosféricas durante la noche, el perfil nocturno es usualmente más pronunciado que el diurno, lo cual se puede ver en la Fig. 2.5.

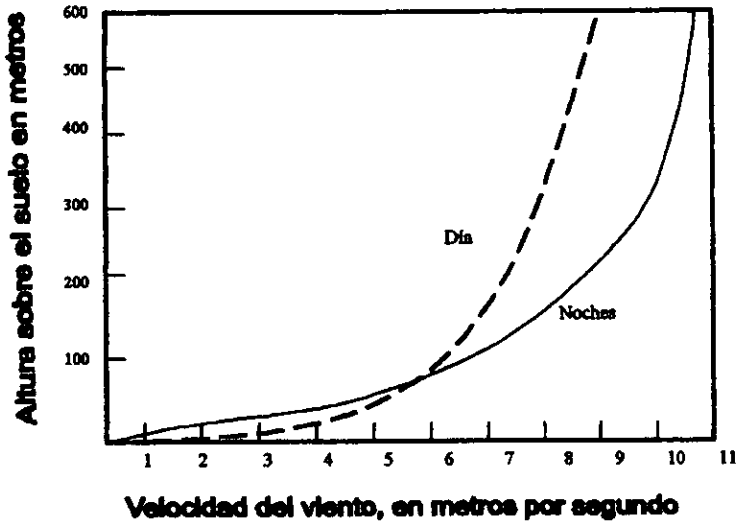


Fig. 2.5 Cambio de perfil de velocidad del viento con la estabilidad

La variación de la velocidad del viento se estabiliza aproximadamente a 600m. Por encima de esta altura el efecto de fricción es despreciable. El efecto de la rugosidad del suelo sobre el perfil de velocidad del viento se muestra en la Fig.2.6.

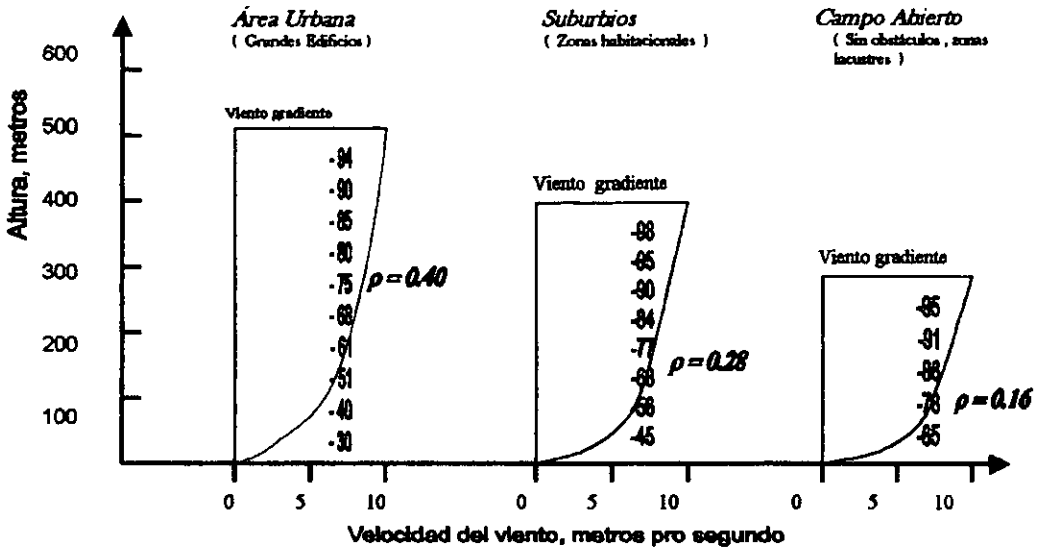


Fig. 2.6 Efecto de la rugosidad del terreno sobre el perfil de velocidad del viento

En este ejemplo en particular, el cambio de espesor total de la capa límite varía aproximadamente de 500 a 280m para una rugosidad decreciente. Al disminuir la rugosidad, el perfil será también más pronunciado cerca de la superficie. La altura internacional convenida para las mediciones del viento superficial es de 10m.

Se han realizado numerosos esfuerzos a fin de desarrollar expresiones analíticas adecuadas que relacionen la velocidad del viento con la altura, sin obtener una expresión satisfactoria hasta el momento. Se ha observado que la ley de exponentes de Deacon es de utilidad para capas límites de hasta varios cientos de metros de espesor. La expresión es la siguiente:

$$(u/u_1)=(z/z_1)^p$$

donde:

- u = velocidad de viento a la altura z
- u_1 = velocidad del viento a la altura z_1
- p = exponente positivo, con un valor entre 0 y 1
- z = altura de la velocidad del viento requerida
- z_1 = altura de la velocidad del viento conocida

Cuando la tasa de cambio es aproximadamente igual al valor adiabático y el suelo es generalmente llano con poca cubierta superficial, se debe seleccionar un valor de p de aproximadamente 1/7.

El espesor de la capa límite, y por lo tanto el perfil de la velocidad del viento, es una función de la estabilidad atmosférica. Por ello, el exponente p debe variar en relación con las características de estabilidad de la atmósfera, como en una primera aproximación. Sutton ha sugerido que p se puede relacionar con un parámetro n que es función de la estabilidad de la atmósfera. Esta relación es:

$$P = n/(2-n)$$

Los valores de n para las varias condiciones de estabilidad están dadas en el Cuadro 2.1

Se puede utilizar la ley de exponentes para aproximar los perfiles de la velocidad del viento a los diversos terrenos. Se ha encontrado razonablemente adecuado el uso de un valor de $p=0.40$ para áreas urbanizadas, de 0.28 para áreas densamente boscosas, ciudades y suburbios y 0.16 para terrenos llanos y abiertos, lagos y mares. Algunos investigadores opinan que, para alturas de hasta cientos de metros, una relación logarítmica del tipo $u = c \log z$ es más representativa de la capa de aire cerca del terreno que una expresión de la ley de exponentes, especialmente para terrenos abiertos.

Cuadro 2.1 Relación entre el parámetro de estabilidad (n) y la condición de la atmósfera

Condición de estabilidad	n
Tasa de cambio grande	0.20
Tasa de cambio pequeña o cero	0.25
Inversión moderada	0.33
Inversión grande	0.50

La dispersión de contaminantes en la atmósfera está en función de la velocidad promedio del viento a la elevación de la fuente de emisión; en consecuencia, se debe tener cuidado al seleccionar la velocidad del viento, atendiendo a la elevación, la naturaleza del terreno circundante y la estabilidad de la atmósfera.

2.5 Turbulencia

La turbulencia atmosférica es el resultado de dos efectos específicos: a) el calentamiento atmosférico, que es causa de las corrientes de convección naturales y b) la turbulencia "mecánica", que es el resultado de los esfuerzos cortantes del viento (du/dz). A pesar de que ambos efectos están presentes por lo general en cualquier condición atmosférica dada, una de las dos turbulencias, ya sea la mecánica o la térmica (convectiva), puede prevalecer sobre la otra.

Las turbulencias térmicas prevalecen en los días soleados cuando soplan vientos ligeros y el gradiente de temperatura es altamente negativo. Por otra parte, las turbulencias mecánicas predominan junto con la estabilidad neutral en las noches con viento, y las fluctuaciones del viento tienen períodos del orden de segundos. La turbulencia mecánica es el resultado del movimiento del aire sobre la superficie terrestre y está influida por la situación de los edificios y la relativa rugosidad del terreno.

Una de las descripciones cuantitativas más útiles de las turbulencias está representada por la desviación estadística normal (esto es la raíz cuadrada del promedio de los mínimos cuadrados) de las fluctuaciones del viento tomadas sobre un cierto periodo, usualmente 1 hora. Estas desviaciones normales (valores σ) se pueden convertir en estimaciones de los parámetros verticales y horizontales de las ecuaciones de dispersión que se estudiarán más adelante.

2.6 Características de los tipos de plumas

Los contaminantes liberados a la atmósfera viajan con el viento dominante, dispersándose tanto en la dirección vertical como horizontal. En el estudio de fuentes contaminantes fijas, las formas que pueden tomar las emisiones de contaminantes de acuerdo a las condiciones atmosféricas presentes son llamadas plumas de chimeneas.

Como se mencionó anteriormente, la dispersión de contaminantes se efectúa por medio de dos mecanismos generales: la velocidad promedio del viento y la turbulencia atmosférica. El efecto de la primera es simplemente transportar los contaminantes desde la fuente en la dirección del viento; la segunda hace que la concentración de los contaminantes fluctúe en las direcciones verticales y transversales del viento a partir de la corriente principal.

A continuación se presentan las seis clasificaciones del comportamiento de las plumas, así como su perfil aproximado de temperatura y velocidad del viento para cada una de ellas.

Pluma espiral.- Este tipo de pluma se presenta cuando existe un alto grado de turbulencia convectiva. Como se indica en la figura 2.7, la pluma de espiral presenta una tasa de cambio superadiabática en la atmósfera, lo que conduce a fuertes condiciones de inestabilidad.

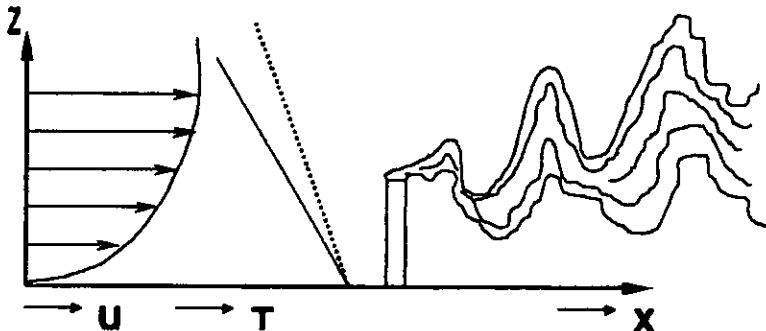


Fig. 2.7 Pluma espiral

A pesar de que los grandes remolinos tienden a dispersar los contaminantes sobre una amplia región. Puede ocurrir altas concentraciones localizadas en áreas específicas del terreno. Una pluma espiral está usualmente asociada con un fuerte calentamiento solar de la superficie del terreno y con vientos ligeros.

Pluma de cono.- Ocurre cuando predomina una estabilidad neutra y domina la turbulencia mecánica en pequeña escala. Como el efecto de calentamiento térmico es mucho más bajo que para el caso de plumas espiral, el efecto de cono ocurre cuando el cielo está nublado y a sea durante el día o durante la noche. Los vientos varían típicamente de moderados a fuertes. La cubierta de nubes impide la entrada de radiación solar durante el día y el escape de la radiación terrestre durante la noche. Se ha observado que el semiángulo de la pluma, la que tiene forma general de un cono, es de aproximadamente 10 grados. A diferencia de las espirales, en el caso de conos la mayor parte de la concentración de contaminantes es arrastrada bastante lejos por el viento antes de llegar al nivel de terreno en cantidades

significativas. Esta constituye una condición especialmente favorable para estimar la dispersión de contaminantes por medio de las ecuaciones de difusión.

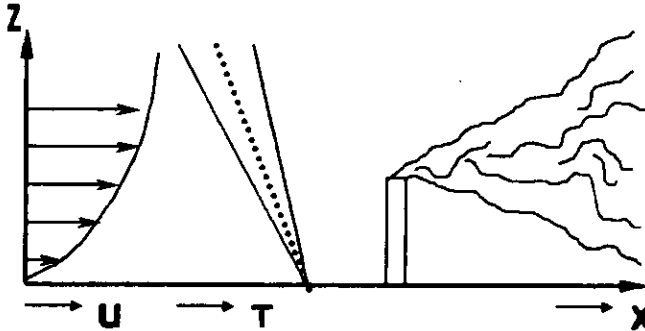


Fig. 2.8 Pluma de cono

Pluma de abanico.- Ocurre en presencia de grandes tasas de cambio negativas, de manera que tiene lugar una fuerte inversión a una considerable distancia por encima de la altura de la chimenea. La atmósfera es extremadamente estable, y se elimina la turbulencia mecánica. Como ya se indicó, las inversiones son característica de condiciones nocturnas despejadas, cuando la tierra se enfría por la radiación que se escapa. Cuando se le observa desde arriba, puede parecer que la pluma de abanico serpentea en la dirección horizontal según es arrastrada por el viento. Es difícil pronosticar las concentraciones en la dirección del viento cuando se presenten abanicos. Muy poco del afluente del contaminante llega al suelo.

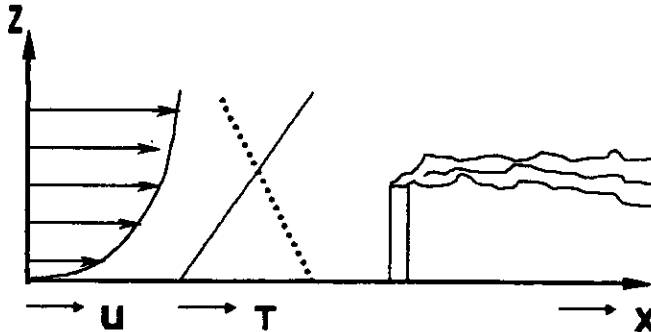


Fig. 2.9 Pluma de abanico

Plumas de fumigación.- Se presentan cuando una capa estable de aire esta a corta distancia por encima del sitio de emisión de la pluma, y una capa de aire inestable se encuentra debajo de la pluma. El perfil necesario de temperatura para la fumigación se origina generalmente temprano por la mañana, después de una noche caracterizado por una inversión estable. El sol de la mañana calienta el suelo, lo que conduce a su vez un gradiente negativo de temperatura hacia arriba del terreno. Una vez que la

capa inestable recién formada alcanza la altura de la chimenea, grandes concentraciones del gas de la misma (que presentaba anteriormente perfil de abanico) serán arrastradas por el viento hasta la superficie del terreno. Afortunadamente, las condiciones de fumigación no duran más de una media hora. No obstante, durante este período, se alcanzarán concentraciones relativamente altas al nivel del terreno. La fumigación se ve favorecida por los cielos despejados y los vientos ligeros. Y predomina más en el verano.

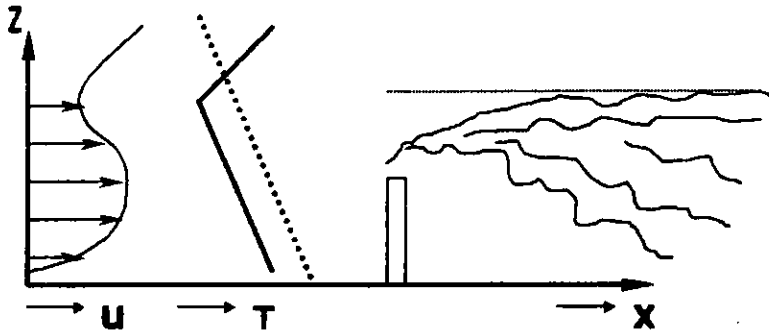


Fig. 2.10 Pluma de fumigación

Pluma de flotación.- Este tipo de pluma se desarrolla en condiciones contrarias a la de la pluma de fumigación. La capa de inversión está por debajo de la pluma y la capa inestable está dentro y por encima de ésta. El resultado es una situación favorable, ya que los contaminantes se dispersan junto con el viento son concentraciones significativas a nivel del terreno. Mientras que las condiciones de fumigación se presentan por la mañana, justamente después de la salida del sol, las condiciones de flotación predominan al caer la tarde y al anochecer, bajo cielos despejados. Durante el día, se establece un gradiente negativo de temperatura en toda la atmósfera baja, como resultado del calor solar. Al caer la tarde, la radiación de la superficie conduce a la formación de una capa de inversión cerca del nivel del suelo. Según se hace más profunda la capa de inversión. Una pluma de flotación cambiará a una pluma de abanico. Por tanto, la flotación es una situación transitoria.

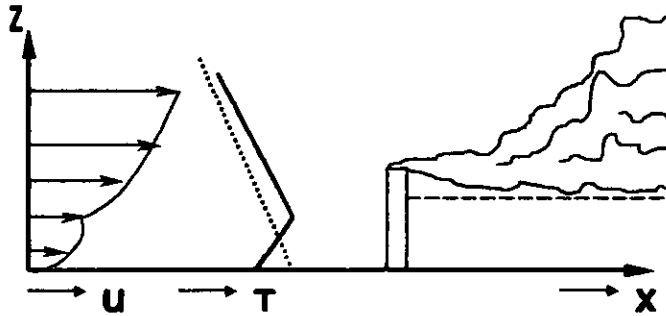


Fig. 2.11 Pluma de flotación

Pluma de atrapamiento.- Cuando existe inversión tanto por debajo como por arriba de la altura de la chimenea, se tiene este tipo de pluma. La difusión de los contaminantes está severamente restringida a la capa entre las dos regiones estables.

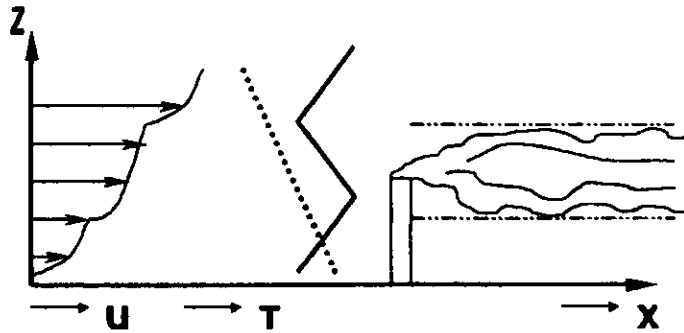


Fig. 2.12 Pluma de atrapamiento

CAPÍTULO 3

MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Para poder determinar la calidad del aire y así predecir con exactitud la concentración de contaminantes atmosféricos, se tiene que recurrir al uso de algún modelo matemático. Los modelos matemáticos están basados en conceptos teóricos que requieren datos básicos meteorológicos como son: dirección y velocidad del viento, altura de la capa de inversión, temperatura, así como características topográficas y de las fuentes contaminantes que se presenten. Para que un modelo matemático cumpla con exactitud su función, es necesario contar con datos micro-meteorológicos, mismos que describen la circulación atmosférica que ocurre durante las condiciones de viento en calma. Para hacer posible la recuperación oportuna de la información, es necesario contar con un banco de datos perfectamente organizado y guardado en un disco magnético.

En este capítulo se describen brevemente los modelos más utilizados para simular la dispersión atmosférica.

3.1 Modelo de difusión turbulenta

El enfoque más completo de la teoría del transporte se basa en el modelo de difusión turbulenta, que implica a su vez el concepto de la "longitud de mezclado". Esto constituye el punto inicial más simple en el desarrollo de un modelo para la dispersión de la atmósfera. La ecuación básica de este modelo es matemáticamente muy compleja, pero haciendo suposiciones de poca importancia, se puede reducir a la forma

$$\frac{dC}{dt} = K_x \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) + K_y \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_z \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad 3.1a$$

donde C es la concentración, t es el tiempo, y las magnitudes K_i son los coeficientes de difusión turbulenta en la dirección de los tres ejes coordenados. Esta ecuación se conoce como la ecuación de difusión de Fick. Sin embargo, este resultado es de difícil aplicación, en el caso del proceso real en la atmósfera. Por tanto, se hacen usualmente las siguientes suposiciones adicionales:

1. La concentración del contaminante emana de una fuente puntual continua.
2. El proceso es de estado estacionario, esto es, $dC/dt = 0$
3. Se escoge la principal dirección de transporte debida al viento, para que vaya a lo largo del eje de la x
4. Se selecciona la velocidad del viento u , para que sea constante en cualquier punto del sistema de coordenadas x, y, z
5. El transporte de contaminantes debido al viento en la dirección x predomina sobre la difusión descendente, esto es:
 $u(dC/dx) \gg K_{zz}(\partial^2 C / \partial z^2)$.

De aquí resulta que la ecuación de difusión de Fick se reduce a

$$\frac{\partial C}{\partial x} = K_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad 3.16$$

donde $K_{yy} \neq K_{zz}$. La solución de esta ecuación debe también cumplir las siguientes condiciones de frontera:

1. $C \rightarrow \infty$, Cuando $x \rightarrow 0$ (una gran concentración en la fuente puntual).
2. $C \rightarrow 0$, cuando $x, y, z \rightarrow \infty$ (la concentración es cero a una gran distancia de la fuente).
3. $K_{zz}(\partial^2 C / \partial z^2) \rightarrow 0$ cuando $z \rightarrow 0$ (no hay difusión en la superficie).
4. $\int_0^\infty \int_0^\infty u C(x, y, z) dy dz = Q, x > 0$ (la tasa de transporte del contaminante en la dirección del viento es constante e igual a la tasa de emisión Q del contaminante en la fuente)

Lowry y Boubel dan la siguiente solución aproximada para la ecuación anterior.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}} e^{-\frac{u}{2} \left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right)} \quad 4.2$$

donde $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Desafortunadamente, la ecuación (3.2) muestra dos grandes desviaciones cuando se le compara con la evidencia experimental para las concentraciones a lo largo de la línea de centro. A nivel del suelo, a lo largo de la línea de centro, la ecuación (3.2) se reduce a

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}}$$

Por tanto, la solución aproximada de la ecuación teórica simplificada indica que el valor de C a nivel del suelo y a lo largo de la línea de centro de la pluma es inversamente proporcional a x e independientemente de la velocidad del viento, u. Las observaciones experimentales indican que C es inversamente proporcional a $(ux)^{1.76}$. Se continúa buscando soluciones mejoradas para el modelo de difusión turbulenta, a fin de perfeccionar su afinidad con las observaciones. Entre las técnicas que se someten a prueba está una que incluye el uso de una computadora analógica digital. Hasta que se acepten y se pueda disponer de métodos más refinados, se deberán considerar otros modelos. Es útil en la búsqueda de nuevos modelos el formato de la ecuación (3.2). Esta ecuación indica que, lejos de la línea de centro, la concentración decae exponencialmente tanto en la dirección "y" como en la "z". Matemáticamente esto significa que C en la dirección transversal al viento y en la vertical, puede estar distribuido "normalmente". Además, la disminución del valor de C en la dirección x depende mucho de los valores de K_{zz} y K_{yy} . Por lo tanto, cualquier otro modelo deberá mostrar también una gran dependencia en los coeficientes de difusión.

3.2 Modelo Gaussiano

Este modelo emplea las propiedades estadísticas de la turbulencia, aceptando la hipótesis de operar con fuentes puntuales, en este caso con chimeneas, cuyas plumas representan en su reacción distante transversal una distribución Gaussiana en sus dos ejes ortogonales (Fig 3.1) la distribución de su pluma será de acuerdo a la dirección del viento.

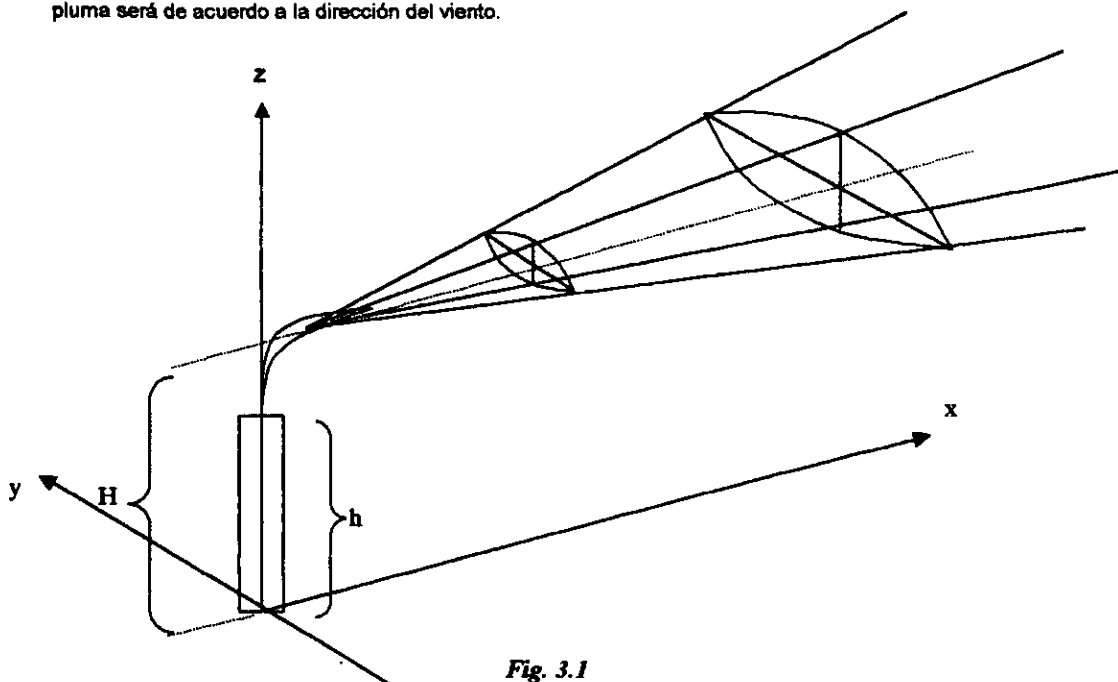


Fig. 3.1

En virtud de que este modelo se utiliza en el desarrollo del programa de computadora que se presenta en el capítulo 5, se ha considerado pertinente dedicar el Capítulo 4 exclusivamente al estudio del Modelo Gaussiano.

