

56  
2 ej.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

## CONTAMINACION INDUSTRIAL: SISTEMATIZACION PARA LA DESCRIPCION PRELIMINAR DE PROCESOS INDUSTRIALES DE ACUERDO A LAS OPERACIONES CONTAMINANTES DEL AIRE Y RECOMENDACIONES DE EQUIPO DE CONTROL

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
ENRIQUE FERNANDEZ SANCHEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ALFONSO GARCIA GUTIERREZ

MEXICO, D. F.

FALLA DE ORIGEN

1991



## **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 está 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.

"Contaminación Industrial: Sistematización para la descripción preliminar de procesos industriales de acuerdo a las operaciones contaminantes del aire y recomendaciones de equipo de control."

## INDICE

INDICE DE FIGURAS .....	VI
INDICE DE TABLAS .....	IX
INTRODUCCION .....	XI
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1 La contaminación industrial .....	3
1.1.1 Países desarrollados .....	3
1.1.2 Países en vías de desarrollo .....	4
1.2 El caso particular de México .....	5
1.2.1 Contaminación del aire a nivel nacional .....	5
1.2.2 Contaminación del aire en el D.F. ....	8
1.2.2.1 Inversión térmica .....	14
1.2.2.2 Localización industrial .....	15
1.3 Objetivo, alcance y limitaciones de este trabajo .....	24
1.3.1 Contexto y objetivo .....	24
1.3.2 Alcance .....	24
1.3.3 Limitaciones .....	25
2. FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE .....	26
2.1 Fuentes de emisión .....	27
2.1.1 Contaminantes atmosféricos primarios .....	30
2.1.2 Contaminantes atmosféricos secundarios .....	35
2.1.3 Unidades de medición de los contaminantes del aire .....	39
2.2 La Atmósfera .....	39
2.2.1 Estructura atmosférica .....	40
2.2.2 Meteorología de la contaminación atmosférica .....	41
2.2.2.1 Micrometeorología .....	42
2.2.3 Proceso de dispersión .....	43

2.3	Receptores	49
2.3	Efectos de los contaminantes atmosféricos en el medio ambiente	49
3.	LEGISLACIÓN	52
3.1	Estructura	53
3.2	Inspección	53
3.3	Sanciones	55
3.4	Monitoreo ambiental en la Ciudad de México	56
3.4.1	Calidad del aire en la ZMCM	57
3.4.2	Plan de contingencias ambientales	60
4.	DETECCIÓN DE CONTAMINANTES	62
4.1	Monitoreo en fuentes fijas	63
4.1.1	Muestreo de gases	70
4.1.2	Muestreo de partículas	70
5.	TÉCNICAS Y EQUIPOS DE CONTROL	73
5.1	Equipos para retener partículas	76
5.1.1	Colectores mecánicos	77
5.1.2	Filtros de bolsas	83
5.1.3	Precipitadores electrostáticos	84
5.1.4	Colectores por vía húmeda	86
5.2	Equipo para separar gases	93
5.2.1	Lavadores o depuradores	93
5.3.	Tratamiento por combustión	97
5.4	Costo de la contaminación	100
5.5	Diseño del sistema de control de partículas	102
6.	FUENTES INDUSTRIALES DE EMISIÓN	104
6.1	Elementos de los procesos industriales	104
6.2	Operaciones industriales	106
6.3	Clasificación de las fuentes industriales de emisión	108
6.4	Metodología de estudio para un proceso contaminante	109
6.5	Descripción del programa elaborado	110
6.6	Características del programa CONTAMIND	112
6.7	Instructivo de uso	113

7. APLICACIÓN DEL PROGRAMA. CASOS DE ESTUDIO	118
7.1 Proceso de fabricación de cemento tipo Portland por vía seca	118
7.1.1 Descripción del proceso	119
7.1.2 Utilización del programa	121
7.1.3 Resultados	124
7.1.4 Comentarios, conclusiones y recomendaciones particulares	124
7.1.4.1 Comentarios	124
7.1.4.2 Conclusiones	125
7.1.4.3 Recomendaciones	125
7.2 Proceso de fabricación acumuladores de plomo	126
7.2.1 Descripción del proceso	127
7.2.2 Utilización del programa	131
7.2.3 Resultados	133
7.2.4 Comentarios, conclusiones y recomendaciones particulares	133
7.2.4.1 Comentarios	133
7.2.4.2 Conclusiones	134
7.2.4.3 Recomendaciones	134
CONCLUSIONES Y COMENTARIOS GENERALES	136
Comentarios a este trabajo	136
Conclusiones generales	137
BIBLIOGRAFIA	140

Nota: El programa que acompaña a esta tesis se puede consultar con su autor al 7831737.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Contaminación a nivel global	2
Figura 1.2	Regionalización de la contaminación atmosférica	5
Figura 1.3	Localización de las industrias en México	8
Figura 1.4	Producción de contaminantes atmosféricos	9
Figura 1.5	El D.F. dentro de la cuenca del Valle de México	10
Figura 1.6	Cuenca del Valle de México y ZMCM	12
Figura 1.7	Zonas climáticas de la Ciudad de México	13
Figura 1.8	Inversión térmica en la en la Ciudad de México	14
Figura 1.9	Distribucción industrial 1960-1980	16
Figura 1.10	Patrón anual de vientos	17
Figura 1.11	Zonas metropolitanas en 1980	19
Figura 1.12	Zonas metropolitanas en 2010	20
Figura 2.1	Elementos de contaminación atmosférica	27
Figura 2.2	Esmog fotoquímico	36
Figura 2.3	Formación del ozono a partir de sus precursores	37
Figura 2.4	Escala de pH para la lluvia ácida	38
Figura 2.5	La atmósfera y sus partes	41
Figura 2.6	Capa límite planetaria	42
Figura 2.7	Perfil de velocidad en diferentes terrenos	43
Figura 2.8	Diferentes gradientes de temperatura	44
Figura 2.9	Comportamiento del penacho	44
Figura 2.10	Distribución gaussiana de los contaminantes	45
Figura 2.11	Coefficiente de dispersión $\sigma_y$	46
Figura 2.12	Coefficiente de dispersión $\sigma_z$	46

<i>Figura 3.1 Red metropolitana de monitoreo en la ZMCM</i>	56
<i>Figura 3.2 Reporte del INECA</i>	58
<i>Figura 3.3 Diferencia entre el PSI y el INECA</i>	60
<i>Figura 3.3 Plan de contingencias</i>	61
<i>Figura 4.1 Localización del punto de muestreo</i>	65
<i>Figura 4.2 Características del puerto de muestreo</i>	66
<i>Figura 4.3 Ducto de sección circular</i>	67
<i>Figura 4.4 Ducto de sección rectangular</i>	67
<i>Figura 4.5 Tipos de tubos pitot</i>	69
<i>Figura 4.6 Partes de un tren de muestreo</i>	70
<i>Figura 4.7 Diferentes condiciones de isocineticidad</i>	71
<i>Figura 5.1 Cámara de sedimentación por gravedad</i>	77
<i>Figura 5.2 Colector por recirculación</i>	78
<i>Figura 5.3 Cámara de persianas</i>	78
<i>Figura 5.4 Comportamiento del fluido en un ciclón</i>	79
<i>Figura 5.5 Ciclón axial</i>	80
<i>Figura 5.6 Partes de un ciclón axial</i>	80
<i>Figura 5.7 Ciclón de entrada tangencial</i>	81
<i>Figura 5.8 Ciclones de entrada tangencial</i>	81
<i>Figura 5.9 Ciclón de entrada tangencial con educador</i>	82
<i>Figura 5.10 Funcionamiento básico del filtro</i>	83
<i>Figura 5.11 Arreglos de filtros</i>	84
<i>Figura 5.12 Partes que forman un precipitador electrostático</i>	85
<i>Figura 5.13 Efecto electrostático sobre las partículas</i>	85
<i>Figura 5.14 Precipitador electrostático comercial</i>	86
<i>Figura 5.15 Cámara de rociado</i>	87
<i>Figura 5.16 Lavador de ciclón</i>	88
<i>Figura 5.17 Lavadores de choque</i>	88
<i>Figura 5.18 Torres empacadas</i>	89
<i>Figura 5.19 Lavador de lecho fluidizado</i>	90
<i>Figura 5.20 Lavadores Venturi</i>	90
<i>Figura 5.21 Venturi del dispositivo</i>	91
<i>Figura 5.22 Lavador húmedo con ventilador centrífugo</i>	91
<i>Figura 5.23 Eficiencia de colección de equipos de control</i>	92

Figura 5.24	Torre de rociamiento	94
Figura 5.25	Columnas de placas	95
Figura 5.26	Columna rellena o empacada	96
Figura 5.27	Torre de burbujeo	96
Figura 5.28	Postquemador común	97
Figura 5.29	Convertidor catalítico	98
Figura 5.30	Oxidante térmico recuperativo	99
Figura 5.31	Oxidante térmico regenerativo	99
Figura 5.32	Chimenea típica	100
Figura 5.33	Costos de la contaminación	101
Figura 6.1	Proceso Industrial	105
Figura 6.2	Operaciones que conforman una planta	106
Figura 6.3	Análisis de un proceso industrial	110
Figura 6.4	Estudio del tópico "contaminantes"	111
Figura 6.5	Menú principal de CONTAMIND	115
Figura 6.6	Selección de la Actividad Industrial	115
Figura 6.7	Algunas industrias que integran la actividad minera	116
Figura 6.8	Ventana descriptiva del proceso escogido	116
Figura 6.9	Información General	117
Figura 6.10	Consulta a los equipos de control	117
Figura 7.1	Fabricación del cemento Portland por vía seca	121
Figura 7.2	Localización de "Cemento Portland" en el programa	122
Figura 7.3	Visualización de "Operaciones"	122
Figura 7.4	Visualización de "Contaminantes"	122
Figura 7.5	Visualización de "Información"	123
Figura 7.6	Visualización de "EQ_CONTROL"	123
Figura 7.7	Acumulador o batería ordinario	127
Figura 7.8	Fabricación del acumuladores de plomo	130
Figura 7.9	Localización de "Acumuladores de plomo"	131
Figura 7.10	Visualización de "Operaciones"	131
Figura 7.11	Visualización de "Contaminantes"	132
Figura 7.12	Visualización de "Información"	132
Figura 7.13	Visualización de "EQ_CONTROL"	132

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	EMISION DE CARBONO POR LA COMBUSTION (ton.métricas)	4
Tabla 1.2	EMISIONES A LA ATMOSFERA EN MEXICO POR REGIONES	6
Tabla 1.3	DELEGACIONES Y MUNICIPIOS DE LA ZNOM	11
Tabla 1.4	CRONOLOGIA TECNOLOGICA DE MEXICO	21
Tabla 2.1.	CLASIFICACION DE LAS FUENTES DE EMISION	27
Tabla 2.2	CLASIFICACION DE LAS FUENTES FIJAS POR ACTIVIDAD	28
Tabla 2.3	CLASIFICACION DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS	30
Tabla 2.4	CONTAMINANTES ATMOSFERICOS	32
Tabla 2.5	ORIGEN DE LAS PARTICULAS SUSPENDIDAS	35
Tabla 2.6	COMPOSICION DEL AIRE LIMPIO (base húmeda)	39
Tabla 2.7	VARIABLES METEOROLOGICAS	42
Tabla 2.8	EFFECTOS DEL TERRENO SOBRE LA DISPERSION	46
Tabla 2.9	CATEGORIAS DE ESTABILIDAD	49
Tabla 2.10	ALGUNOS EFFECTOS SOBRE EL HOMBRE	50
Tabla 2.11	EFFECTOS EN LA FLORA	50
Tabla 2.12	EFFECTOS EN LOS MATERIALES	51
Tabla 3.1	NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE EN VARIOS PAISES	57
Tabla 3.2	ESCALA NUMERICA DEL IMECA	58
Tabla 3.3	VALORES DE CONCENTRACION CORRESPONDIENTES AL IMECA	59

Tabla 4.1	TECNICAS DE DETECCION DE CONTAMINANTES. EN FUENTE	62
Tabla 4.2	TECNICAS DE DETECCION DE CONTAMINANTES. PERIMETRAL	63
Tabla 4.3	NORMAS TECNICAS ECOLOGICAS PARA FUENTES FIJAS	64
Tabla 4.4	DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS EN UN DUCTO CIRCULAR	65
Tabla 5.1	SUSTITUCION POR MATERIALES MENOS TOXICOS	74
Tabla 5.2	SUSTITUCION DE EQUIPOS U OPERACIONES UNITARIAS	74
Tabla 5.3	CLASIFICACION DE EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES	76
Tabla 5.4	COSTO DE LA CONTAMINACION	101
Tabla 5.5	PARAMETROS PARA ELEGIR UN DISPOSITIVO DE CONTROL	102
Tabla 6.1	PROCESOS COMUNES DE FABRICACION	107
Tabla 6.2	FUENTES DE EMISION INDUSTRIAL, SEGUN LA EPA	109
Tabla 6.3	TECLAS DE NAVEGACION EN EL PROGRAMA	114

## INTRODUCCION

La problemática de la contaminación industrial del aire es en mucho consecuencia del desarrollo tecnológico aplicado a satisfacer las necesidades de la sociedad. Es por tanto parte de ese compromiso tecnológico que la ingeniería se avoque a contrarrestar los efectos perjudiciales que causa este fenómeno sobre el medio ambiente, sean la flora, la fauna y los bienes.

El acercamiento que pretende este trabajo a los procesos industriales proporciona una alternativa para conocer el control adecuado, señalando las operaciones potencialmente contaminantes del aire.

Para lograr esto, en el capítulo uno se dan los antecedentes en cuanto a la contaminación industrial del aire, particularizando en el caso del D.F., por la importancia que tiene. En el capítulo dos se definen los conceptos básicos de la contaminación atmosférica, de acuerdo a su mecanismo físico. En el capítulo tres se hace una breve reseña de los aspectos legales en materia de contaminación del aire vigentes en México. Se incluye lo relacionado con el D.F. En el capítulo cuatro se sintetizan conceptos básicos de la medición de contaminantes en fuentes industriales de emisión. En el capítulo cinco se hace una recopilación de los equipos de control convencionales. En el capítulo seis se define un proceso de fabricación en general y se explica la sistematización para su descripción mediante el programa CONTAMIND. El capítulo siete incluye dos casos de estudio en donde se aplica el programa de cómputo a dos empresas ordinarias y se evalúan los resultados.

## 1. ANTECEDENTES

Desde los inicios de la historia del ser humano, el hombre ha buscado dominar a la Naturaleza para su bienestar personal. La contaminación atmosférica antropogénica\* se inicia en el momento en que el hombre primitivo descubre el fuego y enciende leños para producir calor en las cuevas y cocer los alimentos. Es de esta manera como la combustión se convierte en parte de la vida diaria de nuestra especie, en forma doméstica inicialmente, hasta los días en que se presenta la inimaginable demanda de energía a partir de la revolución industrial y posteriormente por las necesidades de nuestro modo de vida actual.

La reducción de la contaminación actual requiere de una gran inversión económica e incluso de cambios en la forma de vida, así como en los hábitos de uso de la energía. Según las cifras mostradas por el *Worldwatch Institute* (Linden, 1989), Estados Unidos de Norteamérica (EUA), que constituye el 5% de la población total del planeta, consume el 26% del petróleo del mundo, produce el 22% del dióxido de carbono y el 26% del dióxido de azufre mundial y desecha 290 millones de toneladas de residuos tóxicos, siendo el país que más energía consume y más desperdicios produce.

\* producida por el hombre

Cambiar el estilo de vida de millones de personas es tan difícil como tratar de evitar todas las emisiones de contaminantes a la atmósfera; lo factible es entonces *controlar* las descargas para reducir las emisiones de sustancias nocivas al máximo.

Lo anterior se conseguirá cuando se cuente con la información adecuada y se elabore un planteamiento óptimo del problema que se trate, en el que se identifiquen las partes contaminantes de la actividad humana -industrial en este estudio- y se conozcan las alternativas viables para su solución. Este es el objetivo fundamental del presente trabajo sobre la contaminación industrial del aire.

Actualmente, debido a que el problema de la contaminación del aire tiene repercusiones a nivel mundial, se hacen cada vez mayores esfuerzos para crear conciencia y hacer más responsable a la población y de esta manera fomentar una *cultura ecológica* tendiente a proteger y restaurar el medio ambiente. La figura 1.1 (Horiba, 1990) nos da una concepción artística de la contaminación global, incluyendo la parte de contaminación de agua y suelo.

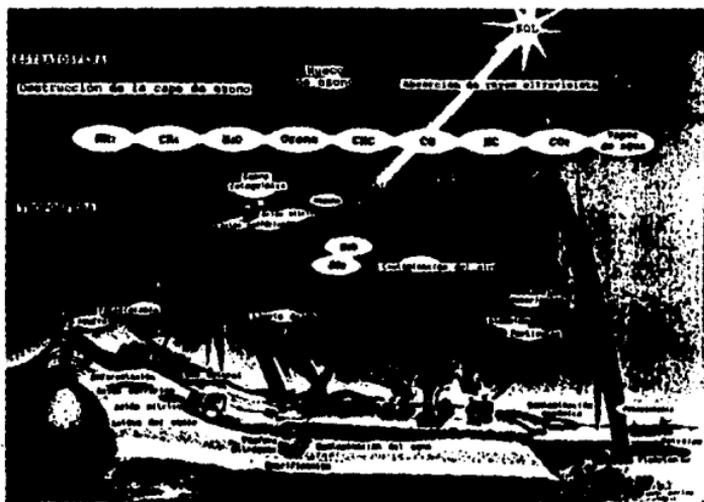


Figura 1.1 Contaminación a nivel global

## 1.1 La contaminación industrial

En función de los adelantos técnicos a los que han llegado los diferentes países es como son clasificados en desarrollados o en vías de desarrollo; de manera similar a estos avances tecnológicos corresponden los tipos de contaminantes que producen y la forma en que se deben prevenir y controlar.

### 1.1.1 Países desarrollados

En los países del primer mundo, fue hasta se estudiaron los históricos episodios de contaminación del aire de Donora y Nueva York en EUA, Valle de Mosa en Bélgica, Londres en Inglaterra y Poza Rica en México, cuando se tomó conciencia de la magnitud de este problema y de las repercusiones que esto puede llegar a tener (Lippmann, 1979). Cabe resaltar este último caso, que se presentó en nuestro país el 24 de noviembre de 1950 al combinarse dos situaciones desfavorables: el escape accidental de ácido sulfhídrico de una planta refinadora y una condición de calma en el viento.

Comparando la contaminación del aire a nivel mundial, en la tabla 1.1 se puede observar la forma en que se incrementó la emisión de compuestos de carbono a la atmósfera de 1960 a 1980 por combustión de carburantes fósiles, notándose la marcada diferencia entre lo que se emite en los países desarrollados en comparación con los demás. Esta producción de contaminantes es un indicador de la actividad industrial y urbana en los lugares a los que se hace referencia.

Tabla 1.1 EMISIÓN DE CARBONO POR LA COMBUSTIÓN (ton. métricas)

Lugar	1960	1980
EUA	783.7	1124.0
URSS	389.9	1013.6
Europa del Oeste	523.3	791.6
China	213.5	555.2
Europa del Este	191.8	365.7
Oceania	88.1	314.7
Japón	60.8	247.5
Hispanoamérica	69.7	229.7
África	41.8	152.6
India	32.1	150.4
Canadá	51.1	105.6
Medio Oriente	20.6	146.0
Brasil	12.0	50.2
Taiwán	3.1	23.6

Tomado de: Sancton, 1989

### 1.1.2 Países en vías de desarrollo

Con relación a lo antes mencionado, es en los países que reciben gran parte de las tecnologías obsoletas donde el problema de la contaminación es mayor y se agudiza por la falta de medidas de control adecuadas. Es bien sabido que una gran parte del trabajo industrial contaminante ("sucio") se realiza fuera de las naciones más avanzadas, dejando así una marcada diferencia entre la forma de contaminación en los países de primer orden y los que se encuentran en desarrollo, debido a que estos últimos no cuentan con una legislación suficientemente restrictiva en materia ambiental. Es importante notar que, paradójicamente, los países en vías de desarrollo, teniendo una planta industrial menor, presentan proporcionalmente mayor contaminación del aire que otras naciones más desarrolladas, con una actividad fabril considerable. La diferencia estriba en que estos últimos mantienen un control continuo de sus descargas.

## 1.2 El caso particular de México

En México, y como una característica común a cualquier nación, los problemas de contaminación del aire se presentan en las zonas conurbadas de las principales ciudades del país, debido al crecimiento de su actividad fabril y urbana. Dentro de esta última, es significativo el incremento del parque vehicular, principalmente en la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y Veracruz, ya que los transportes automotores representan una considerable aportación de contaminantes del aire.

### 1.2.1 Contaminación del aire a nivel nacional

Agrupando por regiones el territorio nacional, se obtienen las zonas de contaminación atmosférica que se muestran en la figura 1.2 (Bravo, 1987).



Figura 1.2 Regionalización de la contaminación atmosférica

Con base en datos de emisiones recopilados para las diversas regiones del país (Bravo, 1987), resulta que la zona costera del Golfo de México-Istmo de Tehuantepec, la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y la de Monterrey, poseen los niveles más importantes de contaminación del aire, destacando en segundo lugar la zona metropolitana de Guadalajara. La tabla 1.2 señala las cifras correspondientes, en toneladas por año.

Tabla 1.2 EMISIONES A LA ATMÓSFERA EN MÉXICO POR REGIONES

Área de Dependencia	PM10	SO <sub>2</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>	Otros	Total (Miles de toneladas)
Zona costera del Istmo de Tehuantepec	106448	152677	801411	413859	32666	512632	2018883
Zona Fronteriza de Baja California, Sonora y Chihuahua	93308	106620	743789	58842	72307	6267	1138863
Zona conurbada de la desembocadura del Río Panuco y Huasteca Potosina	365127	242191	462374	62841	32230	2540	1187203
Zona costera del Sur de Sonora y Norte de Sinaloa	527553	140563	267353	34240	39081	2745	608715
Zona conurbada de la Desembocadura del Río Balsas y Costa de Guerrero	48477	127264	14079	5153	25384	736	251122
Zona conurbada de la Laguna	72486	81839	108240	8268	2322	2415	256706
Zona de Bayo	105372	356670	538001	52398	65763	4057	1125361
Zona conurbada de Manzanillo	14173	6890	88354	16442	4846	312	130819
Bahía de Navidad	781	35142	52816	8141	5874	461	110095
Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco	132788	187856	937812	58548	78886	8052	1402032
Zona Metropolitana de Monterrey	407672	283738	618740	44130	74516	15423	1443869
Zona conurbada del centro del país	489486	798857	1802243	150630	233847	17689	3572892
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	338721	306408	3054081	488056	74504	...	4267500

Tomada de: Bravo, 1987

El desarrollo industrial moderno en México se inició a partir de 1876. En el periodo de 1876 a 1910, se establecieron los factores definitivos que favorecieron la actual concentración industrial en la Ciudad de México (Garza, 1987).

El primer indicador de este crecimiento fue, en 1879, el sector textil, ocupando en ese entonces el sitio principal Puebla, luego Jalisco y en tercer lugar el Distrito Federal. Es importante señalar que en esta época se inició una dispersión territorial de la industria hacia el norte del país, en los Estados de Coahuila, Nuevo León, Sonora y Chihuahua, registrándose los mayores crecimientos urbanos en Monterrey y San Luis Potosí. Esto se explica históricamente por la necesidad de las empresas de contar con energía hidráulica y materias primas cerca del lugar de

producción, así como por la inexistencia de un sistema de transporte eficiente y el debilitamiento del control político y económico de la capital en esas fechas.

El ferrocarril estableció una condición fundamental para el desarrollo de la industria. Cuando en 1850 un viaje por carretera a Veracruz demoraba varios días, con el tren se redujo el tiempo a 12 horas en promedio. El costo del transporte se redujo diez veces y la cantidad de mercancías transportadas se incrementó 500%. En 1880 se inició una etapa de rápido crecimiento ferroviario. De 1,073 km existentes en esa fecha se llegó hasta 19,280 km en 1910.

Según se mencionó, la ubicación de las fábricas se regulaba principalmente por la disponibilidad de energía hidráulica, hasta alrededor de 1880 cuando las máquinas de vapor comenzaron a desplazar a las corrientes de agua como fuerza motriz.

Por esa fecha, se introdujo en México la energía eléctrica. En 1878 se estableció una de las primeras plantas que produjo electricidad para una fábrica de hilados en León, Guanajuato.

Nueve años después, sobre el río Atoyac y a 12 km de la Ciudad de Puebla, se construyó la primera planta hidroeléctrica, con capacidad de 1.8 MW (ó 2400 HP) para proporcionar energía a las fábricas textiles.

En 1881 la electricidad se utilizó como servicio público de alumbrado en la Ciudad de México.

El uso de la energía eléctrica se desarrolló considerablemente: de una planta que existía en 1870 se llegó a 235 en 1899 y después a partir de 1905 se iniciaron los grandes proyectos hidroeléctricos que permitieron disponer a la Ciudad de México de mayores cantidades de energía a un menor costo.

\* MW = mega watt; HP = caballo de potencia

Fue en esta época cuando se decidió históricamente cuál sería la ciudad que constituiría el principal centro de desarrollo del país.

Al fijar la atención en las zonas de mayor movimiento fabril, por ser potencialmente emisoras de contaminantes, se encuentra una localización en el territorio nacional de la forma que se muestra en la figura 1.3 (Bravo, 1987), donde se observa que la región de principal actividad industrial es la Región Centro que incluye al Distrito Federal (D.F.) y su zona metropolitana.



Figura 1.3 Localización de las actividades industriales en México

### 1.2.2 Contaminación del aire en el D.F.

La contaminación del aire en México tiene muchas facetas y el lugar donde se presenta la mayoría de estas y en forma pronunciada es en la Ciudad de México. Estudios realizados por la Comisión Nacional de Ecología (CONADE, 1988) indican que la producción importante de contaminantes se divide entre lo que emiten los vehículos y la industria, en la proporción indicada en la figura 1.4 (CONADE, 1988), sumandose un pequeño porcentaje atribuido a causas naturales, sobre todo tolveneras.



Categoría	Fuentes Fijas		Fuentes Móviles		Fuentes Naturales		Emisión Total (Ton)
	Emisiones (Ton)	%	Emisiones (Ton)	%	Emisiones (Ton)	%	
Industria	126,000	20.4	41,241	6.8	251,000	100.0	419,241
OC	226,000	37.4	7,291	1.2			243,291
AC	117,500	19.1	369,840	61.7			487,340
CA	52,000	8.5	1'973,427	32.4			2'025,427
OC	64,000	10.5	111,324	1.8			175,324
<b>T O T A L E S</b>	<b>625,500</b>	<b>100.0</b>	<b>4'043,173</b>	<b>100.0</b>	<b>251,000</b>	<b>100.0</b>	<b>4'916,673</b>

Figura 1.4 Producción de contaminantes atmosféricos

Aquí debe señalarse que los transportes producen fundamentalmente monóxido de carbono, mientras que la industria aporta principalmente dióxido de azufre. No se debe olvidar la existencia de otras muchas sustancias que aún cuando se emiten en pequeñas cantidades, resultan tener efectos muy perjudiciales. El presente trabajo se centrará en lo referente a la contaminación del aire debida a la industria, o sea, las fuentes fijas de emisión.

La producción de contaminantes atmosféricos proveniente de las diversas fuentes, sumada a la situación geográfica de las industrias en la mancha urbana, más las condiciones meteorológicas locales constituyen el complejo problema de la contaminación del aire por la industria en el Valle de México.

Para explicar lo anterior, hay que recordar la localización de la cuenca del Valle de México. Dicha cuenca abarca parte de los Estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla; contiene totalmente al Distrito Federal y ocupa una extensión de 9,520 km<sup>2</sup>. Se ubica en la parte sur del centro de la República y está limitada por cadenas montañosas de origen volcánico: al oriente, la Sierra Nevada, donde sobresalen los picos nevados del





aumenta con la actividad urbana. En la figura 1.6 (Bravo, 1987; SEDUE, 1987) se muestra la distribución de la cuenca y la parte correspondiente a la ZMCM.