3.3 Modelo Estadístico de Predicción

Un modelo estadístico funciona relacionando estadísticamente valores medidos de emisión y parámetros meteorológicos con "factores de emisión" para los contaminantes detectados en la atmósfera a vigilar. A partir de la distribución establecida se determinan empíricamente los focos lineales y móviles mediante diversos métodos entre los que destaca el "Análisis de regresión múltiple lineal" con la introducción de una "función de peso" que es una variable del banco de datos. Debe contener los datos más significativos para calcular las predicciones en los niveles posibles de emisión. Un modelo estadístico

requiere como insumos, los parámetros del banco de datos que se consideran significativos, por ejemplo, los valores medios horarios de los mismos contaminantes, enviados por las estaciones remotas de la red. La salida del programa de la computadora, basado en el modelo, será de la forma de concentraciones actuales medias, y en un determinado instante, la predicción del valor más probable en los niveles de emisión de cada contaminante, nominalmente para periodos de ocho y veinticuatro horas, que pueden extenderse a las cuarenta y ocho horas y hasta setenta y dos horas, disminuyendo la exactitud de las predicciones.

Los valores calculados por este modelo se almacenan en el banco de datos con lo que se tienen los valores predichos para el día (N+1) y los que se miden efectivamente dicho día, comprobándose así la bondad del modelo y por consiguiente, la forma de perfeccionarlo y mejorar la bondad de las predicciones.

3.4 Modelo de caja

Se considera una ciudad cuyos límites forman la base rectangular de una caja imaginaria. La altura de la caja es igual a la altura de mezclado sobre la ciudad. Se asume que los contaminantes están siendo emitidos en la ciudad y además que fluye el aire debido a que sopla el viento hacia el interior de la caja por una lado de ésta, causando que el aire contaminado salga por el lado opuesto como se observa en la Fig. 3.2. Haciendo una simplificación se asume que los contaminantes se distribuyen uniformemente e instantáneamente a través de la caja.

Sea:

V = Volumen de la caja (V)

C = Concentración del contaminante y residuos de la caja (F / V)

P = Velocidad de la emisión del contaminante (F / t)

Q = Flujo del aire (V / t)

Entonces se puede escribir un simple balance de masas por medio de la siguiente ecuación:

Variación del contaminante en la caja = Variación del contaminante entrante en la caja - Variación del contaminante removido en la caja

$$V \frac{dC}{dt} = P - QC$$

Si inicialmente la concentración del contaminante en la caja es cero, entonces la ecuación anterior tiene la solución:

$$c = \frac{P}{Q} (1 - e^{-\frac{Q}{V}t})$$

En la Fig. 3.3 se puede observar que la concentración del contaminante en la caja aumenta asintóticamente hasta el valor final de P/Q .

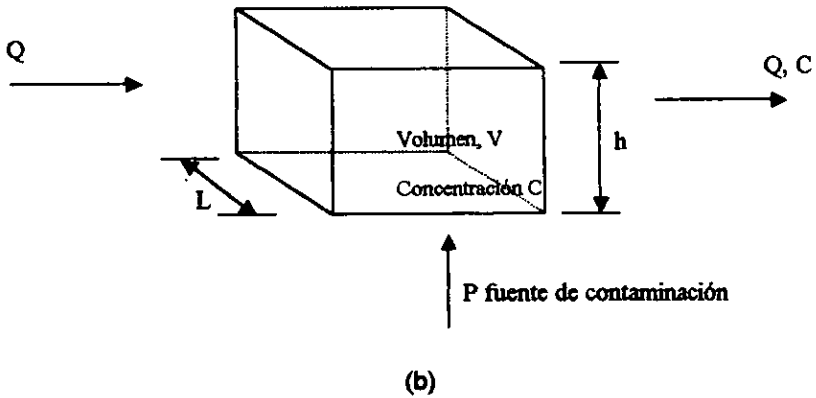
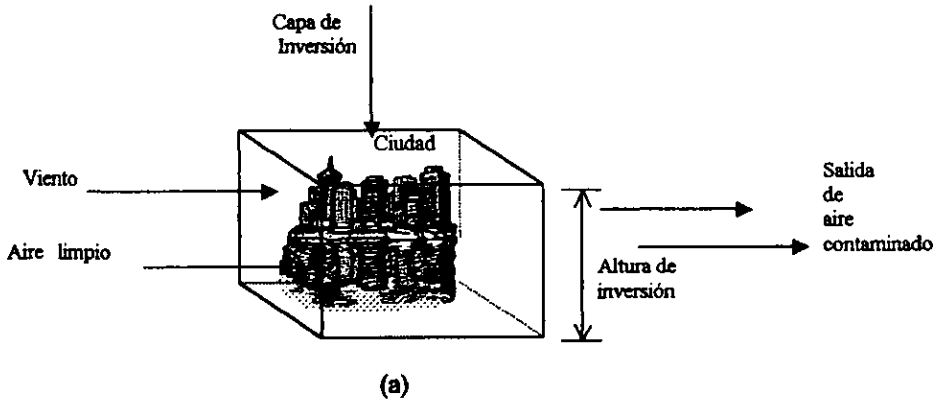


Fig. 3.2 Modelo de Caja

La cantidad Q es una medida del aumento de la ventilación que la caja recibe y es igual a la velocidad del viento multiplicada por el área transversal de la caja, o bien:

$$Q = v L h$$

Donde:

V= Velocidad del viento
L= Dimensión de la base de la caja
h= Altura de mezclado

El estado estacionario de la concentración del contaminante que predece este modelo es por lo tanto:

$$C = \frac{P}{vLh}$$

La concentración se incrementa si se incrementa la emisión, o si la altura de inversión o la velocidad del viento disminuyen.

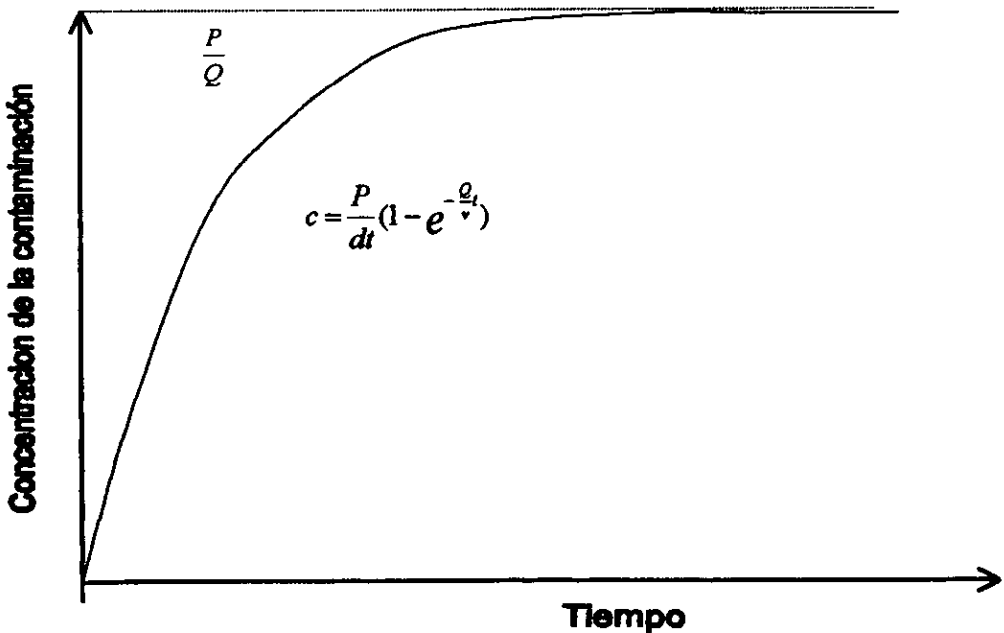


Fig 3.3 Modelo de Caja

3.5 Modelo de Gifford – Hanna

Gifford y Hanna en 1970 desarrollaron un modelo de contaminación simplificado del tipo llamado "de caja". Estos autores introducen las siguientes simplificaciones en la ecuación de difusión: las fuentes de emisión son del tipo de área, dependiendo su intensidad de la coordenadas "x" y "y", pero se supone que emiten el contaminante al nivel del terreno (z=0); por tanto las fuentes de emisión como el viento predominante son constantes en el tiempo, por lo que se obtiene la solución del estado permanente.

Los coeficientes de difusión Kx y Ky son nulos, lo que implica que sólo hay difusión por turbulencia a lo largo del eje z. Los componentes del viento son v=0, w=0, u≠0 por lo que se puede decir que el contaminante es transportado por el viento. Puesto que no hay difusión por turbulencia en el sentido transversal, (ya que Ky vale cero), la concentración de contaminante en un punto receptor puede ser influenciada únicamente por fuentes de emisión. Localizados en un estrecho corredor.

Viento arriba del receptor. Si se considera que el viento predominante sopla con una velocidad u; en cada una de la 16 direcciones en que se divide la rosa de los vientos, la forma de la solución obtenida es:

$$N_i(x, y) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^{1-b}}{\prod a(1-b)} \left(Q_0 + \sum_{k=1}^n Q_k \left[(2k+1)^{1-b} - (2k-1)^{1-b} \right] \right)$$

i = 1,2,3,.....16

Donde:

$\Delta x =$ Longitud de la malla asociada a la fuentes de área

$Q_0 =$ Tasa de emisión de la fuente de área correspondiente al área donde está localizado el reactor.

$Q_k =$ Tasa de emisión de la fuente de área localizada a una distancia.

$\left(K + \frac{1}{2}\right) \Delta x =$ Viento arriba del receptor.

a y b = Son coeficientes relacionados con la estabilidad atmosférica.

El modelo Gifford – Hanna, introduce muchas simplificaciones en la ecuación de difusión. Proporcionando una expresión analítica sencilla; sin embargo no pueden manejar los casos de vientos en calma (u = 0, i = 1, 2,..... 16).

3.6 Modelo de Levy – Cardenas.

En 1973, Levy y Cárdenas, modificaron el modelo de Gifford-Hanna para poder modelar la contaminación atmosférica de SO₂ en la ciudad de México aún cuando existen condiciones de calma en más del 50% del año.

Las expresiones que se obtienen son del tipo:

$$X(x, y) = \sum_{i=1}^{16} F_i X_i(x, y) + F_c X_c(x, y)$$

En donde:

- F_i = Frecuencia con que el viento sopla en la i - ésima dirección
- X_i(x,y) = Concentración cuando hay viento predominante en la i – ésima dirección, siendo dado su valor por la ecuación del modelo de Gifford –Hanna.
- F_c = Frecuencia de ocurrencia de la condición de viento en calma.
- X_c(x,y) = Concentración cuando ocurren condiciones de calma, y el valor de esta expresión es:

$$X_c(x, y) = \frac{\left(\frac{2}{\pi}\right) \left(\frac{AX}{2}\right)^{1-b}}{\int_c a(1-b)} Q_0(x, y)$$

- U_c = Velocidad del viento en condiciones de calma, la cual teóricamente tiene un valor de U_c = 1.17 m/s

La velocidad del viento predominante ($\bar{u}_i, i = 1, 2, \dots, 16$) se obtuvo de la estación meteorológica del aeropuerto operada por ASSA. El inventario de fuentes emisoras de SO₂ fue proporcionado por PEMEX y los coeficientes a y b se tomaron de la fórmula de $\sigma_z = a \times b$ dada por Pasquill.

3.7 Modelo de Lamb - Levy – Burkle

En 1975, Lamb, Levy y Burkle desarrollaron un modelo matemático más avanzado de contaminación atmosférica para la Ciudad de México, en el cual se pueden incluir los fenómenos del viento predominantes, vientos en condiciones de calma efecto de isla calor, efecto de la capa de inversión, efectos de la topografía, así como reacciones químicas lineales de contaminantes, pudiendo calcularse la concentración promedio de SO₂ y CO ; no solamente en promedios anuales, sino también mensuales, semanales y aún diarios.

La concentración promedio \bar{C} , a lo largo de un periodo arbitrario T, en un receptor localizado por el vector de posición $r = r(x, y, z)$, se puede obtener integrando la ecuación de difusión Langragiana en el periodo T. Obteniéndose la expresión.

$$\bar{C}(r) = \int \int_{R_0}^T \bar{Q}(r, r', t'; T) S(r', t) dt' dr'$$

Ya que es la principal idea introducida en la ecuación de Levy - Cardenas, esto es el modelar por separado las condiciones de viento predominante y viento en calma, tuvo tanto éxito que se utilizará nuevamente en este modelo, dividiendo el periodo de tiempo T en sub-periodos de viento predominante, viento en calma y subperiodo transitorio t obteniéndose la expresión:

$$\bar{C}(r) = \int_R \left[\int_{\Omega_p} \bar{Q} S dt' + \int_{\Omega_p} \bar{Q} S dt' + \int_{\Omega_p} \bar{Q} S dt' \right] dr'$$

En estas expresiones (S), representa la difusión del flujo de contaminante emitido por las fuentes emisoras en la región de interés (R), pudiendo ser estas fuentes de área (zonas industriales), fuentes puntuales (chimeneas) y/o fuentes lineales (avenidas, viaductos, etc.), por otra parte Q esta dada por la expresión:

$$\bar{Q}(r, r', t', T) = \frac{1}{T} \int_{t'}^T Q\left(r, \frac{t}{r'}, t'\right) dt$$

$Q\left(r, \frac{t}{r'}, t'\right)$ denota la densidad de la probabilidad condicionada de que una partícula de contaminante introducida en la atmósfera en el punto r' al instante t' , se encuentre posteriormente en la posición r en el instante t. La obtención de $Q\left(r, \frac{t}{r'}, t'\right)$ para cada subperiodo se obtiene al considerar diferentes mecanismos de dispersión del contaminante.

Ω_p - Cuando hay viento predominante, es de mayor importancia la dispersión por transporte del viento U, V, obteniéndose fórmulas del tipo del modelo de la pluma Gaussiana. En Ω_c cuando no hay viento predominante, es de mayor importancia la dispersión por difusión.

CAPÍTULO 4

MODELO GAUSSIANO

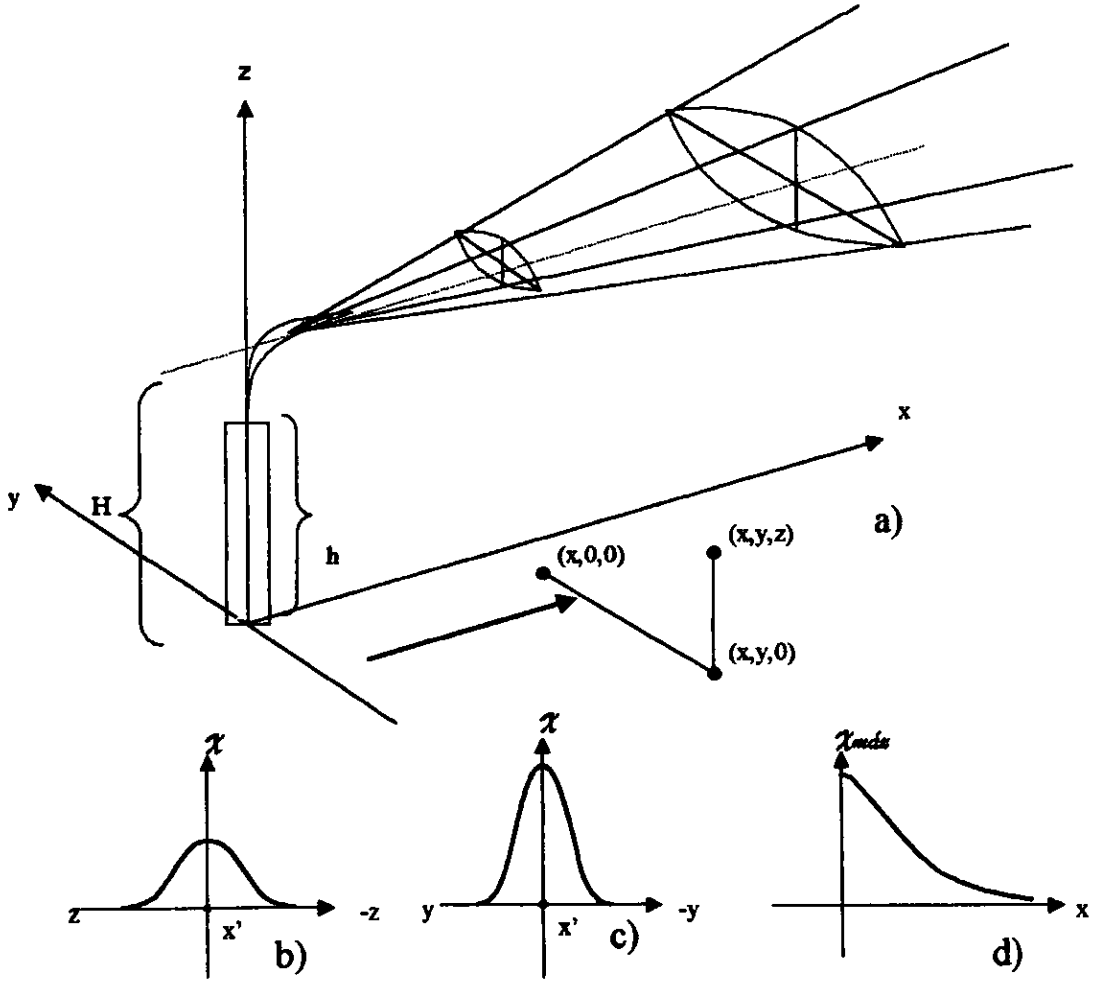
Para estimar la concentración de contaminantes gaseosos desde una fuente y en la dirección del viento, existen varios enfoques básicos, pero en general se requiere cierto número de suposiciones simplificadoras en cualquier caso a fin de obtener una solución manejable. De esto resulta que todas las teorías tienden a llegar a la misma función de distribución para la concentración del contaminante, esto es una función de distribución normal.

El modelo de mayor aceptación en la actualidad es el modelo de pluma Gaussiano, este modelo muestra la distribución "normal" y requiere información, de una manera indirecta, sobre los coeficientes de difusión de masa en las direcciones y y z .

4.1 Deducción matemática del modelo

Un modelo matemático de la dispersión atmosférica debe tratar de simular el comportamiento en conjunto de la plumas emitidas desde fuentes a nivel del terreno o a la altura de la chimenea. Para fuentes localizadas en un punto, como en el caso de una chimenea, el aspecto general de la pluma se podría representar por el esquema de la figura 4.1. A pesar de que la pluma tiene su origen a una altura h encima de la chimenea, se eleva una altura adicional Δh , debido a la capacidad de flotación de los gases calientes y a la cantidad de movimiento de los gases que salen verticalmente de la chimenea a una velocidad V_s . Por lo tanto y para fines prácticos, la pluma aparece como si se originara en una fuente puntual a una altura equivalente de la chimenea, $H = h + \Delta h$. Dicho punto de origen queda también hacia atrás de la línea de centro de la posición de la chimenea para $x = 0$.

El modelo de la situación física que se muestra en la Figura 4.1 se basa en la difusión de la masa del contaminante en las direcciones y y z .



a) Pluma de dispersión en la dirección del viento paralela al eje x' . b) Distribución asociada a la concentración de contaminantes con respecto a la altura z . c) Distribución asociada a la concentración de contaminantes con respecto a la dirección y observada en el esquema "a". d) Distribución de la concentración de contaminantes conforme aumenta la distancia x a partir del origen.

Figura 4.1 Aspecto General de la pluma de dispersión

4.1.1 Deducción de la ecuación tipo Gaussiano de dispersión

El método siguiente es uno de los que se utilizan para deducir la ecuación de dispersión de tipo Gaussiano, para un gas liberado continuamente de una fuente puntual. Con base en la teoría de transferencia de masa, la tasa de difusión, N_x , de una especie gaseosa en la dirección x en cualquier área de sección transversal A , está dada por la expresión:

$$N_x = -A \frac{\partial(D_x C)}{\partial x} \quad 4.1$$

donde N_x es la transferencia de masa por unidad de tiempo; D_x es la difusibilidad, área/tiempo en la dirección x ; C es la concentración en masa por volumen unitario; y A es el área de la sección transversal en la dirección x .

Se desea ahora aplicar esta relación general a la difusión de un gas que se origina en forma continua en una fuente puntual, a través de un volumen diferencial en el espacio. Considérese la situación representada en la Figura 4.2. Un contaminante gaseoso, arrastrado por el viento en la dirección x , con una velocidad del viento u entra a un elemento fluido de un tamaño $dx \, dy \, dz$. La tasa de difusión de masa dentro del elemento fluido (independiente del movimiento del volumen de la corriente de gas) en términos de la ecuación 4.1 será

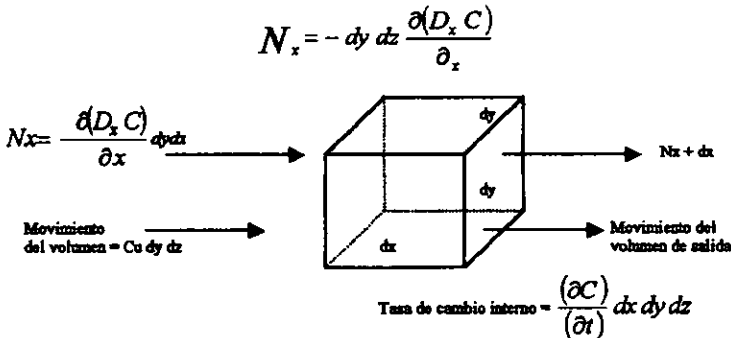


Figura 4.2 Esquema del desarrollo de la ecuación que relaciona la transferencia de masa debido a la difusión y movimiento del volumen dentro y fuera de un elemento fluido para el cambio de una concentración interna.

La tasa diferencial de salida del volumen, en la dirección x , es

$$N_{x+dx} = -dy \, dz \left[\frac{\partial(D_x C)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\partial(D_x C)}{\partial x} \right) dy \, dz \right) dx \right]$$

La tasa de cambio de la concentración dentro del volumen diferencial, debido a la difusión de masa de entrada y salida en la dirección x , es igual a la diferencial entre N_{x+dx} y N_x . Esta magnitud es

$$N_{x+\Delta x} - N_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial(D_x C)}{\partial x} \right) dx dy dz \quad 4.2$$

Expresiones similares son válidas para las direcciones y y z.

Además, de todos modos, el movimiento del contaminante se ve también auxiliado por el movimiento del volumen del fluido. Se observa que la tasa de influjo del contaminante en la posición x a través del área dy dz es

$$\text{Tasa de entrada (movimiento del volumen)} = C(u) dy dz$$

y la tasa de salida en la posición (x + Δx) es

$$\text{Tasa de salida (movimiento del volumen)} = C(u) dy dz + \frac{\partial}{\partial x} (C u) dx dy dz$$

La tasa neta de cambio de concentración dentro del volumen de control dx dy dz, la que resulta del movimiento del flujo, será entonces

$$\text{Tasa neta (movimiento del volumen)} = - \frac{\partial}{\partial x} (C u) dx dy dz \quad 4.3$$

El efecto neto de la difusión de masa y del movimiento del volumen es el de cambiar la cantidad de masa dentro del volumen de control. La tasa de cambio de masa dentro del volumen de control es, simbólicamente,

$$\text{Tasa de cambio dentro de } dx dy dz = \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz \quad 4.4$$

Por tanto, la expresión general para la tasa de cambio de masa dentro de un volumen diferencial dx dy dz, debido al transporte de volumen así como los procesos de difusión en, de las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (C u) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial(D_x C)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial(D_y C)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial(D_z C)}{\partial z} \right) \quad 4.5$$

Al deducir la ecuación 4.5, se ha cancelado la magnitud dx dy dz, en toda la ecuación. Los párrafos siguientes constituyen algunas idealizaciones básicas con respecto a los problemas de difusión desde la chimenea, en este punto:

- 1.- La transferencia de masa debido al movimiento del volumen sobrepasa, con mucho, la contribución debida a la difusión de masa. Esto es, el segundo término del lado derecho de la ecuación 4.5 es mucho menor que el primer término y se puede eliminar de la ecuación.
- 2.- Se tiene un interés primordial en la solución en el estado estacionario para la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Por tanto, la magnitud $\partial C / \partial t$ es cero.
- 3.- A pesar de que la velocidad del viento sí varía en las tres dimensiones, la variación es relativamente pequeña. Por tanto es apropiado suponer que la velocidad del viento u es constante, ya que esto lleva a una solución más simple y más directa de la ecuación diferencial parcial.

En la ausencia de suficiente información contraria, se supone que las difusividades de masa, D_x , D_y y D_z , son constantes. Estas cuatro aseveraciones conducen a la reducción de la ecuación a la forma siguiente:

$$u \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = D_y \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + D_z \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad 4.6$$

La solución general de esta ecuación diferencial parcial de segundo orden es

$$C = K x^{-1} e^{-\left[\left(\frac{y^2}{\bar{D}_y} \right) + \left(\frac{z^2}{\bar{D}_z} \right) \right] \frac{u}{4x}} \quad 4.7$$

donde K es una constante arbitraria cuyo valor se determina por las condiciones de frontera del problema atmosférico específico. Una condición de frontera que es necesario satisfacer es que la tasa de transferencia del contaminante a través de cualquier plano vertical situado en la dirección del viento con respecto a la fuente, es una constante durante el estado estacionario, y esta constante debe ser equivalente a la tasa de emisión Q de la fuente; esto es, todos los contaminantes emitidos de la fuente deben considerarse en algún lugar en la dirección del viento dentro del plano y-z. Por tanto se supone que no ocurre reacción química alguna en la dirección del viento, que elimine parte del contaminante, y no se admite otro mecanismo como la absorción o adsorción por otros medios. Dentro de un contexto matemático, esta condición de frontera está expresada por:

$$Q = \iint u C \, dy \, dz \quad 4.8$$

Por lo general, los límites de integración de dy son desde menos a más infinito. Sin embargo, los límites de dz dependen de la situación física considerada.

4.1.2 Estimación de las desviaciones normales

Se ha demostrado que los valores de σ_y y σ_z están relacionados con los coeficientes de difusión de masa de un gas a través de otros medios en las direcciones y y z. Como se podría anticipar de la descripción física del problema de la difusión, las desviaciones horizontales y verticales, σ_y y σ_z son una función de la posición x en la dirección del viento así como de las condiciones de estabilidad atmosférica. Muchas mediciones experimentales en la atmósfera han llevado a una evaluación y correlación de los valores de σ_y y σ_z . Existen varios grupos de gráficas para estos dos parámetros y los rangos de las condiciones de estabilidad cubiertos en los diferentes grupos usualmente no coinciden. Un grupo de gráficas de gran aceptación se presenta en las figuras 4.5 y 4.6, según han sido preparadas por Turner (1). Dichas correlaciones se basan en las restricciones siguientes:

**ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO**

1. Las concentraciones estimadas con el uso de estas gráficas corresponderán a un tiempo de muestreo de aproximadamente 10 min.
2. Las desviaciones horizontales y verticales se basan en una representación del terreno como si fuera un campo abierto.
3. Las concentraciones estimadas representan aproximadamente sólo los cientos de metros más bajos de la atmósfera.

Según lo advierte Turner, e indicando por las líneas punteadas sobre la mayor parte del rango de la gráfica σ_z , los valores de σ_z son más dudosos que los valores σ_y . Esto resulta especialmente cierto para distancias de más de 1 km en la dirección del viento. En varios de los casos, como para las condiciones atmosféricas de neutrales a moderadamente inestables, y para distancias de hasta unos cuantos kilómetros, la concentración en la línea central a nivel del suelo, basadas en dichas gráficas, deberán encontrarse dentro de un factor de 2 a 3 de los valores actuales.

Turner preparó también una lista de las condiciones atmosféricas que son útiles para determinar cuáles de las seis clases de estabilidad (de A hasta F) que aparecen en las gráficas de σ resulta adecuada. La tabla 4.1 muestra esta clave para las diversas categorías de estabilidad.

Tabla 4.1 Clave de las categorías de estabilidad

Velocidad del viento superficial a 10m (m/s)	Día Radiación solar entrante			Noche Cubierta de nubes	
	Fuente	Moderada	Ligera	En su mayoría nublado	En su mayoría despejado
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-8	C	C-D	D	D	D
> 8	C	D	D	D	D

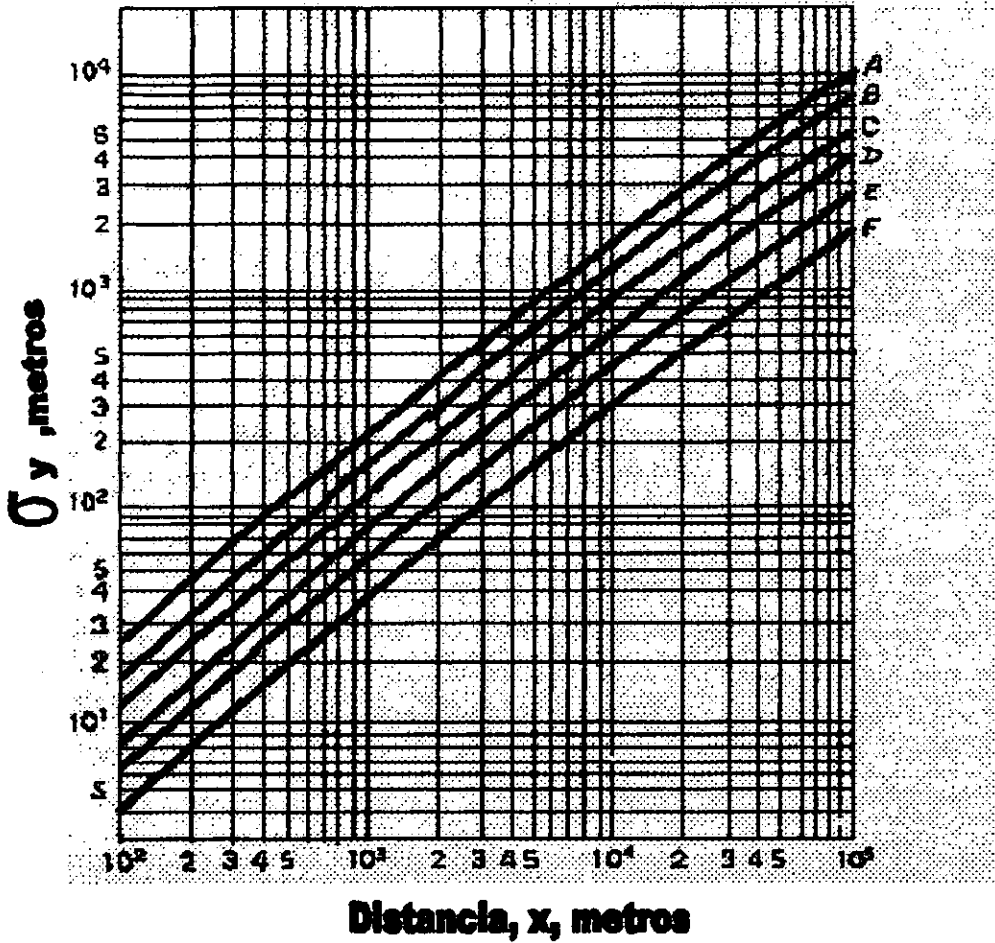


Figura 4.6 Desviación normal, σ_y , en la dirección del viento cruzado como una función de la distancia en la dirección del viento.

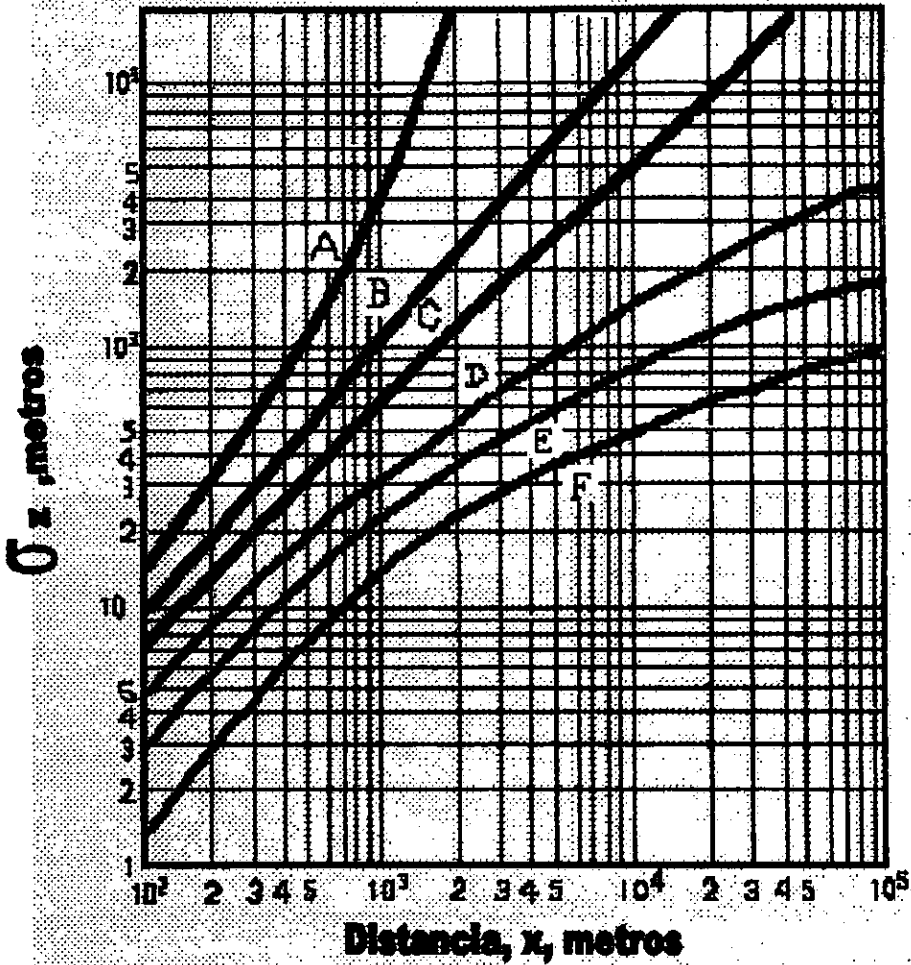


Figura 4.7 Desviación normal, σ_z , en la dirección vertical, como una función de la distancia en la dirección del viento.

Con frecuencia es deseable poseer las dos desviaciones normales expresadas en una forma algebraica. Debido a la naturaleza de los trazadores de σ , se obtiene un ajuste razonable de la curva utilizando la siguiente expresión.

$$\sigma_z = a x^b \quad \sigma_y = c x^d \quad 4.8_A$$

En la Tabla 4.2 se presentan valores para las constantes que dependen de la estabilidad. El valor de x se ha de expresar en metros.

Categoría de Estabilidad Atmosférica	a			b			c		d	
	X<500	500<=x<=5000	x>=5000	X<500	500<=x<=5000	X>=5000	X<=10000	X>=10000	X<10000	x>=10000
A	0.0383	0.000254	0.000254	1.281	2.089	2.089	0.495	0.606	0.873	0.851
B	0.1383	0.0494	0.0494	0.9467	1.114	1.114	0.310	0.523	0.897	0.840
C	0.112	0.101	0.115	0.910	0.926	0.911	0.197	0.285	0.908	0.867
D	0.0856	0.259	0.737	0.885	0.687	0.564	0.122	0.193	0.916	0.885
E	0.1094	0.2452	0.8204	0.7857	0.6358	0.4805	0.0934	0.141	0.812	0.868
F	0.05645	0.1930	1.505	0.808	0.6072	0.3662	0.0625	0.0923	0.811	0.889

Nota Los valores de σ_z deben limitarse a 3,000 metros

A pesar de que los datos de Turner son los que se utilizan con mayor frecuencia, la disponibilidad de nuevos datos de campo indica que se debe efectuar una reevaluación de los datos de σ a fin de utilizarlos en los estudios de la dispersión de los contaminantes del aire.

4.1.3 Cálculo de la altura efectiva de la chimenea

La mayoría de los métodos analíticos para pronosticar las concentraciones de los efluentes de las chimeneas implican la localización de un origen virtual o equivalente como se muestra en la figura 4.1. La elevación H del origen virtual se obtiene añadiendo un término Δh , la altura de la pluma, a la altura actual, h_s , de la chimenea. Existen numerosos métodos para calcular Δh . Básicamente tres conjuntos de parámetros controlan el fenómeno de una pluma gaseosa inyectada a la atmósfera desde una chimenea. Son: las características de la chimenea, las condiciones meteorológicas, y la naturaleza física y química del efluente. Se han propuesto gran número de expresiones analíticas a fin de relacionar dichos factores con los pronósticos de elevación de la pluma. No es nada sorprendente que ninguna expresión haya demostrado su superioridad en lo que respecta a los perfiles geométricos de la chimenea y de las condiciones atmosféricas.

Carson y Moses llegaron a la conclusión de que la siguiente ecuación proporcionaba el mejor acuerdo con todos los datos observados, sin importar la condición de estabilidad

$$\Delta h = -0.029 \frac{V_s d}{u} + 2.62 \frac{(Q_h)^{1/2}}{u} \quad 4.9$$

donde Δh es la elevación de la pluma en metros, V_s es la velocidad de salida del gas de la chimenea, en metros por segundo, d es el diámetro de salida del gas de la chimenea, u es la velocidad del viento a la altura de la chimenea, y Q_h es la tasa de emisión de calor en kilojulios por segundo.

$$Q_h = m C_p (T_s - T_a)$$

$$m = \frac{\pi d^2 V_s P}{4 R T_s}$$

donde m es la tasa de flujo de masa del gas de la chimenea, en kilogramos por segundo, C_p es el calor específico a presión constante del gas de la chimenea, T_s es la temperatura del gas de la chimenea a la salida de la misma, en grados Kelvin, y T_a es la temperatura del aire atmosférico a la altura de la chimenea, en grados Kelvin.

La fórmula de Holland (Ecuación 4.25) mostró un acuerdo bastante bueno con las observaciones, con una ligera tendencia a subestimar la elevación de la pluma. Los símbolos y unidades para la ecuación de Holland son los mismos citados anteriormente. Además, la presión P debe expresarse en milibares. Esta ecuación parece ser más exacta para las chimeneas altas. Si se desea, el último término de la fórmula de Holland se puede sustituir por $0.0098 Q_h / V_s d$.

$$\Delta h = \frac{V_s d}{u} \left[1.5 + 2.68 * 10^{-3} P d \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \right] \quad 4.10$$

La fórmula de Concawe, basada en observaciones en Europa, es

$$\Delta h = 2.71 \frac{Q_h^{1/2}}{u^{3/4}} \quad 4.11$$

Cuando fue perfeccionada por Thomas y colaboradores, la ecuación tomó la forma

$$\Delta h = 4.71 \frac{Q_h^{0.444}}{u^{0.694}} \quad 4.12$$

Se encontró además que las tres ecuaciones específicas de Moses y Carson para condiciones atmosféricas inestables, neutrales y estables eran razonablemente exactas. Los datos para estas tres relaciones se utilizaron para desarrollar la ecuación global de Moses y Carson (4.9). Específicamente, estas tres ecuaciones son:

$$\Delta h = 3.47 \frac{V_s d}{u} + 5.15 \frac{(Q_h)^{1/2}}{u} \quad (\text{inestable}) \quad 4.13a$$

$$\Delta h = 0.35 \frac{V_s d}{u} + 2.64 \frac{(Q_h)^{1/2}}{u} \quad (\text{neutral}) \quad 4.13b$$

$$\Delta h = -1.04 \frac{V_s d}{u} + 2.24 \frac{(Q_h)^{1/2}}{u} \quad (\text{estable}) \quad 4.13c$$

Briggs formuló algunas ecuaciones para estimar el valor de Δh de emisiones dominadas por energía térmica:

a) Atmósferas estables con viento (E,F)

$$\Delta h = 2.6 \left(\frac{F}{u s} \right)^{1/3} \quad 4.14$$

donde:

$$s = \frac{0.02 \text{ g}}{t_a} \quad \text{para la categoría de estabilidad atmosférica E}$$

$$s = \frac{0.035 \text{ g}}{t_a} \quad \text{para la categoría de estabilidad atmosférica F}$$

$$F = V_s R^2 g \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right)$$

T_u = Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{K}$)

T_s = Temperatura de salida de los gases ($^{\circ}\text{K}$)

R = Radio del ducto (m)

U = velocidad del viento a la altura de la fuente (m/s)

V_s = velocidad de salida de los gases (m/s)

g = constante de gravedad (9.81 m/s^2)

b) Atmósferas estables, viento en calma (E,F)

$$\Delta h = 5 F^{1/4} s^{-3/8} \quad 4.15$$

Cuando hay velocidades menores a 5 m/s se utilizan las dos ecuaciones (4.14 y 4.15) y se elige la que proporcione el valor más pequeño.

c) Atmósferas inestables y neutral (A,B,C,D)

Para $X_{\text{critica}} \geq X_T$:

$$\Delta h = \frac{1.6 F^{1/3} X_T^{2/3}}{u} \quad 4.16$$

Para distancias menores de X_T , se utiliza X_{critica} en lugar de X_T en la ecuación 4.16

$X_T = 49 F^{5/8}$ Para $F \leq 55 \text{ m}^3/\text{s}^3$

$X_T = 119 F^{2/5}$ Para $F > 55 \text{ m}^3/\text{s}^3$

En la literatura existen muchas otras ecuaciones para la elevación de la pluma. Es una cuestión de experiencia que los modelos de elevación de las plumas cambien necesariamente según cambian el tamaño de las unidades y la altura de las chimeneas. También es evidente que el tipo de condiciones atmosféricas sea crítico para la evaluación de Δh , en especial cuando se altera el tamaño de la planta.

4.2 Fuente puntual a nivel del suelo.

Para una fuente puntual a nivel del suelo, los límites de integración para z se toman desde 0 hasta ∞ . Con dichos límites y con la sustitución de la ecuación 4.7 en la ecuación 4.8, se encuentra que

$$Q = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K u x^{-1} e^{-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right) \frac{u}{4x}} dy dz$$

Sea ahora $\bar{y} = \frac{y}{D_y^{1/2}}$ y $\bar{z} = \frac{z}{D_z^{1/2}}$. Con este cambio de variables,

$$Q = K u x^{-1} (D_y)^{1/2} (D_z)^{1/2} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\bar{z}^2 u}{4x}} dz \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\bar{y}^2 u}{4x}} d\bar{y}$$

sin embargo, en las tablas de integrales normales, se encuentra que

$$\int_0^{\infty} e^{-a^2 x^2} dx = \frac{\pi^{1/2}}{2a}$$

y la integral de la misma magnitud desde menos a más infinito tiene un valor que es el doble del determinado, o sea $\pi^{1/2}/a$. Por tanto,

$$Q = K u x^{-1} (D_y)^{1/2} (D_z)^{1/2} \left(\frac{\pi x}{u}\right)^{1/2} \left(2\left(\frac{\pi x}{u}\right)^{1/2}\right)$$

$$Q = 2\pi K (D_y)^{1/2} (D_z)^{1/2}$$

o sea

$$K = \frac{Q}{2\pi (D_y D_z)^{1/2}} \quad 4.17$$

Al sustituir la ecuación 4.17 en la ecuación 4.7 se encuentra que la concentración de un contaminante emitido de una fuente puntual a nivel del suelo está representado por la expresión

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi x (D_y D_z)^{1/2}} e^{-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right) \frac{x}{4x}} \quad 4.18$$

Esta ecuación tiene el formato de la distribución gaussiana doble o normal, según se expresa por la siguiente ecuación:

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}} \quad 4.19$$

Como sucede que para una fuente a nivel del suelo la máxima concentración en las direcciones Y y Z deberá tener lugar a lo largo de la línea central a nivel del suelo, los valores de μ_y y μ_z en la ecuación 4.11 serán cero para esta situación física. Por tanto, la ecuación 4.19 se reduce a la forma:

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}}$$

Se ha considerado conveniente reorganizar la ecuación 4.18 en una forma similar a la expresión anterior. Se establecen las siguientes definiciones a fin de poder efectuar dicha transformación

$$\sigma_y^2 = \frac{2D_y x}{u} \quad \text{y} \quad \sigma_z^2 = \frac{2D_z x}{u} \quad 4.20$$

La sustitución de estas dos definiciones en la ecuación 4.18 lleva a la siguiente relación para la concentración a favor del viento desde una fuente puntual a nivel del suelo:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)} \quad 4.21$$

Cuando se reordena la ecuación 4.21 de manera que el lado izquierdo sea igual a $Cu/2Q$, el lado derecho tendrá entonces el idéntico formato de la $f(y, z)$ ya descrito y que es del tipo Gaussiano doble. Las unidades para la concentración gaseosa C se determinan por las unidades utilizadas para expresar las magnitudes Q, u, σ_y y σ_z están dadas por lo general en metros y u en metros por segundo. Si se desea el valor de C en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la tasa de emisión Q se deberá entonces expresar en $\mu\text{g}/\text{s}$. Si Y y Z se toman con un valor de cero, la ecuación 4.21 se reduce a

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad 4.24$$

4.2.1 Fuente puntual a la altura H por encima del nivel del suelo

Para una fuente puntual a una altura H sobre el suelo, los límites de integración para z en la ecuación 4.8 se toman desde menos a más infinito. El límite matemático de menos infinito es físicamente significativo en el sentido siguiente. Aun en el caso de que el terreno fuera permeable a la difusión de un gas contaminante, la distribución gaussiana es de tal naturaleza que la mayor parte del contaminante existirá entre el suelo y la altura H. Por tanto, la adición a Q de la integración desde el nivel del suelo a menos infinito conduce a un pequeño error razonable, pero hace que las matemáticas sean mucho más fáciles de manejar.

El efecto de este cambio sobre el límite inferior de la integración de z es el de dividir en dos el valor de K encontrado previamente para la fuente puntual a nivel del suelo. Esto es, en el caso presente

$$K = \frac{Q}{4\pi(D_y D_z)^{1/2}} \quad 4.25$$

Esta relación de K se sustituye ahora en la ecuación 4.7, y las magnitudes D_y y D_z se cambian por σ_y y σ_z en términos de la ecuación 5.21. De aquí resulta que,

$$C = \frac{Qx^{-1}}{4\pi(D_y D_z)^{1/2}} e^{-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right)\frac{x}{4x}}$$

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)} \quad 4.26$$

Para la emisión de una chimenea con una altura efectiva H, es necesario cambiar el término exponencial que contiene a Z^2 , en la ecuación 4.26 por $z - H$. Por tanto se tiene que para una fuente en un punto elevado de un contaminante gaseoso, sin reflexión el valor de C será,

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right)} \quad 4.27$$

La restricción "sin reflexión" es muy importante. La ecuación anterior constituye una expresión adecuada para la concentración en la dirección del viento, hasta llegar a un punto en la dirección x donde sea significativa la concentración a nivel del suelo ($z = 0$). Tendrá lugar entonces una apreciable "reflexión" del contaminante gaseoso, al difundirse regresivamente a la atmósfera desde el nivel del terreno. En un modelo de este tipo se supone que la superficie terrestre no es un sumidero para un contaminante.

Es una tarea relativamente simple modificar la ecuación precedente para tener en cuenta la reflexión regresiva de un contaminante a la atmósfera, una vez que haya llegado al nivel del terreno. Por referencia a la Figura 4.3, se observa que la reflexión a cierta distancia x es matemáticamente equivalente a tener en $-H$ una imagen de espejo de la fuente. El área sombreada más allá de la posición l en el diagrama indica la región de la atmósfera en donde la

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 4

Modelo Gaussiano para fuentes puntuales, lineales y móviles

concentración aumentará sobre la suministrada normalmente por la fuente en H. Esta concentración aumentada se determina matemáticamente por superposición lineal de dos curvas de concentración del tipo Gaussiano, una centrada en H y la otra en -H. Esto equivale a sumar dos ecuaciones como la ecuación 4.17. Sin embargo, una de las ecuaciones contiene un término (z+H), en vez del término (z-H). Esto da por resultado que la ecuación de concentración para una fuente elevada con reflexión tome la forma:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left(e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad 4.28$$

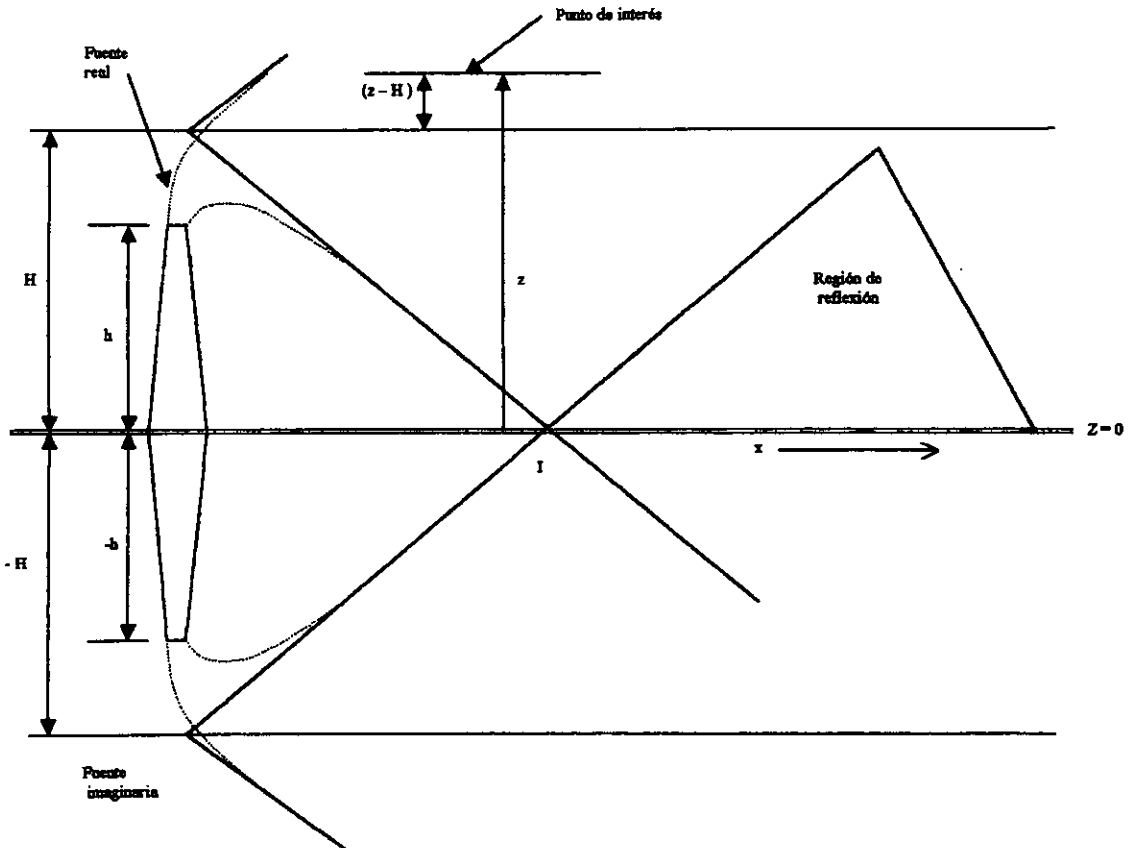


Figura 4.3 El uso de una fuente imaginaria para descubrir matemáticamente la reflexión gaseosa en la superficie terrestre

Es obvio que el efecto de la reflexión a nivel del suelo resulta en el aumento de la concentración a nivel del suelo, en una cantidad muy por encima del que se anticipará sin la reflexión.