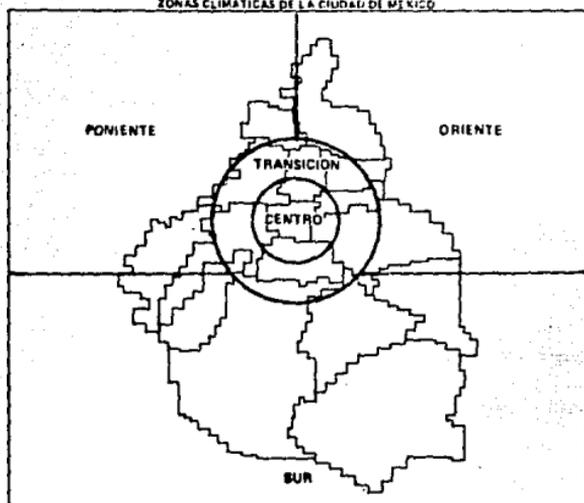


Figura 1.6 Cuenca del Valle de México y ZMCM

El clima en la cuenca es tropical de montaña, debido a la latitud en que se localiza el valle y a su altitud de 2240 msnm. Se distinguen en esta dos estaciones climáticas bien definidas: una estación de estiaje, de noviembre a abril y otra de lluvias, de mayo a octubre. Los vientos predominantes anuales son de noreste a suroeste, que como se verá adelante, producen un arrastre de los contaminantes encima de toda la ciudad.

Debido a la extensión que ocupa el valle, se presentan pequeñas zonas con características climáticas distintas, pudiéndose distinguir variaciones aún entre un punto de la ciudad y otro. Por esta razón, es posible plantear una división en cinco zonas microclimáticas, según se indica en la figura 1.7 (SEDUE, 1987), en donde se exponen los principales datos climatológicos correspondientes al caso particular del D.F.

ZONAS CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO



	SIERVO	TRANSICION	ORIENTE	SUR	PONIENTE
Grado de humedad	Baja	Modorada	Baja	Alta	Baja
Temperatura máxima diaria	Baja	Alta	Alta	Modorada	Modorada
Temperatura mínima	Baja	Modorada	Baja	Alta	Modorada
Presencia de heladas	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta
Presencia de heladas nocturnas	Modorada	Modorada	Alta	Baja	Baja
Presencia de heladas diurnas	Baja	Baja	Alta	Modorada	Modorada
Presencia de neblinas	Modorada	Modorada	Baja	Alta	Alta
Presencia de tormentas eléctricas	Modorada	Modorada	Alta	Alta	Alta

Figura 1.7 Zonas climáticas de la Ciudad de México

El Valle de México presenta actualmente severas alteraciones hidrológicas y ecológicas: casi tres cuartas partes de sus bosques de coníferas y encinos han desaparecido; se han desecado el 99% de los lagos que antiguamente existían y el 70% de las tierras no urbanizadas presentan un avanzado proceso de erosión (Osorio, 1990). Las principales consecuencias de estas perturbaciones son los cambios en el clima a nivel regional, tales como menor humedad y marcadas variaciones de temperatura en las diferentes zonas a lo largo del día y de la noche, así como tolvaneras con grandes cantidades de microorganismos dañinos en suspensión.

### 1.2.2.1 Inversión térmica

Un efecto importante que surge de las características meteorológicas y climáticas de esta región es la existencia de inversiones del gradiente térmico adiabático en la atmósfera. Aunque parecería que este fenómeno surgió a partir de la contaminación del aire en el valle, es pertinente señalar que se ha manifestado desde tiempo inmemorial, sólomente que en la actualidad ha cobrado relevancia por la consecuencia desfavorable de no permitir la circulación del aire y con esto la dilución de los contaminantes. El fenómeno ocurre de la siguiente forma: el enfriamiento desigual entre la tierra y el aire propicia que en las noches se deslice aire frío por las montañas que rodean a la cuenca formandose dos niveles estáticos; uno de aire frío debajo de otro caliente. Esta condición atmosférica dificulta el movimiento de las masas de aire sobre la ciudad, aunado a que las montañas aledañas contribuyen a encerrarlo. Por lo tanto, cuando comienza la actividad urbana, los gases contaminantes no tienen posibilidad de dispersarse y sus efectos peligrosos se incrementan. Este fenómeno se esquematiza en la figura 1.8 (SEDUE, 1987). Existen otras formas de inversión que contribuyen a agravar la situación, como son, los frentes polares que se presentan en época invernal y el fenómeno de irradiación nocturna (isla de calor) en noches despejadas (Williamson, 1973).

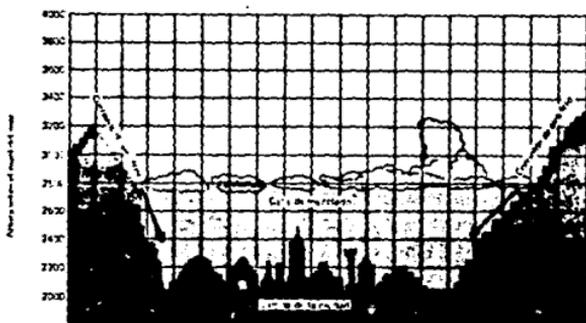


Figura 1.8 Inversión térmica en la en la Ciudad de México

Como una medida de prevención en la Ciudad de México, al igual que en otros países, se examinan en forma continua las condiciones del aire en lo que a contaminantes se refiere, y se cuenta con un *Plan de Contingencias Ambientales* (SEDUE, 1988). Este consiste en una serie de medidas que entrarían en acción según el nivel de riesgo, a partir de que se da la voz de alarma cuando la concentración de contaminantes rebasa los límites permisibles. Esto se toca brevemente en el capítulo tres de este trabajo.

#### *1.2.2.2 Localización Industrial*

Un aspecto importante dentro de la contaminación del aire en la Ciudad de México es la ubicación histórica de la planta industrial. Como se mencionó anteriormente, la concentración territorial de la energía en la capital del país sentó las bases para la centralización de la actividad económica y de población, sin precedentes en otro país.

En 1930 la República Mexicana tenía 46,830 establecimientos industriales, de los cuales únicamente 3,180 se localizaban en el D.F. Esta última cifra aumentó constantemente a medida que avanzaba el proceso de industrialización.

La producción alcanzada en la Ciudad de México desde 1960 hasta 1970 equivale a la que han logrado durante su desarrollo histórico las diez ciudades que le siguen en importancia: Monterrey, Guadalajara, Toluca, Puebla, Monclova, Torreón, Veracruz, Chihuahua, Querétaro y Ciudad Sahagún. En 1960 había en la zona metropolitana 26,624 establecimientos; el 96% estaba situado en el D.F. y el porcentaje restante en el Estado de México, con una producción bruta total de 25,537 millones de pesos, con 407,005 personas empleadas.

En 1970 la ZMCM tenía una producción bruta total de 98,380 millones de pesos y contaba con 33,168 establecimientos que daban empleo a 672,446 personas; el 88% se ubicaba en el D.F. y el

resto en el Estado de México.

En 1980, dentro de la República Mexicana existían 130,494 establecimientos fabriles, de los cuales 38,492 estaban situados en la capital (0.1% del territorio nacional). El 61% de estas empresas estaban albergadas en el D.F. y el 39% restante en el Estado de México. Sin embargo, en ese año en la Ciudad de México se produjo casi la mitad de los productos industriales de todo el país, con un valor de 800,623 millones de pesos (48% del PBI).

En la figura 1.9 (Garza, 1987) se muestra la distribución industrial en la Ciudad de México en el periodo de 1960 a 1980.

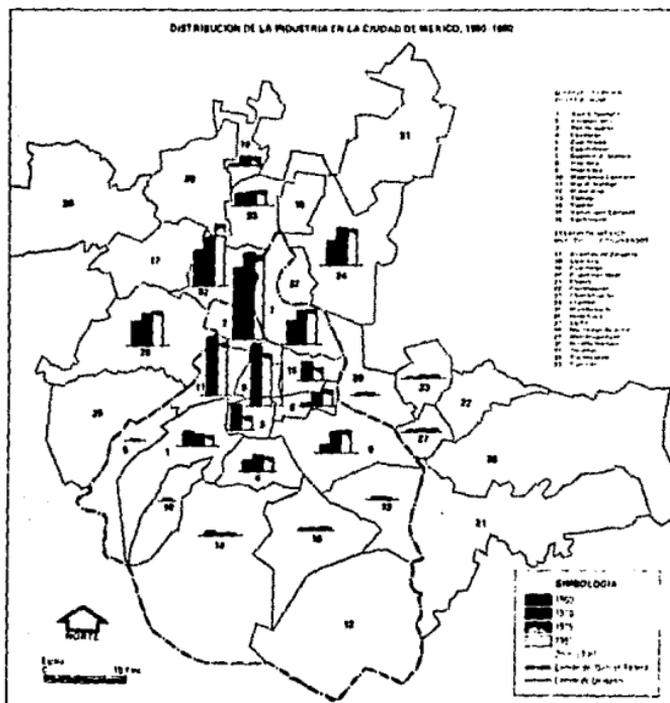


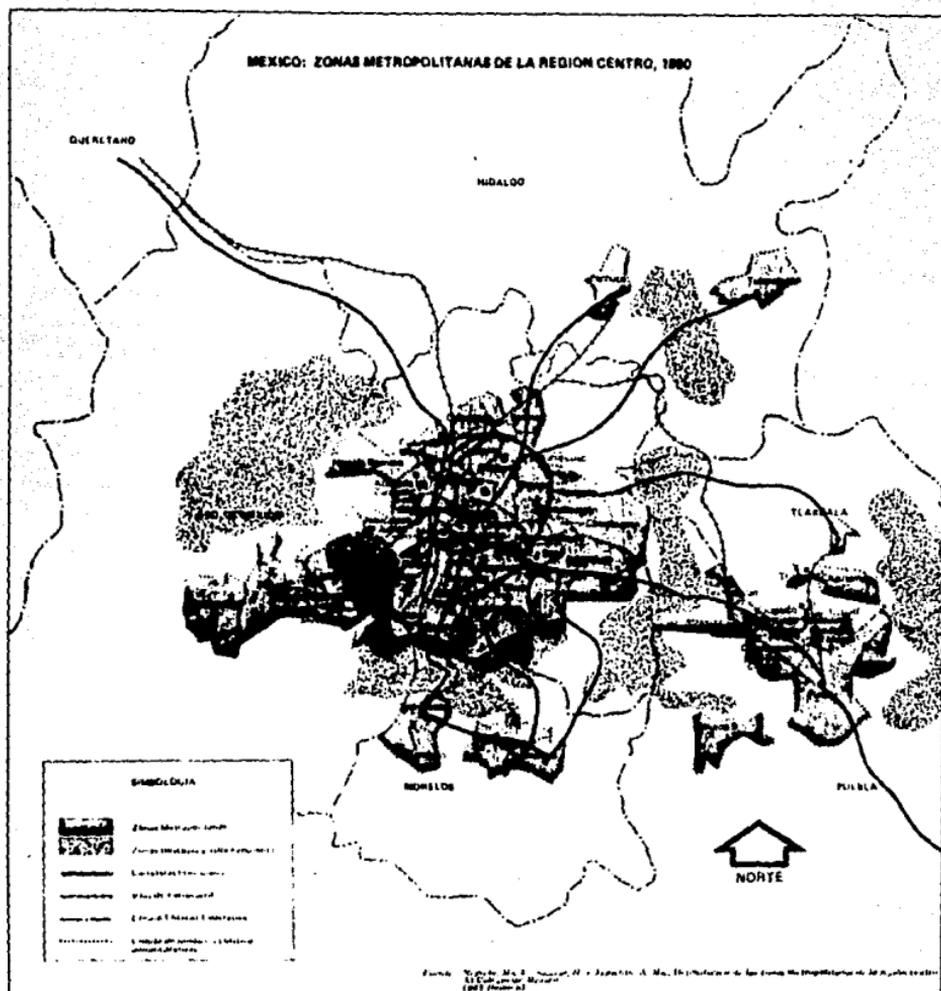
Figura 1.9 Distribución industrial 1960-1980



En la región centro-oeste del país, se tiende a conformar un nuevo género de concentración urbana. Los estados de Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Morelos y Puebla, influenciados por su cercanía con-Ciudad de México, tienden a formar una megalópolis\*, tal como los casos de *Tokaido* (Japón), *Boston - Nueva York - Filadelfia - Baltimore - Washington* (EUA), *región del Gran París* (Francia) y *centro de Gran Bretaña* (Inglaterra).

Actualmente, dentro de la mencionada región de nuestro país, ya se distingue un subsistema articulado entre las ciudades de Puebla, Querétaro, Toluca, Cuernavaca, Pachuca y de manera sobresaliente, las áreas metropolitanas de la Ciudad de México y Toluca. Estas dos últimas, por encontrarse técnicamente unidas pueden considerarse como la primera megalópolis latinoamericana. Se prevee que entre 1990 y 2000 se agregarán las zonas metropolitanas de Cuernavaca y Puebla, y hacia el año 2010, la de Querétaro. La figura 1.11 (Garza, 1987) presenta la distribución actual de la ZMCM y la figura 1.12 (Garza, 1987) representa la tendencia de crecimiento.

\* Unión o agrupación de dos o más zonas metropolitanas



**Figura 1.11 Zonas metropolitanas en 1980**

MEXICO ZONAS METROPOLITANAS DE LA REGION CENTRO, 2010

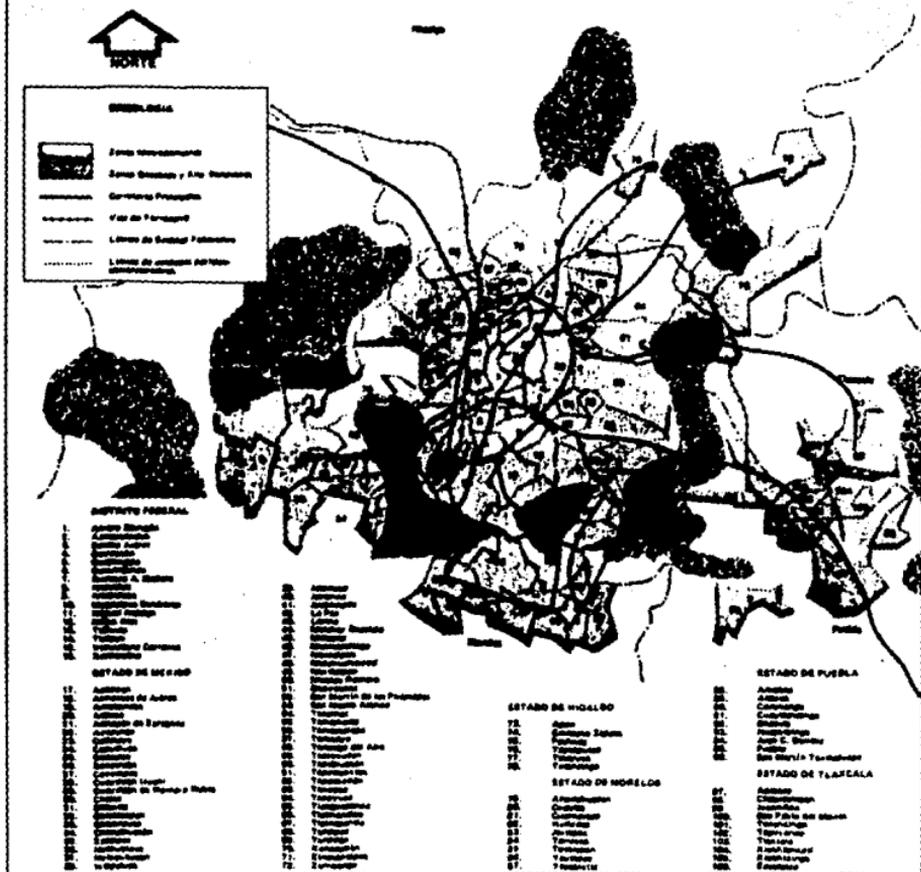


Figura 1.12 Zonas metropolitanas en 2010

Y

Como complemento del capítulo, en la tabla 1.4 se presenta una cronología de los hechos más sobresalientes de la industria y los energéticos en México.

**Tabla 1.4 CROMOLOGÍA TECNOLÓGICA DE MÉXICO**

Prehispánico (15000 aC - 1521 DC)	
Innovaciones	Industria
Brea	Primeros instrumentos en México (800 aC). Horno de Tepoztlán
Combustibles vegetales	Mulo = mull
Procesamiento químico de aceites	Honeycán = puli
Petróleo = ohamopatlil	Vasijas y cerámica
Leta para cocinar	Colorantes y detergentes
Carbón para hornos	Pegamentos
Soledad solar	Cerdeles y costuría
	Metalurgia (800 DC). Aleación de metales
	Salinas
	Caloras
	Telares de cintura
	Alquimia
	Hierro superficial: oro, plata, cobre, estaño, zinc y plomo.
Colonial (1521-1810)	
Innovaciones	Industria
Fuerza de tracción animal	Importación de herramientas (1602)
Fuerza de trabajo humana	Primera mina (1522), Compostela
Primeras velas de cera para iluminar	Primer taller tipográfico (1539)
	Factorías de seda (1548), Puebla, Pue.
Primeros rueda hidráulica para fuerza motriz (1590)	Manufacturas de colorantes
Reales Ordenanzas para la Minería (1763) Se mencionan las acélfileras	Gran innovación metalúrgica: Método de Patio, Bartolomé de Medina
	Primera bomba de agua para minas (1575)
	Primer molino de grano impulsado por agua (1580)
	Exportación de cueros
	Incipientes telares textiles
	Importación de ruedas de hilar
	Uso de la pólvora en minería (1703)
	Condensación de vapores mercuriales (1766)
	Tribunal de Minería (1777)
	Fábrica de explosivos de Santa Fe (1790)
	Primera versión en español del tratado de Lavoisier (1797)
	México produce el 66% de la plata del mundo (1800)

(Continúa)

**Independencia (1810 - 1910)**

Energéticos	Industria
Primer uso del quince	Primera fundición siderúrgica (1805)
Hijo de petróleo en San Fernando (1861)	Calcoman, Michoacan
Primera refinería de petróleo en Aguila (1866)	Lucas Alamán (1792-1853), promotor de la industrialización en México
Primer pozo Papantla de 20m (1869)	Dirección General de Industrias (1842)
Instituto Geológico (1891)	Sociedad Química (1849)
Concesiones de petróleo a extranjeros (1901)	Escuela de Artes y Oficios (1856)
Sociedad Geológica Mexicana (1904)	Primera huelga obrera (1865)
Primer pozo comercial de petróleo (1904)	Estímulos a la inversión extranjera (1898)
Pozo El Pozo # 1, 1500 barriles al día	Máquina de escribir Merton (1893)
	Prueba de cianuración en la producción metalúrgica (1895)
	Cía. Fundidora de Hierro y Acero Monterrey (1908)
	Privilegios a compañías extranjeras (1901)

**Revolución (1910-1940)**

Energéticos	Industria
Aerobombas rurales	Escuela Química Industrial (1916)
Pozo Cerro Gordo # 4 (1916) 250 000 barriles al día	Escuela de Ciencias e Industrias Químicas UNAM (1917)
México segundo productor mundial de petróleo (1921)	Producción de ácido sulfúrico (1924)
Calentadores solares de agua (1928) Guadalajara, Jalisco	Ensamble del primer automóvil (1925)
Nacionalización del Petróleo (1938)	Cía. Industrial Azucarera San Pedro (1930)
Comisión Federal de Electricidad (1937)	Chapas y Triplay, S.A. (1936)
Explotación petrolífera en Amuloy, Michoacán	Posquera del Pacífico (1937)
	Carbonifera Unida de Palau (1938)

(Continúa)

**Industrialización (1900-1900)**

<b>Eventos</b>	<b>Industria</b>
Estudio vulcanográfico del Parícutín (1943)	Guanos y Fertilizantes (1943)
Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales (1945)	Producción de Progesterona (1944)
Generación solar de electricidad (1950) [Orvogaray, UMAN Inv. Nucleo]	Departamento de Industria Militar (1947)
Nacionalización total de la generación eléctrica (1960)	Diesel Nacional S.A. (1951)
Última recepción de contratos para explotación de industrias extranjeras (1963-1970)	Planta de Lubricantes. PENEK (1955)
Reservas probadas de 11000 millones de barriles (1976)	Planta de Hierro esponja (1957)
Casa de Cactus-Reynosa para exportar gas (1975)	Primera computadora IBM 450 UMAN (1958)
Perrazo del Intec I (1975) La mayor contaminación de la época	Planta de dodecibenceno. PENEK (1959)
Proyecto Chicomtopon (1979) 16000 pozos en 13 años	Establecimiento de CONASUPO (1961)
Reservas probadas 50 022 millones de barriles (1980)	Instituto Mexicano del Petróleo (1963)
Asociación Nacional de Energía solar ANES (1980)	Siderúrgica Los Tumbes. (1970)
	Puerto para mineral de hierro (1974) 40 km de largo, Colima
	Nueva ley de invenciones y marcas (1976)
	Proceso Dornix (1977)
	Producción de 54 700 Hústi-hera (1978)
	Política de apogones CFE (1980)
	VolksWagen num. 1 millón, Puebla (1980)

Adaptado del Ortiz, 1987

### *1.3 Objetivo, alcance y limitaciones de este trabajo*

#### *1.3.1 Contexto y objetivo*

Mucho se habla actualmente en México del problema de la contaminación del aire. A este respecto, se han realizado múltiples investigaciones, estudios y publicaciones que explican lo que es la contaminación del aire (Seinfeld, 1978; Lippmann, 1979; Perkins, 1974; Stern, 1984), sus causas industriales (Lund, 1971; Sax, 1974; Parker, 1983), los efectos que produce clínicamente (Lippmann, 1979; Stern, 1984), los dispositivos de control que se emplean (Lund, 1971; Ross, 1974; Sax, 1974; Cavaseno 1980) y el diseño de estos equipos (Strauss, 1971; Marchello, 1976; Cavaseno, 1980; Crawford, 1976). Un número muy limitado ha tratado el problema en México (Bravo, 1987; CONADE, 1988; SEDUE, 1987; SEDUE, 1988; Fuentes G. y García G, 1989), destacando los estudios sobre la Ciudad de México, mientras en provincia son casi nulos.

Con el presente trabajo se pretende organizar lo más destacado de la información disponible, para así tener una guía sistematizada de fácil acceso para abordar un problema de contaminación del aire debido a una fuente industrial. Se recomienda al lector consultar el programa de computadora desarrollado como complemento para el capítulo seis y siete de esta tesis.

#### *1.3.2 Alcance*

El alcance de este trabajo representa la proposición de un ordenamiento lógico que describe una ruta a seguir para interrelacionar los diversos procesos industriales de fabricación con los posibles contaminantes producidos en cada uno de ellos, la identificación de fuentes potenciales dentro de cada proceso, la normatividad correspondiente y una recomendación preliminar sobre los equipos comerciales de control apropiados, además de proporcionar información adicional sobre los rubros anteriores.

Toda esta secuencia de información se ha estructurado en forma de bases de datos a través de un programa de computadora accesible a un usuario común, obteniendo un análisis cualitativo del proceso con sus operaciones básicas, posibles contaminantes y el control recomendado.

### *1.3.3 Limitaciones*

El control de emisiones efectivo para cada proceso requiere de un conocimiento exacto de sus propios parámetros de funcionamiento y operación, por lo que el presente trabajo es solamente una primera aproximación para emprender el estudio del problema de contaminación industrial del aire.

De la información de emisiones industriales existente, se tuvo que recurrir a la bibliografía extranjera (EPA\*) porque en el caso de nuestro país es escasa todavía, ya que no se cuenta con un inventario de fuentes con fiable. Sin embargo, se incluye la información disponible más reciente de la SEDUE.

\* Environmental Protection Agency, EUA.

## 2. FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

Una de las definiciones más completas que podemos encontrar de *contaminación* es seguramente la que se adoptó en la legislación ambiental mexicana de 1977, la cual nos dice que:

"*Contaminación* es la presencia de aquella sustancia, sustancias o combinaciones de ellas que por ser ajena al medio o encontrarse en cantidades excesivas, dañan a éste, perjudicando o molestando la vida, la salud y el bienestar humano, la flora, la fauna, o degrada la calidad del aire, del agua, del suelo, de los bienes, de los recursos de la Nación en general o de los particulares" (SMA, 1977).

A su vez, se define como *contaminante* "toda materia o sustancia o sus combinaciones o compuestos derivados, químicos y biológicos tales como humo, polvos, gases, cenizas, bacterias, residuos y desperdicios y cualesquiera otro que al incorporarse o adicionarse al aire, agua o suelo puedan modificar sus características naturales o las del ambiente; así como toda forma de energía como calor, reactividad o ruido, que al operar sobre o en el aire, agua o suelo altere su estado normal" (SMA, 1977).

*Mecanismo de la contaminación del aire.* Los elementos que intervienen en este fenómeno son la *fuentes de emisión*, la *atmósfera* y los *receptores*, que se relacionan como se indica a continuación en la figura 2.1 (Stern, 1984):

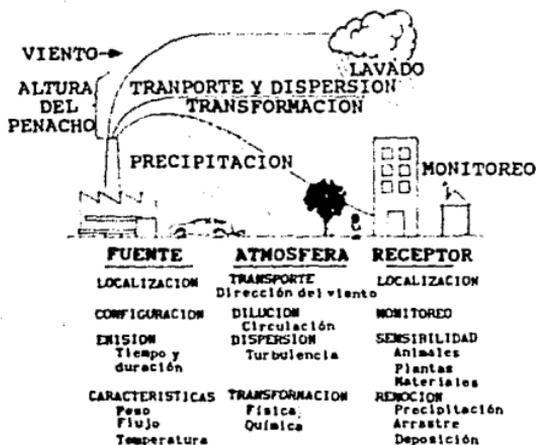


Figura 2.1 Elementos de contaminación atmosférica

### 2.1 Fuentes de emisión

La fuente es el lugar o acción de donde provienen los contaminantes, pudiendo tener un origen natural o causado por el hombre. Además, clasificamos a las fuentes de acuerdo a su ubicación en *fixas*, por ejemplo la chimenea de una fábrica, y en *móviles*, por ejemplo, un vehículo automotor. La tabla 2.1 aclara estos conceptos.

Tabla 2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN

Naturales
Actividad volcánica
Incendios forestales por tormentas eléctricas
Actividad biológica
Elementos en suspensión: bacterias, hongos, esporas
Aerosoles, polvo de tolvaneras
Antropogénicas
Fijas: actividad industrial, combustión externa
Móviles: vehículos de combustión interna

Tomado de: Spedding, 1981

Dentro de las fuentes fijas más importantes podemos mencionar la producción de energía eléctrica, el consumo de combustibles industriales (como diesel y combustóleo) y domésticos (como gas, leña y carbón), la incineración de residuos y en forma destacada, los procesos industriales. En este trabajo el foco de atención es la contaminación antropogénica del aire debida a la actividad industrial en el Valle de México.

Atendiendo a este tipo de fuentes de emisión, se clasifican por la actividad industrial en que se presentan, según la tabla 2.2 siguiente.

Tabla 2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES FIJAS POR ACTIVIDAD

Fuentes de combustión externa	
Combustión de carbón	
Combustión de combustóleo	
Combustión de leña	
Combustión de petróleo	
Combustión de gas	
Combustión de diesel	
Disposición de residuos sólidos	
Quema en tiraderos	
Quema de pastizales secos	
Incineradores de basura	
Industria química	
Plásticos	Explosivos
Pinturas	Acido clorhídrico
Jabón y detergentes	Acido fluorhídrico
Carbonato de sodio	Acido nítrico
Carbón negro	Acido fosfórico
Fibras sintéticas	Acido sulfúrico
Hule sintético	Derivados ftálicos
Amoniaco	Cloro-alcalino
Industria metalúrgica	
Preparación del coque	
Industria del hierro y el acero	
Producción primaria de aluminio	
Fundidoras de cobre	
Fundidoras del plomo	
Fundidoras de zinc	
Industria del bronce	

(continúa)

---

### Industria de la agricultura y alimentos

---

Secado de alfalfa  
Tostado de café  
Algodón  
Molinos y almacenamiento de granos  
Fermentación  
Procesamiento industrial de pescado  
Procesamiento industrial de carnes  
Fertilizantes  
Elaboración de almidón  
Procesamiento de caña de azúcar  
Elaboración de alimentos balanceados para animales

---

### Industria de productos minerales

---

Plantas de asfalto y concreto  
Fábricas de tabiques y refractarios  
Fábrica de carburo de calcio  
Fabricación de cemento, cal y yeso  
Fábricas de fibra de vidrio  
Manufactura del vidrio  
Procesamiento de roca fosfórica  
Procesamiento de arena y grava

---

### Industria del petróleo

---

Producción de crudo y gas  
Refinación del petróleo  
Elaboración de productos de petroquímica

---

### Industria de la madera

---

Industria química de pulpa de madera  
Industria del papel  
Operaciones en madererías

---

### Emissiones por evaporación

---

Pintura de autos  
Almacenamiento y distribución de gasolinas  
Almacenamiento de solventes y derivados volátiles del petróleo

---

### Fuentes varias

---

Incendios forestales  
Caminos no pavimentados  
Fumigación con pesticidas  
Plantas geotérmicas

---

Adaptado de: EPA, 1985

### 2.1.1 Contaminantes atmosféricos primarios

Aquí debemos señalar que existen dos tipos de contaminantes atmosféricos: primarios y secundarios. Los *primarios* son aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión, sean naturales o antropogénicas, como por ejemplo el CO, el SO<sub>2</sub> y el NO<sub>2</sub>. Los *secundarios* son los que se forman por la interacción química entre los primarios y los componentes normales de la atmósfera, resultando entre otros, el ozono (O<sub>3</sub>) y el peroxiacetil-nitrato (PAN), producidos por efectos fotoquímicos y reacciones complejas de oxidación, hidrólisis, reducción, etc.

De acuerdo a su estado físico, los contaminantes pueden ser clasificados como *gases* y *partículas suspendidas*. Los gases tienen el mismo comportamiento que el aire atmosférico una vez que se difunden y por tanto no se depositan. Las partículas pueden ser sólidas o líquidas y según su tamaño, se depositarán primero las más grandes en los alrededores de la fuente de emisión, sintiéndose ahí los efectos inmediatos, mientras que las medianas se alejarán más. En cambio, las más pequeñas tendrán un comportamiento parecido al de un gas y se mantendrán suspendidas, pudiendo ser transportadas a mayor distancia por el viento.

Atendiendo a su composición química los contaminantes también se pueden subdividir en *orgánicos* e *inorgánicos*. En la tabla 2.3 se muestra esta clasificación.

Tabla 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Clases mayores	Subclases	Ejemplos de contaminantes
Partículas	Sólidas	Polvo, humo, aerosoles
	Líquidas	Neblina, aerosoles
Gases orgánicos	Hidrocarburos	Hexano-benceno, etileno-metano
	Aldehidos, cetonas	Formaldehidos
	Otros orgánicos	Hidrocarburos clorados, alcoholes

(continúa)

	Oxido de nitrogeno	Bióxido de nitrogeno, oxido nitrico
	Oxido de azufre	Bióxido de azufre, trióxido de azufre
Gases Inorgánicos	Oxido de carbono	Monóxido de carbono, bióxido de carbono
	Otros Inorgánicos	Acido sulfidrico, ácido fluoridrico, amoníaco, cloro

Adaptado de: Straub, 1989

Si se fija la atención en aquellas actividades humanas que se realizan cotidianamente y que traen consigo la emisión a la atmósfera de sustancias nocivas, se encontrará a la combustión de hidrocarburos y a la actividad industrial como las causas más importantes.

La quema de combustibles fósiles involucra una serie de complejas reacciones químicas, de las cuales predominan la formación de dióxido de carbono y vapor de agua. Muchas otras ocurren simultáneamente produciendo una serie de compuestos de los que podemos destacar los siguientes:

monóxido de carbono	(CO)
óxidos de azufre	(SO <sub>x</sub> )
óxidos de nitrógeno	(NO <sub>x</sub> )
hidrocarburos (volátiles) no metano	(HCNM)
partículas suspendidas totales	(PST)

Las sustancias anteriores son características de las zonas urbano-industriales, tal como la Ciudad de México. Tales contaminantes se miden continuamente (monitoreo) para determinar el estado del medio ambiente en una región determinada y durante un tiempo dado. De esto se hablará más en el capítulo tres, en la parte de legislación.

Así como la combustión de hidrocarburos, existen procesos industriales que contribuyen con estas sustancias o con otras más nocivas, como por ejemplo los óxidos metálicos de zinc, níquel, plomo y cadmio. En la tabla 2.4 se enumeran los contaminantes atmosféricos más conocidos.

Tabla 2.4 CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Ordinarios en ambientes urbanos	
Monóxido de carbono	Sulfatos
Bióxido de azufre	Nitratos
Bióxido de nitrógeno	Fluoruros
Hidrocarburos	Ozono
Partículas suspendidas	Olores
Compuestos de plomo	Compuestos orgánicos
Especialmente peligrosos	
Plomo	Mercurio
Asbestos	Cadmio
Específicos en determinadas fuentes	
Arsénico	Zinc
Cloro	Bario
Cobre	Boro
Manganeso	Selenio
Níquel	Cromo
Plaguicidas	Vanadio
Materiales radioactivos	Acido clorhídrico
Otros	
Polen	Etileno
Aerosoles biológicos	Acido sulfúrico
Amoníaco	Berilio
Aldehídos	Fósforo y Hierro

Tomado de: Bravo, 1989

A continuación se agrupan por familias los contaminantes *primarios* de origen antropogénico más importantes y se mencionan sus principales características.

*Compuestos del carbono.* El monóxido de carbono (CO) es el contaminante más abundante en la atmósfera superficial. Este

compuesto aparece por la quema incompleta del combustible, ya que es difícil conseguir una combustión perfecta. También surge de fugas durante el refinamiento del petróleo. Se origina tanto en fuentes fijas como en móviles. El CO es nocivo para el organismo debido a su alta afinidad para fijarse en la hemoglobina, entre 200 y 250 veces más que el O<sub>2</sub> y sustituirlo para formar la carboxihemoglobina (COHb) en los vasos capilares que unen las venas con las arterias (Speeding, 1981). Al bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no se le considera contaminante, salvo cuando su concentración desplaza al oxígeno atmosférico (O<sub>2</sub>).

*Compuestos del azufre.* Los principales compuestos del azufre en la atmósfera son el bióxido y trióxido de azufre (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y sales del ácido sulfúrico (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Se originan por la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, la fabricación de ácido sulfúrico y procesos en los que la materia prima contiene azufre, como es la obtención del cobre a partir de la calcocita (Cu<sub>2</sub>S) o de la calcopirita (CuS<sub>2</sub>). También se produce durante la descomposición de materia orgánica y combustión de la misma.

Los compuestos del azufre se eliminan de la atmósfera mediante los siguientes mecanismos (Seinfeld, 1978):

Retención y arrastre por agua de lluvia  
Difusión hacia el suelo y la vegetación  
Sedimentación de partículas secas de sulfato

En México, desfavorablemente, el contenido de azufre en los combustibles es alto (3.6% de S en peso), por lo que se propicia una gran emisión de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) a la atmósfera.

Las mayores fuentes industriales de SO<sub>2</sub> son los procesos de fundición, el refinado de petróleo y la producción de energía en plantas termoeléctricas.

Otros compuestos también importantes de esta familia son:

ácido sulfuroso	$\text{H}_2\text{SO}_3$
sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4$
sulfato de calcio	$\text{CaSO}_4$
sulfato de magnesio	$\text{MgSO}_4$

Cabe hacer notar que los de sulfatos provienen principalmente de procesos de fundición.

*Compuestos del nitrógeno.* Un componente implícito en un proceso de combustión ordinario, es el nitrógeno atmosférico, que se encuentra en el aire seco en una proporción de 79/21 con el oxígeno. A condiciones normales de temperatura se comporta como un gas inerte, pero durante las elevadas temperaturas de la combustión, reacciona con el oxígeno que lo acompaña para formar una serie de compuestos que comienzan con el óxido nitroso ( $\text{NO}$ ), para después pasar a dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) (contaminantes primarios) e iniciar el ciclo de contaminantes *fotoquímicos* (contaminantes secundarios). Los compuestos más importantes de nitrógeno en la atmósfera son óxido nitroso, dióxido de nitrógeno y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) se eliminan de la atmósfera por los mismos mecanismos de oxidación que el azufre, sólo que en este caso, las partículas que se precipitan son nitratos.

*Hidrocarburos volátiles, no metano (HCNM).* Aparecen en procesos de refinación del petróleo, combustión deficiente de carburantes fósiles, fugas de combustible de sus depósitos de almacenamiento y uso de solventes volátiles. Se les llama así porque agrupa a todos los hidrocarburos (tipo volátil) que pueden contribuir como contaminantes fotoquímicos, excepto al metano ( $\text{CH}_4$ ), ya que este gas es poco reactivo. El metano se produce en los procesos orgánicos en forma natural (biogas).

*Partículas suspendidas.* Sus principales fuentes estacionarias son los procesos de combustión y operaciones unitarias tales como secado, molienda, pulverizado, etc. Los principales productores se resumen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 ORIGEN DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Fuentes naturales	
Emisión directa (Formación primaria)	Tierra y polvo Incendios forestales Sal de mar Ceniza volcánica
Producidas por emisiones de gases (Formación secundaria)	Nitrato proveniente de amoníaco (NH <sub>3</sub> ) Nitrato proveniente de NO + NO <sub>2</sub> Hidrocarburos provenientes de exudación vegetal
Fuentes antropogénicas	
Emisión directa (Formación primaria)	Cenizas del carbón y combustibles oleos Operaciones unitarias
Producidas por emisiones de gases (Formación secundaria)	Sulfato proveniente de SO <sub>2</sub> Nitrato proveniente de NO + NO <sub>2</sub> Hidrocarburos

Tomado de: Lippmann, 1979

### 2.1.2 Contaminantes atmosféricos secundarios

Las transformaciones químicas que ocurren en la atmósfera involucran compuestos de carbono, nitrógeno y azufre fundamentalmente. La oxidación de hidrocarburos, óxido nitroso (NO), y bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) dan lugar a la formación de compuestos como los aldehídos, el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), respectivamente. Estos productos de denominan *contaminantes secundarios* por que se forman en la atmósfera a partir de los contaminantes primarios que se emiten en las diversas fuentes. Entre los contaminantes secundarios, es importante mencionar el esmog fotoquímico, el ozono y la lluvia ácida.

**Esmog fotoquímico.** La radiación solar produce procesos *fotoquímicos* en la atmósfera interactuando con las moléculas que funcionan como fotoaceptores. Como producto de la fotodisociación de moléculas estables resultan radicales libres, que son muy reactivos. Tenemos como ejemplo, el oxígeno atómico (O), el hidrógeno atómico (H), el radical hidróxilo (OH) y el óxido nitroso (NO) En la figura 2.2 (Williamson, 1973) se ilustra el fenómeno.

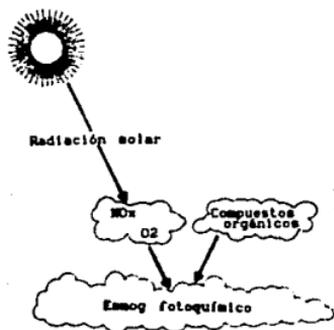


Figura 2.2 Esmog fotoquímico

**Ozono.** El ozono (O<sub>3</sub>) es un contaminante secundario formado en la atmósfera a partir del oxígeno por una compleja serie de reacciones químicas de los contaminantes primarios, llamados *precursores*. De estos últimos los más importantes son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los hidrocarburos no metano (HCNM).

Uno de sus precursores, el NO<sub>2</sub>, es un absorbente muy eficiente de la energía solar ultravioleta que llega a la superficie terrestre. Esta molécula de NO<sub>2</sub> se descompone en NO y O<sup>\*</sup> (estado excitado del oxígeno atómico), con lo cual se inicia el mecanismo de formación de O<sub>3</sub>. Las moléculas de O<sup>\*</sup> y de O<sub>3</sub> tienen una gran capacidad para reaccionar por medio de la oxidación de los hidrocarburos reactivos; la reacción de la molécula de O<sup>\*</sup> es muchas veces más rápida que la de O<sub>3</sub>. Los HCNM se combinan más fácilmente con O<sup>\*</sup> y se forman radicales que oxidan el NO a NO<sub>2</sub>, compuestos que se generan en las zonas urbano-industriales,

reiniciando con ello el ciclo fotoquímico. La ruta que se muestran en la figura 2.3 (Seinfeld, 1978)-conversión de NO a NO<sub>2</sub> sin consumir O<sub>3</sub>- ilustra dicho mecanismo.

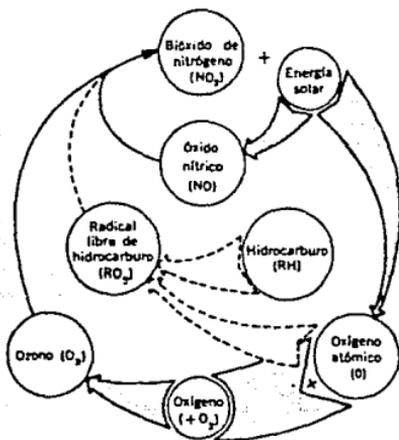


Figura 2.3 Formación del ozono a partir de sus precursores

**Lluvia ácida.** Otro aspecto muy importante en la contaminación atmosférica es el fenómeno de la lluvia ácida. El agua de lluvia normal presenta un valor de pH<sup>\*</sup> de 5.6. Esta acidez natural se debe a la formación de ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) al disolverse el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que se encuentra regularmente en la atmósfera, con el agua de las nubes a una temperatura de unos 20 grados centígrados (Spedding, 1981). Este es un ácido débil que lo que no es tóxico para los seres vivos.

Comparativamente, valores menores de 5.6 indican la presencia de ácidos fuertes como el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) que son producidos a partir de las reacciones de sus precursores: óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) con la humedad de la atmósfera. En la figura 2.4 (Stern, 1984) se

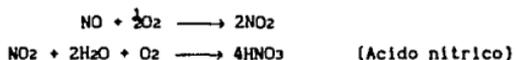
\* Logaritmo negativo de la concentración de iones hidronio (H<sup>+</sup>), es decir, pH = -Log(H<sup>+</sup>). Si pH > 7 es base; pH < 7 es ácido.

representa una escala de valores de pH correspondiente a varias sustancias y su relación con la lluvia ácida.



Figura 2.4 Escala de pH para la lluvia ácida

Las principales reacciones ocurren como se indica a continuación (Stern, 1984):



El efecto más importante que presenta este fenómeno es el daño a las aguas continentales, ya que la disminución del pH causado por las precipitaciones ácidas altera notablemente el ecosistema de los ríos y lagos. Un ejemplo contundente lo tenemos en el caso del lago Adirondack (Stern, 1984), donde las aguas alcanzan una acidéz cercana a la del vinagre. Otro efecto es el causado a la vegetación, como en el caso de la Selva Negra en Alemania en que sus bosques se han visto seriamente deteriorados.

Se tiene además, el daño causado a los bienes inmuebles, donde los más perjudicados son los monumentos históricos (Stern, 1984), en los que los sus materiales de construcción se ven afectados al degradarse el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) por acción de sales del ácido sulfúrico o sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

### 2.1.3 Unidades de medición de los contaminantes del aire

Para medir la concentración en que se encuentran los contaminantes en el aire, se utiliza en el caso de las partículas, las unidades de microgramos por  $m^3$  ( $\mu g/m^3$ ), y en el caso de gases los mililitros por litro (ml/l) o más comunmente, partes por millón de volumen (ppmv). Las técnicas y los instrumentos utilizados para dichas determinaciones son los que indica la EPA dentro de sus *métodos reconocidos*, que se siguen dentro de la legislación ambiental mexicana.

### 2.2 La Atmósfera

La atmósfera es la masa gaseosa que envuelve a la Tierra. Es gracias a su existencia que se realizan las funciones vitales de transporte e intercambio de gases, que sirven de sustento una gran cantidad de especies vegetales y animales, incluyendo al hombre. Es por su función y disposición, que en ella se ubican, depositan, permanecen, agregan e interaccionan los contaminantes. Para comprender el fenómeno de contaminación atmosférica, será fundamental conocer las características básicas de la atmósfera. La tabla 2.6 contiene la composición típica de la atmósfera en las unidades de concentración de gases usuales.

Tabla 2.6 COMPOSICION DEL AIRE LIMPIO (base húmeda)

	ppmv	$\mu g/m^3$
Nitrógeno	756,500.00	$867.00 \times 10^6$
Oxígeno	202,900.00	$265.00 \times 10^6$
Agua	31,200.00	$23.00 \times 10^6$
Argón	9,000.00	$14.70 \times 10^3$
Bóxido de carbono	305.00	$549.00 \times 10^3$
Neón	17.40	$14.40 \times 10^3$
Helio	5.00	825.00
Metano	1.16	763.00
Kriptón	0.97	$3.32 \times 10^3$
Oxido de nitrógeno	0.49	873.00
Hidrógeno	0.49	40.00
Xenón	0.08	417.00
Vapores orgánicos	0.02	-----

(continúa)

---

ppmv: partes de componente por millón de partes de  
aire limpio, en volúmen.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ : microgramos de contaminante que hay en un metro  
cúbico de aire limpio

---

Tomado de: Stern, 1984

### 2.3.1 Estructura atmosférica

**Tropósfera.** Es la región de la atmósfera que está en contacto con la superficie de la tierra. Su espesor oscila entre 15 km sobre el ecuador y 10 km sobre los polos. En esta capa se realizan los procesos vitales y es en ella donde se lleva a cabo el mecanismo de contaminación del aire.

**Estratósfera.** Se extiende desde la tropopausa hasta 50 km de altura. La temperatura es constante en la baja estratósfera, aunque aumenta después con la altura debido a la absorción de radiación de onda corta por el ozono. En esta capa existe poca mezcla vertical de los gases. La parte superior de la estratósfera se llama estratopausa, donde la temperatura baja a 270 K.

**Mesósfera.** Se extiende desde 50 km hasta 85 km, en donde la temperatura disminuye con la altitud hasta alcanzar 175 K, siendo la temperatura más baja de la atmósfera.

**Termósfera.** Es la capa superior de la atmósfera. A esa altitud, la densidad molecular es muy baja (de  $10^{13}$  moléculas/cm<sup>3</sup>, comparada con  $5 \times 10^{19}$  moléculas/cm<sup>3</sup> al nivel del mar). La intensa radiación disocia el nitrógeno y el oxígeno. La temperatura es de 1000 K.

En la figura 2.5 (Seinfeld, 1978) se ilustran las partes citadas de la atmósfera, así como su temperatura, según la altitud.

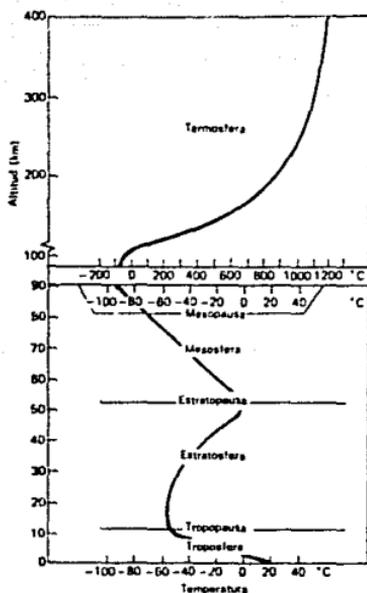


Figura 2.5 La atmósfera y sus partes

### 2.2.2 Meteorología de la contaminación atmosférica

La meteorología estudia la dinámica de la atmósfera calificándola de la siguiente manera (Seinfeld, 1978):

- Macroescala: fenómenos que ocurren a miles de kilómetros del lugar de interés.
- Mesoescala: sucesos a cientos de kilómetros de distancia.
- Microescala: se llevan a cabo distancias menores de 10 km.

Para tener un estudio adecuado del comportamiento de la atmósfera es necesario contar con una cantidad mínima de datos confiables de sus variables físicas. Por tal razón se deben realizar las mediciones que permitan conocer el comportamiento de la atmósfera en diferentes escalas.

Tabla 2.7 VARIABLES METEREOLÓGICAS

Medidas meteorológicas primarias	
Dirección del viento	
Velocidad	
Temperatura	
Medidas meteorológicas secundarias	
Precipitación	
Humedad	
Visibilidad	

Tomado de: Parker, 1983.

### 2.2.2.1 Micrometeorología

Por lo que respecta a la contaminación del aire en zonas urbanas, la parte de la atmósfera que rige el transporte y la dispersión es la llamada *capa límite planetaria* que ocupa los primeros 500 m de altura respecto al piso y representa el límite de la influencia del sistema circulatorio de la tropósfera (10 km) con la superficie terrestre. Para su estudio, esta región de la atmósfera cercana a la tierra puede dividirse en 3 capas: *capa libre* o viento geostrófico, *la capa de Ekman* y *la capa superficial* (Seinfeld, 1978). La capa Ekman y la capa libre constituyen la llamada *capa límite planetaria*. En la figura 2.6 (Seinfeld, 1978) se representa esta capa con sus partes y características.

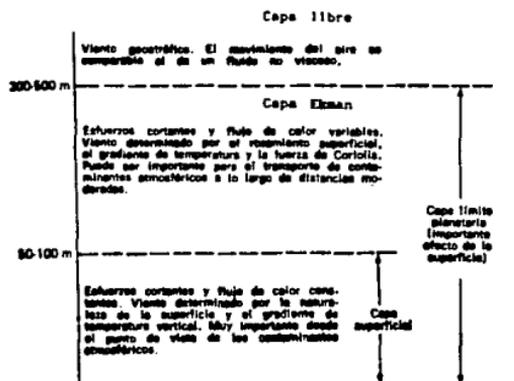


Figura 2.6 Capa límite planetaria

### 2.2.3 Proceso de dispersión

Los fenómenos de mayor interés en la dispersión de los contaminantes son el arrastre y la *difusión turbulenta*. Aunque el término difusión se refiere a escalas moleculares propiamente, nos da una idea aproximada de lo que sucede a escala macroscópica. Sin embargo, en este trabajo se prefiere llamar *mezclado turbulento* al mecanismo en cuestión. El nivel de turbulencia de la capa límite planetaria aumenta con la *velocidad del viento*, con la *rugosidad* de la superficie terrestre, y con la *inestabilidad atmosférica*.

El origen de la turbulencia atmosférica puede ser mecánico o convectivo (Parker, 1983). La turbulencia mecánica se debe al esfuerzo cortante entre las capas de fluido que se mueven y el rozamiento superficial que se presenta con el piso, y aumentará con una mayor rugosidad.

La rugosidad representa una medida de la dificultad que encuentra un fluido para desplazarse sobre una superficie, según las obstáculos y características de esta. En nuestro caso, es una consideración global de las construcciones, montañas y vegetación que se encuentran en una determinada región al nivel del suelo. La figura 2.7 (Seinfeld, 1978) representa el perfil de velocidad del viento sobre diferentes terrenos.

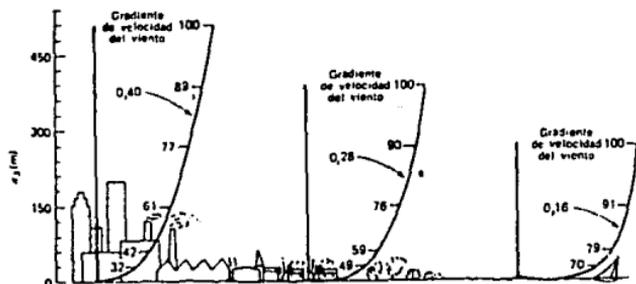
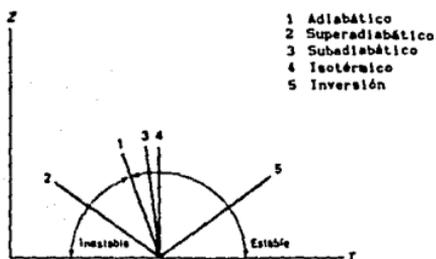


Figura 2.7 Perfil de velocidad en diferentes terrenos .

La turbulencia convectiva (Parker, 1983) se produce por variaciones de la calefacción solar de la superficie terrestre y también depende de la estabilidad atmosférica. Es máxima en un día soleado y claro al mediodía, y mínima por la noche o muy temprano. La diferencia de temperatura entre las capas de aire produce un movimiento convectivo (*fuerzas térmicas*), causado por la fuerza ascensorial que se presenta por las variaciones de densidad del aire entre estratos.

Se conoce como *estabilidad atmosférica* a la condición dada por el nivel de movimiento de las capas de aire, según el gradiente de temperatura en una región considerada, ya que la forma en que se distribuyen las capas de gases en la atmósfera (estratos) dependen de éste. La figura 2.8 (Seinfeld, 1978) ilustra los diferentes gradientes de temperatura con relación a la altitud.



2.8 Diferentes gradientes de temperatura

Si observáramos el comportamiento de los gases que se emiten a la atmósfera producidos por una misma fuente, notaríamos que no siempre salen con la misma forma. A esto se le llama *comportamiento del penacho* y su configuración depende directamente de la estabilidad atmosférica en cada momento, que a su vez depende del gradiente de temperatura y de la velocidad del viento. Por tanto, el penacho toma una línea de la forma en que se dispersan los contaminantes. (Seinfeld, 1978)

Se ilustran las diferentes formas del penacho correspondientes al tipo de estabilidad que se presenta junto con su respectivo gradiente de temperatura.

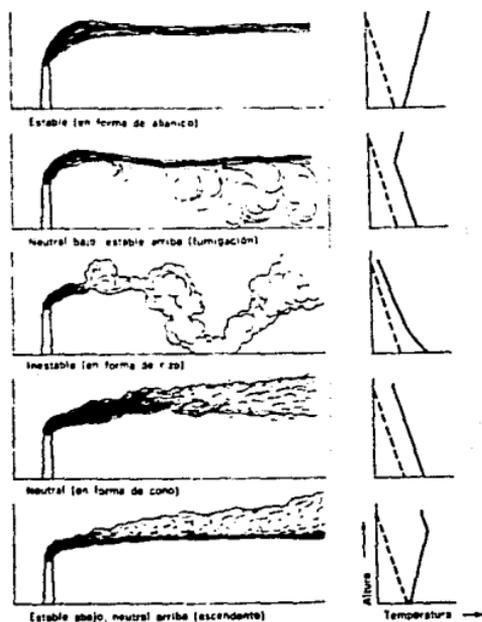


Figura 2.9 Comportamiento del penacho

El comportamiento del penacho y por ende, la concentración de los contaminantes, se ve también afectado de manera importante por las características del terreno. Esto se resume en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 EFECTOS DEL TERRENO SOBRE LA DISPERSIÓN

Característica Topografica	Efectos
1 Regiones elevadas	Velocidad del viento mayor.
2 Valles profundos	Canalización del viento a lo largo del eje del valle resultando altas concentraciones dentro de él.
3 Terrenos ondulados	Incrementa la turbulencia atmosférica resultando concentraciones altas de contaminantes cerca de sus fuentes.
4 Regiones boscosas	Aumento de la turbulencia cerca del piso produciendo baja concentración de contaminantes cerca de sus fuentes.
5 Cuerpos de agua	La humedad de la atmósfera causa fumigación al nivel del suelo durante condiciones de día soleado

Tomado de: Lippman, 1979

Para conocer la forma en que los contaminantes se dispersan y distribuyen a partir de la fuente que los produce, se han ideado varios modelos matemáticos que describen tal comportamiento. Uno de los más aceptados es el propuesto por Pasquill-Gifford en 1966. Se basa en una distribución gaussiana hipotética de los contaminantes en dos direcciones del movimiento. En la figura 2.10 se ilustra la distribución gaussiana en  $y$  y en  $z$  (Sax, 1981).