Otra ecuación importante cuando se considera la reflexión a nivel del terreno, es la que representa la concentración a nivel del suelo. En este caso $z=0$, y la ecuación 4.18 se reduce a

$$C = (x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} \quad 4.29$$

Si se desea la concentración a nivel del suelo y en la línea central, el último término exponencial será igual a la unidad.

Un perfil típico de concentración en la dirección Z y un perfil en la dirección X a lo largo de la línea del centro y a nivel del suelo, se encontrarán superpuestos en un esquema del proceso de difusión de una chimenea elevada en la Figura 4.4. Nótese que la distribución gaussiana en la dirección Z está centrada en la altura H de la chimenea. Además, la concentración a lo largo en la línea central y en la dirección del viento, se hace mínima para un cierto valor de X para luego disminuir con el aumento en los valores de X . Será también válido un perfil similar al de la dirección Z , pero en la dirección Y . No obstante, la pendiente de las distribuciones gaussianas en las direcciones Y y Z podrán ser muy diferentes, puesto que se ha encontrado que los valores de σ_y y σ_z para determinado valor de X son significativamente diferentes.

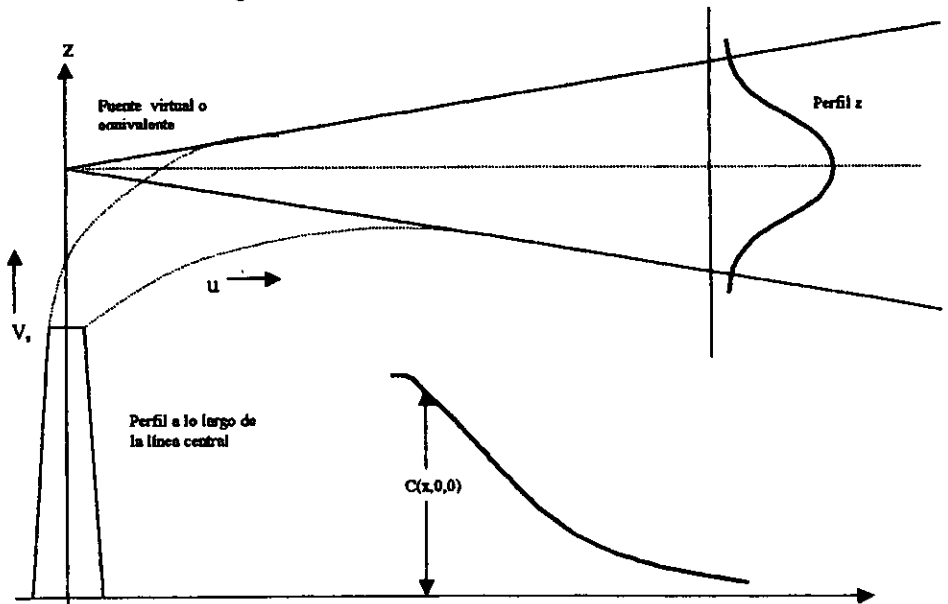


Figura 4.4 Perfiles de concentración a lo largo de la línea central, en la dirección X y en la dirección Z .

4.2.2 Concentración Máxima al nivel del suelo

El efecto de la reflexión del suelo, es de aumentar las concentraciones a nivel del suelo de los contaminantes gaseosos, según aumenta x , hasta un punto muy por encima del nivel que podría esperarse sin reflexión. Tal aumento en el valor de C en la dirección X no puede continuar indefinidamente. La difusión hacia fuera (viento cruzado) en la dirección Y , y hacia arriba en la dirección Z , disminuirán la concentración a nivel del suelo ($z=0$) y a lo largo de la línea central ($y=0$). Por tanto, como se indicó en la figura 4.4, la curva C versus x tiene un punto máximo antes de caer hacia cero a grandes valores de x .

La técnica de maximización del cálculo diferencial se puede utilizar para determinar la posición y el valor de la concentración máxima, sustituyendo las ecuaciones 4.8_A en la ecuación 4.29:

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi u a c x^{b+d}} e^{\frac{-H^2}{2a^2 x^{2b}}} \quad 4.30$$

Derivando con respecto a x :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{Q}{\pi u a c} e^{\frac{-H^2}{2a^2 x^{2b}}} \left[\frac{H^2 b}{a^2 x^{(2b+d+1)}} - \frac{b+d}{x^{(b+d+1)}} \right]$$

igualando la ecuación anterior con cero y despejando x tenemos:

$$X_{\text{critica}} = \left[\frac{b H^2}{a^2 (b+d)} \right]^{\frac{1}{2b}} \quad 4.31$$

sustituyendo la ecuación 4.31 en la 4.30 obtenemos la expresión para la concentración máxima:

$$C_{\text{max}} = \frac{Q}{\pi u a c \left(\frac{b H^2}{a^2 (b+d)} \right)^{\frac{b+d}{2b}}} e^{-\frac{b+d}{2b}} \quad 4.32$$

Para poder utilizar las ecuaciones 4.31 y 4.32 se debe conocer las categoría de estabilidad atmosférica y suponer que la distancia crítica se encuentra entre un rango de valores de x , para poder utilizar los coeficientes de la tabla 4.2. Se calcula el valor de X_{critica} y si este se encuentra dentro del rango supuesto se acepta, si no es así se debe suponer en otro rango de valores x , esto se realiza hasta que la suposición sea correcta.

4.2.3 Determinación de la altura requerida de la chimenea

Entre los problemas típicos de la contaminación del aire se encuentra el caso de una nueva industria, en la cual los productos gaseosos de un nuevo proceso industrial, han de dispersarse a la atmósfera por medio de una nueva chimenea. Se conoce Q , la tasa de emisión del proceso. A una distancia dada x , en la dirección del viento, se encuentra otra propiedad, en donde es necesario que la concentración nunca sobrepase un valor establecido C (nivel máximo permisible). También se conoce, de los datos meteorológicos, la velocidad general del viento, u , que se podrá esperar. El problema básico consiste en determinar la altura requerida H , de la chimenea.

La peor situación puede ocurrir cuando el nivel máximo permisible se localice en X_{critca} en este caso se puede igualar el nivel máximo con $C_{máx}$ de la ecuación 4.32, donde esta forma la H que interviene en la ecuación es la altura requerida, para obtenerla se tiene que despejar H de la ecuación 4.32:

$$H_{requerida} = \sqrt{\left[\frac{Q e^{-\frac{b+d}{2b}}}{\pi u a c C_{máx}} \right] \frac{2b}{b+d} \frac{a^2 (b+d)}{b}} \quad 4.33$$

Para poder utilizar la ecuación anterior se debe suponer un valor de la velocidad u , ya que el valor conocido de la velocidad de viento por lo general lo evalúan a una altura de 10m y el valor que se requiere debe ser a la altura de la chimenea, se deben conocer también los valores de los coeficiente de la forma algebraica de las desviaciones normales, para lo cual se elige un rango de valores de x de la tabla 4.2 para calcular el valor de X_{critca} de tal manera que se encuentre dentro del rango supuesto, al lograr esto los coeficientes utilizados serán los que se utilicen para calcular la altura requerida, conociendo este valor se calcula la velocidad u si ésta es igual a la supuesta, el valor de H será el correcto si no es así se debe suponer otro valor de u y volver a repetir el proceso hasta que coincida el valor de u supuesto con el calculado.

Nótese que la magnitud H que se acaba de determinar es en realidad la altura efectiva de la chimenea, y no la altura real de la misma. Por tanto, la chimenea podría ser más corta que la altura H . No obstante, si se utiliza H para la altura real de la chimenea, quedará incluido un factor de seguridad en el estimado.

4.3 Fuentes Lineales y Móviles

La obtención de las concentraciones de gases y partículas emitidas al ambiente por fuentes móviles se aplica en zonas muy transitadas, como pueden ser ríos, tramos rectos de carreteras, pistas aéreas, etc., Las emanaciones de estas fuentes móviles se pueden modelar como un corredor de emisiones. En donde un corredor de emisiones se considera como una expulsión longitudinal, horizontal, constante, infinita y totalmente homogénea, por lo que en cualquier punto a lo largo de este corredor debe emitir la misma cantidad de gases por unidad de longitud (tasa de emisión) y tener las mismas características físicas. Otras de las características que deben cumplir es que el corredor de emisiones debe ser considerablemente grande como para que no se presenten los efectos de borde ó el punto en el cual se quiere determinar la concentración debe estar cercano al corredor de emisión.

Cuando la dirección del viento es normal a la línea de emisión, la concentración a nivel del suelo en la dirección del viento está dada por:

$$C(x,0) = \frac{2q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z u} e^{-\left(\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right)} \quad 4.34$$

donde q es la fuerza de la emisión por distancia unitaria. Por ejemplo, se podría expresar q en términos de g/(s*m). En donde la tasa de emisión q por longitud unitaria (g/s*m), se determina del producto de la tasa de emisión por vehículo (g/s*veh.), multiplicada por el número de vehículos por unidad de longitud (veh./m). Esta última magnitud se obtiene dividiendo la tasa de recorrido de vehículos al pasar por un punto, (veh./hr), entre la velocidad promedio de los vehículos (m./hr).

Para determinar la tasa de emisión por vehículo (g/s*veh), se obtiene de gramos de contaminante emitidos por el vehículo por cada kilómetro de recorrido (g/km) el cual se puede obtener de la tabla 4.3 que a continuación se muestra, y este dato se multiplica por la velocidad del vehículo (km/s*veh).

$$q = \frac{g}{s \cdot m} = \left(\frac{g}{s \cdot \text{veh.}} \right) \left(\frac{\text{veh.}}{m} \right) \quad \text{donde:} \quad \frac{g}{s \cdot \text{veh.}} = \left(\frac{g}{km} \right) \left(\frac{km}{s \cdot \text{veh.}} \right); \quad \text{y} \quad \frac{\text{veh.}}{m} = \left(\frac{\text{veh.}}{hr} \right) \left(\frac{hr}{m} \right)$$

u es la velocidad del viento en m/seg, y σ_z es la desviación normal, dadas en mts observada en la sección 4.1.2. El termino exponencial se utilizará solamente en caso de que el tramo de carretera se encuentre elevado como por ejemplo algún puente con una longitud mayor a 100 mts situación en la que no se observaran efectos de borde. En donde H representa la altura sobre el nivel del suelo.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 4

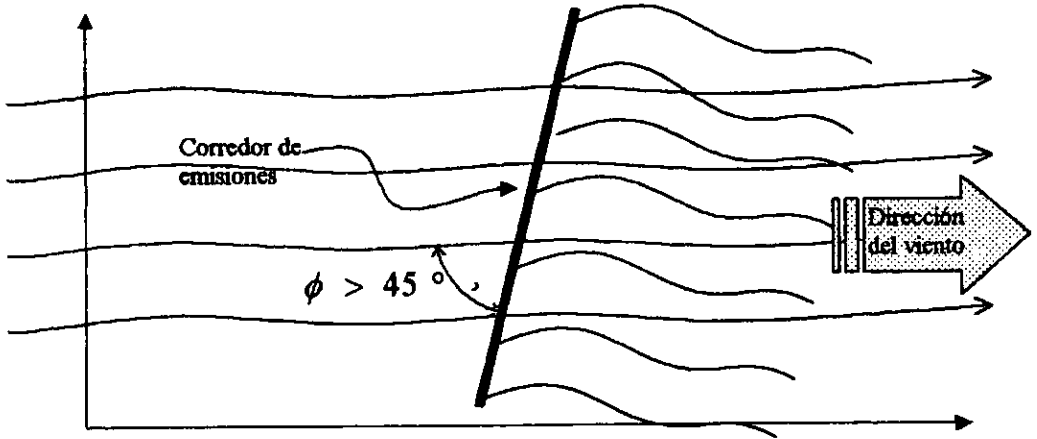
Modelo Gaussiano para fuentes puntuales, lineales y móviles

Cuadro 4.3 Cantidades de contaminantes arrojados a la atmósfera por fuentes móviles, expresado en gramos por kilómetro de recorrido del vehículo (g/km) en función del tipo de vehículo y modelo.

TIPO DE VEHÍCULO	MODELO	HC		CO		NO _x	
		ppm	g/km	ppm	g/km	ppm	g/km
Automóvil de uso particular que utilice como combustible gas natural, gas L.P. ó gasolina	1986 y anteriores	500	0.625	40000	4.22	4000	1.55
	1987 -1993	400	0.50	30000	3.165	3200	1.24
	1994 y posteriores	200	0.25	20000	2.11	1600	0.62
Camiones ligeros y pesados de carga que utilicen como combustible gas natural, gas L.P. ó gasolina.	1985 y anteriores	600	1.89	50000	21.875	4800	4.32
	1986 -1991	500	1.575	40000	17.5	4000	3.6
	1992 -1993	400	1.26	30000	13.125	3200	2.88
	1994 y posteriores	200	0.63	20000	8.75	1600	1.44
Taxis colectivos, microbuses y todo tipo de transporte público de pasajeros a gas natural, gas L.P. ó gasolina.	Cualquier año	100	0.32	10000	4.50	800	0.75
Camiones de carga y de pasajeros que utilicen como combustible diésel.	2000 y anteriores	200	0.63	20000	8.75	1600	1.44
	2001 y posteriores	65	0.20	10000	3.11	520	0.62

Los datos de este cuadro se obtuvieron apartir de la unión de las NOM-041-ECOL-1999 y NOM-042-ECOL-1999 que establecen los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes de fuentes móviles. Estos datos los puede cotejar en el capítulo 1 sección 1.3.+

La desviación normal horizontal, σ_y , está ausente de la ecuación, ya que la difusión con el viento cruzado desde diversas porciones de los gases emitidos, deberán ser autocompensantes. Nótese también que σ_y no aparece en la ecuación (4.34), ya que la concentración debe ser uniforme en la dirección y una distancia x determinada. Cuando la dirección del viento no sea perpendicular a la fuente lineal, Turner sugiere que la ecuación (4.34) se divida por $\text{sen}\phi$; donde ϕ es el ángulo agudo entre el corredor de emisiones y la dirección del viento. Esta corrección no se debe usar cuando ϕ sea menor de 45 grados



Quedando finalmente la ecuación:

$$C(x,0) = \frac{2q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z u \sin\phi} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2} \quad 4.35$$

Cuando el corredor de emisión es continuo y tiene una longitud relativamente corta, se deberán tener en cuenta los efectos de borde causados por los dos extremos de la fuente. Estos efectos de borde resultan más importantes, en el sentido de que se amplían a mayores distancias del viento transversal, conforme aumenta la distancia desde la fuente en la dirección del viento. Si la fuente lineal es perpendicular a la dirección del viento, entonces es conveniente definir el eje x en la dirección del viento y que pase también por el punto de muestreo en la dirección del viento. Los extremos de la fuente lineal se encuentran en dos posiciones, y_1 e y_2 en la dirección del viento cruzado, y donde y_1 es menor que y_2 . La concentración a lo largo del eje x , a nivel del suelo, estará dada entonces por la expresión

$$C(x,0,0) = \frac{2q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2} \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-0.5p^2} dp$$

donde $p_1 = y_1/\sigma_y$ y $p_2 = y_2/\sigma_y$. Una vez establecidos los límites de la integración, se podrá determinar el valor de la integral por medio de las tablas estadísticas normales.

CAPÍTULO 5

PROGRAMA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DE GASES EMITIDOS POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES

La predicción de concentraciones de contaminantes atmosféricos en un lugar y tiempo determinados es esencial para evaluar el impacto en la calidad del aire de proyectos que involucren fuentes de emisión móviles y lineales. El objetivo es verificar que no se excedan los niveles máximos permisibles establecidos en las normas de calidad del aire. Esta predicción se hace simulando el proceso de dispersión atmosférica por medio de modelos matemáticos.

El uso de la computadora ha permitido hacer análisis más complejos y detallados para resolverlos en menos tiempo abarcando una gama de condiciones factibles, obteniéndose así una mejor simulación de fenómeno.

En este capítulo se presenta el desarrollo de un programa de computadora que estima concentraciones de contaminantes con base en el modelo Gaussiano de dispersión utilizando información meteorológica y de la fuente de emisión. La presentación de los resultados se da en forma numérica y gráfica, obteniendo una mejor visualización de los niveles de contaminación en la zona.

5.1 Estructura del Programa

Diagrama de flujo del programa para determinar la concentración de HC, CO y NOx a los costados de una carretera.

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 5.1 presenta la secuencia en la que se introducen los datos, la forma como opera con las ecuaciones y parámetros desarrollados.

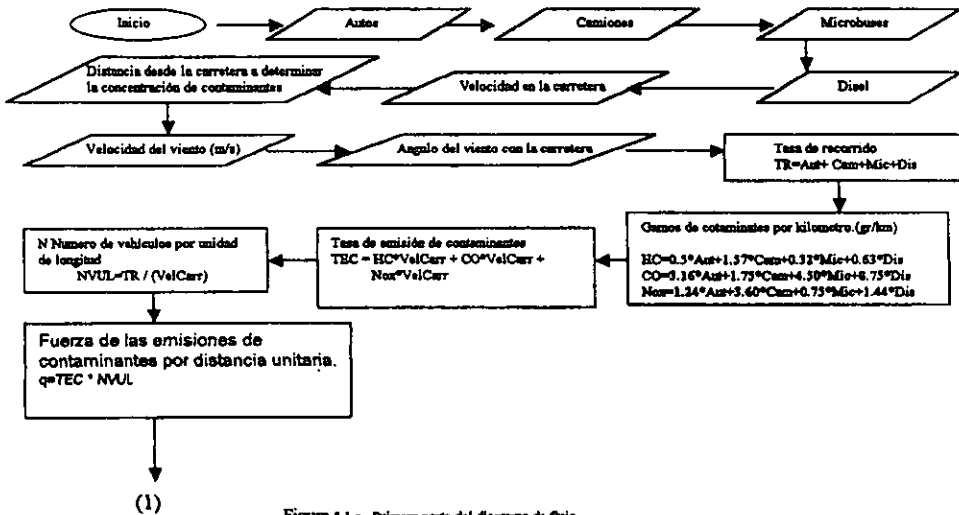


Figura 5.1.a. Primera parte del diagrama de flujo.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 5
Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

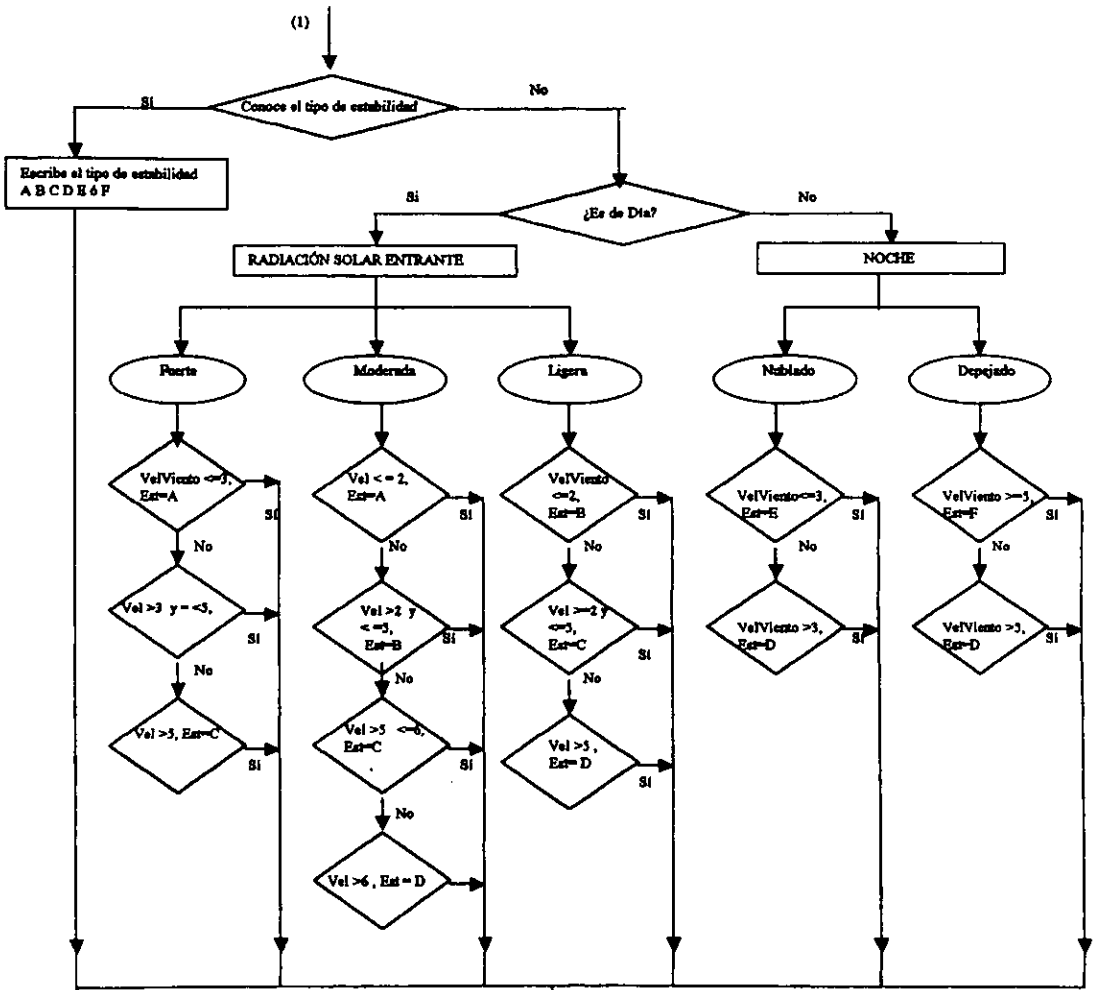


Figura 5.1 b Segunda parte del diagrama de flujo.