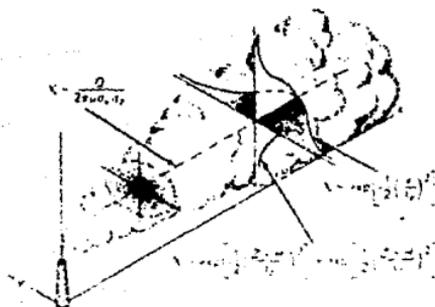


Figura 2.10 Distribución gaussiana de los contaminantes

Es lógico pensar que la concentración de contaminantes dependerá del gasto de la emisión, su velocidad de salida y su temperatura relativa. Sin embargo, esa concentración dependerá también de la velocidad del viento, su dirección dominante, la presión barométrica, la temperatura y la estabilidad atmosférica. Debido a esto Pasquill propuso dentro de su modelo los factores de dispersión  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  que se calcularon experimentalmente considerando una superficie llana a campo abierto. Esos coeficientes aparecen en forma gráfica en las figuras 2.11 y 2.12 (Seinfeld, 1978). Las categorías de estabilidad de Pasquill se encuentran en la tabla 2.9 y el modelo es el siguiente:

La concentración  $C$  de un contaminante gaseoso producido de manera continua por una fuente fija se puede estimar en un punto  $(x, y, z)$  por la siguiente ecuación (Seinfeld, 1978):

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

$C$  = concentración de contaminantes en la atmósfera  
el punto  $(x, y, z)$  en  $(g/m^3)$

$Q$  = gasto o flujo másico de la emisión en  $(g/s)$

$H$  = altura efectiva de emisión en  $(m)$

$u$  = velocidad del viento en  $(m/s)$

$\sigma_y$  = coef. de dispersión horizontal en  $(m)$

$\sigma_z$  = coef. de dispersión vertical en  $(m)$

$x, y, z$  = distancias en el sistema cartesiano en  $(m)$

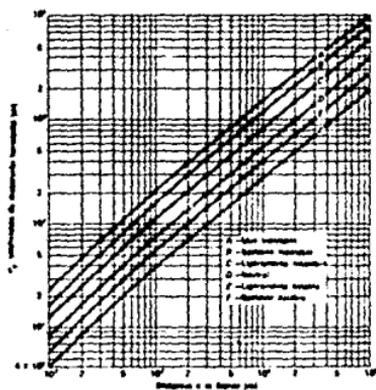


Figura 2.11 Coeficiente de dispersión  $D_y$

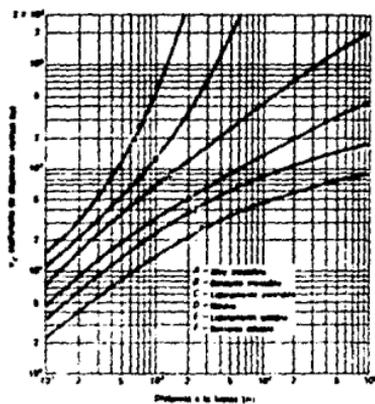


Figura 2.12 Coeficiente de dispersión  $D_z$

Tabla 2.9 CATEGORÍAS DE ESTABILIDAD

Velocidad del viento de superficie m/s	Situaciones fuertes			Condiciones normales	
	Fuertes	Moderas	Ligeras	Cielo cubierto o nubosidad ** D, E, F	Nubosidad G, H
< 2	A	A-B	B		
2	A-B	B	C	I	F
4	B	B-C	C	D	I
6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A: muy estable  
 B: bastante estable  
 C: ligeramente estable  
 D: inestable\*  
 E: ligeramente estable  
 F: bastante estable

\* Aplicable a cielo muy nuboso. Caso de día nublado de noche.  
 \*\* El grado de nubosidad se indica como la porción del cielo cubierto por nubes del horizonte aparente total que está al menos de 500m.

Tomado de: Stenfeldt, 1978

El inconveniente que tiene este modelo es que pierde exactitud cuando se usa en condiciones diferentes de aquellas en que se tabularon los coeficientes de dispersión horizontal y vertical  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , es decir, cuando se usa para un terreno urbano se deben elaborar nuevas gráficas de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  para ajustar el modelo. Sin embargo, se obtiene una aproximación a lo que en realidad está ocurriendo.

### 2.3 Receptores

El tercer elemento del mecanismo de la contaminación del aire son los receptores, o sea, todos aquellos organismos que directa o indirectamente se ven afectados por la presencia de sustancias contaminantes en el aire. Sin embargo, también se consideran como receptores a los bienes muebles o inmuebles.

#### 2.3.1 Efectos de los contaminantes atmosféricos en el medio ambiente

En varios países del mundo se han realizado diversos estudios para conocer las afectaciones de cada contaminante sobre su receptor. Las tablas 2.10, 2.11 y 2.12 muestran en forma resumida tales efectos.

Tabla 2.10 ALGUNOS EFECTOS SOBRE EL HOMBRE

Contaminante	Efecto
CO	Reducción de la capacidad del aparato circulatorio para transportar oxígeno. Agravamiento de los padecimientos cardiovasculares.
NO <sub>2</sub>	Se incrementa la sensibilidad del aparato respiratorio a microorganismos patógenos.
O <sub>3</sub>	Afecta la función pulmonar, causa tós, malestar en el pecho. Incrementa los ataques de asma.
PAN*	Irritación de ojos
PST* y SO <sub>2</sub>	Agravan los padecimientos respiratorios crónicos. Aumentan el riesgo de enfermedades respiratorias agudas.

Adaptado de: Stern, 1984

- \* Peroxiacetil-nitrato
- \*\* Partículas Suspendidas Totales

Tabla 2.11 EFECTOS EN LA FLORA

Sustancia	Efecto	Especie
Cloro	Zonas decoloradas entre las venas y puntas. Necrosis.	Rábano, alfalfa, maíz, trigo, tabaco, encino, pino blanco
Fluor	Quemaduras en los bordes y extremidades de las hojas.	Gladiola, tulipán, maíz, uva, pino blanco
NO <sub>x</sub>	Manchas café en las hojas	Azalea, tabaco girasol, mostaza
SO <sub>x</sub>	Clorosis, reducción del rendimiento.	Cebada, olmo, alfalfa, algodón, manzana abedul
O <sub>3</sub>	Manchas, decoloración, afecta al crecimiento.	Alfalfa, frijol, maíz, tomate, espinaca, cebada
PAN	Superficie interior de las hojas lustrosa, blanca o parda.	Mostaza, petunia, tomate, lechuga,
HC <sub>insat.</sub> *	Hojas marchitas y anormales	Clavel, azalea, tomate, algodón, durazno

Adaptado de: Lippmann, 1979 y Seinfeld, 1978

- \* Hidrocarburos insaturados

Tabla 2.12 EFECTOS EN LOS MATERIALES

Sustancia	Materiales atacados	Daño típico
CO	Materiales de construcción	Deterioro
NO <sub>x</sub>	Metales ferrosos	Corrosión
	Cobre	Corrosión
	Aluminio	Corrosión
	Materiales de construcción caliza, mortero, marmol, hormigón	Lixiviado y debilitamiento
	Piel	Agrietamiento
	Papel	Fragilización
	Textiles naturales y sintéticos	Baja la resistencia a la tensión
H <sub>2</sub> S*	Plata Cobre Pinturas	Empañamiento Empañamiento Ennegrecimiento
Ozono	Hule y elastómeros	Estrellamiento
	Teñidos	Decoloración
	Textiles naturales y sintéticos	Debilitamiento
NO <sub>x</sub>	Teñidos	Decoloración
HF**	Vidrio	Opacidad
PST	Materiales de construcción	Ennegrecimiento
	Textiles	Manchas

Tomado de: Lippmann, 1979

\* Acido sulfhídrico

\*\* Acido fluorhídrico

### 3. LEGISLACIÓN

En el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se encuentra el antecedente más importante para la conservación de los recursos naturales. Establece el derecho a la nación para imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público.

En 1972, México se incorpora a las políticas ambientales internacionales participando en la histórica Conferencia sobre el Medio Humano de la Organización de las Naciones Unidas, en Estocolmo, Suecia. Ese mismo año, se forma dentro del Sector Salud, la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente.

Para extender a nivel nacional los conceptos del cuidado del medio ambiente, se crea en diciembre de 1982 la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Un año después se forma la Subsecretaría de Ecología que elabora el Primer Programa Nacional de Ecología.

En abril del 1985 se crea la Comisión Nacional de Ecología (CONADE) con los cinco subcomités que la integran: Control de Agroquímicos, Aguas Residuales, Bosques y Selvas, Contaminación Atmosférica en Zonas Metropolitanas y Emergencias Ambientales.

En marzo de 1988 entra en vigor la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación, el 28 de enero de 1988 (SEDUE, 1989). Con esta ley aparece el Reglamento en Materia de Prevención y

Control de la Contaminación Atmosférica. Esto tiene una importancia significativa, pues se observa en este documento, la descentralización en materia ambiental.

En noviembre del mismo año, el Departamento del Distrito Federal emite el Reglamento para la Prevención y Control de la contaminación generada por los vehículos que circulan en la ZMCM.

### 3.1 Estructura

La Ley General de Equilibrio y Protección al Ambiente está estructurada de la siguiente forma:

Título Primero: Disposiciones generales, en 5 capítulos  
Título Segundo: Áreas naturales protegidas, en 3 capítulos  
Título Tercero: Aprovechamiento racional, en 3 capítulos  
Título Cuarto : Protección al ambiente, en 7 capítulos  
Título Quinto : Participación nacional, en 1 capítulo  
Título Sexto : Medidas de control y seguridad, en 5 capítulos  
Al final, cuatro artículos transitorios.

Esta Ley, contempla además una serie de Reglamentos de vigencia a nivel nacional, que tienen por objeto establecer los ordenamientos de dicha ley, actualmente en los siguientes ámbitos:

Impacto ambiental  
Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica  
Residuos peligrosos,

que además incluyen una serie de normas, llamadas Normas Técnicas Ecológicas, que son la base para "establecer los procedimientos, requisitos, condiciones, especificaciones, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar

\* Zona Metropolitana de la Ciudad de México

desequilibrio ecológico o daño al ambiente y, además que uniformen principios, criterios, políticas y estrategias en la materia". (SEDE, art. 36, 1989). El cumplimiento de estas normas se orienta a satisfacer el bienestar de la población y serán un medio para asegurar la restauración y preservación del equilibrio ecológico.

Esta Ley General, tiene como objetivo establecer las bases de la política ecológica y la regulación de sus instrumentos de aplicación para el *ordenamiento ecológico*, que es la planeación adecuada del uso del suelo y manejo de los recursos naturales del territorio nacional, y con esto, preservar el equilibrio ecológico y restaurar el ambiente (SEDE, art. 3, 1989).

La protección atmosférica en zonas o en casos de fuentes emisoras de jurisdicción federal y la prevención y el control se mencionan en las fracciones XIV y XX del artículo quinto de la citada Ley.

Para la protección a la atmósfera, se considera que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos, así como en las diferentes regiones del país y que las emisiones de contaminantes a la atmósfera, sean de fuentes naturales o artificiales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas para asegurar la calidad aceptable del aire para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico (fracciones I y II del artículo 110)

En el artículo 111 se especifican las políticas que ejecutará SEDUE en materia de contaminación del aire. En forma resumida podemos destacar los dos puntos siguientes:

- 1) Expedición de las Normas Técnicas Ecológicas, donde se especifican los niveles permisibles de emisión e inmisión por contaminante y por fuente emisora.

\* Que no rebase los límites que establece la norma mexicana de calidad del aire

- II) Acordará y requerirá la instalación de equipos de control a las actividades contaminantes que lo requieran

### 3.2 Inspección

El Gobierno Federal le confiere a la SEDUE (art. 161 y 162) la realización de la inspección y vigilancia, a través de exámenes de reconocimiento en las que se levanta un acta (art. 164) en que se hace constar la situación que se presente en cuanto a materia ambiental.

En el artículo 169 se señalan y acondicionan las medidas que deberán llevar a cabo las empresas para corregir las deficiencias o irregularidades observadas, otorgándole al infractor un plazo para satisfacerlas y cubrir las sanciones a las que se haga acreedor.

### 3.3 Sanciones

El artículo 171 se señala que: "las violaciones a los preceptos de esta Ley, sus Reglamentos y disposiciones que de ella emanen, constituyen una infracción y serán sancionados administrativamente por la autoridad en competencia", de acuerdo con las siguientes categorías:

- I) Multa por el equivalente de veinte a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción;
- II) Clausura temporal o definitiva, parcial o total, y
- III) Arresto administrativo hasta por 36 horas

Todo lo anterior denota la importancia que en la actualidad tienen las cuestiones ambientales en materia jurídica.

### 3.4 Monitoreo ambiental en la Ciudad de México

La medición sistemática de contaminantes en la ciudad de México se inició desde 1972, siendo la preocupación de esa época el dióxido de azufre y las partículas suspendidas. Aún cuando también se medía ozono, no se le consideraba problemático (Bravo, 1987).

El crecimiento de la ciudad hacia el norte, principalmente, dió origen a lo que se conoce como zona metropolitana del Valle de México (ZMCM), con el asentamiento industrial tratado en el capítulo uno. El establecimiento actual de la red automática de monitoreo se inició en 1986, notándose su distribución cargada hacia esa región de la ciudad.

La SEDUE actualmente cuenta en su red con 24 estaciones manuales, 25 automáticas, 2 radares acústicos y unidades móviles. En 16 estaciones de la red se miden diversos parámetros meteorológicos y en 2 de ellas, en forma de estaciones piloto, se efectúa la calibración y supervisión de todos los equipos. En la figura 3.1 (CONADE, 1988) se muestra la Red Metropolitana de la Ciudad de México

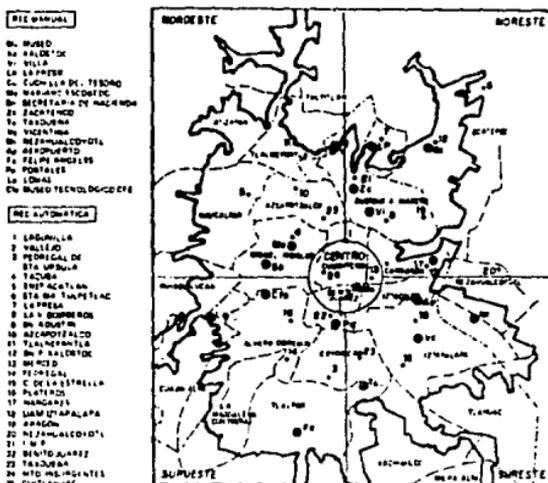


Figura 3.1 Red metropolitana de monitoreo de la Ciudad de México

### 3.4.1 Calidad del aire en la ZMCH

Como se mencionó anteriormente en el capítulo dos, los contaminantes se miden en unidades que no son usuales para la población en general. Las cantidades máximas permisibles de sustancias en el aire atmosférico que circunda un región y que están aceptadas por la legislación mexicana (Diario Oficial, 29 de noviembre de 1982) se exponen en la tabla 3.1, que a la vez se comparan los valores admitidos en otros países. Un estudio más amplio de este tema se encuentra en (Fuentes G., y García G., 1989)

Tabla 3.1 NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE EN VARIOS PAISES

País	Partículas suspendidas totales	Dióxido de Azufre	Ozono	Monóxido de Carbono	Oxidos de Nitrógeno (como NO <sub>2</sub> )	Hidrocarburos totales	Plomo
México	275 µg/m <sup>3</sup> /24 h	341 µg/m <sup>3</sup> /24 h (0.13 ppm)	216 µg/m <sup>3</sup> /1 h (0.11 ppm)	14 950 µg/m <sup>3</sup> /8 h (13 ppm)	395 µg/m <sup>3</sup> /1 h (0.21 ppm)		
Estados Unidos	260 µg/m <sup>3</sup> /24 h	80 µg/m <sup>3</sup> /media anual (0.03 ppm)	240 µg/m <sup>3</sup> /1 h (0.12 ppm)	10 000 µg/m <sup>3</sup> /8 h (9 ppm)	100 µg/m <sup>3</sup> /media anual (0.05 ppm)	180 µg/m <sup>3</sup> /3 h (0.24 ppm/3h)	1.5 µg/m <sup>3</sup> /3 meses
	75 µg/m <sup>3</sup> /mgs	386 µg/m <sup>3</sup> /24 h (0.14 ppm)		40 000 µg/m <sup>3</sup> /1 h (35 ppm)			
Checoslovaquia	150 µg/m <sup>3</sup> /24 h /media anual	150 µg/m <sup>3</sup> /24 h /media anual (0.057 ppm)		1 000 µg/m <sup>3</sup> /24 h /media anual (0.87 ppm)	100 µg/m <sup>3</sup> /24 h /media anual (0.05 ppm)		0.7 µg/m <sup>3</sup> /24 h /media anual
Italia	100 µg/m <sup>3</sup> /24 h	150 µg/m <sup>3</sup> /24 h (0.057 ppm)		23 000 µg/m <sup>3</sup> /24 h (20 ppm)	200 µg/m <sup>3</sup> /24 h (0.1 ppm)		10 µg/m <sup>3</sup> /24 h
Japón	100 µg/m <sup>3</sup> /1 h	100 µg/m <sup>3</sup> /1 h media diaria (0.04 ppm)	116 µg/m <sup>3</sup> /1 h (0.05 ppm)	11 500 µg/m <sup>3</sup> /media diaria (10 ppm)	75-113 µg/m <sup>3</sup> /1 h/media diaria (0.04-0.05 ppm)		
	200 µg/m <sup>3</sup> /1 h	262 µg/m <sup>3</sup> /1 h (0.1 ppm)					
						mas - media aritmética anual	mgs - media geométrica anual

Tomado de: Bravo, 1987

Con el objeto de hacer llegar la información del estado de los contaminantes en la atmosfera citadina, se ideó un número llamado *Índice Metropolitano de Calidad del Aire* (IMECA), basado en el concepto del *Pollution Standard Index* (PSI) de E.U.A. (Wayne, 1976).

En el IMECA se registran los valores de contaminantes medidos mediante cifras que son fáciles de interpretar, de acuerdo a una escala numérica del 0 al 500 que representa ciertos niveles en los que se puede encontrar el aire atmosférico en la ciudad. Esta escala se expone en la tabla 3.2 siguiente:

Tabla 3.2 ESCALA NUMÉRICA DEL IMECA

0-50	Buena
50-100	Satisfactoria
101-200	No satisfactoria
201-300	Mala
301-500	Peligrosa

Tomado de: Bravo, 1987

Los contaminantes que se miden son los que marca la norma mexicana: el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), y partículas suspendidas totales (PST). Se incluye otro valor más que representa el efecto combinado (sinergismo) del dióxido de azufre con las partículas suspendidas mediante el producto SO<sub>2</sub> x PST. Este efecto es importante porque el dióxido de azufre es llevado por las partículas pequeñas a las zonas más internas del sistema respiratorio, resultando ser más dañino que cualquiera de los dos contaminantes por separado. La figura 3.2 muestra la hoja de reporte del IMECA (Zaragoza, 1990).



Figura 3.2 Reporte del IMECA

La tabla 3.3 indica la relación entre el valor IMECA y las cantidades medidas de contaminantes.

Tabla 3.3 VALORES DE CONCENTRACIÓN CORRESPONDIENTES AL IMECA

GRUPO DE CONTAMINANTES PRINCIPALES DEL AIRE			GRUPO DE CONTAMINANTES DEL AIRE		
IMECA	PPM	PPHF	IMECA	PPM	PPHF
100	0.1	0.001	100	1.70	0.001
90	0.1	0.001	90	1.53	0.0009
80	0.1	0.001	80	1.36	0.0008
70	0.1	0.001	70	1.19	0.0007
60	0.1	0.001	60	1.02	0.0006
50	0.1	0.001	50	0.85	0.0005
40	0.1	0.001	40	0.68	0.0004
30	0.1	0.001	30	0.51	0.0003
20	0.1	0.001	20	0.34	0.0002
10	0.1	0.001	10	0.17	0.0001
0	0	0	0	0	0

GRUPO DE CONTAMINANTES PRINCIPALES DEL AIRE			GRUPO DE CONTAMINANTES DEL AIRE		
IMECA	PPM	PPHF	IMECA	PPM	PPHF
100	0.001	0.001	100	0.14	0.001
90	0.001	0.0009	90	0.126	0.0009
80	0.001	0.0008	80	0.112	0.0008
70	0.001	0.0007	70	0.098	0.0007
60	0.001	0.0006	60	0.084	0.0006
50	0.001	0.0005	50	0.07	0.0005
40	0.001	0.0004	40	0.056	0.0004
30	0.001	0.0003	30	0.042	0.0003
20	0.001	0.0002	20	0.028	0.0002
10	0.001	0.0001	10	0.014	0.0001
0	0	0	0	0	0

IMECA: INDICE DE CONTAMINACION DE LA CALIDAD DEL AIRE  
 PPM: PARTES POR MILLON  
 PPHF: MICROGRAMOS POR METRO CUBICO

Tomado de: Zaragoza, 1990

A este respecto cabe hacer notar tres cosas:

1. El índice de 100 para todos los contaminantes reportados coincide con el máximo permisible de exposición a un contaminante de acuerdo a la norma mexicana de calidad del aire. Después de este nivel se pueden presentar molestias para la población.

2. El IMECA está basado prácticamente en el PSI (Pollution Standard Index) elaborado en EUA, pero con algunas diferencias numéricas relacionadas con la tolerancia a partículas mostradas en la figura 3.3 (Bravo, 1987).

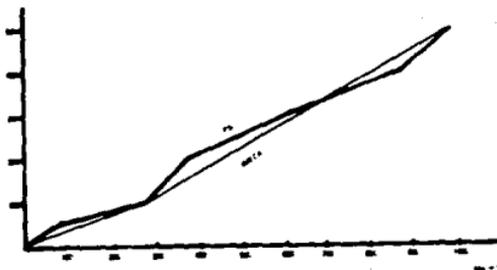


Figura 3.3 Diferencia entre el PSI y el INECA

3. En México no se han realizado estudios epidemiológicos como para establecer los niveles que realmente tolera la población de la ciudad de México y se han tomado los mencionados de manera casi igual que en Norteamérica, por lo que el reporte que se dá con el INECA a la población es muy subjetivo.

### 3.1.3 Plan de contingencias ambientales

Con el objetivo de evitar acontecimientos peligrosos para la población (episodios), se vigila constantemente mediante el monitoreo perimetral, la concentración de los contaminantes y se observan las condiciones meteorológicas principalmente las desfavorables- como una inversión térmica sobre la ciudad.

Para actuar en esos casos se formuló el plan de contingencias ambientales (SEDUE, 1988) que menciona una serie de acciones según la situación que se presente. En la figura 3.4 se muestra el plan con sus diferentes niveles de alerta.

## ACCIONES DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS

IMECA	NIVEL	ACCIONES A TOMAR POR NIVEL EN CONDICIONES DESFAVORABLES DE DISPERSION
401-500	3	IMPLANTAR EL TERCER NIVEL DE REDUCCION DE EMISIONES EN FUENTES INDUSTRIALES (MAS DEL 30%)
301-400	2	IMPLANTAR EL SEGUNDO NIVEL DE REDUCCION DE EMISIONES EN FUENTES INDUSTRIALES (PROMEDIO 30%) IMPLANTAR EL SUMINISTRO DE GAS NATURAL A LAS TERMOCENTRALES
201-300	1	IMPLANTAR EL PRIMER NIVEL DE REDUCCION DE EMISIONES EN FUENTES INDUSTRIALES (PROMEDIO 20%) PERER SUMINISTRARA MAYOR CANTIDAD DE GAS NATURAL A CFE, PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA
100-200	ALERTA INTERNA	VIGILANCIA HORARIA LAS 24 HORAS DEL DIA DE LOS NIVELES DE CONTAMINACION, ACTUALIZACION Y ANALISIS DE LAS CONDICIONES METEOROLOGICAS PREVALEcientes ELABORACION DEL INDICEDOR DE CALIDAD DEL AIRE Y PREPARACION DE RECURSOS MATERIALES Y HUMANOS
GESTION AMBIENTAL PERMANENTE		SI MEDIDAS CONTRA LA CONTAMINACION DEL AIRE INCREMENTO DEL TRANSPORTE COLECTIVO NO CONTAMINANTE, REFORESTACION, MEJORAMIENTO DE LA DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS, RELOCALIZACION INDUSTRIAL, SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES MENOS CONTAMINANTES, ENTRE OTRAS. CONVENIOS DE CONCERTACION CON CAMARAS INDUSTRIALES PARA EL MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS DE COMBUSTION E INSTALACION DE EQUIPO ANTICONTAMINANTE. ACCIONES DE LA POBLACION PARA EL CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES. MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE.

Figura 3.4 Plan de contingencias

#### 4. DETECCIÓN DE CONTAMINANTES

La detección de los contaminantes atmosféricos se realiza en dos categorías distintas. La primera se conoce como *monitoreo perimetral* y se efectúa en espacio abierto. Los resultados que se obtienen son aportación de las fuentes fijas y móviles que existan alrededor del lugar de monitoreo, al nivel del piso. Como ejemplo, en el capítulo tres se menciona el monitoreo perimetral en la Ciudad de México. La segunda categoría, el *monitoreo en fuente*, es una medición efectuada directamente sobre el emisor, sea este móvil, como en el caso de un vehículo; o fijo, como la chimenea de una fábrica. La tabla 5.2 menciona las técnicas para fuentes fijas, mientras que la tabla 5.1 señala el conjunto de técnicas de detección perimetral de contaminantes.

Tabla 4.1 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CONTAMINANTES. EN FUENTE.

Tipo	Técnica	Contaminantes
1) Fija	Análisis Químico	Gases
	Isocinetismo	Partículas
	Carta Ringelman	Opacidad
2) Móvil	Infrarrojo	H <sub>C</sub> totales CO NO <sub>x</sub>

Adaptado de: Bravo, 1989

Tabla 4.2 TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE CONTAMINANTES. PERIMETRAL.

Método	Técnica	Contaminantes
1) Manual	Via húmeda	H <sub>2</sub> S, HCl, NH <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> OH y otros
	Via seca	Br, H <sub>2</sub> S y SO <sub>2</sub>
2) Semimanual	Medidor de grandes volúmenes	Partículas en suspensión
	Medidor de cinta	SO <sub>2</sub> y HCl
3) Automático	Infrarrojo	CO y HC
	Ultravioleta	O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub>
	Colorimetría	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> y HF
	Coulometría	O <sub>3</sub> y SO <sub>2</sub>
	Cromatografía	HC
	Fluorescencia	Fluoruros y SO <sub>2</sub>
	Conductometría	SO <sub>2</sub>

Adaptado de: Bravo, 1989

#### 4.1 Monitoreo en fuentes fijas

El monitoreo en fuente se realiza por alguna de las siguientes razones (SEDUE, 1988):

1). Para establecer si una fuente esta dentro de los límites de emisión señalados por los reglamentos vigentes (vigilancia ambiental) y que se sujete a ellos.

2). Expedición, negación o revocación de permisos para operar equipos que sean fuente potencial o actual de emisión.

3). Contar con los datos de emisión necesarios para el diseño o selección del equipo de control adecuado en determinado proceso.

4). Disponer de datos para el cálculo de la eficiencia del equipo de control existente.

5). Existencia de información sobre el efluente, para elaborar inventarios de emisiones, con el objeto de conocer y evaluar el tipo y cantidad de contaminantes que se añaden a la atmósfera por las fuentes fijas.

6). Tener información para la modificación de partes del proceso que sean emisoras, o en ciertos casos, desarrollo o implementación de nuevos equipos de proceso.

7). Estudios para el control de pérdidas, detectando lugares del proceso con emisión excesiva de materias primas o de producto.

8). Efectuar pruebas periódicas en la fuente para precisar si un proceso dado está siendo eficientemente operado. En ocasiones, se pueden diagnosticar fallas de acuerdo a lo que se esté emitiendo.

Para efectuar el monitoreo es necesario utilizar una serie de técnicas, tanto para coleccionar los contaminantes como para analizarlos. Realizar lo anterior significa hacer una determinación directa de los contaminantes en su lugar de origen.

La colección de la muestra es la etapa clave del monitoreo en fuente, porque domina el costo del estudio, debido a que establece el número de sondeos necesarios y por el riesgo que puede tener la toma de muestras.

La selección del sitio de muestreo y el número de puntos de sondeo se basan en procedimientos registrados en la literatura. En México, para llevar a cabo dichos métodos, se siguen las Normas Oficiales Mexicanas que se citan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 NORMAS TÉCNICAS ECOLÓGICAS PARA FUENTES FIJAS

Clave	Objetivo
NOM-AA-09-1973	Determinación del flujo de gases en un conducto por medio de un tubo Pitot.
NOM-AA-10-1974	Determinación de la emisión de PST en los gases que descarga un conducto.
NOM-AA-23-1980	Terminología de la contaminación atmosférica.
NOM-AA-35	Determinación de CO, CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en los gases de combustión.
NOM-AA-54-1978	Determinación de la humedad de los gases.

(continúa)

NOM-AA-55-1979 Determinación de SO<sub>2</sub> en gases que fluyen en un conducto.

NOM-AA-56-1980 Determinación de SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y neblinas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Tomado de: Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial

Un criterio utilizado para localizar el sitio de muestreo a lo largo del ducto o chimenea, es buscar un lugar que se encuentre a una distancia exactamente determinada entre un punto de perturbación viento abajo y otro viento arriba. Esto se hace para asegurar un régimen de movimiento aproximadamente laminar y desarrollado. El cálculo se realiza con auxilio de la figura 4.1 (SEDUE, 1988) que nos indica en términos del diámetro del ducto la posición del puerto de colección en el eje longitudinal.

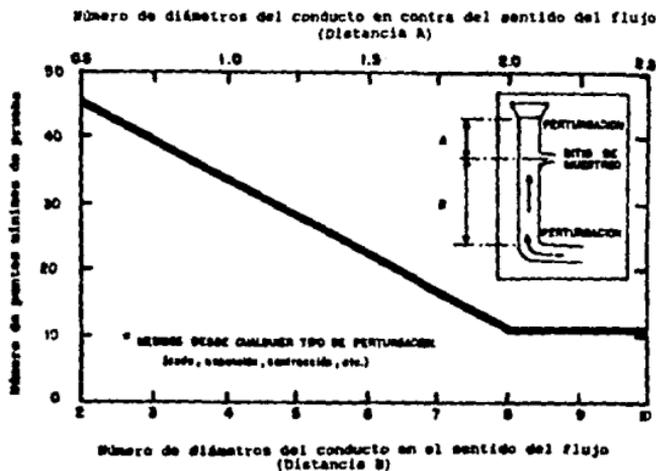


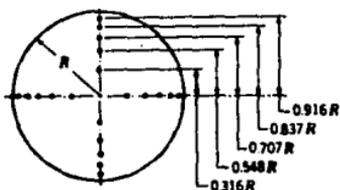
Figura 4.1 Localización del punto de muestreo

En general, se procura que el punto se encuentre a una distancia, por lo menos a ocho veces el diámetro del ducto después de cualquier codo o doblés, entronque, perturbación, ensanchamiento,



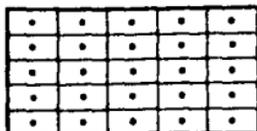
Después se deben calcular el número y ubicación de los puntos de sondeo en la sección transversal del ducto. Estos puntos cumplen con una cierta ubicación para tener un promedio de los gradientes extremos de flujo y concentración que ocurren. Por norma, el número mínimo de puntos colección en la sección transversal del ducto es 12 y el máximo es de 48.

La distribución de los mencionados puntos de colección de ser simétrica y uniformemente distribuida. es decir, deberán estar proporcionalmente espaciados de acuerdo al área total de la sección transversal del ducto como lo indica la figura 4.3 (Cavaseno, 1980) para un ducto de sección circular y la figura 4.4 (Cavaseno, 1980) para un rectangular. Para el caso ductos de sección circular se puede recurrir a la tabla 4.4 que permite calcular rápidamente el espaciamiento en términos de porcentajes del diámetro.



**Chimenea circular**  
(10 puntos transversales)

*Figura 4.3 Ducto de sección circular*



**Chimenea rectangular**  
(25 áreas iguales)

*Figura 4.4 Ducto de sección rectangular*

Tabla 4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS EN UN DUCTO CIRCULAR

No. DEL PUNTO (PLAN SIMPLIFICADO) EN DIÁMETRO	DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS EN UN DUCTO CIRCULAR																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	142	062	045	033	024	017	010	007	004	003	002	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
2	064	250	147	120	084	062	052	040	034	028	024	020	017	014	012	010	009	008	007	006	005	004	003	002
3		040	290	150	100	070	050	040	030	025	020	018	016	014	012	010	009	008	007	006	005	004	003	002
4			017	230	120	080	060	050	040	035	030	028	026	024	022	020	019	018	017	016	015	014	013	012
5				007	110	050	040	035	030	028	026	024	022	020	019	018	017	016	015	014	013	012	011	010
6					004	005	030	015	014	013	012	011	010	009	008	007	006	005	004	003	002	001	001	001
7						002	010	005	004	003	002	002	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
8							007	004	003	002	002	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
9								010	003	002	002	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
10									015	002	002	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
11										023	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
12											030	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
13												043	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
14													062	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
15														081	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001
16															080	001	001	001	001	001	001	001	001	001
17																056	001	001	001	001	001	001	001	001
18																	040	001	001	001	001	001	001	001
19																		013	001	001	001	001	001	001
20																			007	001	001	001	001	001
21																				005	001	001	001	001
22																					000	001	001	001
23																						000	001	001
24																							000	001

(Fracción del diámetro del conducto, desde la pared interior hasta el punto).

Tomada de: SEDUE, 1988

El muestreo de contaminantes está orientada a la determinación de gases, en donde se aplica el *muestreo proporcional*, o a la determinación de partículas, en la que se usa el *muestreo isocinético*. En ambos casos, es necesario determinar el gasto del efluente. Es muy importante que sea correctamente medido, pues afecta de manera notable el cálculo real de la concentración. Como es sabido, el flujo volumétrico de una corriente gaseosa se mide a partir de la velocidad promedio, y esta a su vez, es calculada a partir de la presión dinámica en el efluente. La forma más usual y sencilla de realizar esto es a través de un tubo de pitot, en donde se obtiene la presión dinámica como la diferencia entre la presión total (medida de frente al flujo) y la presión estática (medida perpendicular al flujo). En la figura 4.5 (Cavaseno, 1980) muestra los dos tipos de tubos pitot que se utilizan.

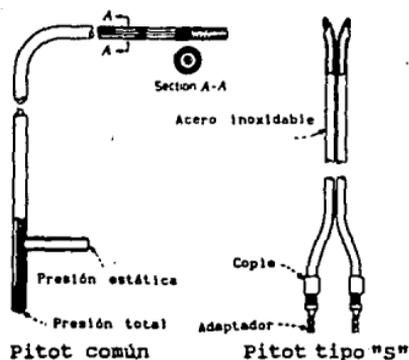


Figura 4.5 Tipos de tubos pitot

El tipo "S" es muy utilizado porque es fácil de manejar cuando hay que sondear en augeros pequeños de la pared de la chimenea y porque es difícil que se obstruya si hay alta concentración de partículas. Sin embargo, requiere de una calibración previa para el flujo que vá a medir y no proporciona una lectura directa de la presión dinámica, como en el caso del pitot normal. El material convencional del tubo pitot es acero inoxidable, aunque a veces se usa el vidrio o el teflón.

Un tren de muestreo consiste del montaje del equipo necesario para realizar la colección y la medición de las variables que intervienen. El más común es el que recomienda la EPA y se ilustra en la figura 4.6 (Cavaseno, 1980), con las partes que lo forman.

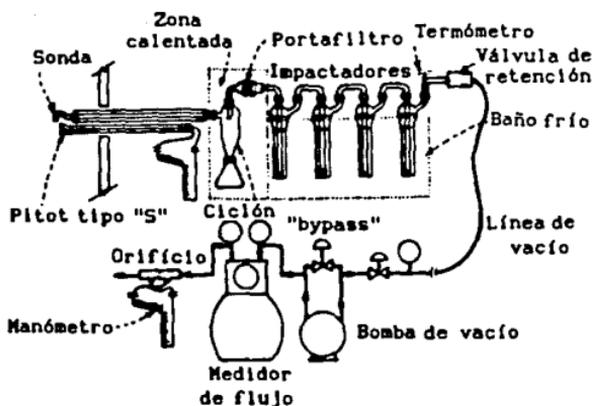


Figura 4.6 Partes de un tren de muestreo

#### 4.1.1 Muestreo de gases

Al tomar la muestra, el gas colectado se filtra, para remover las partículas del gas recogido. Después se hace pasar a través de los burbujeadores, que contienen una sustancia selectiva (solución química de captura) para el gas contaminante que se desea analizar. El volumen total del gas muestreado se registra con el medidor de flujo. La operación de colección termina cuando se completa un ciclo predeterminado o hasta que se tiene suficiente muestra para el análisis.

#### 4.1.2 Muestreo de partículas

La captura de las partículas requiere de un conocimiento exacto de la velocidad del efluente y de la colección, debido a que la muestra tiene que ser representativa de lo que realmente hay en la chimenea. Esto es por la siguiente razón: cuando se cumple la condición de *isocineticidad*, se asegura que la misma concentración de contaminantes particulados que hay en el

efluente, es la misma que está entrando por la sonda, es decir, no deben de succionar más contaminantes de los que provee el flujo en sus condiciones de movimiento normal, ni tampoco debe recibir menos. Cuando el régimen se desvía de lo anterior, la sonda puede estar recibiendo una concentración menor de partículas o una mayor de la que realmente existe. La figura 4.7 (Cavaseno, 1980) aclara estas ideas.

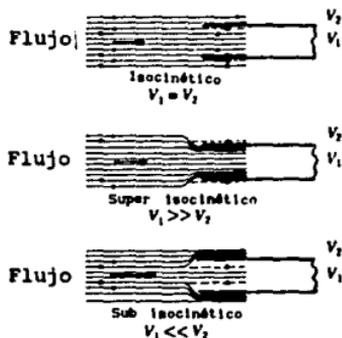


Figura 4.7 Diferentes condiciones de Isocineticidad

El paso siguiente es analizar químicamente las muestras obtenidas, de acuerdo al contaminante que se desea determinar. Esto se realiza mediante procedimientos de laboratorio que también se encuentran normalizados, que por salir de los propósitos de este trabajo, no se describen.

#### 4.2 Emisiones industriales

Ya que se mencionó la forma en que se miden los contaminantes producidos en un proceso de fabricación, cabe preguntar qué cantidad de sustancias nocivas es permisible arrojar a la atmósfera por una determinada industria. Por tal razón, en varios países se han llevado a cabo numerosos estudios con el objetivo obtener ciertos valores llamados factores de emisión, para limitar las emisiones industriales.

La emisión de una fuente fija se expresa como la cantidad de contaminantes que arrojan a la atmósfera durante un intervalo de tiempo considerado. Así, se tiene que:

$$\text{Emisión} = \frac{\text{masa contaminantes}}{\text{tiempo}}$$

o también, de otra forma, como:

$$\text{Emisión} = \text{Capacidad} \times \text{Factor de emisión}$$

La *capacidad* puede ser la producción de un satisfactor o el consumo de combustible por unidad de tiempo

El *factor de emisión* es un número que nos dá la proporción entre la cantidad de contaminantes que se deben producir como máximo, por unidad de producto obtenido o combustible consumido. Son resultado de los mejores valores alcanzados en condiciones óptimas de operación de los respectivos procesos estudiados. De acuerdo a si se trata de la elaboración de un producto o un determinado combustible que se esté consumiendo, la emisión se expresa de las dos formas siguientes:

$$\text{Emisión} = \frac{\text{masa producto}}{\text{tiempo}} \times \frac{\text{masa contaminante}}{\text{masa producto}}$$

$$\text{Emisión} = \frac{\text{masa combustible}}{\text{tiempo}} \times \frac{\text{masa contaminante}}{\text{masa combustible}}$$

, donde el cociente de la derecha, en ambos casos es el factor de emisión.

En nuestro país no hay todavía un compendio de factores de emisión para los procesos industriales existentes. Por tal motivo, en este trabajo se han añadido para los ejemplos del capítulo siete los que se encuentran en la literatura norteamericana (EPA, 1985). Los factores de emisión vigentes actualmente en México son sólo para combustibles y se pueden consultar en (SEDUE, 1988), el Diario Oficial o en las Normas Técnicas Ecológicas respectivas.

## 5. TÉCNICAS Y EQUIPOS DE CONTROL

Con la finalidad de limitar la producción y emisión de contaminantes se aplican las siguientes técnicas (Lund, 1971; Seinfeld, 1978; Lippmann, 1979):

- a). *Modificación del proceso básico y/o la operación de este con objeto de conseguir un funcionamiento más limpio.*
- b). *Sustitución de las materias primas*
- c). *Busqueda de otros equipos para realizar operaciones unitarias similares pero con menores emisiones*
- d). *Sustitución de los carburantes utilizados en el proceso de combustión.*
- e). *Tratamiento de los gases del efluente antes de su emisión a la atmósfera.*

El control por cambio en el proceso es de la competencia del diseñador del proceso o del operador del mismo, y cuando existe equipo de control, del diseñador del sistema anticontaminante. Un tratamiento detallado de este método para cada proceso es sumamente difícil, debido al gran número de actividades industriales y las variables que intervienen en cada uno de ellos.

Cuando el proceso lo permite, se realiza la sustitución de materias primas tóxicas o contaminantes, que intervienen en el producto, por algunas otras menos perjudiciales. La tabla 5.1 nos da varios ejemplos.

Tabla 5.1 SUSTITUCIÓN POR MATERIALES MENOS TOXICOS

Material original	Sustituto	Aplicación
Fósforo amarillo	Fósforo rojo	Cerillos comunes
Tetracloruro de carbono	Percloroetileno, Cloruro de metileno	Solventes para limpieza
Benceno	Tolueno, ciclohexano	Materia prima, como solvente
Plomo	Titanio Zinc	Pigmento para pintura interior
Berilio	Fosfato de calcio	Fósforo para lámparas
Fibras de asbesto	Fibra de vidrio	Materiales de aislamiento
Arena	Carburo de silicio	Discos abrasivos
Radio	Tritium	Materiales fosforescentes

Tomado de: Lippmann, 1979

Otra medida para evitar emisiones nocivas es el empleo de equipos alternos, en sustitución de los tradicionales. La tabla 5.2 cita varios casos típicos.

Tabla 5.2 SUSTITUCIÓN DE EQUIPOS U OPERACIONES UNITARIAS

Op. ó eq. original	Sustitución	Aplicaciones
Rociado	Inmersión	Pintura de partes
Sopleteado con arena	Soplet. húmedo Ataque ácido	Limpieza de partes
Carga intermitente	Alimentación continua	Suministro de materiales
Motores Diesel	Motores eléctricos de baterías	Montacargas y entrega de materiales
Tubería bridada	Tubería soldada	Transporte de fluidos
Manómetros e instrumentos de mercurio	Instrumentos mecánicos	Instrumentación

Tomado de: Lippmann, 1979

La sustitución de los combustibles industriales utilizados es una buena opción puesto que un combustible de calidad controlada tendrá menos productos nocivos de combustión. Sin embargo, esto tiene una repercusión inmediata en el costo del producto, y si consideramos el caso de nuestro país, nos daremos cuenta que los combustibles más abundantes son los que tienen mayores impurezas y esta alternativa no resulta viable económicamente. Además, esta elección es exclusiva para la parte de combustión de un proceso.

La quinta técnica es la más desarrollada y se usa ampliamente en la industria. El tratamiento que se dé al efluente dependerá en cada caso del proceso del que se trate y de los contaminantes a eliminar. Los dispositivos de control se dividen entre los que retiran partículas del efluente gaseoso, los que absorben los gases nocivos (como por ejemplo  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), y los que transforman químicamente a los contaminantes por combustión o catálisis.

Los equipos para retirar partículas se basan en principios físicos, y los equipos para gases se apoyan en fundamentos químicos, como la absorción y combustión. De acuerdo a su operación, también se clasifican en húmedos y secos, atendiendo esto a que se utilice algún líquido o no para capturar los contaminantes gaseosos y partículas. Cada método se recomienda de acuerdo a las características de la partícula o gas a recolectar. En la tabla 5.3 se clasifican los equipos de control convencionales para partículas y gases.

Tabla 5.3 CLASIFICACION DE EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES

Partículas	Gases
Filtros	Absorbedores húmedos
Tela	Lavadores
Fibras	Torres de absorción
Granulares	Absorbedores secos
Precipitadores electrostáticos	Lecho fijo
Seco de placas	Lecho fluidizado
Seco tubular	Incineradores
Húmedo	Flama directa
Seco inercial	Catalítico
Ciclones	
Cámaras de sedimentación	
Separadores de choque	
Húmedo inercial	
Lavadores	

Tomado de: Lund, 1971

Existen dos tendencias en el tratamiento de las emisiones industriales a la atmósfera (Marchello, 1976). La primera consiste en *tirar y diluir* los contaminantes, tal como ocurre con el uso de chimeneas. El otro tratamiento consiste en *retener y concentrar* los residuos mediante el uso de equipos de control. Cabe mencionar que el uso de estos dispositivos representa un costo, que se incrementa cuanto más pequeñas son las partículas a retirar o cuando el gasto del efluente es grande.

### 5.1 Equipos para retener partículas

La eficiencia de estos equipos ( $\eta$ ) está dada por la cantidad de partículas que pueden retirar del total que lleva el efluente; en otras palabras (Ross, 1979):

$$\eta = \frac{W_e - W_s}{W_e} \times 100$$

donde  $W_e$  es el peso de las partículas a la entrada del dispositivo y  $W_s$  es el peso de las partículas a la salida.

Dentro de los equipos de control para partículas, los más importantes son los colectores mecánicos, los filtros de bolsas, los precipitadores electrostáticos y los colectores húmedos. A continuación se habla acerca de cada uno de ellos.

### 5.1.1 Colectores mecánicos

El peso de una partícula que arrastra el efluente gaseoso de un proceso industrial, es varias veces mayor que el peso específico del gas que acompaña. Esta diferencia en peso se aprovecha para separar las partículas suspendidas, mediante la fuerza de gravedad, la inercia o la fuerza centrífuga. En seguida se mencionan los principales tipos de colectores mecánicos.

*Cámara de sedimentación.* Consiste en hacer pasar los gases lentamente a través de una cámara larga para permitir que la fuerza de gravedad haga caer las partículas suspendidas fuera de la corriente gaseosa. La eficiencia de este método depende del tamaño de la partícula, de su densidad y del largo de la cámara. Se recomienda utilizar sólo para coleccionar partículas mayores de  $50 \mu\text{m}$  o como proceso previo a otro dispositivo de control. Su principio de funcionamiento es muy simple, pero debido al gran espacio que se necesita y a la baja eficiencia de colección, su uso industrial es reducido. La figura 5.1 (Seinfeld, 1978) ilustra una cámara típica de sedimentación por gravedad.

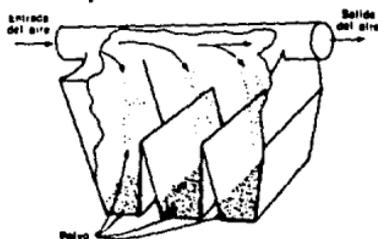


Figura 5.1 Cámara de sedimentación por gravedad

Colector por recirculación con desviador de flujo. Su funcionamiento se basa en que las partículas tienen más inercia que el gas y cuando se les somete a un cambio brusco de dirección, las partículas por ser más pesadas y con mayor inercia, se separan del gas. El dispositivo mostrado en la figura 5.2 (Ross, 1974) es un colector de recirculación con desviación de flujo, en el que se introduce el efluente a alta velocidad a través de un desviador horizontal hecho con varillas separadas unos 12 mm entre sí. Esta placa obliga al gas a pasar por las rendijas y al llegar al final del desviador, el aire sucio tiene que dar una vuelta a gran velocidad. Entonces las partículas continúan su trayectoria rectilínea para ser colectadas en el fondo en una tolva. A pesar de ser más eficiente que la cámara de sedimentación, se recomienda como predepurador de otro separador posterior, pues no colecta las partículas más pequeñas. La figura 5.3 (Haddad, 1971) muestra una cámara de persianas.

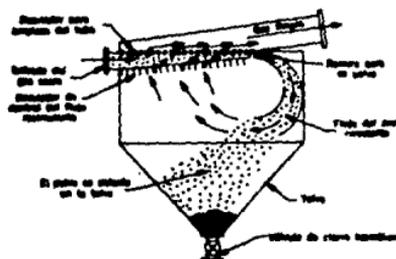


Figura 5.2 Colector por recirculación

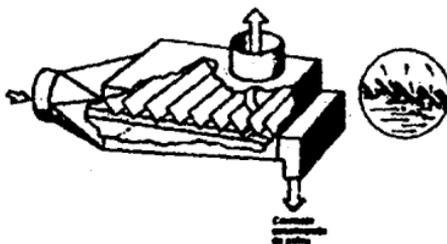
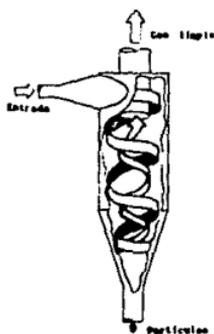


Figura 5.3 Cámara de persianas

**Ciclones.** Estos dispositivos utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas del gas. Su geometría permite que se formen dos remolinos, uno exterior descendente y otro interior ascendente. El remolino descendente se forma desde la entrada y es en la sección cónica en donde al gas sucio adquiere una gran aceleración centrífuga, las partículas se precipitan por las paredes del cono mientras que el gas limpio sube por un remolino interno a través de toda la longitud del ciclón hasta salir por un tubo captador vertical. La figura 5.4 (Williamson, 1973) indica la forma en que se producen los remolinos.



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Figura 5.4 Comportamiento del fluido en el interior de un ciclón

El patrón de flujo descrito tiene muchas variables de acuerdo a la construcción del ciclón, por ejemplo: el tipo de entrada, las proporciones dimensionales, la interdisposición de placas desviadoras y la inclusión de un educor. El diseño de un colector de ciclón implica un balance entre cuatro factores fundamentales que son: el tamaño de la partícula, la pérdida de carga, el costo de los materiales de construcción y las dimensiones físicas del dispositivo. Existen diferentes modelos, pero atendiendo a sus características principales, los podemos clasificar en tres tipos básicos: ciclón axial de placas, de entrada tangencial y de entrada tangencial.

### 1) Ciclón axial de placas

El arreglo presentado en la figura 5.5 (Ross, 1974) consta de un grupo de veinticinco ciclones de diámetro pequeño (25.4 cm) colocados en cinco filas de cinco ciclones cada una. Esto permite lograr un tamaño compacto para una capacidad total de  $0.010 \text{ m}^3/\text{s}$ .

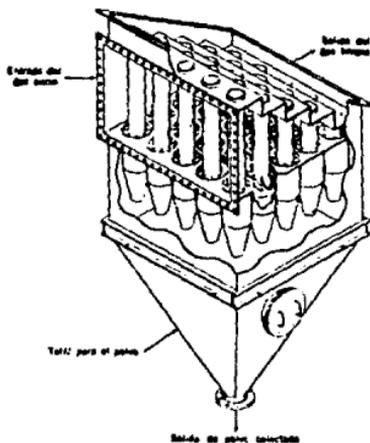


Figura 5.5 Ciclón axial

El gas sucio penetra por una entrada común y se distribuye a todos los ciclones. Las placas axiales obligan al gas con las partículas a describir una trayectoria en espiral formándose los remolinos descendente y ascendente, produciéndose el efecto anteriormente explicado. En la figura 5.6 (Ross, 1974) aparecen las partes que componen un ciclón axial.

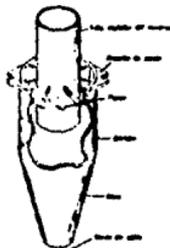


Figura 5.6 Partes de un ciclón axial

### ii) Ciclón de entrada tangencial

La figura 5.7 (Ross, 1974) muestra la disposición de la entrada y salida de este tipo de ciclones, mientras que la figura 5.8 (Ross, 1974) ilustra un colector con cuatro ciclones ordenados de manera que cada uno reciba una cuarta parte del flujo total de gas. Para asegurar esta distribución, se utiliza un conducto de unión adecuado, como el que se señala en el detalle de la figura 5.8.

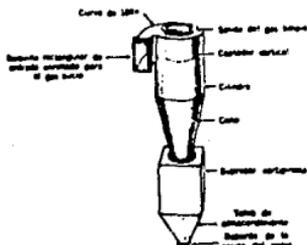


Figura 5.7. Ciclón de entrada tangencial

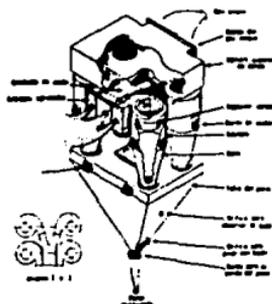


Figura 5.8. Ciclones de entrada tangencial

### iii) Ciclón de entrada tangencial con eductor

Es similar al anterior, con la variante de llevar un conducto eductor para partículas muy finas. Este va en espiral desde la

parte superior, donde el remolino es ascendente, hasta el lugar donde se unen el cilindro y el cono. Esta característica aumenta la eficiencia de colección sin incrementar la pérdida de carga, además de que esta derivación equilibra el remolino superior con el inferior uniformizando el patrón de flujo interno, a la vez que transporta las partículas finas de la parte superior del cilindro y las reinyecta a la corriente inferior de partículas más gruesas, aumentando con esto su captura y evitando un acarreo posterior. Este equipo tiene la desventaja que aumenta 10% el costo de instalación. En la figura 5.9 (Ross, 1974) se puede observar la ubicación del educor.

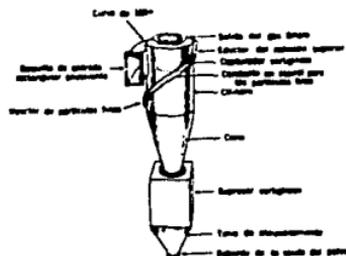


Figura. 5.9 Ciclón de entrada tangencial y educor para partículas muy pequeñas

En general, el uso de ciclones se recomienda bajo las siguientes situaciones (Lund, 1971):

- a). Partículas de tamaño mayor que  $5 \mu\text{m}$
- b). Concentración alta (más de  $6 \text{ g}$  de partículas por  $\text{m}^3$ )
- c). Cuando es deseada una clasificación de materiales
- d). Cuando la eficiencia no es fundamental
- e). Si se usarán como precolectores

### 5.1.2 Filtros de bolsas

Los filtros de material tejido son uno de los colectores más empleados para la eliminación de partículas secas de una corriente gaseosa. El principio de funcionamiento consiste en hacer pasar el flujo de gas a través de un tejido de fibra natural o sintética, que conforma el medio filtrante. El gas fluye entre las fibras pero las partículas quedan atrapadas y conforme crece el espesor de la capa de polvo, la eficiencia aumenta debido a que se forma una "torta" que bloquea el paso de las partículas más pequeñas. Entonces, llega un momento en el que el filtro se satura y es necesario limpiarlo. La figura 5.10 (Lund, 1971) presenta la trayectoria de las partículas al aproximarse a las fibras del filtro y la formación de la torta.