(2)

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 5
Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

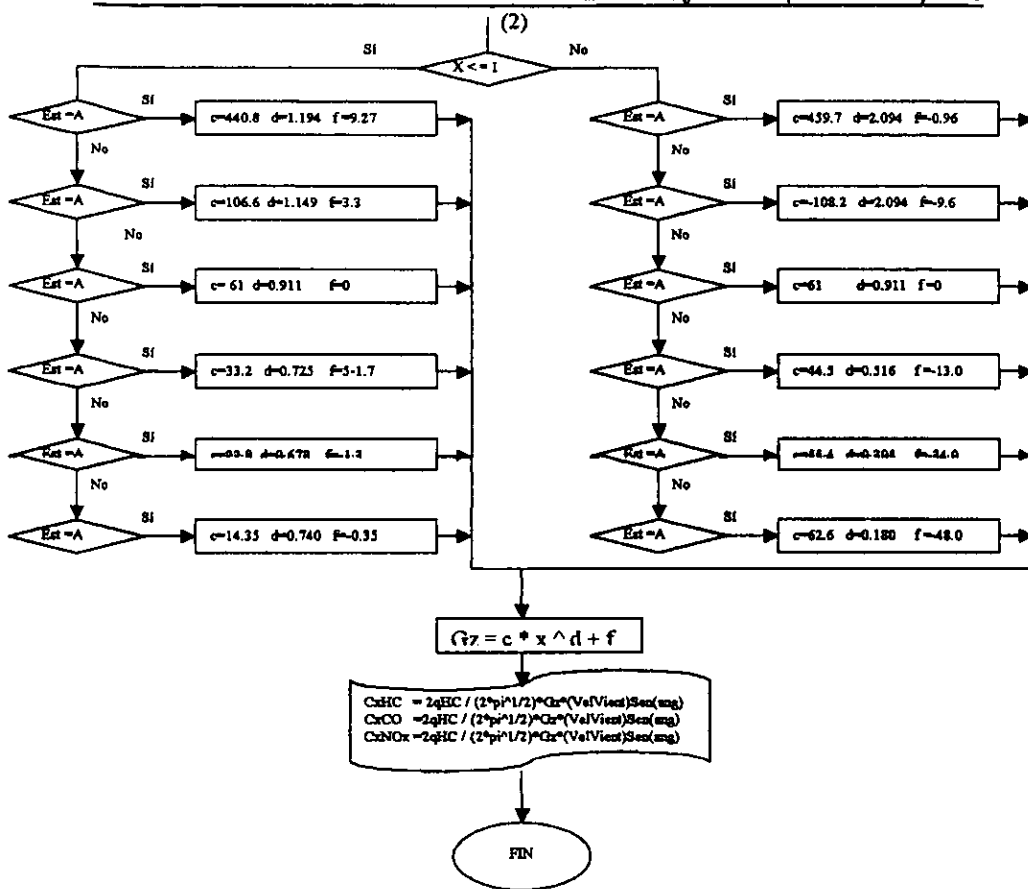


Figura 5.1.c Tercera parte del diagrama de flujo.

5.2 Elaboración del programa

Pantalla principal

Una vez iniciado el programa se observa la pantalla de inicio, en la cual se introducen los datos del tránsito vehicular sobre la carretera, datos meteorológicos y la distancia a la que se requiere determinar la concentración de contaminantes desde la carretera, se observan datos preestablecidos, los cuales se deben modificar en cualquier momento.

El primer botón que observamos es un icono con un libro abierto, contiene la información teórica mediante la cual funciona la este programa.

El segundo botón :Una vez modificados los datos requeridos se oprime el segundo botón de la barra del menú, el cual contiene un icono con una mano sosteniendo una página, este botón realiza y actualiza los cálculos de las concentraciones de CH₄, CO, NOx que se observan en la parte inferior izquierda

El tercer botón se oprime para observar las graficas de concentración contra distancia
 En la figura 5.2 se presenta la primer pantalla del programa.

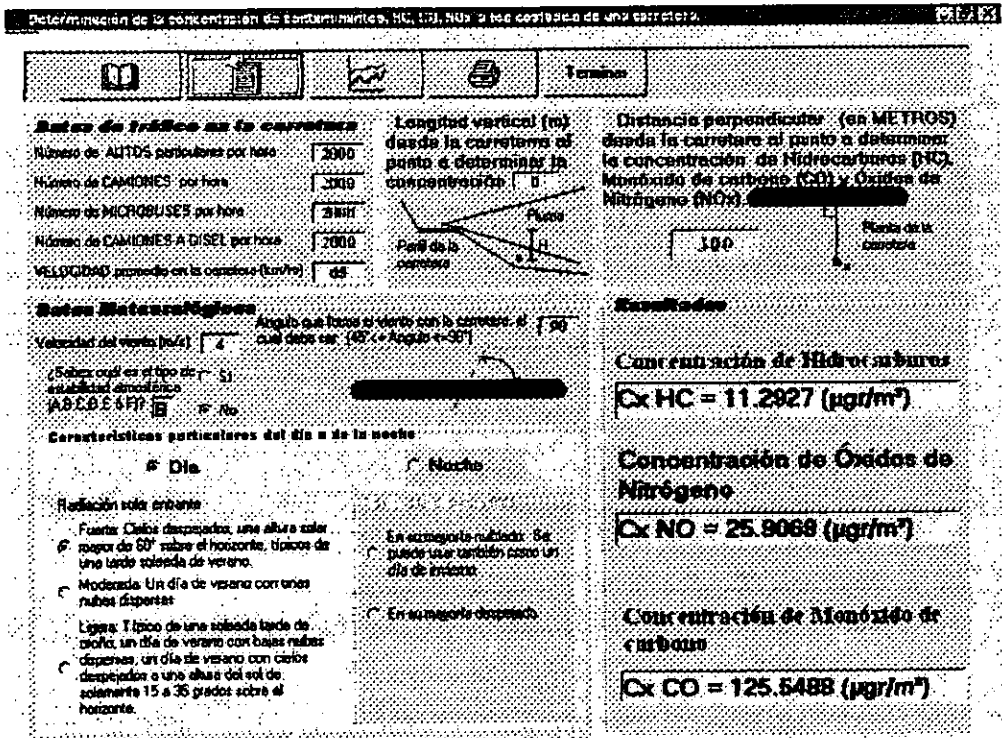


figura 5.2 Primera pantalla del programa

Gráficas de Concentración VS Distancia

En esta pantalla se observan 6 botones (fig 5.3) con en los cuales los tres primeros grafican sus respectivos contaminantes, el cuarto botón muestra una gráfica de barras de las concentraciones de los tres contaminantes con respecto a la distancia, el quinto botón como su icono lo sugiere imprime la grafica del compuesto actualmente en pantalla, el sexto botón regresa a la pantalla de principal del programa donde se puede modificar algún dato requerido.

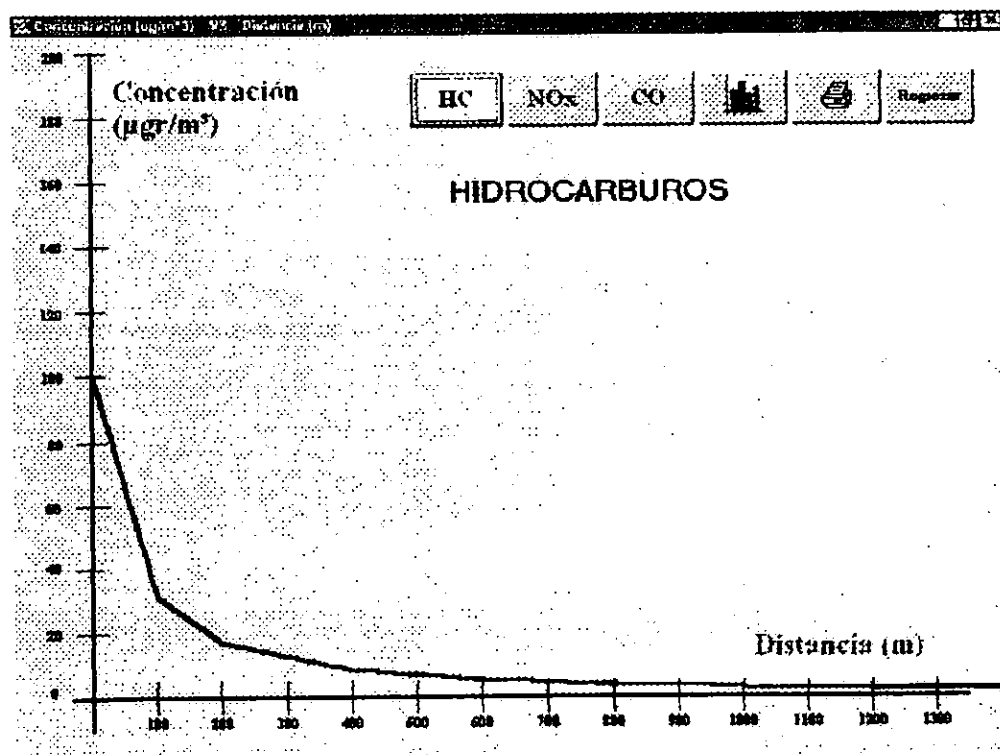


figura 5.3 Segunda pantalla del programa

Barras de concentraciones

Al presionar el cuarto botón que muestra un icono con una gráfica, se muestra un recuadro con barras de concentración de los tres contaminantes estudiados con respecto a la distancia, en donde a cada 50 metros se determina su concentración fig 5.4. Al imprimir este cuadro se puede utilizar el métodos de superposición para estimar las concentraciones en una zona.

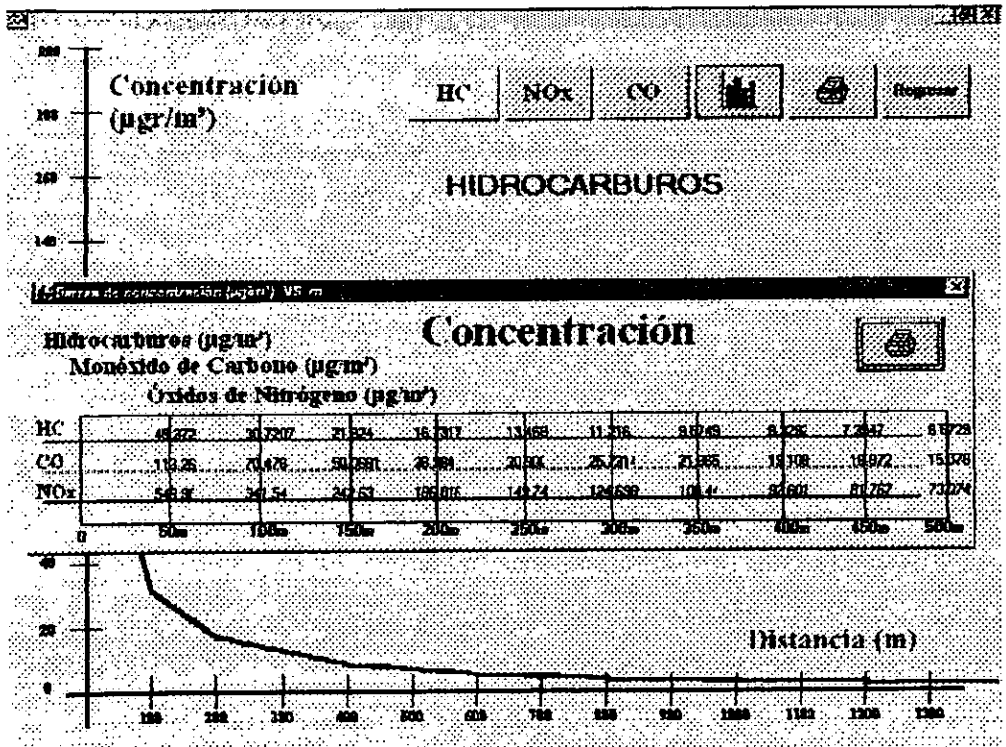


figura 5.4 Tercera pantalla del programa

A continuación se presenta el código de programación empleado en la elaboración del programa, empleando el lenguaje Visual Basic 6.0

**ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO**

Capítulo 5

Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

```

Private Estabilidad As String
Private VelocidadViento As Currency
Public CxHC As Currency

Public CxCO As Currency
Public CxNO As Currency
Private distX As Currency

Public P0HC As Currency
Public P0CO As Currency
Public P0NO As Currency

Public P100HC As Currency
Public P100CO As Currency
Public P100NO As Currency

Public P200HC As Currency
Public P200CO As Currency
Public P200NO As Currency

Public P400HC As Currency
Public P400CO As Currency
Public P400NO As Currency

Public P600HC As Currency
Public P600CO As Currency
Public P600NO As Currency

Public P800HC As Currency
Public P800CO As Currency
Public P800NO As Currency

Public P1000HC As Currency
Public P1000CO As Currency
Public P1000NO As Currency

Public P1200HC As Currency
Public P1200CO As Currency
Public P1200NO As Currency

Public P1300HC As Currency
Public P1300CO As Currency
Public P1300NO As Currency

Public P1400HC As Currency
Public P1400CO As Currency
Public P1400NO As Currency

Private Sub cmdGrafica_Click()

distX = 2 / 1000 '---si en esta linea se realiza una división
Calculos (distX) 'entre cero se producirá un error durante
P0HC = CxHC 'la ejecución
P0CO = CxCO
P0NO = CxNO

distX = 100 / 1000
Calculos (distX)
P100HC = CxHC

P100CO = CxCO
P100NO = CxNO

P1200HC = CxHC
P1200CO = CxCO
P1200NO = CxNO

P1300HC = CxHC
P1300CO = CxCO
P1300NO = CxNO

P1400HC = CxHC
P1400CO = CxCO
P1400NO = CxNO

Form1.Show
End Sub

Public Sub Calculos(distX)

' Definición de las variables
Dim VelocidadCarretera As Currency
Dim Angulo As Currency

Dim Autos As Integer
Dim Camiones As Integer
Dim Micros As Integer
Dim Diesel As Integer
Dim H As Currency

P100CO = CxCO
P100NO = CxNO

distX = 200 / 1000
Calculos (distX)
P200HC = CxHC
P200CO = CxCO
P200NO = CxNO

distX = 400 / 1000
Calculos (distX)
P400HC = CxHC
P400CO = CxCO
P400NO = CxNO

distX = 600 / 1000
Calculos (distX)
P600HC = CxHC
P600CO = CxCO
P600NO = CxNO

distX = 800 / 1000
Calculos (distX)
P800HC = CxHC
P800CO = CxCO
P800NO = CxNO

distX = 1000 / 1000
Calculos (distX)
P1000HC = CxHC
P1000CO = CxCO
P1000NO = CxNO

distX = 1200 / 1000
Calculos (distX)
P1200HC = CxHC
P1200CO = CxCO
P1200NO = CxNO

distX = 1400 / 1000
Calculos (distX)
P1400HC = CxHC
P1400CO = CxCO
P1400NO = CxNO

Form1.Show
End Sub

Public Sub Calculos(distX)

```

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 5

Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

Dim HC As Currency
Dim CO As Currency
Dim NO As Currency

Dim VPta As Currency
Dim VPmh As Currency
Dim TR As Currency

Dim tecHC As Currency
Dim tecCO As Currency
Dim tecNO As Currency

' Asignación de propiedades a las variables
VelocidadCarretera = txlVelocidadCarretera.Text
VelocidadViento = txlVelocidadViento

Autos = txlAutos.Text
Camiones = txlCamiones.Text
Miercos = txlMicrobuses.Text
Disel = txlDisel.Text
H = txlH.Text

Angulo = txlAngulo.Text

.....

'Velocidades promedio a partir de Km/hr
VPta = (VelocidadCarretera * (1 / 3600)) * Velocidad Promedio de
vehiculos en (km/seg)
VPmh = VelocidadCarretera * (1000) * Velocidad Promedio de
vehiculos en (m/hr)
TR = Autos + Camiones + Miercos + Disel TR Transito

' Grupos de contaminante por kilómetros de recorrido (gr/km),
multiplicado por
' el número de cada tipo de vehiculo.

HC = 0.5 * Autos + 1.57 * Camiones + 0.32 * Miercos + 0.63 *
Disel *(gr/km)

CO = 3.16 * Autos + 17.5 * Camiones + 4.5 * Miercos + 8.75 *
Disel *(gr/km)

NO = 1.24 * Autos + 3.6 * Camiones + 0.75 * Miercos + 1.44 *
Disel *(gr/km)

' Tasa de Emisión de Contaminantes (g/s*Vehic.)

tecHC = (HC * VPta) / TR
tecCO = (CO * VPta) / TR
tecNO = (NO * VPta) / TR *(gr/Vehic)

Dim NVUL As Currency
Dim qHC As Currency
Dim qCO As Currency
Dim qNO As Currency

' Número de Vehiculos por Unidad de Longitud (Vehic. hr/m)

NVUL = TR / VPmh
' Puerza de las emisiones de contaminantes por
' distancia unitaria (g/s*m).
qHC = tecHC * NVUL
qCO = tecCO * NVUL
qNO = tecNO * NVUL

'obtención de las desviaciones normales Gx y Gy
'apartir de sus correspondientes valores
'BILIOGRAFIA (CONTAMINACION DEL AIRE: Origen y
Control
'pagina 159)

'Distancia a determinar la concentración
Dim a1 As Currency
Dim c1 As Currency
Dim d1 As Currency
Dim f1 As Currency
Dim b1 As Currency

```
If txEscribela.Visible = True Then
    Estabilidad = UCase(txEscribela.Text)
    txEscribela.Text = Estabilidad
    Label23.Caption = Estabilidad
End If
```

Label23.Visible = True
b1 = 0.894

```
If distX <= 1 Then
    Select Case Estabilidad
        Case Is = "A": a1 = 213: c1 = 440.8: d1 = 1.941: f1 = 9.27
        Case Is = "B": a1 = 156: c1 = 106.6: d1 = 1.149: f1 = 3.3
        Case Is = "C": a1 = 104: c1 = 61: d1 = 0.911: f1 = 0
        Case Is = "D": a1 = 68: c1 = 33.2: d1 = 0.725: f1 = -1.7
        Case Is = "E": a1 = 50.5: c1 = 22.8: d1 = 0.678: f1 = -1.3
        Case Is = "F": a1 = 34: c1 = 14.35: d1 = 0.74: f1 = -0.35
    End Select
End If
```

```
If distX >= 1 Then
    Select Case Estabilidad
        Case Is = "A": a1 = 213: c1 = 459.7: d1 = 2.094: f1 = -9.6
        Case Is = "B": a1 = 156: c1 = 108.2: d1 = 1.098: f1 = 2
        Case Is = "C": a1 = 104: c1 = 61: d1 = 0.911: f1 = 0
        Case Is = "D": a1 = 68: c1 = 44.5: d1 = 0.516: f1 = -13
        Case Is = "E": a1 = 50.5: c1 = 53.4: d1 = 0.303: f1 = -34
        Case Is = "F": a1 = 34: c1 = 62.6: d1 = 0.18: f1 = -48
    End Select
End If
```

Dim Gz As Currency
Dim Argumento As Double

Gz = c1 * (distX ^ d1) + f1
Argumento = Angulo * (3.1416 / 180) * EL programa VBasic trabaja
con Radianes

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 5

Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

```

CxHC = Abs(((2 * qHC * 1000000) / (((2 * 3.1415927) ^ (1 / 2)) *
Gz * VelocidadViento * Sin(Argumento))) * (Exp((-1 / 2) * ((H /
Gz) ^ 2))))
CxCO = Abs(((2 * qCO * 1000000) / (((2 * 3.1415927) ^ (1 / 2)) *
Gz * VelocidadViento * Sin(Argumento))) * (Exp((-1 / 2) * ((H /
Gz) ^ 2))))
CxNO = Abs(((2 * qNO * 1000000) / (((2 * 3.1415927) ^ (1 / 2)) *
Gz * VelocidadViento * Sin(Argumento))) * (Exp((-1 / 2) * ((H /
Gz) ^ 2))))
End Sub

Private Sub cmdImprimir_Click()
Me.PrintForm
End Sub

Private Sub cmdInformacion_Click()
frmTeorica.Show
End Sub

Private Sub cmdResultados_Click()

If I > distanciaX.Text Then
MsgBox "Si introduce una distancia menor a 1m se pude
producir un error en el programa, vbOKOnly + vbInformation,
"Limites de funcionamiento"
distX = 1
distanciaX.Text = 1
Else
distX = distanciaX.Text / 1000 'distX esta en kilometros pero
End If 'distanciaX.Text esta en metros.
Calculos (distX)
'RESULTADOS
Label12.Caption = "Cx HC = " & CxHC & " (µg/m³)"
Label13.Caption = "Cx CO = " & CxCO & " (µg/m³)"
Label14.Caption = "Cx NO = " & CxNO & " (µg/m³)"
cmdGrafica.Enabled = True

End Sub

Private Sub cmdSalir_Click()
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
txtEscribela.Visible = False
Label9.Visible = False
Label125.Visible = False
cmdGrafica.Enabled = False
cmdResultados.Enabled = False
End Sub

Private Sub opDespejado_Click()
If txtVelocidadViento.Text <= 5 Then
Estabilidad = "P"
ElseIf txtVelocidadViento.Text > 5 Then
Estabilidad = "D"
End If
cmdResultados.Enabled = True
Label125.Caption = Estabilidad
End Sub

Private Sub opDia_Click()
Frame3.Enabled = True
Frame4.Enabled = False
opNoche.Value = False
opNublado.Value = False
opDespejado.Value = False
Frame4.BackColor = Frame1.BackColor
opNoche.BackColor = Frame1.BackColor
opNublado.BackColor = Frame1.BackColor
opDespejado.BackColor = Frame1.BackColor
Frame3.BackColor = &H00FFFF ' color amarillo
opDia.BackColor = Frame3.BackColor
opFuerte.BackColor = Frame3.BackColor
opModerada.BackColor = Frame3.BackColor
opLigera.BackColor = Frame3.BackColor
cmdResultados.Enabled = False
End Sub

Private Sub opPuerta_Click()
If txtVelocidadViento.Text <= 3 Then
Estabilidad = "A"
ElseIf txtVelocidadViento.Text <= 5 Then
Estabilidad = "B"
ElseIf txtVelocidadViento.Text > 5 Then
Estabilidad = "C"
End If
Label125.Caption = Estabilidad
cmdResultados.Enabled = True
End Sub

Private Sub opLigera_Click()
If txtVelocidadViento.Text <= 2 Then
Estabilidad = "B"
ElseIf txtVelocidadViento.Text <= 3 Then
Estabilidad = "C"
ElseIf txtVelocidadViento.Text > 3 Then
Estabilidad = "D"
End If
Label125.Caption = Estabilidad
cmdResultados.Enabled = True
End Sub

Private Sub opModerada_Click()
If txtVelocidadViento.Text <= 2 Then
Estabilidad = "A"
ElseIf txtVelocidadViento.Text <= 3 Then
Estabilidad = "B"
ElseIf txtVelocidadViento.Text <= 6 Then
Estabilidad = "C"
ElseIf txtVelocidadViento.Text > 6 Then
Estabilidad = "D"
End If
Label125.Caption = Estabilidad
cmdResultados.Enabled = True
End Sub

Private Sub opNo_Click()
txtEscribela.Visible = False
Label9.Visible = False

Frame2.Enabled = True
Frame3.Enabled = False
Frame4.Enabled = False

```

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 5

Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

```
Frame2.BackColor = &HC0COFF 'color rosa
Frame3.BackColor = &HC0FFFF 'color amarillo
opDia.BackColor = Frame3.BackColor
opFuerte.BackColor = Frame3.BackColor
opModerada.BackColor = Frame3.BackColor
opLigera.BackColor = Frame3.BackColor
```

```
Frame4.BackColor = &HFFC0C0 'color azul
opNoche.BackColor = Frame4.BackColor
opNublado.BackColor = Frame4.BackColor
opDespejado.BackColor = Frame4.BackColor
```

End Sub

Private Sub opNoche_Click()

```
Frame3.Enabled = False
opDia.Value = False
opFuerte.Value = False
opLigera.Value = False
opModerada.Value = False
Frame4.Enabled = True
Frame3.BackColor = Frame1.BackColor
opDia.BackColor = Frame1.BackColor
opFuerte.BackColor = Frame1.BackColor
opModerada.BackColor = Frame1.BackColor
opLigera.BackColor = Frame1.BackColor
Frame4.BackColor = &HFFC0C0 'color azul
opNoche.BackColor = Frame4.BackColor
opNublado.BackColor = Frame4.BackColor
opDespejado.BackColor = Frame4.BackColor
cmdResultados.Enabled = False
End Sub
```

Private Sub opNublado_Click()

```
If txtVelocidadViento.Text <= 3 Then
    Estabilidad = "E"
ElseIf txtVelocidadViento.Text > 3 Then
    Estabilidad = "D"
End If
Label25.Caption = Estabilidad
cmdResultados.Enabled = True
End Sub
```

Private Sub opSi_Click()

```
txtEscribela.Visible = True
Label19.Visible = True
Frame2.Enabled = False
Frame3.Enabled = False
Frame4.Enabled = False
```

```
Frame2.BackColor = Frame1.BackColor
Frame3.BackColor = Frame1.BackColor
Frame4.BackColor = Frame1.BackColor
```

```
opDia.BackColor = Frame1.BackColor
opFuerte.BackColor = Frame1.BackColor
opModerada.BackColor = Frame1.BackColor
opLigera.BackColor = Frame1.BackColor
```

```
opNoche.BackColor = Frame1.BackColor
opNublado.BackColor = Frame1.BackColor
opDespejado.BackColor = Frame1.BackColor
```

```
opDia.Value = False
opFuerte.Value = False
opLigera.Value = False
opModerada.Value = False
```

```
opNoche.Value = False
opNublado.Value = False
opDespejado.Value = False
```

cmdResultados.Enabled = True

End Sub

GRAFICA DE HC, CO Y NOx

Private Sub cmdGrafCO_Click()

```
txtX0 = 0
txtY0 = FormInicio.P0CO
txtX1 = 100
txtY1 = FormInicio.P100CO
txtX2 = 200
txtY2 = FormInicio.P200CO
txtX3 = 400
txtY3 = FormInicio.P400CO
txtX4 = 600
txtY4 = FormInicio.P600CO
txtX5 = 800
txtY5 = FormInicio.P800CO
txtX6 = 1000
txtY6 = FormInicio.P1000CO
txtX7 = 1200
txtY7 = FormInicio.P1200CO
txtX8 = 1400
txtY8 = FormInicio.P1400CO
```

cmdGrafCO.BackColor = &HC0FFC0

Command3.BackColor = &HC0C0C0

cmdGrafNO.BackColor = &HC0C0C0

Lines

lblMensajeGraf.ForeColor = &HFF00&

lblMensajeGraf.Caption = "MONÓXIDO DE CARBONO"