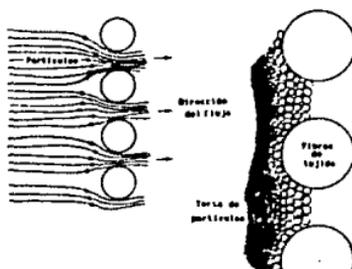


Figura 5.10 Funcionamiento básico del filtro

El uso de filtros se recomienda cuando (Lund, 1971):

- Se desea una alta eficiencia (al menos 99%)
- La temperatura de operación está alejada del punto de rocío.
- La temperatura del efluente es moderada
- Se manejan volúmenes muy grandes
- Existe material valioso que debe colectarse seco
- La disponibilidad de agua es baja
- No existe riesgo de explosión, ni incendio, ni carga residual electrostática
- No haya materiales pegajosos en el efluente

Los medios filtrantes usados en este método se pueden disponer de distintas formas. Los arreglos convencionales son en forma de bolsa o de tubo. La forma de limpieza es de acuerdo al diseño del filtro y se realiza sacudiendo mecánicamente los filtros o aplicando una corriente de aire a alta presión en sentido contrario al de operación o por medio de un anillo móvil. Los periodos de limpieza obedecen a varios factores : abertura de la malla, tamaño promedio del polvo y gasto del efluente. Los arreglos de filtros mencionados aparecen en la figura 5.11 (Seinfeld, 1978).

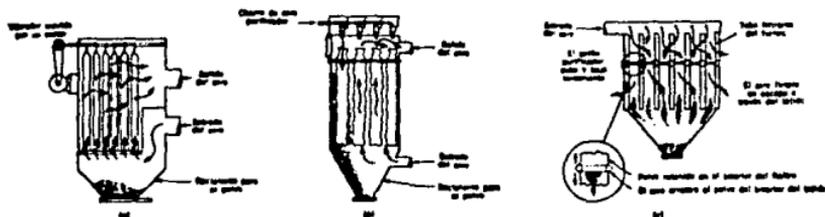


Figura 5.11 Arreglos de filtros

#### 5.1.4 Precipitadores electrostáticos

Estos equipos consisten en una serie de hileras paralelas de placas planas con un potencial positivo, denominadas *electrodos colectores*. Entre cada juego de estas placas va conectado un cable de alta tensión con potencial negativo, llamado *electrodo de descarga*. El gas sucio se hace pasar por horizontalmente entre las placas presentándose las tres etapas siguientes (Seinfeld, 1978):

i) Debido a la gran diferencia de potencial entre los electrodos, de 40 000 a 50 000 V, se produce un desplazamiento (efecto corona) de los iones del gas cargados negativamente hacia las placas cargadas positivamente. A esta corriente iónica se le llama *viento eléctrico*, es visible y de color azul.

ii) Conforme los iones se desplazan desde electrodo de descarga hasta el electrodo colector, chocan con las partículas

suspendidas, cargándolas negativamente y entonces estas son atraídas hacia la placa colectora por efecto electrostático.

(iii) Una vez en las placas colectoras, las partículas forman una capa que, conforme va creciendo en espesor, disminuye la intensidad del campo eléctrico. La resistencia de la capa de polvo se denomina *resistividad del polvo* y oscila entre  $10^7$  y  $10^{11}$  ohms/cm de espesor. Entonces, se hace necesario realizar una remoción periódica del polvo colectado por medio de un golpe o sacudida mecánica.

La figura 5.12 (Seinfeld, 1978) ilustra las partes esenciales de un precipitador electrostático, la figura 5.13 (Williamson, 1973) explica el efecto electrostático sobre las partículas, y la figura 5.14 (Lund, 1971) muestra un precipitador electrostático comercial.

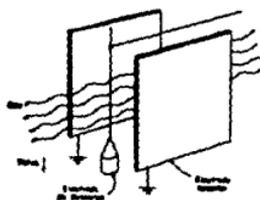


Figura 5.12 Partes que forman un precipitador electrostático

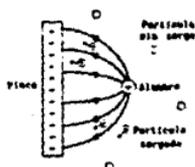
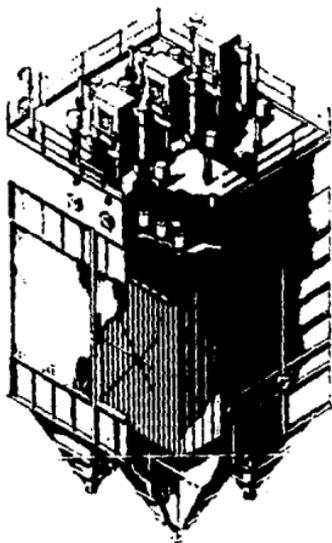


Figura 5.13 Efecto electrostático sobre las partículas



**Figura 5.14 Precipitador electrostático comercial**

Los precipitadores electrostáticos se recomiendan (Lund, 1971) cuando:

- a). Se desean eficiencias muy altas para remoción de partículas finas
- b). Se manejen volúmenes de gas muy altos
- c). No existe disponibilidad de agua
- d). El material recolectado deba estar seco

#### **5.1.4 Colectores por vía húmeda**

Este tipo de colectores emplean un líquido para capturar las partículas de una corriente gaseosa. Cabe señalar que algunas veces son similares a los colectores mecánicos, con la particularidad de que tienen una forma de proveer de líquido al

proceso de colección. Estos equipos son los siguientes.

**Cámara de rociado.** Cuando está en posición horizontal es similar a la cámara de sedimentación, con la diferencia de que cuenta con un sistema hidráulico para proporcionar gotas finas de agua para "lavar" el gas, llevándose consigo las partículas que lo acompañan. Esta recolección se realiza por la colisión entre una partícula suspendida y una gota de agua, resultando que esta la "moja" y la hace caer. Se logra aumentar la eficiencia añadiendo mamparas que favorecen el mezclado. En la figura 5.15 (Seinfeld, 1978) se esquematiza una cámara de rociado, que tiene una disposición vertical en cuyo caso viene a ser una torre de rociado.

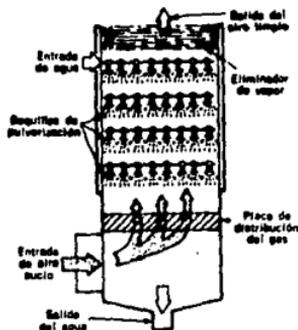


Figura 5.15 Cámara de rociado

**Lavador de ciclón.** El gas sucio a alta velocidad se introduce tangencialmente en la porción interior de un cilindro vertical, que cuenta con una aleta que permite variar el flujo a la entrada para conservar una velocidad adecuada. La fuerza centrífuga lanza las partículas contra las paredes que se encuentran empapadas de líquido por un rociador central que arroja agua un forma radial. En la figura 5.16 (Seinfeld, 1974) se presenta un lavador de ciclón típico. La dirección hacia arriba del agua se debe al flujo ascendente del gas. En la parte superior hay un elemento deshumidificador o trampa de humedad.

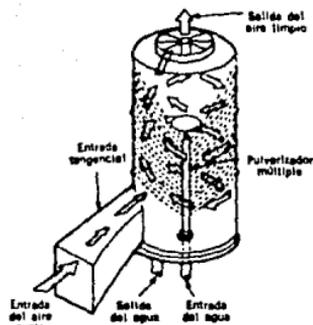


Figura 5.16 Lavador de ciclón

**Lavadores de choque.** Consisten de una columna con placas perforadas en las que se mantiene un cierto nivel de líquido (desviadores de choque inundados), para sea atravesado por el gas y las partículas, quedando adheridas en la película líquida. Posteriormente la circulación descendente del líquido por el interior de la torre lleva las partículas capturadas hacia el fondo. En la figura 5.17 (Seinfeld, 1974) se ilustra lo anterior.

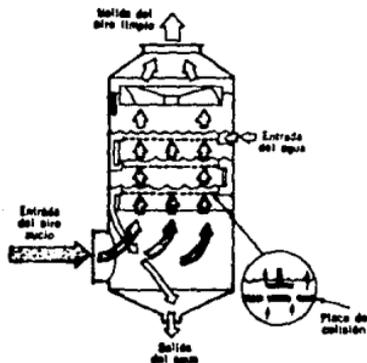


Figura 5.17 Lavadores de choque

**Torres empacadas.** El gas sucio se introduce por la parte inferior, obligándolo a atravesar el empaque humedecido a contracorriente por el líquido lavador. Esta ruta permite un mejor contacto de las partículas con el líquido, que las atrapa fácilmente y las lleva al fondo.

Existe una gran variedad de materiales de empaque, como por ejemplo: esferas de vidrio o plástico, anillos Rasching, sillas Berl, anillos fraccionados y otros. Como los anteriores, este equipo cuenta con un dispositivo deshumidificador en la parte superior. La figura 5.18 (McCarthy, 1979) señala un dispositivo típico con algunos de los rellenos.

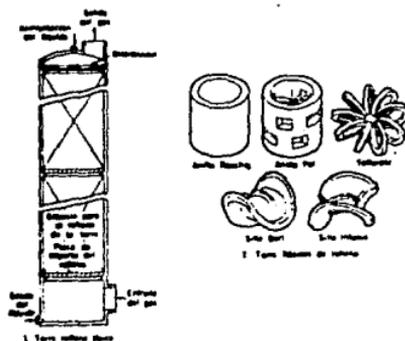


Figura 5.18 Torres empacadas

**Lavador de lecho fluidizado.** Consiste en una torre con rejillas que soportan esferillas de vidrio. Al pasar el gas, se mantienen suspendidas, a la vez que los rociadores les proporcionan humedad continuamente. El efecto es un mejor mezclado de las partículas con el líquido y se evita además que se formen incrustaciones, y con ello, obstrucción. Se puede mejorar la eficiencia implementando un ciclón húmedo a la entrada. Un dispositivo de este estilo aparece en la figura 5.19 (Ross, 1974).

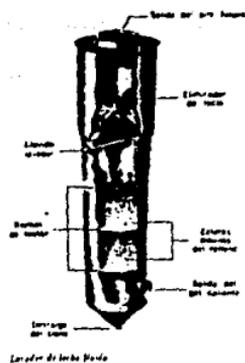


Figura 5.19 Lavador de lecho fluidizado

**Lavadores Venturi.** El gas sucio se hace pasar por un Venturi, mientras que el líquido limpiador se introduce en la garganta por medio de una boquilla. Entonces, se forman gotas muy finas, que al producirse el contacto, en el régimen turbulento, se mezclan vigorosamente con las partículas que lleva el gas y por arrastre son removidas fácilmente las partículas. Por esta razón, es muy compacto y con una eficiencia alta. En la figura 5.20 (Seinfeld, 1974) se muestra un lavador de tipo Venturi.

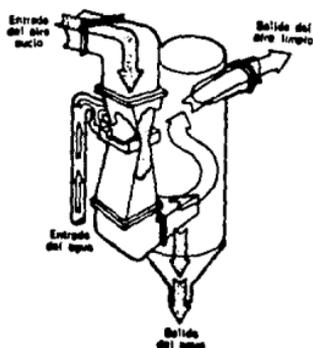


Figura 5.20 Lavadores Venturi

En la figura 5.21 (Williamson, 1973) aparece el detalle interior del Venturi en el dispositivo.

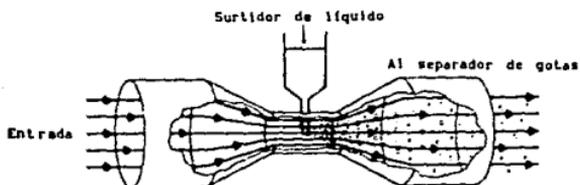


Figura 5.21 Venturi del dispositivo

Lavador húmedo con ventilador centrífugo. Existen otros dispositivos menos convencionales y algunos más que surgen de combinaciones entre los anteriormente vistos. Como ejemplo, en la figura 5.22 (Ross, 1974) se ilustra un lavador húmedo de alta energía. Posee un ventilador centrífugo y un rociador interno que lo hacen muy compacto, económico en cuanto a consumo de líquido y con una eficiencia moderada. Las desventajas son el alto consumo de energía, el desgaste de los álabes del rotor por las partículas y la corrosión en los materiales de construcción.

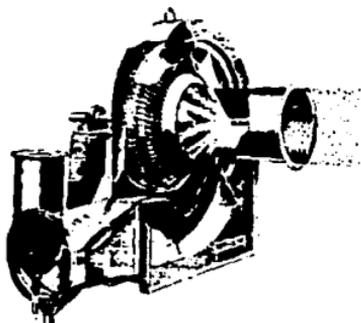


Figura 5.22 Lavador húmedo con ventilador centrífugo

En general, los colectores por vía húmeda, o lavadores se recomiendan cuando:

- a). Se deben remover partículas finas con alta eficacia
- b). No importa que haya mezcla con otra sustancia
- c). Se desea eliminar partículas y gases
- d). Existen gases explosivos o combustibles
- e). Se manejan volúmenes de aire no extremadamente altos
- f). Se tiene disponibilidad de agua

A continuación, la figura 5.23 (Sax, 1974) expone de manera comparativa la eficiencia de colección de los principales equipos.

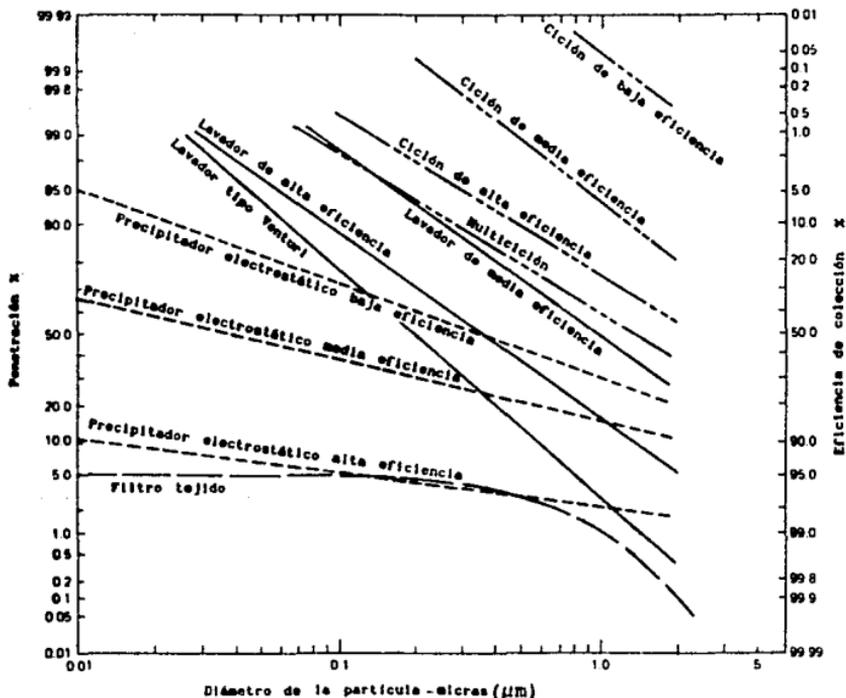


Figura 5.23 Eficiencia de colección de diversos equipos de control

## 5.2 Equipo para separar gases

Como se mencionó al inicio del capítulo, los contaminantes de un efluente pueden ser partículas o gases, pero es común que se presenten ambos. Aunque se antoja un método que separe en una sola operación las partículas y los gases contaminantes, no siempre se puede hacer esto, por lo que se tiene que hacer en forma aparte. Para separar los gases contaminantes, es común emplear métodos químicos, que implican un costo elevado del tratamiento del efluente, debido a que se tiene que manejar todo el volumen del gas, aún cuando la parte que interesa retirar sea de sólo algunas ppm\*. Esto contrasta con los principios para retirar partículas suspendidas que son puramente físicos y con costos de operación relativamente bajos. Sin embargo, se puede observar que mecánicamente los dispositivos son iguales en los dos casos, a excepción de los incineradores. En seguida se mencionan las técnicas y los equipos convencionales más utilizados.

### 5.2.1 Lavadores o depuradores

Es una práctica común utilizar agua como líquido absorbente, debido a todas las ventajas que tiene sobre cualquier otro compuesto químico. El lavado con agua se lleva a cabo con diferentes tipos de aparatos de contacto, siendo es un método muy usado para materiales como cloruro de hidrógeno, acetona, fluoruro de hidrógeno, tetrafluoruro de silicio y amoníaco, que son muy solubles en agua. La mezcla resultante es un ácido, una base o un compuesto orgánico que finalmente se neutraliza o se recupera por destilación. Sin embargo, este método puede traducirse en un problema de contaminación de agua si no se cuenta con el tratamiento posterior adecuado, porque podrían existir reacciones en la descarga a un cuerpo de agua o al alcantarillado.

\* partes por millón de volumen

Los aparatos utilizados en la mayoría de los procesos industriales son de cuatro tipos principalmente: torres de rociamiento, columnas de placas, columnas empacadas, torre de burbujeo. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

**Torres de rociamiento.** Se utilizan principalmente para disminuir la temperatura del efluente, pero como no son muy eficientes, se utilizan poco para la absorción de gases. En la figura 5.24 (McCarthy, 1979) se ilustra una de estas torres. Aquí se nota la semejanza con la cámara de sedimentación húmeda para partículas.

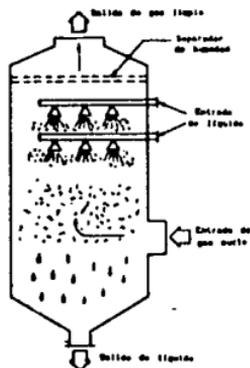


Figura 5.24 Torre de rociamiento

**Columnas de placas o de choque.** Es lo mismo que un lavador de choque para partículas, con la variante de que utilizan un líquido absorbente para separar algún gas en especial. Se ocupan cuando la cantidad de reactivo de que se dispone es pequeña. El modelo más usado es el de casquetes de burbujeo. En la figura 5.25 (Ross, 1974) se ilustra un dispositivo con las partes que lo forman.



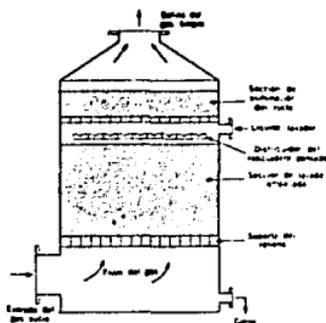


Figura 5.26 Columna rellena o empacada

**Torre de Burbujeo.** Estos equipos consiguen un mejor contacto líquido-gas al inducir un burbujeo. Para conseguir esto, se coloca una cierta cantidad de perlas (por ejemplo, vidrio) sobre el piso interior de malla. Después se hace pasar el gas, previamente rociado de líquido absorbente, en forma ascendente para que se vea obligado a pasar entre las esferillas y lograr así el contacto deseado. El aire limpio es deshumidificado y expulsado por la parte superior, mientras que el gas absorbido se acumula en el líquido. En la figura 5.27 (Ross, 1974) se puede apreciar el efecto de burbujeo y se nota que es idéntico al lavador de lecho fluidizado para partículas.



Figura 5.27 Torre de burbujeo

### 5.3. Tratamiento por combustión

La destrucción de un gas, partículas o vapor contaminante por medio del proceso de combustión se llama incineración. Los dispositivos utilizados reciben genéricamente el nombre de *Incineradores*.

Los incineradores tienen la finalidad de transformar los hidrocarburos y partículas que acompañan al efluente, por medio de la combustión, en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua y calor. Este método es el más utilizado actualmente para la destrucción de vapores orgánicos insolubles en agua.

Existen diferentes técnicas de tratamiento de gases derivadas de la combustión en diferentes modalidades (Lund, 1971; Ross, 1974; Renko, 1987): *Postquemador común, convertidor catalítico, oxidante térmico recuperativo y oxidante térmico regenerativo.*

*Postquemador común.* A través de una flama directa se realiza la incineración de los contenidos nocivos que lleva el gas. Usualmente se realiza a  $750^\circ\text{C}$  durante 0.5 segundos. El equipo es relativamente económico y fácil de instalar, pero consume 200% más combustible que los otros sistemas de incineración. Es adecuado para aplicaciones de baja producción, o sea, que requieran limpiar menos de  $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$  de aire. La figura 5.28 (Renko, 1987) muestra un posquemador ordinario.

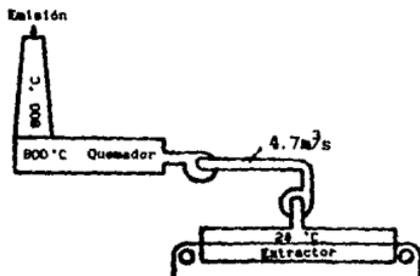


Figura 5.28 Postquemador común

**Convertidor catalítico.** Los gases cargados de hidrocarburos son llevados por un ventilador a la sección de precalentamiento en donde su temperatura se eleva a 360 °C máximo. De ahí se pasa por una sección que contiene un catalizador, el cual es capaz de oxidar térmicamente los vapores orgánicos. Este sistema es más eficiente que un postquemador y también es simple en su funcionamiento. Se recomienda para efluentes con baja concentración de solventes. El catalizador se deteriora por partículas, metales pesados y siliconas. La figura 5.29 (Renko, 1987) es un diagrama de este equipo.

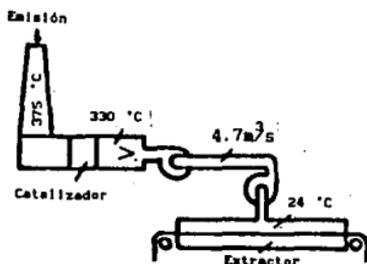


Figura 5.29 Convertidor catalítico

**Oxidante térmico recuperativo.** Este dispositivo oxida los gases emitidos en una cámara de combustión a 800 °C y antes de expulsarlos, los lleva a un intercambiador de calor indirecto de armadura y tubos, que funciona como precalentador de la cámara, reemplazando de esta manera el combustible requerido para la combustión. En la figura 5.30 (Renko, 1987) se muestra el circuito de los gases y la disposición del intercambiador de calor (precalentador).

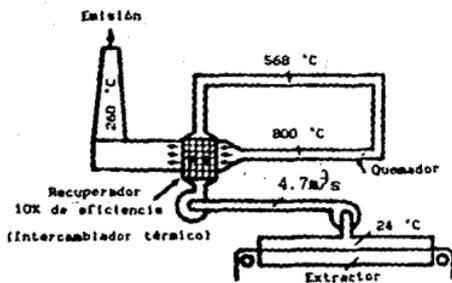


Figura 5.30 Oxidante térmico recuperativo

**Oxidante térmico regenerativo.** Los gases oxidados provenientes de la cámara de combustión pasan a través de una sección porosa de transferencia de calor, almacenando el 95% de la energía por conducción en millones de elementos cerámicos no reactivos. Mediante el uso de válvulas, se logra un ciclo continuo alternante de almacenamiento y liberación de calor en el espacio de tres secciones receptoras, que permiten un flujo ininterrumpido del gas sucio, a través del sistema. Este proceso es sencillo y confiable; requiere de poco o ningún combustible (5% del usado en la combustión normal), incluso cuando los niveles de hidrocarburos en el efluente son próximos a cero. En la figura 5.31 (Renko, 1987) esquematiza este sistema.

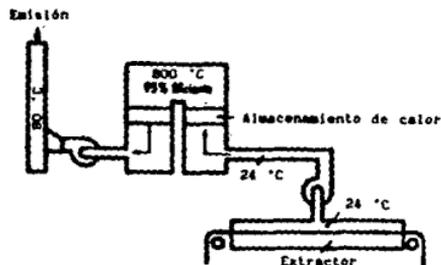


Figura 5.31 Oxidante térmico regenerativo.

Un caso particular en el manejo de un efluente es el uso de chimeneas. Aunque es evidente que de ninguna forma es un dispositivo de control de la contaminación, se usan las chimeneas altas como una herramienta (Seinfeld, 1978) para reducir la concentración, al nivel del suelo, de sustancias tóxicas extraordinariamente caras o difíciles de tratar. Esto es debido a que descargando a una altura considerable, se consigue la suficiente dispersión de los contaminantes, para que cuando llegen al piso, a una distancia alejada a la fuente, no rebasen la concentración tolerada. Por esta razón, deberán tenerse en cuenta de manera destacada los factores meteorológicos y topográficos de la región antes de optar por esta alternativa. En la figura 5.32 (Williamson, 1973) se ilustra una chimenea y la dispersión de los contaminantes.

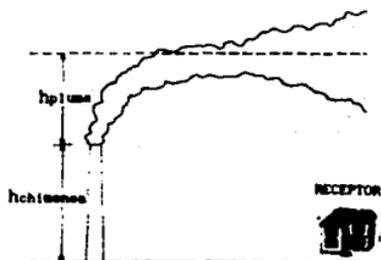


Figura 5.32 Chimenea típica

#### 5.4 Costo de la contaminación

El objetivo fundamental de un estudio de la contaminación atmosférica, es el de llevar a cabo su control en las fuentes de emisión y reducir con esto, las concentraciones de contaminantes al aire. De no ser así, se cae en consecuencias como las afectaciones al medio mencionadas en el capítulo dos, y otra importante que es el costo económico de la contaminación del aire.

En forma global, expresamos el costo de la contaminación como la suma del costo de los daños que causa, más el costo del control de emisiones. Cada uno de los anteriores costos los podemos desglosar

como lo muestra la tabla 5.4.

Tabla 5.4 COSTO DE LA CONTAMINACIÓN

Costo de los daños
Tangibles: deterioro de materiales, bienes, cosechas y equipos. Limpieza de la suciedad.
Intangibles: irritación de ojos y nariz, disminución de la visibilidad.

Costo de control
Directos: compra de equipo, instalación operación y mantenimiento.
Indirectos: cierre por clausura, necesidad de trasladar la planta a otro sitio.

Adaptado de: Seinfeld, 1978

Si representamos gráficamente estos costos, en un sistema costo contra nivel de contaminación, obtenemos lo que se ilustra en la figura 5.33 (Seinfeld, 1978), en donde se observa que una mala cantidad de aire viene acompañada de un alto costo de daños (recta d), mientras que para una calidad satisfactoria de aire, ocurre lo contrario: un bajo costo de daños y un alto costo de control (recta b). Podemos también notar, que hay un punto donde el el costo total es el mínimo, y coincide exactamente en el punto en que se tiene el menor daño al menor costo.

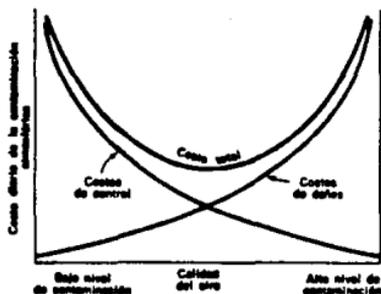


Figura 5.33 Costos de la contaminación

### 5.5 Diseño del sistema de control de partículas

Para lograr un diseño efectivo del sistema de control de emisiones es necesario conocer, al menos, los factores considerados en la tabla 5.5 siguiente:

Tabla 5.5 PARÁMETROS CLAVE PARA ELEGIR UN DISPOSITIVO DE CONTROL

En general		
Eficiencia de colección deseada	Requerimiento de energía	
Limitaciones legales	Disponibilidad de espacio y peso	
Tecnología disponible	Materiales de fabricación	
Costo inicial	Confiabilidad	
Vida útil	Garantía del fabricante	
Valor de salvamento	Disposición de los contaminantes	
Efluente		
Temperatura	Densidad	Corrosividad
Presión	Viscosidad	Flamabilidad
Humedad	Punto de rocío	Toxicidad
Proceso		
Gasto de emisión y velocidad		
Variaciones en el flujo		
Concentración de los contaminantes		
Caída de presión permisible		
Contaminante gaseoso		
Corrosividad	Flamabilidad	
Toxicidad	Reactividad	
Contaminante en partículas		
Tamaño y distribución	Aglomeración	
Forma	Corrosividad	
Abrasividad	Higroscopia	
Adherencia	Flamabilidad	
Toxicidad	Resistividad eléctrica	
Reactividad		

Adaptado de: Stern, 1984

La selección óptima del equipo de control requerirá de un análisis detallado de los factores mencionados. Esto significa

que se debe conocer lo siguiente: las limitaciones legales de emisión de contaminantes, que fijarán los valores permisibles para cada proceso; la tecnología apropiada para el caso que se trate (partículas y/o gases); la confiabilidad del equipo, en su funcionamiento; la disponibilidad de energía, agua, reactivos y espacio necesario; la garantía, refacciones o repuestos y servicio del fabricante; el costo inicial de la inversión, su operación y mantenimiento; la disposición o confinamiento de los contaminantes retirados y la eficiencia de colección requerida. Para esta última, se necesitan conocer las características particulares del efluente, como el gasto, presión y temperatura, humedad, corrosividad, variaciones en el flujo y caída de presión permisible a la salida del proceso. En lo que concierne a los contaminantes, se debe determinar su concentración en el efluente del proceso, corrosividad, flamabilidad, toxicidad y reactividad, y si son partículas, el tamaño, forma, abrasividad, higroscopia y las demás que se indicaron en la tabla 5.5. Para determinar varios de estos parámetros, es necesaria la parte de muestreo en fuente, que se toca en el capítulo cinco de este trabajo.

## 6. FUENTES INDUSTRIALES DE EMISION

### 6.1 Elementos de los procesos industriales

En forma general, cualquier proceso industrial se describe en términos de las siguientes partes: una *entrada* de insumos, que según el caso puede tratarse de materia prima virgen o de materiales secundarios de otro proceso precedente; la *planta*, o sea las operaciones utilizadas en la producción de un artículo, material o satisfactor bajo un método o técnica apropiado y específico para cada caso; una *salida* que es el producto o bien que deseamos obtener y dos elementos más sobre los que versa este trabajo: los *efluentes gaseosos controlados* y los *no controlados*. Estas descargas- controlados o no- podrán tener una parte que se considera *deshecho* y otra llamada *residuo* que bien puede ser el insumo de otro proceso posterior. En la figura 6.1 se ilustra la representación general de un proceso industrial.

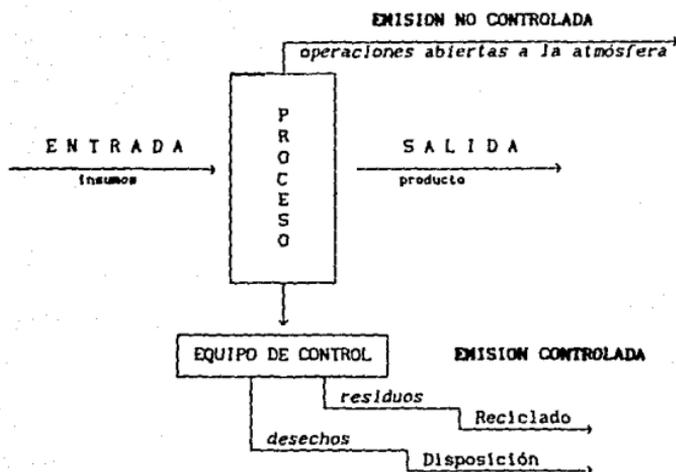


Figura 6.1 Proceso Industrial

El tratar de alcanzar algún género de sistematización en el estudio de los procesos industriales (Badger, 1970), condujo a reconocer que muchos procesos tienen operaciones y técnicas comunes, que se basan en los mismos principios fundamentales.

Poniendo atención en la parte correspondiente a la *planta*, se observa que disponiendo de una agrupación general de *operaciones industriales* es posible construir cualquier proceso, eligiendo un conjunto de ellas.

En esto se apoya este trabajo, pues de esta manera se propone una metodología general que abarca cualquier industria y así se tiene una forma de detectar las partes dentro de la planta que representen la posibilidad de ser fuentes de emisión de algún contaminante en particular. En la figura 6.2 se desglosa el interior de la planta de un proceso cualquiera.

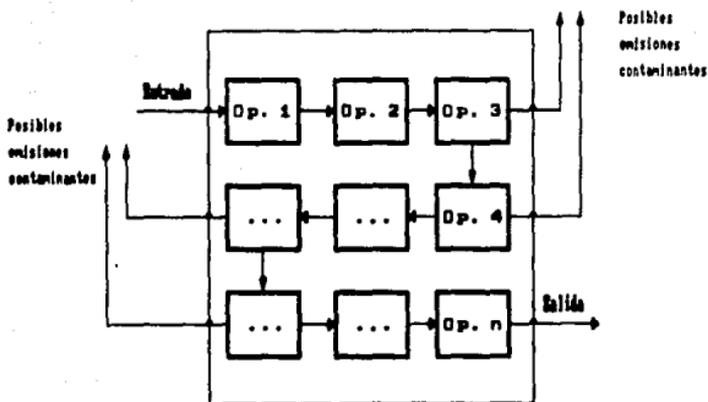


Figura 6.2 Operaciones que conforman una planta

## 6.2 Operaciones industriales

El concepto de operación unitaria se estableció formalmente por el Dr. Arthur Little, en 1915 (Foust, 1987). Con esta idea, se hizo la distinción entre las *operaciones unitarias* y los *procesos unitarios*. En las primeras se aplican principios meramente físicos y en las segundas intervienen reacciones químicas.

Actualmente ambas se engloban en la descripción de los *fenómenos de transporte* dada por Byron en 1960, y que abarcan los tres siguientes grupos fundamentales (Badger, 1970):

- Fenómenos de transferencia de masa
- Fenómenos de transferencia de calor
- Fenómenos de transferencia de momento

Sin embargo, y por lo expuesto en el apartado anterior, para los propósitos de este trabajo se usan las operaciones unitarias y los procesos unitarios como tales, englobándolos como *operaciones industriales*. Las recopiladas para este trabajo se listan en el apéndice B de esta obra.

De igual forma, así como hay similitudes dentro de las partes de un proceso, en cuanto a operaciones, existen similitudes entre los contaminantes que se producen. Relacionando los contaminantes con las operaciones, dentro de un esquema general de procesos, se encontrarán los posibles contaminantes para cualquier proceso, y si además relacionamos el equipo de control recomendado para tal operación o tal contaminante, se tiene una lista de equipos recomendados para determinada actividad, con lo que se tendría una primera aproximación a la solución del problema de emisión de contaminantes.

Para ilustrar lo anterior, la tabla 6.1 contiene procesos típicos de fabricación, "construidos" a partir de las operaciones que se mencionan.

Tabla 6.1 PROCESOS COMUNES DE FABRICACIÓN

Procesos de fabricación	Operaciones Unitarias de algunos procesos														
	Flujo de fluidos	Transferencia de calor	Evaporación	Humidificación	Destilación	Secado	Mezclado	Clasificación	Sedimentación	Filtración	Tamizado	Cristalización	Centrifugado	Desintegración	Manejo de materiales
Vidrio y cerámicos	●	●				●	●	●	●	●	●			●	●
Fertilizantes	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Explosivos	●	●		●	●	●	●			●	●	●	●	●	●
Cemento	●	●				●	●	●	●	●	●			●	●
Pinturas y barniz	●	●	●			●	●	●	●	●	●			●	●
Pulpa y papel	●	●	●	●		●	●		●	●	●			●	●
Rayón	●	●	●	●	●	●	●			●	●			●	●
Jabón	●	●	●			●	●		●					●	●

Tomado de: Olive, 1944

De la misma manera, se pueden relacionar cada uno de esos procesos con los contaminantes que puede producir, a partir de una lista general de sustancias, aplicándose lo mismo para los diferentes equipos de control.

### *6.3 Clasificación de las fuentes industriales de emisión*

Como se mencionó en el capítulo uno, en la zona metropolitana de la ciudad de México se alojan cerca de 33,380 mil industrias (Garza, 1987) que producen el 23% de la contaminación atmosférica y aunque próximamente se adoptará la clasificación de la EPA, actualmente se agrupan dentro de alguno de los siguientes giros (Páramo, 1990):

- Refinación del petróleo
- Plantas termoeléctricas
- Industria química
- Celulosa y papel
- Cemento
- Azucarera
- Hulera
- Asfalto
- Metales no ferrosos

Próximamente en la legislación mexicana se adoptarán como modelo, varios de los trabajos propuestos por la Environmental Protection Agency, como la clasificación de fuentes industriales de emisión (EPA, 1985) y que es diferente a los giros que maneja la Secretaría de Comercio de los EUA. La tabla 6.2 contiene las divisiones mencionadas. Para más detalle, consúltese la tabla 2.2 del capítulo dos.

Tabla 6.2 FUENTES DE EMISIÓN INDUSTRIAL, SEGÚN LA EPA

---

Fuentes de Combustión Externa
Disposición de Residuos Sólidos
Máquinas de Combustión Interna
Fuentes de Baja Evaporación
Industria Química
Industria de Agricultura y Alimentos
Industria Metalúrgica
Industria de Productos Minerales
Industria del Petróleo
Industria de Productos de Madera
Fuentes Misceláneas

---

Tomado de: EPA, 1985

#### 6.4 Metodología de estudio para un proceso contaminante

El objetivo fundamental de esta tesis es proponer una metodología para estudiar los posibles puntos de emisión dentro de un proceso cualquiera y recomendar el uso de un equipo de control convencional. La secuencia se encuentra en un programa que maneja bases de datos con la información apropiada sobre los rubros que se exponen a continuación.

**Industrias.** Agrupa 36 actividades industriales, según los diferentes giros que se mencionaron en la tabla 6.2.

**Operaciones.** Reune las operaciones y procesos unitarios utilizados en las industrias anteriores.

**Control.** Recoge los equipos de control recopilados en el capítulo cinco.

**Contaminantes.** Contiene los diversos tipos de contaminantes potenciales encontrados para cada proceso industrial.

**Información.** Cita lo referente a las Normas Técnicas Ecológicas, de acuerdo a la actividad industrial que se trate.

En forma gráfica, la figura 6.3 esquematiza lo anterior.

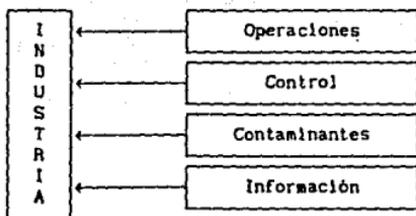


Figura 6.3 Análisis de un proceso industrial

### 6.5 Descripción del programa elaborado

La secuencia con que funciona el programa CONTAMIND es como sigue:

1. Se selecciona un giro industrial en el menú principal.
2. Se escoge un proceso de fabricación de los que se presentan, quedando una esquema como el que aparece en la figura 6.3.
3. Se presenta un nuevo menú interactivo con las opciones de:
  - a) listar las operaciones industriales que conforman el proceso (entrada por proceso).
  - b) listar los contaminantes posibles de emitirse.
  - c) desplegar el máximo permisible de emisión de cada contaminante en los casos de ejemplo.
  - d) visualizar los diferentes equipos de control de emisiones que se recomiendan para ese proceso en particular.
  - e) obtener un reporte en papel de lo consultado.
4. Dentro del menú principal existe una opción para

consultar cualquier t3pico (entrar por un tema espec3fico) y ver la relaci3n que guarda con los otros temas. Por ejemplo si se entra por "control", se escoge un equipo de control que se quiera consultar y luego el men3 dar3 la opci3n de consultar su relaci3n con el "proceso donde se presenta", las "operaciones donde aparece" y "los posibles contaminantes", adem3s de alguna "informaci3n complementaria", de la forma que se ilustra en la figura 6.4.

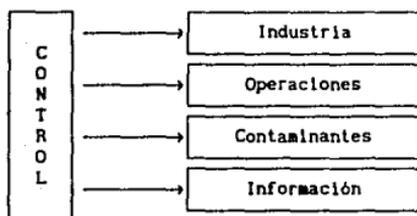
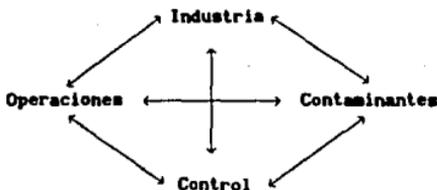


Figura 6.4 Estudio del t3pico "contaminantes"

Las relaciones que se mencionan son del tipo mostrado a continuaci3n.



## 6.6 Características del programa CONTAMIND

La metodología mencionada se programó en el manejador de bases de datos "Clipper". Se seleccionó por ser rápido y de gran capacidad, por admitir rutinas hechas en lenguaje C o en ensamblador, para ampliaciones futuras del programa, y además porque genera un código ejecutable (e indecifrado: confidencialidad del software) por cualquier computadora personal que reúna las siguientes características:

- PC AT, XT o cualquiera que sea 100% compatible con IBM, con un mínimo de 256 kb en la memoria principal.
- Sistema Operativo MS-DOS versión 2.0 o superior.
- Monitor monocromático o de color.
  
- Opcionalmente, una impresora con puerto paralelo y un "ratón" adecuadamente instalado.

El algoritmo consta de un programa principal que controla a otras subrutinas: selección de un proceso de producción específico, consulta a industrias y operaciones, consulta a contaminantes y equipos de control, impresión parcial, impresión total, textos de ayuda y carátula de presentación.

Las bases de datos son cuatro con sus respectivos archivos de texto y están designadas según la información que manejan. El diseño de su estructura esta especialmente formulada y organizada para asignar, en forma exacta e individual, el conjunto de operaciones emisoras de contaminantes, equipo de control e información para cada proceso.

En todos los menús se encuentran disponibles ventanas de ayuda para auxiliar al usuario en el manejo del programa e indicarle lo que podrá encontrar en cada uno.

El programa ejecutable se proporciona en discos flexibles de 5 1/4 pulgadas del tipo ordinario. El usuario tiene la opción de correr el programa en la unidad "A" de la computadora ó

instalarlo en la unidad "C", auxiliandose de un programa de instalación que se incluye.

A continuación se listan los programas que debe contener cada disco para el correcto funcionamiento de C O N T A M I N D.

\*\*\*\*\* DISCO # 1 \*\*\*\*\*

LEEME.DOC	Contiene una pequeña introducción acerca del programa C O N T A M I N D.
INSTALA.BAT	Archivo de utilería para la instalación de CONTAMIN.EXE en el disco duro.
INSTALA.AYU	Texto auxiliar de INSTALA.BAT
CONTAMIN.EXE	El programa C O N T A M I N D

\*\*\*\*\* DISCO # 2 \*\*\*\*\*

INSTALA.BAT	Archivo de utilería para la instalación de las bases de datos en el disco duro.
PROCESO.DBF	Contienen la información referente a los procesos industriales.
PROCESO.DBT	
OPS.DBF	Contienen la información referente a las operaciones que intervienen en cada proceso.
OPS.DBT	
CONTAM.DBF	Contienen la información referente a los contaminantes producidos.
CONTAM.DBT	
EQCONTRL.DBF	Contienen la información referente a los equipos de control utilizados.
EQCONTRL.DBT	

### 6.7 Instructivo de uso

El programa inicia con un menú principal que proporciona las opciones de seleccionar un proceso según la agrupación de fuentes industriales que maneja la EPA, mencionados en la tabla 6.2 ó directamente cualquiera de los tópicos registrados en la bases de datos. En ambos casos se cuenta con un menú de interacción con el usuario que permite obtener cada una de las relaciones

disponibles, así como información adicional de los temas de procesos, equipos de control y contaminantes. Se tiene la posibilidad de tener un reporte impreso de la consulta a cada tema.

A través de un sencillo manejo de las teclas del cursor, o el uso de un ratón es posible recorrer CONTAMIND.

El compilador Clipper permite las siguientes facilidades en el teclado para guiar el cursor, mostradas en la tabla 6.3:

Tabla 6.3 TECLAS DE NAVEGACION

Tecla	Propósito
Flecha sup. o Ctrl-E	Mueve hacia arriba un renglón
Flecha inf. o Ctrl-X	Mueve hacia abajo un renglón
Flecha izq. o Ctrl-S	Mueve el cursor a la izq.
Flecha der. o Ctrl-D	Mueve el cursor a la der.
Inicio	Vá al comienzo de la lista
Fin	Vá al final de la lista
Ctrl-Inicio	Se sitúa en el comienzo de la lista
Ctrl-End	Llega al final de la lista
RePag	Retrocede varias líneas
AvPag	Avanza varias líneas
Esc	Regresa a la pantalla anterior
Intro ó "Return"	Ejecuta la opción

Tomado de: Nantucket, 1987

Una vez que se está ejecutando CONTAMIND, el manejo de archivos permite relacionar entre sí los siguientes rubros:

ACTIVIDADES INDUSTRIALES  
OPERACIONES que intervienen  
CONTAMINANTES potenciales  
EQUIPO DE CONTROL recomendado.

El menú principal muestra dos alternativas de realizar la consulta:

A). En "SELECCION DE LA ACTIVIDAD" se escoge alguno de los procesos de fabricación almacenados en las bases de datos y

ordenados según la fuente industrial. Después se lista su relación con las OPERACIONES, los CONTAMINANTES y los EQUIPOS DE CONTROL.

B). En "CONSULTA GENERAL" es posible acceder a cualquier tópico de los recopilados y observar su relación con los rubros anteriores.

La figura 6.5 ilustra el aspecto del menú principal en el monitor.



Figura 6.5 Menú principal de CONTAMIND

Siguiendo por el camino de "SELECCION DE LA ACTIVIDAD", encontrará la clasificación de fuentes por actividad industrial que se muestra en la figura 6.6.

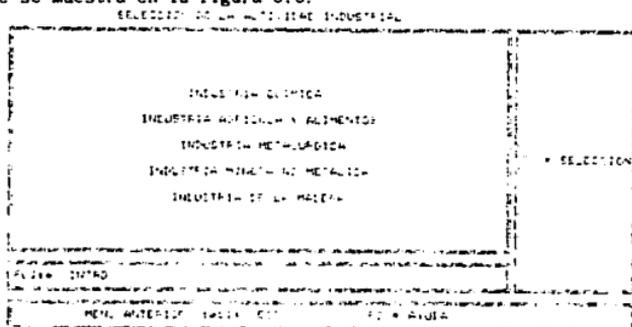


Figura 6.6 Selección de la Actividad Industrial

Si escoge "Industria minera no metálica", verá lo que aparece en la figura 6.7.

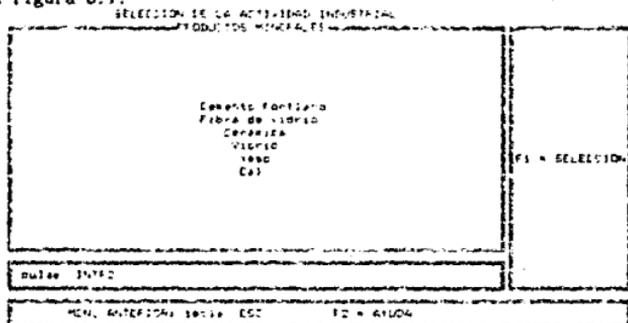


Figura 6.7 Algunas Industrias que integran la actividad minera

Después, al seleccionar un proceso de fabricación industrial, por ejemplo "Cerámica", usted podrá saber las operaciones que intervienen y los contaminantes que se producen, así como los equipos de control comerciales recomendables para disminuir las emisiones a la atmósfera, así como un texto introductorio al proceso. La figura 6.8 ilustra el menú interactivo que permite lo anterior.

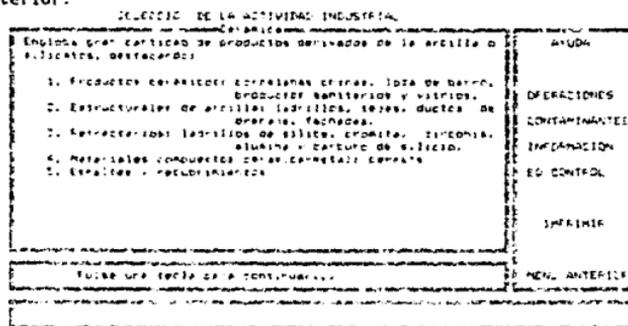


Figura 6.8 Ventana descriptiva del proceso escogido

Ahora, por el camino de "CONSULTA GENERAL", usted podrá realizar una consulta a cualquiera de los rubros que se muestran en la figura 6.9, obteniendo de esta manera, las relaciones entre los



## 7. APLICACIÓN DEL PROGRAMA. CASOS DE ESTUDIO

Las empresas tomadas como caso de estudio se escogieron por reunir las siguientes características:

1. Que tenga emisiones contaminantes a la atmósfera.
2. Encontrarse en la zona industrial del norte de la Ciudad. Esta ubicación es importante por las razones explicadas en el capítulo uno.
3. Disponibilidad de la empresa para permitir observar su proceso y facilitar información.
4. Que se encuentre documentado en la literatura.

### 7.1 Proceso de fabricación de cemento tipo Portland por vía seca.

El 17 de noviembre de 1990 se verificó la visita a la planta de Cementos Anahuac S.A., perteneciente al grupo CFMEX. Se ubica en Barrientos, Tlanepantla, en la parte norte del municipio. La planta surte principalmente al sureste del país.

El primer tipo de cemento que utilizó el hombre era el obtenido por la calcinación de roca caliza con arcilla. El proceso que se conoce actualmente lo desarrolló Joseph Aspdin, en 1824, utilizando una caliza arcillosa que tenía la coloración característica de un lugar de Inglaterra llamado "Portland", derivandose de ahí su nombre.

La composición típica del cemento comercial es la siguiente:

Caliza	64%
Silice	22%
Oxidos de aluminio	9%
Oxidos de hierro	3%
Oxidos de magnesio	2%

#### 7.1.1 Descripción del proceso

El proceso se divide en cinco partes fundamentales, que son:

1. Recepción de materia prima
2. Preparación del "crudo"
3. Molienda
4. Calcinación
5. Preparación del cemento y envase

##### 1. Recepción de la materia prima.

Las materias fundamentales para elaborar el cemento Portland son la caliza y la arcilla, que originalmente se extraían de la zona de Barrientos, donde se localiza la planta, y actualmente se abastecen de la mina "Jardín Tula", a 39 Km de la planta. La transportación se realiza por furgones de ferrocarril. Existe una leve emisión de polvos que acompañan a los fragmentos de roca.

##### 2. Preparación del "crudo".

Consiste en proporcionar a los molinos la cantidad apropiada de los componentes del cemento, según exámenes de laboratorio que se practican a la materia prima para determinar su contenido de caliza y arcilla y pruebas del producto obtenido. También se añaden los "correctores", que consisten en agregados de hierro y material silico-aluminio que proveen al cemento las características deseadas.

### 3. Molienda.

La molienda se realiza en circuito cerrado, reciclando continuamente las partículas para que alcancen el diámetro requerido. Teóricamente, cada partícula de crudo recorre 1.5 veces el circuito antes de salir. Cada molino de bolas tiene un secador a la entrada para facilitar la molienda.

En la planta cuentan con:

- 2 molinos de 40 ton/h c/u.
- 1 molino de 70 ton/h.
- 2 molinos de 180 ton/h c/u.

, para una capacidad total de molienda de 510 ton/h

### 4. Calcínación.

Para la calcínación se utilizan dos hornos "Dopol" de 2400 ton/día cada uno.

Los hornos trabajan con combustóleo todo el año.

### 5. Preparación del cemento y envase.

Una vez que se obtiene el "clinker" del horno, se procede a un nuevo ciclo de molienda de lo que ya es propiamente el cemento, agregándole los "aditivos" necesarios para el tipo de cemento que se trate. Uno de estos es el yeso, que es un compuesto usado para retardar el tiempo de fraguado. Los molinos de cemento tienen una capacidad de 380 ton/h.

Al final, el cemento es tomado de los silos de almacenamiento para su pesado y envase, quedando casi sobre los camiones que lo transportan.

En la figura 7.1 (Austin, 1988) se ilustra el diagrama de flujo del proceso.

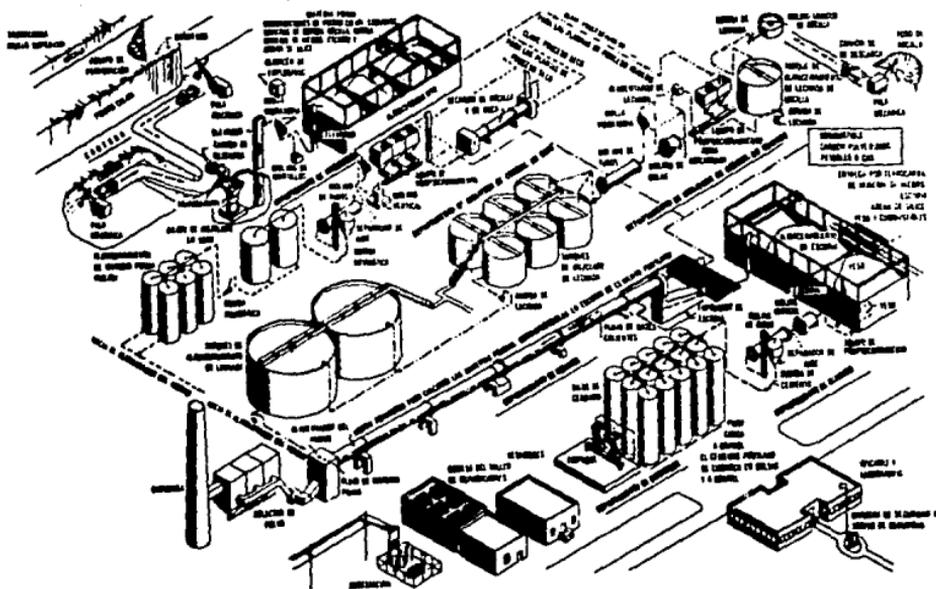


Figura 7.1 Fabricación del cemento Portland por vía seca

### 7.1.2 Utilización del programa

Una vez que el usuario se encuentra en el menú principal, se debe escoger la selección del proceso de interés. En este caso, se busca en "Actividades Industriales" el giro de *Industria Minera No Metálica*, con la opción de "Cemento Portland" que interesa. La figura 7.2 muestra esta parte de la secuencia, que es similar a la usada en el capítulo seis.

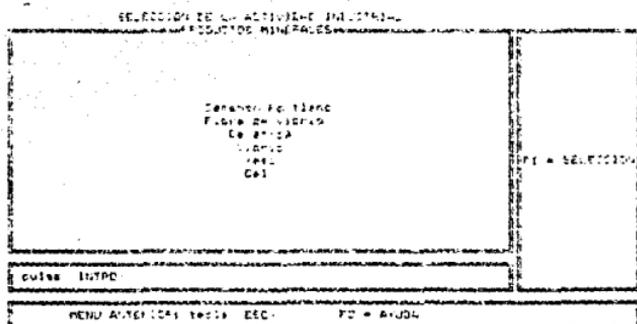


Figura 7.2 Localización de "Cemento Portland" en el programa

Al entrar a esta opción, se está en disposición de consultar cuáles son las operaciones que componen al proceso, los contaminantes que se producen, los equipos de control que se recomiendan e información adicional sobre esa actividad industrial, como cuestiones de legislación ambiental, factores de emisión o efectos sobre el medio ambiente. A continuación, las figuras 7.3 a 7.6 ilustran la consulta sucesiva.

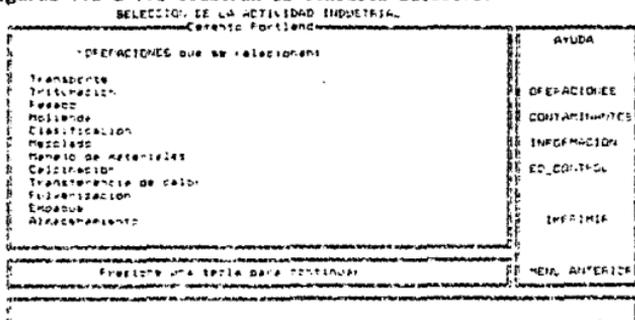


Figura 7.3 Visualización de "Operaciones"

SELECCION DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL Cemento Fortiano		AYUDA
CONTAMINANTES que se relacionan:		
Pólvo fino de carbón (CO)		OPERACIONES
Dioxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )		CONTAMINANTES
Dioxido de azufre (SO <sub>2</sub> )		INFORMACION
Partículas suspendidas (PS)		EQ_CONTROL
Hidrocarburos no aromáticos (HCN)		
Partículas de óxidos metálicos (Pb, V)		IMP-IMP
Líquido (LQ)		
Presione una tecla para continuar		MENU ANTERIOR

Figura 7.4 Visualización de "Contaminantes"

SELECCION DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL Cemento Fortiano		AYUDA
CONTAMINANTE	Horas	Horas de exposicion, etc.
Partículas suspendidas	110.4	46.0
Pólvo fino de carbón		
Por sí mismo	5.1	----
Contribucion de las	despreciable	----
Contribucion de combustibles	1.12	----
Contribucion de cemento	7.45	----
Dioxido de nitrógeno	1.2	----
Líquido	1.00	1.00
LQ de contaminante por cemento + 1 es el porcentaje de azufre en el combustible		IMPR-IMP
Presione una tecla para continuar		MENU ANTERIOR

Figura 7.5 Visualización de "Información"

SELECCION DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL Cemento Fortiano		AYUDA
EQ_CONTROL que se relacionan:		
Difusión de las		OPERACIONES
Difusión de entrada lateral		CONTAMINANTES
Filtros de bolsas		INFORMACION
Precipitadores electrostáticos		EQ_CONTROL
Presione una tecla para continuar		IMPR-IMP
		MENU ANTERIOR

Figura 7.6 Visualización de "EQ\_CONTROL"

### 7.1.3 Resultados

1). Los contaminantes que se esperan encontrar en este proceso son: partículas suspendidas, como el más importante y los productos propios de la combustión de combustóleo: SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCNM (hidrocarburos no metano), CO, Plomo, Oxidos de Vanadio y de Zinc, figura 7.4.