End Sub

Private Sub cmdGrafNO_Click()

```
txtX0 = 0
txtY0 = FormInicio.P0NO
txtX1 = 100
txtY1 = FormInicio.P100NO
txtX2 = 200
txtY2 = FormInicio.P200NO
txtX3 = 400
txtY3 = FormInicio.P400NO
txtX4 = 600
txtY4 = FormInicio.P600NO
txtX5 = 800
txtY5 = FormInicio.P800NO
txtX6 = 1000
```

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 5

Programa para la obtención de la dispersión
atmosférica de gases emitidos por fuentes lineales y móviles

```

txtY6 = forminicio.P1000NO
txtX7 = 1200
txtY7 = forminicio.P1200NO
txtX8 = 1400
txtY8 = forminicio.P1400NO
cmdGrafNO.BackColor = &HC0FFFF 'color amarillo
Command3.BackColor = &HC0C0C0 'color gris
cmdGrafCO.BackColor = &HC0C0C0 'color gris

&
Lineas
lblMensajeGraf.ForeColor = &HFFFF&
lblMensajeGraf.Caption = "OXIDOS DE NITRÓGENO"
End Sub

Private Sub Lineas()
L0.X1 = txtX0 * 0.1375 + 17.5
L0.Y1 = txtY0 * -0.685 + 141
L0.X2 = txtX1 * 0.1375 + 17.5
L0.Y2 = txtY1 * -0.685 + 141
L1.X1 = txtX1 * 0.1375 + 17.5
L1.Y1 = (txtY1 * -0.685) + 141
L1.X2 = txtX2 * 0.1375 + 17.5
L1.Y2 = (txtY2 * -0.685) + 141
L2.X1 = txtX2 * 0.1375 + 17.5
L2.Y1 = txtY2 * -0.685 + 141
L2.X2 = txtX3 * 0.1375 + 17.5
L2.Y2 = txtY3 * -0.685 + 141
L3.X1 = txtX3 * 0.1375 + 17.5
L3.Y1 = txtY3 * -0.685 + 141
L3.X2 = txtX4 * 0.1375 + 17.5
L3.Y2 = txtY4 * -0.685 + 141
L4.X1 = txtX4 * 0.1375 + 17.5
L4.Y1 = txtY4 * -0.685 + 141
L4.X2 = txtX5 * 0.1375 + 17.5
L4.Y2 = txtY5 * -0.685 + 141
L5.X1 = txtX5 * 0.1375 + 17.5
L5.Y1 = txtY5 * -0.685 + 141
L5.X2 = txtX6 * 0.1375 + 17.5
L5.Y2 = txtY6 * -0.685 + 141
L6.X1 = txtX6 * 0.1375 + 17.5
L6.Y1 = txtY6 * -0.685 + 141
L6.X2 = txtX7 * 0.1375 + 17.5
L6.Y2 = txtY7 * -0.685 + 141
L7.X1 = txtX7 * 0.1375 + 17.5
L7.Y1 = txtY7 * -0.685 + 141
L7.X2 = txtX8 * 0.1375 + 17.5
L7.Y2 = txtY8 * -0.685 + 141

End Sub

Private Sub Command1_Click()
Me.PrintForm
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Unload Form2
L0.Visible = False
L1.Visible = False
L2.Visible = False
L3.Visible = False
L4.Visible = False
L5.Visible = False
L6.Visible = False
L7.Visible = False
L8.Visible = False
End Sub

L4.Visible = False
L5.Visible = False
L6.Visible = False
L7.Visible = False

forminicio.Show
End Sub
Private Sub Command3_Click()

txtX0 = 0
txtY0 = forminicio.P0HC
txtX1 = 100
txtY1 = forminicio.P100HC
txtX2 = 200
txtY2 = forminicio.P200HC
txtX3 = 400
txtY3 = forminicio.P400HC
txtX4 = 600
txtY4 = forminicio.P600HC
txtX5 = 800
txtY5 = forminicio.P800HC
txtX6 = 1000
txtY6 = forminicio.P1000HC
txtX7 = 1200
txtY7 = forminicio.P1200HC
txtX8 = 1400
txtY8 = forminicio.P1400HC

Command3.BackColor = &HC0C0FF
cmdGrafCO.BackColor = &HC0C0C0
cmdGrafNO.BackColor = &HC0C0C0
lblMensajeGraf.ForeColor = &HFFF&
lblMensajeGraf.Caption = "HIDROCARBUROS"
End Sub

Private Sub Command4_Click()
Form2.Show
End Sub
Public distX As Currency

Private Sub Command1_Click()
Me.PrintForm
End Sub

Private Sub Form_Load()
Dim i As Integer
distX = (2 / 1000)
For i = 0 To 10
Call forminicio.Calculo(distX)
Label2(i).Caption = forminicio.CxHC
Label2(i + 11).Caption = forminicio.CxNO
Label2(i + 22).Caption = forminicio.CxCO
distX = (distX + (50 / 1000))
Next i
End Sub

```

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DEL MODELO EN LA INGENIERÍA CIVIL

Un caso típico de aplicación en donde es indispensable el empleo de un modelo de simulación es la operación de una autopista, en la que en ambos costados se encuentran poblaciones que pueden ser afectadas por las concentraciones de contaminantes.

Los datos necesarios para realizar la simulación deben obtenerse de un estudio de tránsito ya sea que la autopista esté en funcionamiento o se encuentre en la etapa de planeación. Los datos meteorológicos se obtendrán a partir de un análisis de datos históricos

6.1 Ejemplo de aplicación en la operación de una autopista

En el diseño de una carretera se ha contemplado efectuar su trazo a trescientos metros de una población. Se desea determinar el impacto ambiental provocado por la emisión de contaminantes de la autopista sobre la población. Los datos de tránsito son los siguientes, el flujo del tráfico a lo largo de la supercarretera es de 3900 automóviles, 155 microbuses a gasolina, 95 camiones a gasolina, 350 camiones a diesel por hora y la velocidad promedio de los vehículos es de 85 km/hr. A las 5:30 p.m., en un día nublado, el viento dominante forma un ángulo con la carretera de 55° y tiene una velocidad de 4 m/s.

Al iniciar el programa "Estimación de concentraciones de contaminantes emitidos por fuentes móviles y lineales" se introducen los datos del tráfico vehicular que se encuentra en la parte superior izquierda, enseguida se introduce la distancia desde la carretera al punto en el que se desea determinar la concentración de contaminantes. El siguiente paso es introducir los datos meteorológicos como la velocidad del viento, el ángulo que forma éste con la carretera; si se conoce el tipo de estabilidad se selecciona la celda (Sí), de lo contrario se selecciona (No), a continuación se elige si es de día o de noche el momento en el que se quiere determinar la concentración de contaminantes, que para nuestro caso es de día, enseguida seleccionamos la tercera opción que es la que muestra características más cercanas a nuestro problema, es en este paso en el que se ha terminado la introducción de datos.

Para obtener los resultados requeridos debemos presionar el segundo botón "Actualización de cálculos" de nuestra barra de funciones que se encuentra en la parte superior, quedando la pantalla principal del programa como se muestra a continuación.


Si se realiza algún cambio en los datos del programa, se debe presionar nuevamente el segundo botón "Actualización de cálculos" después de realizar los cambios.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 6

Aplicación del modelo en la ingeniería civil

Determinación de la concentración de contaminantes, HC, CO, NO_x y NO₂ a las orillas de una carretera.

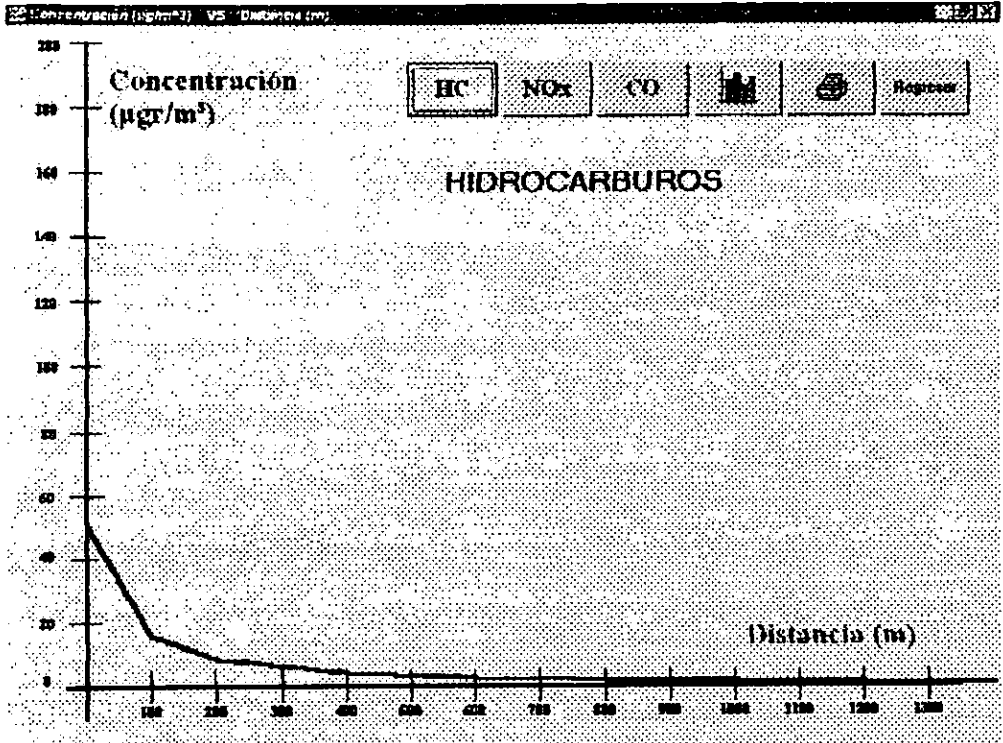
Botón de trabajo en la carretera Número de AUTOS particulares por hora: 2000 Número de CAMIONES por hora: 12 Número de MICROBUSES por hora: 155 Número de CAMIONES A DIESEL por hora: 350 VELOCIDAD promedio en la carretera (km/h): 85		Longitud vertical (m) desde la carretera al punto a determinar la concentración: 0 	(en METHOS) desde la carretera al punto a determinar la concentración de Hidrocarburos (HC), Monóxido de carbono (CO) y Óxidos de Nitrógeno (NO _x): 300 Planta de la carretera
Botón Meteorología Velocidad del viento (m/s): 4 Ángulo que toma el viento con la carretera, el cual debe ser (45° <= Ángulo <= 90°): 55 ¿Sabes cuál es el tipo de estabilidad atmosférica (A,B,C,D,E,F,P)? <input type="checkbox"/> No Características particulares del día o de la noche: <input checked="" type="radio"/> Día <input type="radio"/> Noche		Resultados Concentración de Hidrocarburos: $C_x \text{ HC} = 5.6765 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ Concentración de Óxidos de Nitrógeno: $C_x \text{ NO} = 12.9749 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ Concentración de Monóxido de carbono: $C_x \text{ CO} = 39.7358 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	
Radiación solar ambiente: <input checked="" type="checkbox"/> Fuerte: Cielos despejados, una altura solar superior de 60° sobre el horizonte, típicos de una tarde soleada de verano. <input checked="" type="checkbox"/> Moderada: Un día de verano con unas nubes dispersas. <input checked="" type="checkbox"/> Ligera: Típico de una soleada tarde de mañana, un día de verano con pocas nubes dispersas, un día de verano con cielos despejados a una altura del sol de solamente 15 a 35 grados sobre el horizonte.		<input checked="" type="checkbox"/> En su mayoría nublado. Se puede usar también como un día de invierno. <input checked="" type="checkbox"/> En su mayoría despejado.	

Hasta este momento los únicos resultados que observamos son el de las concentraciones que se encuentran a 300mts de la carretera, para saber cual es la variación que tendremos de cada contaminante, la podemos observar mediante una grafica que se genera al presionar el tercer botón "Concentración vs. Distancia", en esta pantalla podemos seleccionar de cual de los contaminantes queremos ver la grafica.

En la siguiente figura se oprimió el botón HC en el programa, para observar su curva de concentraciones contra distancia.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 6
Aplicación del modelo en la ingeniería civil

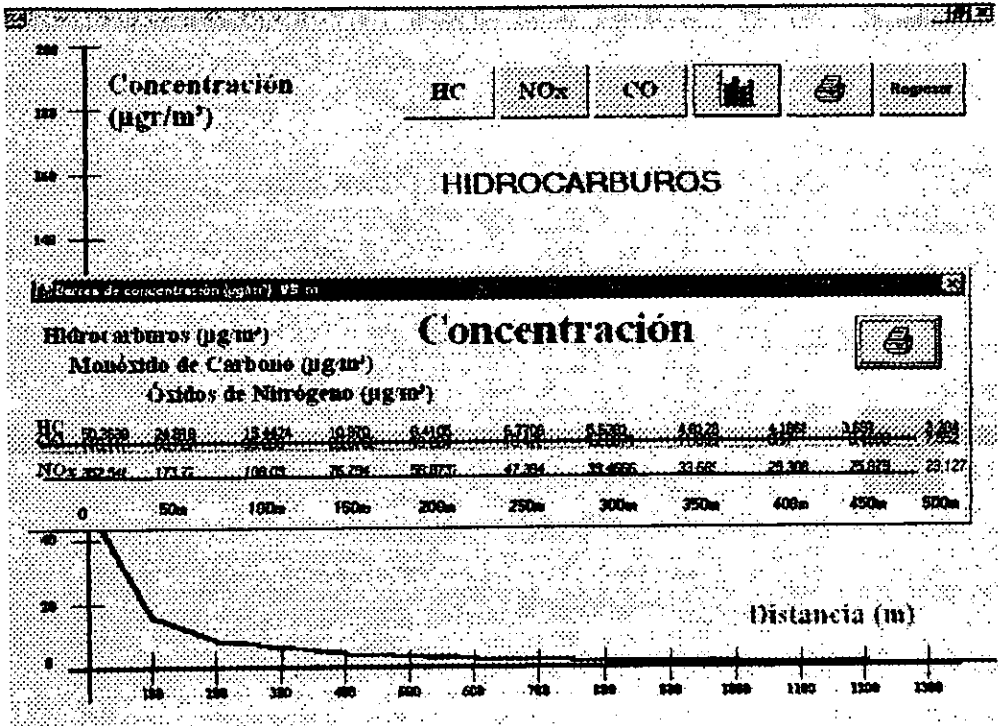


Si se desea saber de una manera numérica cual es la variación de la concentración se oprime el cuarto botón, el cual tiene un icono con una gráfica de barras, este botón muestra unas barras en colores que representan las concentraciones de los tres contaminantes a cada cincuenta metros.

Esta gráfica de barras de concentración se utiliza para realizar el método de superposición, el cual consiste en sobreponer la gráfica sobre un plano de una región en estudio y determinar el grado de concentración de los contaminantes en la zona.

La gráfica de barras de concentración se observa en la siguiente figura.

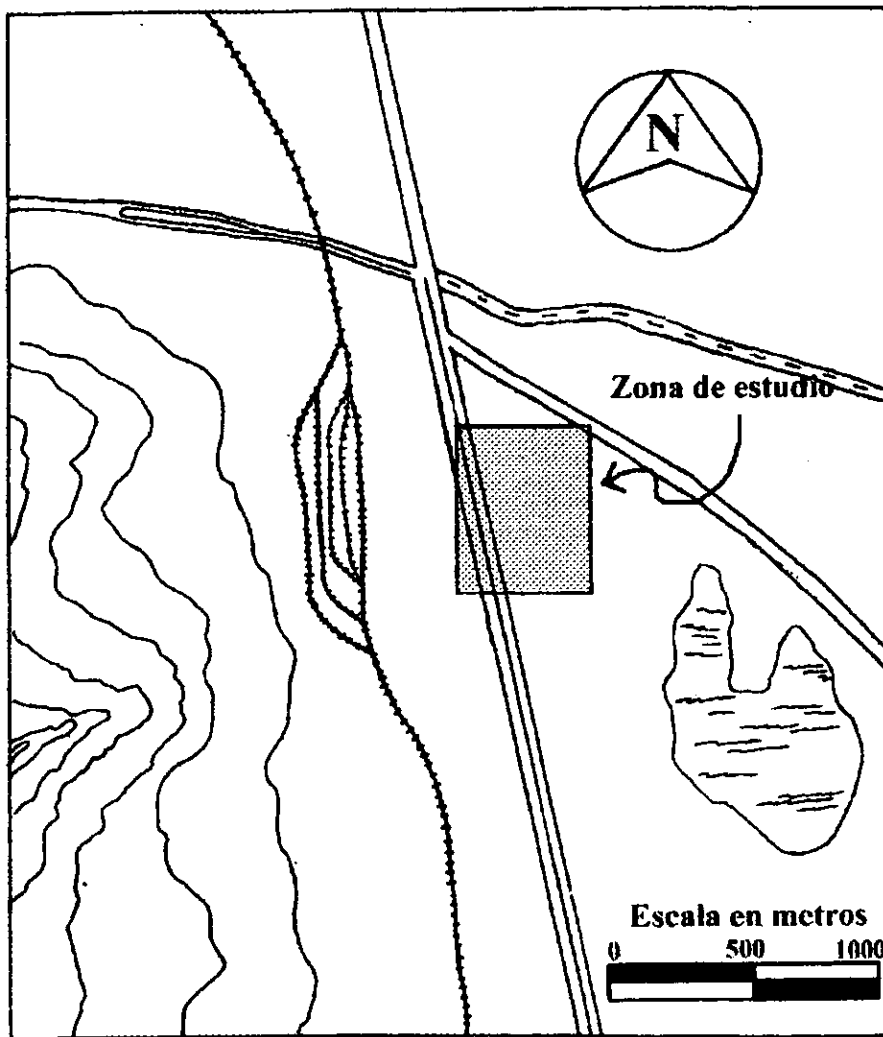
ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
 ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
 UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO



Como parte final del ejemplo se presenta la aplicación de la técnica de sobre posición:

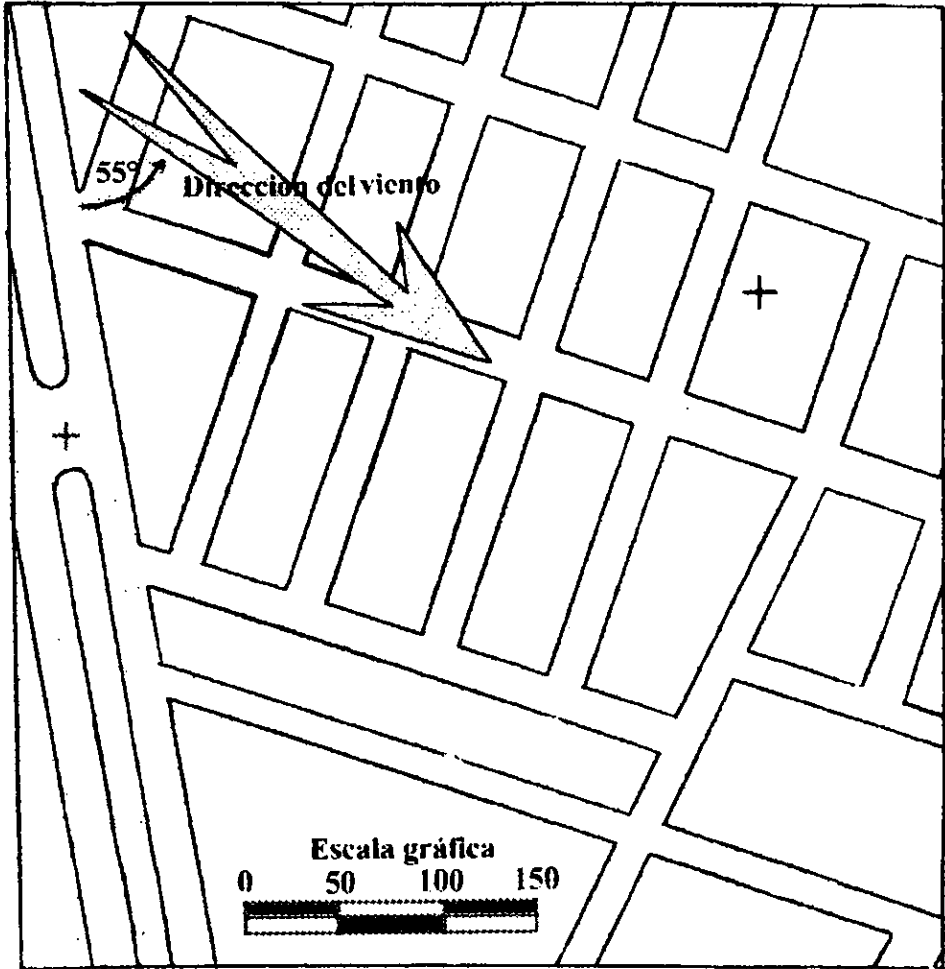
ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 6
Aplicación del modelo en la ingeniería civil



ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 6
Aplicación del modelo en la ingeniería civil



ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
 ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
 UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Campos de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) VS m

Concentración

	0	50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m
Hidrocarburos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
Monóxido de Carbono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
Oxidos de Nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
HC	50.3638	24.618	15.4424	10.899	8.3105	6.7768	5.5391	4.6128	4.185
CO	119.11	58.747	36.736	25.077	19.224	15.47	11.9971	11.009	9.87
NOx	32.58	17.17	10.609	7.234	5.875	4.781	3.8565	3.633	2.848
0		50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m

CAPÍTULO 7

CONTROL DE PARTICULAS

Aunque las partículas representan sólo el nueve por ciento de la masa total de los contaminantes producidos por el hombre, el riesgo potencial sobre la salud de este tipo de contaminantes es muy alto. La magnitud de los problemas que pueden ocasionar estará en función del rango de tamaño de las partículas presentes en la atmósfera local, la concentración y su composición física y química.

En términos generales, el control de partículas contaminantes del aire implica pasar la corriente de gas que contiene las partículas a través de una cámara y permitir que una fuerza actúe sobre las partículas para sacarlas de la corriente de aire.

7.1 Distribución y fuentes de la materia particulada

El tamaño de las partículas influye en forma importante en su comportamiento en la atmósfera. Las partículas cuyo tamaño varía desde 0.001 a 500 μm son generalmente arrastrados por el aire. Las partículas con un tamaño menor de 0.1 μm muestran un comportamiento similar al de las moléculas de gas. Las partículas mayores de 1 μm , pero menores de 20 μm , tienden a seguir el movimiento del gas por el que son llevadas. Las partículas mayores de 20 μm poseen velocidades de asentamiento significativas; por tanto, el aire las arrastra por periodos relativamente cortos.

De los datos de los estudios de concentraciones promedio de partículas, obtenidos por muestreo de la atmósfera de ciudades de todo el mundo, presentados en la tabla 7.1, se puede ver que las partículas dentro de dicho intervalo, de 81,115, es abrumador comparado con el resto de la muestra. Las partículas dentro de este intervalo son probables a introducirse en los pulmones. Desde el punto de vista de la salud, el control de partículas no busca abatir solamente el volumen total de partículas, sino disminuir el fuerte conteo de partículas en el intervalo de los tamaños pequeños.

Los principales procesos industriales de emisión de partículas se encuentran resumidos en la tabla 7.2. En ella se describe el tipo de partículas emitidas y los métodos de control comúnmente utilizados.

Tabla 7.1 Distribución de partículas en una atmósfera típica

Rango de tamaños (μm)	Tamaño promedio (μm)	Conteo de partículas	Por ciento en volumen
10-30	20.00	1	27
5-10	7.50	112	53
3-5	4.00	116	12
1-3	2.00	555	5
1/2-1	0.75	4,215	2
0-1/21	0.25	56,900	1

En general, las partículas presentes en la atmósfera en el intervalo de tamaños por debajo de $1 \mu m$, se producen por condensación, mientras que las partículas mayores son el resultado, o bien de la trituración (pulverización) o la combustión. La combustión puede producir los siguientes tipos de partículas:

El calor puede vaporizar materiales que se condensan posteriormente produciendo partículas entre 0.1 y $1 \mu m$.

Las reacciones químicas del proceso de la combustión puede producir partículas de cúmulos moleculares inestables de corta duración por debajo de aproximadamente $0.1 \mu m$.