2). También se obtiene la tabla mostrada en la figura 7.5 que indica los valores máximos permisibles de emisión de contaminantes para cada operación (EPA, 1985). Hay que recalcar que estas tablas se tomaron de trabajos extranjeros, ya que para nuestro país no existe aún este tipo de legislación. Sin embargo, a futuro se hará algo similar en la SEDUE (Páramo, 1990).

3). De acuerdo a la información encontrada en la base de datos EQCONTRL para la fabricación de cemento Portland (figura 7.6) se indica que los equipos de control recomendados en la bibliografía (EPA, 1985) son:

Multiciclones  
Precipitadores electrostáticos y  
Filtros de bolsas,

de los cuales, todos se encuentran en la operación real de la planta.

### 7.1.4 Comentarios y conclusiones y recomendaciones particulares

#### 7.1.4.1 Comentarios

Durante la visita, se mencionó que las políticas ambientales de la empresa están dirigidas hacia los siguientes puntos:

1). La emisión de partículas representa pérdida del producto para la empresa, por lo que mantienen en buenas condiciones de operación sus equipos de control, ya que el diseño de la planta incluye el uso de filtros de bolsas, ciclones y precipitadores

electrostáticos diversos. Aunque se considera que tienen una emisión baja (0.1% de lo que se produce), por el volumen de producto es una cifra considerable. Es decir, si se producen 10,000 ton/día y de estas se emite el 0.1% resultan ser 10 ton/día de partículas que se expulsan, muchas de ellas de tamaño muy pequeño (menores de 10 $\mu$ m).

2). El cuidado del medio ambiente. Para esto, la compañía realizó una campaña para plantar árboles en la zona circundante a la planta, como forma de favorecer a los habitantes de la periferia.

#### *7.1.4.2 Conclusiones*

1). Respecto a la ubicación de la planta, inicialmente la planta estaba fuera de la ciudad (hace 50 años), por lo que no representaba un problema serio el arrastre natural de las partículas. Sin embargo, es evidente que el factor que propició la instalación en esa zona fue la existencia de las materias primas, independientemente que en esa época alguien hubiera observado las condiciones meteorológicas propiciarían el transporte de las partículas hacia la parte urbana.

2). El programa CONTAIND propuesto permitió tener una idea básica del proceso y proporcionó los datos para tener un acercamiento al problema de la contaminación industrial del aire debida a este proceso en particular.

#### *7.1.4.3 Recomendaciones*

1). Esta empresa cuenta con el equipo que se recomienda en la literatura para partículas suspendidas, sin embargo siguen teniendo emisiones por el gran volumen de materiales que maneja. Una alternativa drástica- pero no viable- es sugerir un cambio en el proceso a vía húmeda. Otra es mantener en condiciones óptimas de funcionamiento y operación el equipo de control disponible, y

otra más es instalar equivalentes con un diseño mejorado.

2). La atención primordial se le ha dado a la emisión de partículas, desatendiendo la emisión de los productos de la combustión que las acompañan. Por esta razón sería difícil tratar los gases cuando no se ha logrado retirar la materia particulada. Lo que se recomienda aquí como medida alternativa es un cambio en el combustible, evidentemente por gas natural.

### *7.2 Proceso de fabricación acumuladores de plomo*

El 11 de octubre de 1990 se realizó la visita a las instalaciones de la empresa *Diener América de México, S.A.* que se ubica en el 3060 de la autopista México-Querétaro, en Tlanepantla.

La planta es de tamaño pequeño a mediano. En ella se producen dos tipos de acumuladores para vehículos automotrices: los de plomo antimonial y los de plomo calcio. El primero es el convencional y el segundo es el llamado de "bajo mantenimiento", porque casi no se requiere reponer electrolito durante su funcionamiento.

Los acumuladores consisten de lo siguiente: un conjunto de placas positivas y negativas unidas por soldaduras de plomo, un recipiente con tapa y un electrolito, que es ácido sulfúrico diluido ( $H_2SO_4$ ). En la figura 7.7 (Jacobson, 1975) se ilustra un acumulador de plomo y sus partes.



El contaminante que se emite son vapores de plomo.

### 2. Mezclado de los componentes de las placas.

Las rejillas tienen la apariencia de una malla o parrilla a la que se le agrega una mezcla pastosa de compuestos para quedar en conjunto como una placa.

### 3. Empastado.

Estas placas individuales ya formadas se diferencian en positivas y negativas, según sea la formulación de la mezcla, que contiene óxido de plomo (que se elabora fuera de la planta), lignina, agua, ácido sulfúrico diluido, negro de humo (para la placa negativa), fibras y otros compuestos que no fueron revelados.

### 4. Curado de las placas.

En la planta, al proceso químico de oxidación del plomo se le llama "curado" y se consigue al meter los bancos de placas a un ambiente húmedo y tibio durante varios días.

### 5. Secado.

Como las placas salen húmedas después del curado, se tienen que someter a un secado, en hornos de gas L.P. con recirculación. Se tiene emisión de  $H_2SO_4$ .

### 6. Desbaste y cortado.

Se retiran excedentes de plomo en la placas y se cortan a la medida. Se tiene emisión de partículas de plomo.

#### 7. Barajeado y ensobretado.

Las placas se acomodan en conjuntos de tres en tres y se meten en un sobre de material dieléctrico. Hay emisión de material particulado de la pasta por manejo de materiales.

#### 8. Soldado.

Con los sobres se forman grupos de placas positivas y negativas intercalándolos y soldando con plomo. Existe emisión de vapores de plomo.

#### 9. Ponchado de caja.

La caja de polipropileno, que contiene a los grupos de placas, se perfora para permitir su interconexión eléctrica. Al barrenar ocurre desprendimiento de partículas de plástico.

#### 10. Sellado.

Por medio de la aplicación de calor, se fija la tapa de la caja y se pegan herméticamente las terminales o bornes de la batería.

#### 11. Inspección eléctrica y de fugas.

Se comprueba la instalación eléctrica y se prueba la hermeticidad de cada cámara de placas.

#### 12. Llenado de electrolito.

Se agrega el electrolito que requerirá durante la "carga".

### 13. Carga eléctrica.

El acumulador se somete a una corriente eléctrica con la que las placas adquirirán una diferencia de potencial después de la reacción electroquímica. Aquí existe emisión de gases de ácido sulfúrico.

### 14. Verificación del nivel de electrolito.

Al final de la carga, se repone el líquido hasta su nivel de operación.

### 15. Limpieza exterior, etiquetado, tapones y sellos.

Como parte del acabado del producto, se lavan las unidades con detergente, se etiquetan con la marca y tipo de acumulador, se colocan los tapones y se sellan con tiras de papel.

### 16. Almacén.

Los acumuladores se almacenan en la planta hasta que se embarcan. Aparentemente no están guardados tanto tiempo para producir vapores de ácido sulfúrico.

En la figura 7.8 (EPA, 1985) se ilustra el diagrama de bloques del proceso.

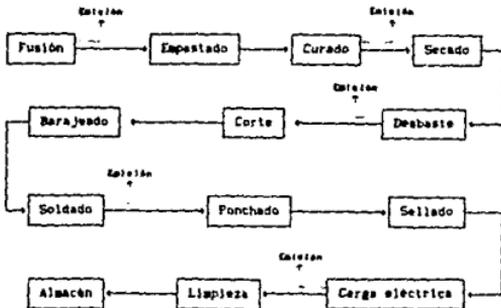


Figura 7.8 Fabricación de acumuladores de plomo

## 7.2.2 Utilización del programa

La secuencia es similar a la que se utilizó en el caso anterior. En la figura 7.9 se muestra cuando se llega al proceso "Acumuladores de plomo"

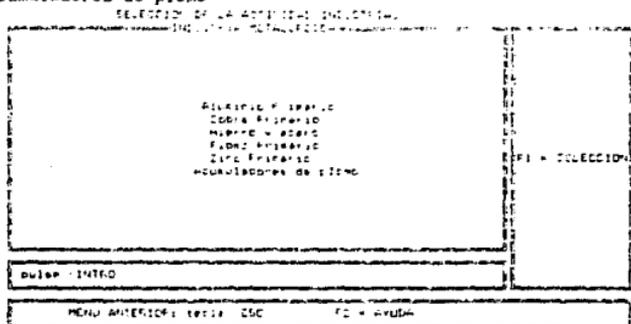


Figura 7.9 Localización de "Acumuladores de plomo" en el programa

Nuevamente, al entrar a este menú, se está en disposición de consultar las operaciones que forman el proceso, los contaminantes potenciales, los equipos de control de uso convencional y la información adicional que se proporciona. En las figuras 7.10 a 7.13 siguientes se muestra la consulta completa.

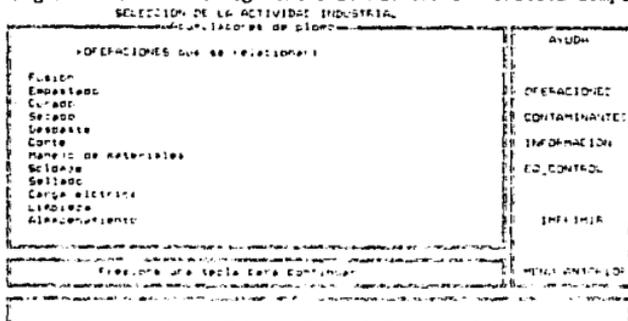


Figura 7.10 Visualización de "Operaciones"

SELECCIÓN DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL  
Acumuladores de plomo

<p style="text-align: center;">CONTAMINANTES que se relacionan:</p> <p>Marc 100 de cadenas (C)          Dosis de radiación (R)          Partículas suspendidas (PS)          Fumo (F)          Dosis de plomo          Aire acondicionado (MSDA)</p>	<p style="text-align: center;">AYUDA</p> <p>OPERACIONES</p> <p>CONTAMINANTES</p> <p>INFORMACION</p> <p>EQ_CONTROL</p> <p>IMPRIMIR</p> <p>MENU ANTERIOR</p>
Presione una tecla para continuar	

**Figura 7.11 Visualización de "Contaminantes"**

SELECCIÓN DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL  
Acumuladores de plomo

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px dashed black;">OPERACION</th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px dashed black;">P.E.</th> <th style="text-align: center; border-bottom: 1px dashed black;">Fumo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fuccion de pilillas</td> <td style="text-align: center;">1.42</td> <td style="text-align: center;">1.25</td> </tr> <tr> <td>Reciclar de la pasta</td> <td style="text-align: center;">1.96</td> <td style="text-align: center;">1.17</td> </tr> <tr> <td>Molienda del óxido de Pb</td> <td style="text-align: center;">0.05</td> <td style="text-align: center;">0.05</td> </tr> <tr> <td>Curado, secado, asbesto y corte</td> <td style="text-align: center;">42.00</td> <td style="text-align: center;">4.79</td> </tr> <tr> <td>Reciclaje del Pb</td> <td style="text-align: center;">5.03</td> <td style="text-align: center;">0.62</td> </tr> <tr> <td>Producción total</td> <td style="text-align: center;">62.20</td> <td style="text-align: center;">8.94</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(%) de contaminante/1000 acumuladores</p>	OPERACION	P.E.	Fumo	Fuccion de pilillas	1.42	1.25	Reciclar de la pasta	1.96	1.17	Molienda del óxido de Pb	0.05	0.05	Curado, secado, asbesto y corte	42.00	4.79	Reciclaje del Pb	5.03	0.62	Producción total	62.20	8.94	<p style="text-align: center;">AYUDA</p> <p>OPERACIONES</p> <p>CONTAMINANTES</p> <p>INFORMACION</p> <p>EQ_CONTROL</p> <p>IMPRIMIR</p> <p>MENU ANTERIOR</p>
OPERACION	P.E.	Fumo																				
Fuccion de pilillas	1.42	1.25																				
Reciclar de la pasta	1.96	1.17																				
Molienda del óxido de Pb	0.05	0.05																				
Curado, secado, asbesto y corte	42.00	4.79																				
Reciclaje del Pb	5.03	0.62																				
Producción total	62.20	8.94																				
Presione una tecla para continuar																						

**Figura 7.12 Visualización de "Información"**

SELECCIÓN DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL  
Acumuladores de plomo

<p style="text-align: center;">EQ_CONTROL que se relacionan:</p> <p>Filtros de bolsas          Torres empacadas</p>	<p style="text-align: center;">AYUDA</p> <p>OPERACIONES</p> <p>CONTAMINANTES</p> <p>INFORMACION</p> <p>EQ_CONTROL</p> <p>IMPRIMIR</p> <p>MENU ANTERIOR</p>
Presione una tecla para continuar	

**Figura 7.13 Visualización de "EQ\_CONTROL"**

### 7.2.3 Resultados

1). Los contaminantes que se esperan encontrar en este proceso son: plomo y óxidos de plomo, como los más importantes, partículas suspendidas (plomo, pasta, polipropileno), vapores de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y los productos de la combustión de gas L.P.: CO y  $NO_x$ , principalmente, figura 7.11.

2). De igual forma que en caso anterior, se obtiene la tabla mostrada en la figura 7.12 que indica los valores máximos permisibles de emisión de contaminantes para cada operación (EPA, 1985). Recordar que estas tablas se tomaron de trabajos extranjeros a manera de ejemplo, debido a la escasez de información en México.

3). La información encontrada en la base de datos EQCONTROL para la fabricación de acumuladores de plomo, figura 7.13, indica que los equipos de control aconsejados en las "fuentes" bibliográficas (EPA, 1985) son:

Filtros de bolsas y  
Torres empacadas,

de los cuales, sólo se cuenta con un filtro de bolsas para las operaciones 6, 7, 8 y 9 y dispositivos de extracción de gases en los hornos, que van directamente a la atmósfera.

### 7.2.4 Comentarios y conclusiones y recomendaciones particulares

#### 7.2.4.1 Comentarios

1). Se observó que en la empresa no existen políticas ambientales, debido a que la SEDUE no restringe sus emisiones por no haber una norma de descarga para el plomo o sus compuestos.

2). Las pérdidas de materia de proceso no representan un parámetro de control de emisiones.

3). Las repercusiones de la contaminación del aire mas bien se presentan en la salud ocupacional de los empleados, pues es frecuentemente la indisponibilidad de obreros e incapacidades por cuestiones médicas (esto con su debidas reservas).

#### 7.2.4.2 Conclusiones

1). Aunque la planta no es grande, es muy probable que esté emitiendo plomo, que es muy dañino aún en cantidades pequeñas, siendo su dispersión favorecida por las condiciones meteorológicas del valle, y su destino, la ciudad, por la localización de la fuente, debido a que esta fabrica se ubica en el municipio de Tlanepantla, al norte de la ZMCM, muy cerca de Ciudad Satélite, que es una zona urbana muy poblada.

2). Al igual que en caso anterior, el programa CONTAMIND permitió tener una idea básica del proceso y proporcionó datos para tener una aproximación al problema de la contaminación del aire en este segundo proceso de fabricación abordado.

#### 7.2.4.3 Recomendaciones

1). Los hornos de fundición de plomo y de secado descargan a la atmósfera directamente, a 3m sobre el nivel del piso, ya que no existe norma para el plomo que restrinja sus emisiones, por tanto, legalmente "no estan contaminando". Esto hace necesaria la existencia inmediata de una legislación apropiada para este tipo de contaminantes y otros más que no se contemplan actualmente. Sin embargo cabe mencionar que se ha dado el primer paso al publicar los factores de emisión para quema de combustibles en las Normas Técnicas Ecológicas para los combustibles usados en la ciudad por fuentes industriales y domésticas.

2). Se tiene un sistema de ventilación con filtro de bolsas para las operaciones 6, 7, 8 y 9 productoras de particulas por manejo

de materiales, que no es tan grave si se compara con el problema de los hornos de fundición, en cuanto a la toxicidad.

3). Para atenuar la emisión de plomo gaseoso y sólido, se recomienda la instalación de equipos de control en los hornos de fusión y de secado.

4). La combustión de gas L.P. en la planta no se considera problemática porque es un combustible relativamente limpio y el volumen de consumo no es muy grande.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS GENERALES

### *Comentarios a este trabajo*

1). Descomponer un proceso en sus operaciones no es nada nuevo. En cambio, identificar la relación entre el tipo de emisión y la operación industrial, conlleva a la reunión de información especializada que se puede sistematizar mediante un programa de cómputo apropiado, através del manejo de bases de datos.

2). El problema de la contaminación del aire es muy extenso, tanto a mundial como regional. Por esa razón se consideró importante referirse a este partiendo de lo más general (contaminación global), hasta llegar a nivel nacional en México y luego al caso particular del D.F., donde el problema es mayor, y a la vez se tiene más información.

3). Por lo que concierne a este trabajo en conjunto, se considera que cubrió el basamento teórico, ya que se habla de la información existente para el Valle de México, el monitoreo en fuente, los conceptos de contaminación atmosférica, los equipos convencionales de control y una descripción básica de los procesos tratados. No se hizo énfasis en la descripción de las operaciones ni procesos unitarios ni de la mecánica de fluidos en los equipos o en la atmósfera, ya que no se consideró imprescindible para la descripción preliminar que se busca.

4). La parte fundamental de este estudio es la relación de los procesos de fabricación con las operaciones industriales que utilizan, los contaminantes que se producen y la recomendación de los equipos de control recomendados para caso. Inmediatamente después sigue el diseño del equipo de control que evidentemente requiere de un estudio profundo aparte. Esto significa un tratamiento del particular con base en datos reales de los parámetros listados en el capítulo cinco.

5). En los casos de estudio, originalmente se planteó buscar empresas que no contaran aún con equipo de control de emisiones o que no estuvieran familiarizados con el problema de la contaminación industrial del aire, buscando que el programa fuera de utilidad real. Pero no fue accesible alguna visita por el temor de ser sancionadas por SEDUE al publicarse información o datos comprometedores en esta tesis.

#### *Conclusiones generales*

1). La descripción de cualquier proceso industrial es tan complejo como se quiera profundizar. Sin embargo, se notó un tratamiento más amplio en los casos que se tomaron como estudio, en comparación con todos los demás.

2). El estudio de cualquier operación industrial lleva a un conocimiento amplio del equipo, sus principios de funcionamiento, materiales de construcción, fenómenos de transferencia, etc., por lo que no se trataron en este planteamiento.

3). Es importante señalar la futura ampliación del programa, dada la gran capacidad de las computadoras modernas y el cúmulo de información que se puede recopilar. Por esta razón, el presente trabajo es el inicio y la base de para posteriores de cada proceso que incluirán balances de materia, evaluación con modelos matemáticos, factores de emisión obtenidos, diseño de equipo de control, etc., a través de las subrutinas que se incorporen.

4). Como se menciona en el capítulo uno, este trabajo surge como una alternativa para acercarse al tratamiento de un proceso industrial, de acuerdo a la intención actual de abatir la contaminación atmosférica atribuible a las emisiones contaminantes en el Valle de México.

5). Este estudio es aplicable a cualquier proceso, independientemente de que se encuentre o no en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

6). La contaminación atmosférica debida a las fuentes fijas puede reducirse considerablemente mientras se tenga la información apropiada sobre los contaminantes en cada operación y así formular una recomendación de cierto equipo de control alguna corrección operativa de las mencionadas en el capítulo cinco.

7). Es importante observar que nuestro país, a diferencia de otras naciones, no se asume como algo ordinario la inversión en equipos y alternativas de control de emisiones de contaminantes como parte del proceso productivo en los análisis de costo de producción / utilidad, sino que se considera un gasto superfluo y hasta hace algunos años, innecesario, que repercute directamente sobre el costo al público del producto adquirido. Es en fechas recientes cuando realmente se está tomando en consideración la falta de dispositivos de control, y a medida que se tenga una vigilancia ambiental adecuada y la información técnica apropiada, se podrá atacar el problema.

8). Las bases de datos del programa CONTAMIND se pueden ampliar para cualquier tipo de industria, alimentando correctamente los datos necesarios.

9). El programa desarrollado se piensa distribuir a los encargados de la parte ambiental en empresas que no tengan equipos de control de emisiones instalados o que desconozcan la forma en que sus operaciones industriales se relacionan con el problema de la contaminación industrial del aire.

10). Desde su planteamiento, el propósito de este trabajo es una evaluación cualitativa de tipo didáctico, por lo que no se realizaron mediciones en fuente. No obstante, se proporcionan lineamientos útiles que deben seguirse para tales determinaciones.

11). Para los propósitos de esta tesis, se consideran cubiertos con la información obtenida, los casos de ejemplo, el programa de cómputo, las conclusiones y comentarios, tanto particulares como generales.

## BIBLIOGRAFIA

Austin, T.G., *Manual de Procesos Químicos en la Industria*, tomos I, II y III, México, McGraw-Hill, (1988).

Badger, L.W., Banchemo, T.J., *Introducción a la ingeniería química*, México, McGraw-Hill, (1970).

Bravo, H., *La Contaminación del Aire en México*, México, Universo Veintiluno, (1987).

Bravo, H A, Sosa, E R. "Evaluación y Control de la Contaminación del Aire", *Curso Introductorio sobre el Control de la Contaminación Ambiental en Refinerías de Petróleo*, División de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería (UNAM), México, (octubre de 1989).

Cavaseno, V., *Industrial air pollution engineering*, Nueva York, Chemical Engineering y McGraw-Hill, (1980).

CONADE, *Informe General de Ecología*, México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (1989).

CONADE, *Programa de Contingencias por Episodios de Contaminación del Aire (ZMCM)*, Mexico, Subcomisión de Atención a Emergencias Nacionales, (1988).

Crawford, M., *Air Pollution Control Theory*, EUA, McGraw-Hill, (1976).

Diario Oficial de la Federación, *Ley para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental*, México, Talleres Gráficos de la Federación, (marzo de 1977).

Diario Oficial de la Federación, *Secretaría de Industria y Comercio, Normas Mexicanas*, México, Talleres Gráficos de la Federación, (marzo de 1982).

Edwards, J., *Aplique el dBASE III Plus*, México, Osborne & McGraw-Hill, (1988).

EPA, *Compilation of Air Emission Factors*, volumen 1, EJA., U.S. Environmental Protection Agency, (1985).

Fuentes, G.V., García G.A., *Evaluación de la Calidad del Aire en el Valle de México*, División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería (UNAM), México, (1989).

Foust, S.A., Wenzel A.L., *et. al.*, *Principios de las Operaciones Unitarias*, segunda edición, México, Continental, (1987).

Garza, G., Aguilar, A., *et. al.*, "La Ciudad de México como centro comercial e industrial en el siglo XIX", *Atlas de la Ciudad de México*, México, DDF, (1987).

Garza, G., Aguilar, A., *et. al.*, "El crecimiento económico de la Ciudad de México durante los siglos XIX y XX", *Atlas de la Ciudad de México*, México, DDF, (1987).

Garza, G., Aguilar, A., *et. al.*, "Inicios del proceso de industrialización en la Ciudad de México", *Atlas de la Ciudad de México*, México, DDF, (1987).

Garza, G., Aguilar, A., *et. al.*, "Distribución de la industria en la Ciudad de México" *Atlas de la Ciudad de México*, México, DDF, (1987).

Haddad, R., Spittler T.M., *et. al.*, "Alternativas de Control de la Contaminación Industrial", *Control de la Contaminación Atmosférica*, División de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería (UNAM), México, (1971).

Horiba, *Annual Report*, Japón, (1989).

Jacobson, M.A., *El libro del automóvil*, novena edición, México, Reader's Digest, (1975).

Linden, E., "Get Going Mr. Bush", *Time*, EUA, Time magazine, December 18th, (1989).

Lippmann, M., Schlesinger, R., *Chemical Contamination in the Human Environment*, EUA, Oxford University, (1979).

Lund, H.F., *Industrial Pollution Control Handbook*, EUA., McGraw-Hill, (1971).

Marchello, J.M., *Control of Air Pollution Sources*, N.Y., Marcel Dekker Inc., (1976).

McCarthy, J.E., "Select the right scrubber", *Hydrocarbon Processing*, EUA, Gulf Publishing, August, (1979).

Nantucket, *Nantucket CLIPPER Manual*, EUA, Nantucket Corporation, (1987).

Olive, T.R., *The Chemical & Metallurgical Engineering Flow Sheets*, cuarta edición, EUA, Chemical Engineering, (1944).

Ortiz, M.F., "El desarrollo de la ciencia en México", *Comunidad CONACYT*, año VI, número 119-120, México, CONACYT, (1980).

Osorio y de León, I., "Algunos negocios podrían cerrar un día; no la industria", *El Universal*, México, (domingo 8 de julio de 1990).

Páramo, F.V., *Comunicación oral*, SEDUE, (14 de abril de 1990).

Parker, A., *Contaminación del aire por la industria*, España, Reverté, (1983).

Perkins, H.C., *Air Pollution*, México, McGraw-Hill, (1974).

Renko, R.J., "Sistemas para la incineración de gases" *Tecnología del plástico*, edición 22, México, (1987).

Ross, R.D., *La Industria y la Contaminación del Aire*, México, Diana, (1974).

Sancton, A.T., "Hand Across the Sea", *Time*, EUA, Time magazine, January 2nd, (1989).

Sax, N. I., *Industrial Pollution*, EUA, Van Nostrand Reinhold, (1974).

SEDUE, *Políticas y Estrategias de Abatimiento y Control de la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (1987).

SEDUE, *La Contaminación Atmosférica en el Valle de México*, México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (1988).

SEDUE, *Control de la Contaminación Atmosférica. Programa Nacional de Capacitación Ambiental*, México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (1988).

SEDUE, *Gaceta Ecológica*, volumen I, num. 1, México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (junio de 1989).

Seinfeld, J.H., *Contaminación Atmosférica. Fundamentos físicos y químicos*, España, Instituto de Estudios de Administración Local, (1978).

SMA, *Legislación Ambiental de México*, México, SSA, (1977).

Spedding, J.D., *Contaminación Atmosférica*, España, Reverté, (1981).

Stern, A.C., *Fundamentals of Air Pollution*, EUA., Academic Press, segunda edición, (1984).

Straub, C.P., *Practical Handbook for Environmental Control*, EUA, CRC Press Inc., (1989).

Strauss, W., *Air Pollution Control*, parte I, EUA, John Wiley & Sons, (1971).

Valverde, C., Aguilar, A., et. al., "Localización geográfica de la Ciudad de México", *Atlas de la Ciudad de México*, México, DDF, (1987).

Wayne, R.O., William, F.H., "A quantitative evaluation of the pollutant standar index", *APCA Journal*, volumen 26 num. 11, EUA, (noviembre de 1976).

Williamson, S.J., *Fundamentals of Air Pollution*, EUA, Addison-Wesley Publishing Company, (1973).

Zaragoza, A.J., *Comunicación oral*, SEDUE, (30 de enero de 1990).

Zinky, M., *Programming in Clipper*, Londres, Forestman & Co., (1989).