Los procesos mecánicos pueden liberar cenizas o partículas de combustible de $1 \mu m$ o mayores.

Si intervienen aspersiones de combustibles líquidos, puede que se escape directamente una ceniza muy fina.

La combustión parcial de los combustibles fósiles puede producir hollín.

**ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO**

Capítulo 7
Control de partículas

Tabla 7.2 Fuentes principales de emisión de contaminantes

Industria o proceso	Fuente de las emisiones	Partículas	Método de control
Fábricas de acero y hierro	Altos hornos, hornos para la producción de acero	Oxido de hierro, polvo, humo	Ciclones, filtros de bolsas, precipitadores electrostáticos, colectores húmedos
Fundiciones de hierro gris	Hornos de cubilote, sistemas de vibración, fabricación de núcleos	Oxido de hierro, humo, polvo aceitoso, vapores metálicos	Lavadores, colectores centrifugos secos
Metalurgia no ferrosa	Fundiciones y hornos	Humo, vapores metálicos, grasa	Precipitadores electrostáticos, filtros de tela
Refinerías de petróleo	Regeneradores de catalizador, incineradores de lodos	Polvo del catalizador, ceniza de los lodos	Ciclones, precipitadores electrostáticos, lavadores, filtros de bolsas
Cemento Portland	Hornos, secadores, sistema de manejo de materiales	Polvos de procesos y alcalinos	Filtros de tela, precipitadores electrostáticos, colectores mecánicos
Fábrica de papel Kraft	Hornos de recuperación, hornos de cal, tanques de beneficio	Polvos de origen químico	Precipitadores electrostáticos, lavadores venturi
Manufactura de ácidos fosfórico y sulfúrico	Procesos térmicos, acidulación de las rocas, molenda	Nebulina ácida, polvos	Precipitadores electrostáticos, eliminadores de matia para la neblina
Manufactura de coque	Operación de las estufas, manejo de los materiales a tempiar	Polvos de carbón y de coque, alquitranes del carbón	Diseño cuidadoso, operación y mantenimiento
Vidrio y fibra de vidrio	Hornos, formación y curado, manejo	Nebulina ácida, óxidos alcalinos, polvo, aerosoles	Filtros de tela, incineradores

7.2 Eficiencia de colección de partículas

En un colector de partículas la eficiencia de remoción es, en muchos casos, una función del tamaño de la partícula. Es muy poco probable que cualquier tipo de equipo de colección sea efectivo en la remoción de partículas en un intervalo de tamaños muy amplio. Por ejemplo, un colector puede remover partículas muy grandes con una eficiencia de casi 100 por ciento, pero la eficiencia del colector en la remoción de partículas más pequeñas puede estar muy cerca de cero.

Las características generales de los dispositivos de colección de partículas, utilizados en la industria para limpiar corrientes de gas, se resumen en la tabla 7.3. En la columna con el encabezamiento "eficiencia en peso" se indica cuál será el peso total de partículas que se eliminará en el intervalo total de tamaños.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 7
Control de partículas

La eficiencia total de colección, η_o , es un parámetro generalizado que se emplea para indicar el nivel de operación de un dispositivo para limpieza de gases y está expresada por la ecuación 7.1.

$$\eta_o = \frac{C}{A} = \frac{C}{B-C} = \frac{A-B}{A} \quad 7.1$$

donde:

A = Carga o concentración en la entrada del colector

B = Carga o concentración en la salida del colector

C = Cantidad retenida por el dispositivo de limpieza

Tabla 7.3 Eficiencia de equipos mecánicos de control de partículas

Tipo de colector	Requerimientos de espacio	Eficiencia en peso
Cámara de sedimentación	Grandes	Buena por encima de 50 μm
Ciclón convencional	Grandes	Aprox. 50% con 20 μm
Ciclón de alta eficiencia	Medias	Aprox. 80% con 10 μm
Ciclones de tubos múltiples	Pequeñas	80% con 7.5 μm
Precipitador dinámico	Pequeñas	80% con 15 μm
Separador por impacto	Pequeñas	80% con 10 μm

La eficiencia total de colección para un intervalo discreto, cuando se conoce la distribución de partículas por tamaño, basándose en la masa, se puede expresar como:

$$\eta_o = \frac{\sum (\text{peso})_d \eta_d}{\sum (\text{peso})_d} = \sum (\text{fracción de peso}) \eta_d \quad 7.2$$

donde:

$(\text{peso})_d$ = peso de la muestra en el intervalo

η = eficiencia parcial de ese intervalo

En el caso de requerir instalarse en serie dos o más dispositivos de limpieza a fin de satisfacer las normas de emisión de partículas, como es el caso de las plantas de energía eléctrica que consumen carbón, donde los separadores ciclónicos remueven las partículas más grandes y los precipitadores electrostáticos eliminan las partículas pequeñas, el cálculo de la eficiencia total está dado por la ecuación 7.3.

$$\eta_o = \eta_p + \frac{\eta_s(100 - \eta_p)}{100} \quad 7.3$$

donde:

η_p es la eficiencia del primer colector

η_s es la eficiencia del segundo colector

Debe tomarse en cuenta que, para calcular la eficiencia del segundo colector, deberán tomarse la carga de polvo y la distribución de tamaños de salida del primer colector.

7.3 Velocidad terminal o de asentamiento

El método natural más utilizado en la remoción de partículas consiste simplemente en el asentamiento por gravedad. Existe un parámetro importante que determina su utilidad; se trata de la velocidad terminal o de asentamiento de una partícula, V_t . Se define como la velocidad descendente constante que alcanza la partícula en una dirección paralela al campo gravitacional terrestre; para que una partícula descienda es necesario que sobrepase las fuerzas debidas a la flotación o la fuerza de resistencia de fricción. La fuerza de flotación está dada por el volumen del fluido multiplicado por su densidad y por la aceleración local de la gravedad. La fuerza de resistencia de fricción está correlacionada con otras variables físicas, especialmente la forma de la partícula.

A fin de simplificar el estudio de este fenómeno es conveniente suponer que la forma de las partículas es esférica, facilitándose con esto la determinación del diámetro de la partícula. La ecuación para determinar la velocidad de asentamiento de partículas esféricas se conoce como la ley de Stokes, la cual es muy exacta para intervalos de tamaños de partículas de 50 μm hasta 100 μm .

Las velocidades terminales o de asentamiento de las partículas esféricas en el aire atmosférico, a la temperatura ambiente, para intervalos de 0.1 a 3000 μm fueron graficadas en la fig. 7.1. Para tamaños de partículas mayores de 30 μm se muestran cuatro curvas para densidades de 1.0, 1.5, 2.0, y 3.0 g/cm^3 (Para estas curvas deberán usarse los ejes superior e izquierdo)

La línea punteada que aparece a la derecha representa las regiones de flujo de Stokes-Cunningham. Es decir, incluye a las partículas esféricas menores de 30 μm y con densidades aparentes de 1 g/cm^3 , cuyo comportamiento es similar al de las moléculas de gas de la atmósfera.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
 ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
 UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

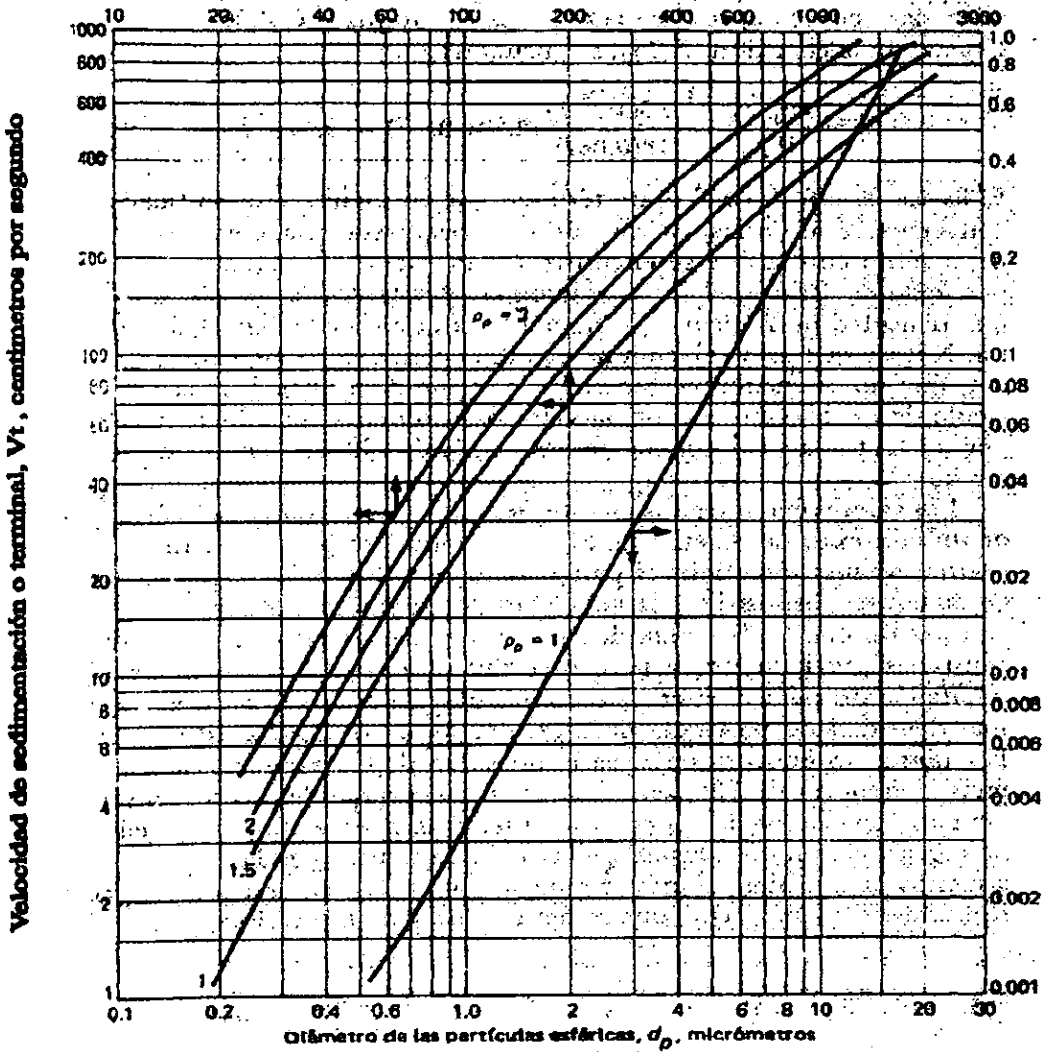


fig. 7.1 Velocidad de sedimentación de partículas esféricas

7.4 Mecanismos de colección de partículas

Los mecanismos disponibles para la recolección de partículas se pueden clasificar como de sedimentación por gravedad, eliminación mecánica, impactación centrífuga y métodos electrostáticos.

Se requiere analizar varios factores para elegir correctamente el equipo de colección de partículas, estos factores son: propiedades de la partícula como dimensiones, forma, densidad, concentraciones, estado (líquido o sólido), composición química y conductividad eléctrica, las propiedades del gas en el cual se encuentran suspendidas, como su temperatura, presión, humedad, el intervalo de la tasa de flujo volumétrico de la corriente de gas y su composición química, por último es importante conocer la naturaleza de la operación de la planta, si la emisión es cíclica o continua.

A continuación se mencionan los principales equipos de colección de partículas.

Cámara de sedimentación por gravedad

Este tipo de dispositivo permite que las partículas se asienten por gravedad fuera de la corriente del gas dentro de tolvas colectoras, mientras los gases pasan a través de la cámara a una velocidad reducida. Las partículas líquidas o sólidas suspendidas en el gas alcanzan una velocidad de caída libre final (velocidad de asentamiento) que se determina por medio de la Ley de Stokes.

La cámara de sedimentación por gravedad es utilizada para remover partículas mayores de $50 \mu m$, ya que partículas más pequeñas requerirán que la cámara de sedimentación fuera impracticamente larga, y velocidades uniforme y relativamente bajas, es decir menores de 300 cm/s.

Las características principales de éste tipo de colector son:

- Provocan muy bajo costo de energía
- El costo de la instalación y su mantenimiento es bajo.
- Alto grado de confiabilidad, aunque baja o muy baja eficiencia.
- Dimensiones físicas muy grandes

Las cámaras de sedimentación por gravedad son utilizadas generalmente para realizar una limpieza previa de las partículas gruesas existentes en una corriente gaseosa. Pueden fabricarse de casi cualquier material, sin embargo, no son muy usadas debido a los grandes espacios que requieren.

Separadores ciclónicos

Este dispositivo utiliza una fuerza centrífuga generada haciendo girar una corriente de gas con el fin de separar las partículas (tanto líquidas como sólidas) del gas que las transporta. Este dispositivo se utiliza extensamente para polvos relativamente gruesos y pulverizados burdos tales como el aserrín que se produce durante el labrado de la madera.

En el ciclón convencional, los gases sucios entran en la cámara cilíndrica a la cual se le ha adaptado una sección inferior cónica que termina en una tolva. La fuerza centrífuga. Debida al movimiento de rotación de un anillo central con paletas axiales, lanza las partículas de gas contra las paredes externas del cilindro y del cono. Las partículas resbalan por las paredes hasta depositarse en la tolva de almacenamiento. El gas gradualmente purificado invierte su espiral descendente y sale a través de un conducto colocado al centro del ciclón.

Los separadores ciclónicos son utilizados para eliminar partículas con tamaños mayores a $10 \mu m$; por debajo de éste diámetro la eficiencia para un rendimiento razonable decae considerablemente.

El precipitador ciclónico al ser especialmente útil en la colección de partículas finas, tiene mucho uso en las industrias alimentarias, farmacéuticas y madereras.

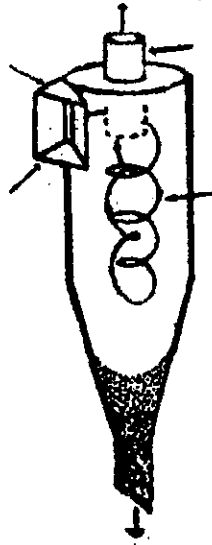


fig. 7.2 Separador Ciclónico

Colectores húmedos

Es sabido que la acción de la lluvia limpia a fondo el aire; este fenómeno se puede utilizar en un sistema de partículas que habitualmente se denomina limpieza por frotamiento. Este sistema puede remover de forma efectiva partículas entre 0.1 y $20 \mu m$ de una corriente de gas.

Los tres tipos principales de colectores húmedos son los lavadores de cámaras de aspersión, lavadores ciclónicos y lavadores Venturi.

Dentro de los lavadores de cámara de aspersión el dispositivo más sencillo es la torre de rocío, cuyo funcionamiento consiste en hacer fluir el gas contaminado hacia arriba y las partículas o los aerosoles chocan con las gotas del líquido producidas por boquillas apropiadas situadas a través del paso del flujo. El líquido contaminado se recolecta por gravedad colocándose además un eliminador de neblina en la parte superior de la torre con el fin de eliminar el exceso de agua en forma de gotas pequeñas que arrastra el flujo ascendente del gas limpio.

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
 ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
 UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

El lavador ciclónico húmedo se compone insertando bancos de boquillas aspersoras dentro de un ciclón seco convencional. El aspersor actúa sobre las partículas en el vórtice exterior y las partículas del líquido cargadas de polvo son lanzadas hacia fuera contra la pared interna húmeda del ciclón. La solución cargada de polvo fluye por las paredes hasta el fondo, donde es retirada.

El lavador Venturi consiste en un canal de flujo rectangular o circular que converge a una garganta de sección estrecha y luego diverge nuevamente hasta recuperar su área transversal original. En la sección convergente, el trabajo del flujo asociado con el flujo se convierte en energía cinética, provocando un aumento en la velocidad. La incorporación del líquido puede ser en la sección de la garganta (que es lo mejor) o al inicio de la sección convergente. El gas a alta velocidad atomiza el líquido inyectando. Para funcionar, los depuradores Venturi requieren energía considerable debido a la necesidad de empujar los gases a velocidad alta a través del sistema. Este lavador puede remover partículas con diámetros desde $0.1 \mu m$.

Mientras que éste tipo de depuradores se utiliza ampliamente, se tienen desventajas serias con ellos; una es que el líquido que ya se usó se debe eliminar o reutilizar; en cualquiera de los dos casos se requiere de un tratamiento adecuado, el cual es costoso y frecuentemente complicado. Además la presencia de agua aumenta la corrosividad de los materiales y se requiere una buena dispersión de la fase líquida y esto a su vez ocasiona un consumo de energía alto.

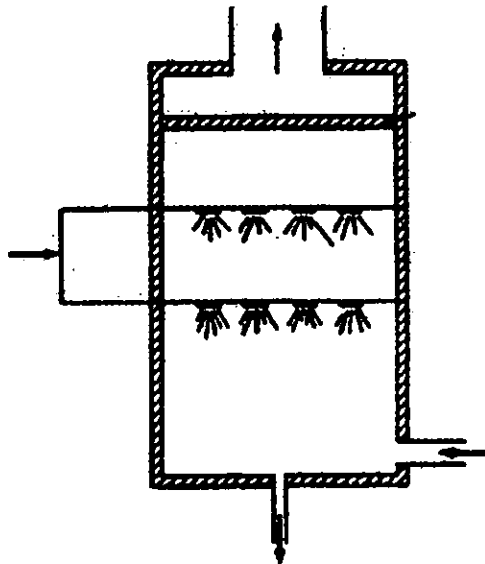


Fig. 7.3 Croquis de un lavador de torre por aspersión

Filtros de tela

Descrito de la forma más simple, el filtro de tela es una versión a gran escala de una aspiradora doméstica, funciona provocando que el gas fluya a través del material de filtro y que las partículas que se van a colectar, y la recolección ocurre como resultado de varios mecanismos que a continuación se describen. Las partículas son interceptadas cuando la trayectoria del flujo que las transporta pasa por la mitad del diámetro de la fibra del filtro. También pueden sufrir un impacto cuando tienen suficiente inercia como para permanecer en su curso cuando la trayectoria del flujo se desvía en derredor de la fibra. Las partículas que se encuentran dentro de los rangos más pequeños hacen contacto con la fibra del filtro como resultado de su propio movimiento al azar (movimiento browniano) en la corriente del gas, y otras se ponen en contacto como resultado de la atracción electrostática. Al paso del tiempo, se construye una capa de partículas sobre la superficie de tela y se forma una costra, la cual incrementa la eficiencia de los filtros pero disminuye la velocidad del flujo. Por consiguiente, esta capa se tiene que remover periódicamente mediante agitación de la tela, invirtiendo el flujo de aire usando ambos métodos.

El filtro se construye con materiales adecuados para el tipo de gas y de partículas, generalmente se utiliza tela trenzada o de fieltro y se colocan en hojas extendidas que se apoyan sobre estructuras de alambre o en forma de tubos cilíndricos colgados en hileras múltiples, lo que permite dar extensas áreas superficiales que permitan el paso del gas adecuadamente. La temperatura a la cual pueden funcionar los filtros de tela es en esencia una función de las características de las fibras con las cuales están hechos los tubos o camisas.

Este mecanismo de remoción de partículas es aplicado para partículas de 0.01 a $0.05 \mu m$, logrando una eficiencia cercana al 100%. En general tiene una amplia eficiencia colectora sobre un intervalo de tamaños de partículas extenso y tiene una extrema flexibilidad de diseño, proporcionada por la disponibilidad de varios métodos de limpieza y de medios filtrantes.

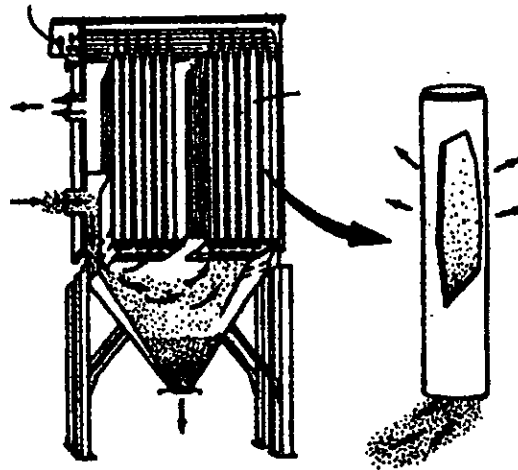


fig. 7.4 Filtros de tela

Precipitadores electrostáticos

Este mecanismo se emplea para la colección de partículas y aerosoles, funciona de la siguiente forma; una partícula con una carga eléctrica repele un alambre o una placa de carga similar y es atraída por una carga eléctrica opuesta, por lo general conectada a tierra, que puede ser un tubo o una placa. Los precipitadores electrostáticos se utilizan extensamente para la colección de partículas en una escala muy grande: para el polvo de cemento de los hornos de calcinación en la sementeras, hasta cierto grado para coleccionar discretas gotas de bruma de ácido sulfúrico en las plantas de ácido, casi de uso universal para ceniza volátil en las estaciones de energía y en la mayor parte de otras situaciones donde se tratan grandes volúmenes de gases y que se deben lograr eficiencias altas.

Uno de los inconvenientes de este sistema es la descarga de las partículas que recién llegan a la placa, donde ya existe una costra depositada que actúa como aislante parcial, esto puede provocar que algunas partículas depositadas se reincorporen a la corriente de gas.

Los precipitadores electrostáticos modernos pueden lograr eficiencias de 99% o superiores en la recolección de partículas finas menores de $0.01 \mu m$ de diámetro.

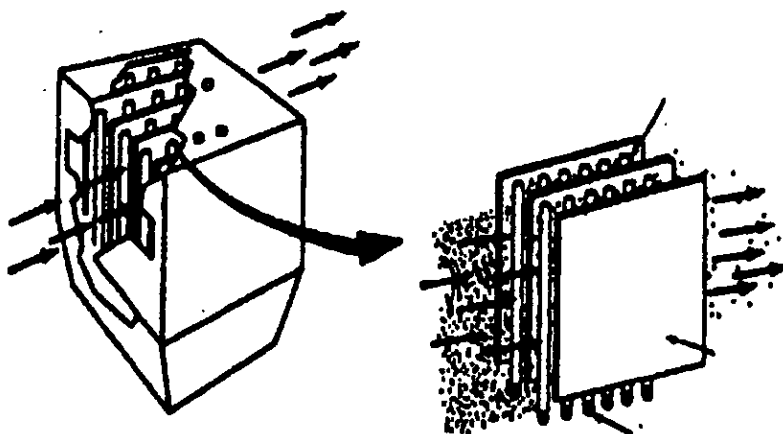


Fig. 7.5 Precipitador electrostático

CAPÍTULO 8

CONTROL DE GASES

Una gran parte de los contaminantes del aire está formado por gases, entre ellos están el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, y los hidrocarburos no quemados en su totalidad. Las principales fuentes de los contaminantes gaseosos son el consumo de combustibles fósiles y emisiones de gases y vapores durante procesos industriales, estos últimos pueden provocar concentraciones locales con niveles objetables.

La remoción de contaminantes gaseosos de una emisión presenta problemas por su homogeneidad respecto a la corriente del gas y sólo se pueden remover mediante difusión hacia superficies controladas donde se absorben o adsorben de manera preferencial o, en algunos casos, presentan una modificación química para transformarse en productos menos nocivos.

Por lo general, las concentraciones de contaminantes gaseosos en las mezclas de gas son relativamente bajas. La reducción de dichas sustancias a niveles deseables se puede llevar a cabo por varios métodos. Primero la especie contaminante se puede adsorber sobre la superficie de adsorbentes sólidos selectivos. Segundo, los contaminantes pueden ser absorbidos por solventes líquidos. Tercero, el contaminante se puede oxidar por medio de la incineración catalítica, de flama directa, e incineración térmica.

8.1 Adsorción

La adsorción es un proceso de separación que se basa en la capacidad que tienen ciertos sólidos para remover en forma preferencial componentes gaseosos (o líquidos) de una corriente. Las moléculas del gas o vapor contaminantes, presentes en una corriente residual, se acumulan en la superficie del material sólido. Al medio adsorbente sólido se le llama con frecuencia el adsorbente, mientras que el gas o vapor adsorbido se le llama adsorbato.

Además de contribuir a la deshumidificación del aire y otros gases, la adsorción es útil en la remoción de olores y contaminantes objetables, procedentes de gases industriales, así como en la recuperación de vapores de solventes valiosos del aire y otros gases. La adsorción es una técnica especialmente útil en los casos en que:

1. El gas contaminante no es combustible, o es difícil de quemar.
2. El contaminante es lo suficientemente valioso para justificar su recuperación.
3. El contaminante se encuentra en una concentración muy diluida en el sistema de escape.

El proceso de adsorción puede clasificarse como adsorción física o adsorción química. En la adsorción física, las moléculas de gas se adhieren a la superficie del adsorbente sólido como resultado de las fuerzas atractivas intermoleculares entre ellas (fuerzas de Van Der Waals). El proceso de adsorción es exotérmico. La ventaja de la presión del adsorbato en la corriente de gas, o elevando la temperatura, el gas adsorbido es fácilmente desadsorbido sin cambio en la composición química. Esta característica de reversibilidad es extremadamente importante si resulta económicamente deseable la recuperación del gas adsorbido o la recuperación del adsorbente para volver a utilizarlo.

Si las moléculas son pequeñas y polares (con carga eléctrica), entonces se pueden adsorber sobre sólidos tales como el sílice gelatinoso, alúmina o carbón de leña. Los sólidos adsorbentes de éxito como el sílice gelatinoso, aunque de apariencia sólida simple vista, en realidad consisten en una multiplicidad de poros diminutos, los cuales incrementan de manera considerable la superficie de exposición disponible. Por ejemplo, la superficie de exposición efectiva del sílice gelatinoso es del orden de varios metros cuadrados por cada gramo de adsorbente. Los adsorbentes sólidos de este tipo se pueden reutilizar; el sílice gelatinoso, después de la saturación con vapor de agua se puede secar por completo y reutilizar varias veces.

Si se trata de moléculas grandes no polares, tales como varios compuestos orgánicos que incluyen la mayoría de los aromáticos, el adsorbente más adecuado es el carbón activado. Este carbón es de leña que se prepara mediante destilación destructiva de la madera, cáscara de coco, huso de frutas y comprimidos de carbón, el cual se ha tratado (activado) con vapor y algunos reactivos químicos inorgánicos. El diámetro de las partículas del adsorbente puede variar desde 0.25 cm hasta valores tan bajos como 200 μm o menos. La superficie de exposición interna total de este material es mucho más grande que la del sílice gelatinoso y puede fluctuar desde 200 hasta 1200 m^2/gr . Por consiguiente, el carbón activado puede actuar como adsorbente para olores durante periodos de semanas aún de meses sin necesidad de reemplazarlo o regenerarlo.

El carbón activado también se puede utilizar para la recuperación de solventes. El sistema usual consiste en emplear de forma alternada dos adsorbentes y regenerar al solvente con vapor.

La diferencia fundamental entre un adsorbente sólido y uno líquido es que en un sistema de absorción líquida, el líquido se remueve en forma continua y la superficie se regenera conforme el líquido fluye dentro del empaquetamiento de la torre u otro aparato. En un sistema adsorbente sólido, el sólido mismo se tiene hacia el deterioro del sólido adsorbente por rozadura ya que éste se mueve despacio a través del aparato.

La adsorción química es el resultado de una interacción entre el adsorbato y el medio adsorbente. La fuerza de unión asociada con este tipo de adsorción es mucho más fuerte que para la adsorción física. La adsorción química es con frecuencia irreversible, ya que al experimentar la desorción, la naturaleza química habrá experimentado un cambio. En ciertos casos, el adsorbente sirve como un sitio de reacción entre dos contaminantes adsorbidos, o entre un contaminante adsorbido y un reactivo químico impregnado sobre el adsorbente. El adsorbente sólido en estas circunstancias puede desempeñar una función catalítica y auxiliar a la reacción, ya que muchas especies son más reactivas en el estado adsorbido que en estado libre.

La descomposición catalítica sobre superficies impregnadas con un catalizador adecuado también se utiliza; aquí, los productos de descomposición pueden no tener alguna afinidad respecto al adsorbente y se liberan nuevamente en la corriente de gas. Tal sistema adsorbente puede operar de manera continua y sólo se limita por la susceptibilidad del catalizador a la desactivación.

8.2. Absorción

El proceso de absorción se basa en transferir un contaminante de la fase gaseosa a la gas líquida, este es un proceso de transferencia de masa en el cual el gas se disuelve en el líquido. Esta disolución puede o no ser acompañada por una reacción con un ingrediente de el líquido. La transferencia de masa es un proceso de difusión en donde el gas contaminante se mueve de puntos de alta concentración a

puntos de baja concentración. La remoción de el gas contaminado se realiza por lo general en tres etapas.

- 1.- Difusión del gas contaminante hacia la superficie del líquido.
- 2.- Transferencia a través de la interfase gas/líquido (disolución)
- 3.- Difusión de gas disuelto fuera de la interfase en el líquido.

Cuando se trabaja con concentraciones elevadas de un gas contaminante (del orden de 1% o más), es frecuente utilizar un sistema de flujo a contracorriente en una unidad tal como una torre de absorción empacada, como se muestra en la figura 8.1. Esto tiene la ventaja de que la concentración más baja del contaminante en el gas se encuentra en contacto con el líquido más débil, el cual es el líquido absorbente en el que hay menor concentración del gas contaminante (o quizá líquido absorbente puro y no ha circulado dentro de una sistema cerrado). El líquido más concentrado que se separa de la columna de absorción entra en contacto con la concentración más elevada del contaminante. Entonces el líquido absorbente, se puede utilizar como material básico para procesamiento ulterior. Así, una operación común en refinerías de petróleo es la absorción del ácido sulfídrico en una solución alcalina, su subsiguiente enjuague mediante el uso de vapor y luego su conversión en azufre. Este azufre es el material no elaborado que se utiliza en la producción de fertilizante (superfosfato).

Los contaminantes del aire que se encuentran presentes a concentraciones muy bajas se limpian con frecuencia por fricción en un sistema de corriente coordinada, donde el gas sigue la misma dirección que el líquido limpiador.

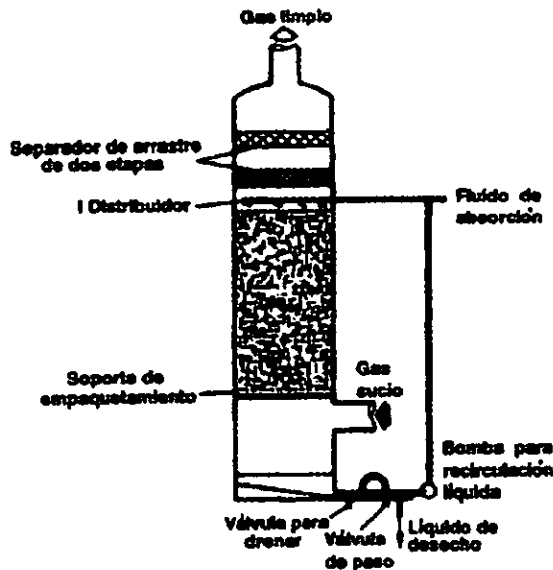


fig. 8.1 Diagrama de una torre de absorción empacada

El tamaño del depurador de gases y su efectividad relativa son una función de una cantidad de parámetros: la superficie de exposición del líquido absorbente, la temperatura, el tiempo disponible y la fuerza de conducción que lleva a las moléculas del gas contaminante hacia la superficie del líquido y afecta su absorción. Esto depende de la naturaleza química y la interacción del gas contaminante con el líquido. Si el gas se absorbe con facilidad, por ejemplo amoníaco en agua, se tiene una gran fuerza de conducción y el sistema requerido puede ser relativamente más pequeño que si se trata de un sistema de absorción difícil, tal como dióxido de azufre en agua. La opción normal para la limpieza de SO_2 por frotamiento no sería agua sino una solución alcalina, tal como amoníaco, en el cual el SO_2 es muy soluble. La fuerza de conducción también es una función de la concentración del gas contaminante en la corriente de gas y en la superficie líquida, y se reduce conforme el líquido se aproxima a la saturación con el gas.

La superficie de exposición a través de la cual un gas se absorbe es una función del tamaño de la gota del líquido (en un depurador de gases de tipo rocío) o de las dimensiones y tipo de empaquetamiento (en una torre empaquetada), así como también de la cantidad de líquido por unidad de volumen de gas se utiliza y de las dimensiones físicas del sistema.

En general, los contaminante gaseosos presentes a concentraciones moderadas, menos de cerca de 0.1% en volumen, se manejan con efectividad mediante depuradores líquidos de gases siempre y cuando se encuentre disponible un líquido absorbente adecuado. Los líquidos limpiadores para depuradores de gases incluyen agua para amoníaco y ácido clorhídrico en forma de gas, ácido sulfúrico para amoníaco, soluciones de metil y etilamina para ácido sulfhídrico, soluciones de sulfito de sodio y pastas aguadas de caliza para ácido sulfúrico y muchos otros. Los gases colectados, con frecuencia se enjuagan de la fase líquida con vapor o mediante calentamiento directo, además de que se tratan, ahora como un producto más concentrado, mediante un proceso secundario. La remoción de ácido sulfhídrico a partir de gas natural y productos de refinería de petróleo y su subsecuente reducción a azufre es un ejemplo del uso de limpieza por frotamiento para concentración del contaminante antes de su conversión en una forma más útil o eliminable con mayor facilidad.

8.3 Combustión de gases contaminantes

La combustión de gases contaminantes es un proceso de incineración que se utiliza para remover contaminantes combustibles del aire (gases, vapores u olores). Se usa frecuentemente en situaciones donde el gasto volumétrico del gas residual de un proceso es grande, pero el nivel de gas contaminante es pequeño. La incineración de residuos gaseosos indeseables es un método satisfactorio de control de contaminantes, desde diversos aspectos.

- 1.- Casi todos los contaminantes altamente olorosos son combustibles o son cambiados químicamente a sustancias menos olorosas cuando se calienta suficientemente en presencia del oxígeno.
- 2.- Los aerosoles orgánicos que causan plumas visibles se destruyen eficazmente por la combustión auxiliar.
- 3.- Ciertos gases y vapores orgánicos, si se descargan en la atmósfera, intervienen en reacciones de neblumo. La combustión auxiliar con flama destruye eficazmente dichos materiales.
- 4.- Algunas industrias, como las refinerías, producen grandes cantidades de gases residuales altamente combustibles y materiales orgánicos que serían de otra manera peligrosos. Por lo general el método más seguro de control del efluente es mediante la combustión de chimeneas de flama, u hornos especialmente diseñados.

Las ventajas de la combustión auxiliar son múltiples. Incluyen: 1) destrucción esencialmente completa de todos los contaminantes combustibles, cuando el equipo este diseñado y operando de manera adecuada, 2) posibilidad de adaptar el equipo a cambios moderados en el gasto y concentración

del efluente, 3) una eficiencia de control que sea relativamente insensible al contaminante gaseoso específico, 4) ausencia de deterioro en el funcionamiento, y 5) posibilidad de recuperación económica del calor residual.

Entre las desventajas frecuentemente citadas se tienen 1) costos de inversión y operación razonablemente altos, 2) la necesidad proveer en algunos casos equipos de colección y conducción, y 3) la posibilidad de introducir problemas especiales de contaminación cuando estén presentes en el hidrocarburo otros átomos diferentes de C, H y O.

Es necesario conocer diversos factores para poder diseñar un proceso de incineración para los contaminantes gaseosos. Se incluyen la composición química de los contaminantes y su nivel de concentración, la temperatura del gas residual a la entrada, el gasto volumétrico del gas residual por manipular, y los niveles permisibles de emisión se podrá escoger una técnica adecuada de incineración. Los tres tipos básicos de incineración, de gases contaminantes, se clasifican como 1) de flama directa, 2) térmico y 3) catalítico.

8.4 Incineración de gases por flama directa

La incineración por flama directa, es un método por el cual los gases residuales se queman directamente en una combustión, con o sin la adición de combustible adicional, como el gas natural. En algunos casos, el gas residual mismo puede contribuir a una mezcla de combustible sin que haya que añadir aire. En otras situaciones, aun después de la adición de aire la mezcla estará dentro de sus límites de flamabilidad. Si la mezcla queda fuera de su límite de flamabilidad inferior, la adición de una cantidad relativamente pequeña de combustible la llevará frecuentemente dentro del límite. En un quemador bien diseñado, será posible quemar exitosamente un gas residual sin tener que recurrir a un combustible auxiliar. Aun este requerimiento se puede evitar precalentando la corriente de gas algunos cientos de grados, ya que el límite de flamabilidad inferior disminuye con el aumento de la temperatura, la incineración por flama directa se deberá usar sólo en aquellas situaciones en las que los combustibles en el gas residual contribuyen con una porción significativa de la energía total requerida para la combustión. Esta contribución deberá ser, por razones económicas, mayor del 50% del valor calórico total requerido.

Uno de los problemas que se presentan en la incineración por flama directa, que son posibles temperaturas de flama en el intervalo de los 2500°F. Esto da por resultado la formación de óxidos de nitrógeno cuando esté disponible un suficiente exceso de aire, y se mantenga un tiempo suficiente la alta temperatura del gas. De esta manera, el proceso de combustión podría sustituir simplemente un tipo de contaminante por otro.

La antorcha o mechero representa un ejemplo especial de la incineración por flama directa y que se utiliza en las plantas petroquímicas y las refinerías. Se trata sencillamente de una cámara de combustión abierta en su extremo, y dirigida por lo general, verticalmente hacia arriba. La antorcha se utiliza en primer lugar para combustibles gaseosos que no se pueden eliminar convencionalmente por otros medios.

8.5 Incineración térmica de gases

Cuando la concentración de los contaminantes combustibles sea muy baja, será necesario usar la incineración térmica. Por lo general, la corriente de gas residual se precalienta en un intercambiador de calor y luego por la zona de combustión de un quemador, provisto con combustible suplementario. De aquí resulta que los combustibles en la corriente de gas residual se llegan por encima de sus temperaturas de autoencendido y se queman con el oxígeno usualmente presente en la corriente contaminada. Si no se dispone normalmente de suficiente oxígeno, se añade al flujo de gas residual por medio de un soplador o un ventilador. La principal ventaja del proceso, que se muestra esquemáticamente

en la figura 8.2, es que la incineración térmica, se lleva a cabo característicamente con temperaturas dentro del intervalo de 1000 a 1500°F. Este intervalo de temperatura hace menos costoso el diseño de la cámara de combustión, y atenúa la posibilidad de una formación apreciable de los óxidos de nitrógeno.

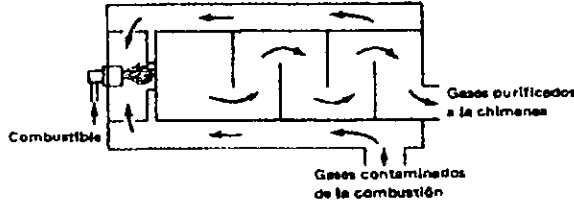


fig. 8.2 Esquema de un incinerador térmico

Una extremadamente importante consideración en el diseño de los incineradores térmicos está representada por el Tiempo, Temperatura y Turbulencia. El tiempo de residencia en el incinerador debiera ser suficiente para permitir completa combustión del material combustible. Normalmente se encuentra dentro del intervalo de 0.2 a 0.8s, con 0.5s como una pauta razonable. La turbulencia se refiere a la cantidad requerida de mezclado mecánico a fin de asegurar el completo contacto del oxígeno con el combustible, y de los contaminantes combustibles con los productos de combustión y el calor de la flama. Un mezclado completo es usualmente más importante en el control de la flama. Un mezclado completo es usualmente más importante en el control de los olores que en el control de los hidrocarburos, debido a que el escape del compuesto odorífero en concentraciones de sólo unas pocas partes por billón, se pueden frecuentemente detectar. Se requerirá menor tiempo de residencia cuando ocurra un mezclado adecuado y se utilice una flama corta. Un aumento de una o las tres cantidades aumentará la posibilidad de una remoción razonablemente completa de los gases residuales combustibles y viceversa.

Las temperaturas de operación usadas en los quemadores auxiliares varían con la naturaleza de los contaminantes combustibles presentes en el gas efluente. Estos contaminantes pueden ser hidrocarburos en general, monóxido de carbono, olores, o una combinación de varios de ellos. Los requerimientos medios del promedio de las temperaturas para dichos contaminantes aparecen en la cuadro. 8.1.

Cuadro 8.1

Gases contaminantes	Intervalo promedio de temperaturas (°F)
Oxidación de los hidrocarburos	850 - 1400
Oxidación del monóxido de carbono	1250 - 1450
Control de los olores por la vía de la oxidación	900 - 1300

8.6 Incineración catalítica de gases

La incineración térmica se utiliza con preferencia a la incineración por flama directa cuando los materiales combustibles en un gas residual tienen una concentración muy baja. El quemador auxiliar catalítico es un método que compete, en esta situación, con el quemador auxiliar térmico. Un catalizador acelera la tasa de una reacción química sin que él experimente un cambio químico. Por tanto, los tiempos de residencia requeridos para las unidades catalíticas son mucho menores que los requeridos para las unidades térmicas. En lugar de los tiempos de residencia o detención de 0.3 a 0.9s, típicos de las unidades térmicas, los requerimientos de tiempo para la acción catalítica son del orden de unas pocas

centésimas de segundo. Los quemadores auxiliares térmicos pueden requerir de 20 a 50 veces el tiempo de residencia que requiere una unidad catalítica. De hecho, para una unidad catalítica se habla de la "velocidad espacial" en lugar del tiempo de residencia. La velocidad espacial se define como los pies cúbicos normales por hora de fluido de gas divididos por el volumen, en pies cúbico, del catalizador. La otra ventaja marcada de las unidades catalíticas para su uso en un proceso de incineración consiste en que se baja la temperatura de ignición. En realidad, esto es un efecto energético. Un catalizador reduce los requerimientos de energía del proceso de oxidación que ocurre en una instalación catalítica, opuesto a la situación necesaria para una reacción homogénea en la fase gaseosa. Por tanto, no hay que calentar la corriente de gas residual a una temperatura tan alta como en la incineración térmica. Si se hacen pasar los gases residuales a través del lecho del catalizador se puede reducir hasta en 500°F, la temperatura necesaria para la reacción exotérmica con el oxígeno de los gases y vapores orgánicos, si se le compara con la incineración térmica.

La mayoría de los gases residuales que contienen contaminantes combustibles, procedentes de procesos industriales, están a una temperatura bastante baja. Por tanto, se utiliza algún tipo de quemador de precalentamiento para llevar el gas residual hasta la temperatura en la que el catalizador será efectivo. Son típicas las temperaturas de 600° a 1000°F. Este intervalo de temperatura es inferior a la temperatura de autoignición para la incineración térmica, de manera que los contaminantes en el gas residual se calientan. Las reacciones de combustión ocurren en la superficie del catalizador. No se observa ninguna estructura directa de la flama, pero en la superficie del catalizador estará incandescente. La eficiencia de la combustión catalítica es del orden de 95 a 98%, de modo que los gases efluentes de la conversión catalítica estarán constituidos principalmente por el dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno. En la figura 8.2 se muestra la figura de un quemador auxiliar catalítico. El soplador que se muestra es esta configuración tendrá que ser capaz de manejar las temperaturas moderadas debidas al quemador de precalentamiento. A estas bajas temperaturas, la formación de óxidos de nitrógeno no representa un serio problema, a pesar de que el tiempo de residencia es razonablemente largo.

Metales nobles como el platino y el paladio se utilizan frecuentemente, dispersados en un soporte catalizador, como la alúmina. Los hidrocarburos de peso molecular alto se oxidan con mayor facilidad que los de peso molecular bajo. La reactividad catalítica varía también con la estructura molecular, en el orden que se indica a continuación: aromáticas < parafinas ramificadas < parafinas lineales < oleofinas < acetilénicas.

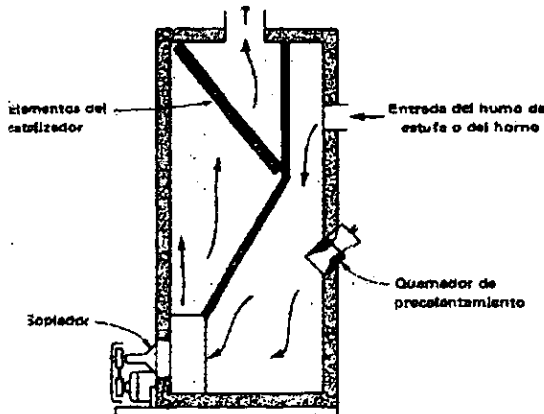


fig. 8.2 Diseño de un quemador auxiliar catalítico

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE GASES EMITIDOS A LA
ATMÓSFERA POR FUENTES LINEALES Y MÓVILES
UTILIZANDO EL MODELO GAUSSIANO

Capítulo 8
Control de Gases

La oxidación catalítica de los contaminantes gaseosos es eficiente debido a que ofrece un consumo más bajo del combustible suplementario que de la incineración auxiliar térmica. Por tanto, los costos de operación son normalmente bajos, con la excepción de los costos de mantenimiento del catalizador. La vida de operación normal de un catalizador sin problemas de deposición de partículas podrá ser de 3 a 5 años.

Los intervalos de temperatura requeridos para los tres gases residuales industriales más comunes, se muestran en el cuadro 8.2

Cuadro 8.2

Contaminante industrial	Intervalo de temperaturas catalíticas (°F)
<i>Solventes</i>	500-850
<i>Grasas vegetales y animales</i>	500-700
<i>Descargas de los procesos químicos</i>	400-750

Entre los *solventes contaminantes* se incluyen el toluol, el metil etil cetona, el xilol, alcoholes, hidrocarburos y otros, entre los *contaminantes provenientes de procesos químicos*, están el monóxido de carbono, el etileno, el óxido de etileno y el propileno.

Uno de los problemas asociado con la incineración catalítica es el envenenamiento del lecho por contaminantes específicos presentes en el gas residual. Materiales como el hierro, plomo, silicio y fósforo acortan la vida útil de muchos catalizadores.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

El aire constituye uno de los principales factores ambientales debido a su importancia determinante en la salud de los seres vivos y particularmente del hombre.

Tradicionalmente, el aire ha sido estudiado sólo desde aquellos atributos que resultaban importantes para la realización de proyectos.

Actualmente ante los problemas de contaminación atmosférica es necesario realizar estudios más profundos para conocer con detalle las alteraciones que puedan sufrir sus atributos y las repercusiones en el ambiente, con el fin de mejorar fundamentalmente la calidad de vida, que en muchas zonas del país se está afectando por emisiones tóxicas.

El carácter de los estudios de impacto ambiental, eminentemente predictivo, requiere el empleo de técnicas que, a partir de las acciones de un proyecto en particular, permitan prever sus efectos en el ambiente, con el objeto de proponer las medidas que atenúen los efectos adversos antes de su implantación.

Con respecto al impacto en la calidad del aire, para poder predecir con suficiente confiabilidad la concentración de contaminantes atmosféricos como consecuencia de un proyecto que involucre fuentes móviles y lineales, se debe recurrir a un modelo matemático.

Los modelos matemáticos están basados en consideraciones que simplifican el fenómeno, y para su aplicación se requiere contar con datos meteorológicos del sitio del proyecto como son: dirección del viento, altura de la capa de inversión, temperatura y características topográficas y de las fuentes de emisión.

El modelo gaussiano es el más utilizado en la evaluación de la dispersión atmosférica de contaminantes producto de fuentes móviles y lineales; sin embargo, se debe tener en cuenta las consideraciones simplificadoras que se establecen para el desarrollo del modelo, tales como:

- a) La transferencia de masa debido al movimiento del volumen que sobrepasa, con mucho la contribución debida a la difusión de masa;
- b) A pesar de que la velocidad del viento sí varía en las tres dimensiones, la variación es relativamente pequeña;
- c) Las condiciones meteorológicas se consideran estacionarias.
- d) Se considera reflexión total del contaminante a nivel del piso.
- e) Las desviaciones horizontales y verticales se calcularon considerando terreno totalmente plano.
- f) Las características de emisión del contaminante se consideran constantes (p. ejem. Tasa de emisión, concentración, temperatura de emisión, etc)
- g) El material contaminante que se dispersa es conservativo

Para hacer posible la simulación del efecto en la calidad del aire de fuentes móviles y lineales ante diversas condiciones físicas de la fuente y del ambiente en forma expedita y sin errores de cálculo, resulta imprescindible el empleo de la computadora en el manejo de un lenguaje de programación. Esto, por otra parte, es condición necesaria, pero no suficiente, ya que el carecer de las suficientes bases teóricas del fenómeno conduciría a la aplicación incorrecta del modelo y convertiría al usuario del programa en una "capturista" imposibilitado para interpretar adecuadamente los resultados que aparecen en pantalla.

Esta tesis y el programa desarrollado servirá como apoyo didáctico para la materia de Impacto Ambiental impartida a los alumnos de la carrera de Ingeniero Civil en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

BIBLIOGRAFÍA

Kenneth Wark. Cecil F. Warner
CONTAMINACIÓN DEL AIRE origen y control.
Noriega Editores Mexico D.F. 1990

Mackenzie L. Davis A. Cornwel
Introducción to Enviromental Engineering.
McGraw-Hill, second editioin, New York, 1991

Semamap
Ley General del Equilibrio Ecológico y protección al ambiente.
México, 28 de enero de 1988

M. en C. Vicente Fuentes Gea
Apuntes de clases de modelos de ingeniería Ambiental
División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería, UNAM

George Peg
Aprendiendo Visual Basic Ver.6 en 21 días.
McGraw-Hill, primera edición México 1999

Julien Hennefeld
BASIC con aplicaciones.
Grupo Editorial Iberoamérica
