

Modelo metropolitano de gestión de la calidad del aire

Informe final

Presentado a: Dirección General de Ecología
Departamento del Distrito Federal

Por: Departamento de Ingeniería Ambiental
Departamento de Ingeniería Mecánica
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería, UNAM

Abril de 1993

Modelo metropolitano de gestión de la calidad del aire

Vicente Fuentes Gea * **
Arón Jazcilevich Diamant **
Rina Aguirre Saldivar **

Ann Wellens Purnal ***
Julio Aysa Jiménez ****
Carlos I. Rivera Solorio *****

- * Coordinador del proyecto
- ** Profesor de tiempo completo, DEPI, UNAM
- *** Alumna de la Maestría en Ingeniería Ambiental, DEPI, UNAM
- **** Alumno de la Facultad de Ingeniería
- ***** Alumno de la Maestría en Ingeniería Mecánica, DEPI, UNAM

CONTENIDO

	pag.
1. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Objetivos	6
2. MODELO DE EMISIONES VEHICULARES	7
2.1 Emisiones provenientes de la vialidad primaria	11
2.2 Emisiones provenientes de la vialidad secundaria	17
2.3 Descripción del programa de computadora	20
2.3.1 Subrutina principal EmiVehPri	23
2.3.2 Subrutina principal EmiVehSecun	28
2.4 Datos generales de los archivos	32
3. MODELO METEOROLOGICO	47
3.1 Fundamentos	47
3.1.1 Factores meteorológicos	48
3.1.2 Topografía	52
3.1.3 Ecuaciones generales	53
3.2 Modelo DWM de interpolación	54
3.2.1 Campo inicial de vientos	56
3.2.2 Efecto topográfico	56
3.2.3 Interpolación horizontal	59
3.2.4 Reducción de divergencia	60

	pag.
3.3 Adaptación del modelo para la ZMCM	62
3.3.1 Perfil vertical de viento	64
3.3.2 Caracterización de estaciones meteorológicas	72
3.3.3 Parámetros de cálculo	76
3.4 Altura de la capa de mezcla	79
3.4.1 Método directo	79
3.4.2 Método de Holzworth	80
3.5 Coeficientes de difusión atmosférica	82
3.5.1 Difusión horizontal	82
3.5.2 Difusión vertical	84
4. MODELO DE DISPERSION ATMOSFERICA.....	88
4.1 Estructura vertical.....	91
4.2 Solución numérica de la componente advectiva.	92
4.3 Solución numérica de la componente difusiva..	96
4.4 Estructura computacional del modelo de transporte atmosférico.....	103
4.5 Pruebas y evaluación preliminares.....	105
4.5.1 Pruebas del modelo de advección.....	107
4.5.2 Evaluación preliminar del modelo tridimensional.....	107
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
6.- REFERENCIAS.....	114
APENDICE A. Estructura de los archivos de entrada para el modelo de emisiones vehiculares	A1

APENDICE B. Estructura de los archivos de entrada para el modelo meteorológico	B1
--	----

APENDICE C. Caracterización de las estaciones meteorológicas	C1
--	----

LISTA DE TABLAS

2.1 Archivo de decisiones	32
2.2 Archivo de estaciones de aforo	35
2.3 Mapa de zonas de influencia de las estaciones de aforo	36
2.4 Mapa de delegaciones	40
2.5 Archivo de composición delegacional en vías primarias	39
2.6 Factores de composición por delegaciones en vías primarias	41
2.7 Información sobre las velocidades promedio por tipo de vía	43
2.8 Factores de emisión utilizados en las vías primarias	43
2.9 Fracciones de vehículos que arrancan con el motor en frío	44
2.10 Composición vehicular en la vialidad secundaria (Programa de placa permanente)	45
2.11 Factores de composición por delegaciones en vías secundarias	45
2.12 Factores de emisión para vehículos en vías secundarias.	46
2.13 Factores de corrección de las emisiones vehiculares	46
3.1 Categorías de estabilidad atmosférica	50
3.2 Angulo de dirección del viento	57
3.3 Angulo de drenaje topográfico, β	58
3.4 Insolación en función de la elevación solar	66

	pag.
3.5 Índice neto de radiación	67
3.6 Categorías de estabilidad atmosférica	68
3.7 Clasificación de los tipos de nubes	68
3.8 Longitud de rugosidad para varias superficies	69
3.9 Coeficientes a y b para la ecuación (3.22)	71
3.10 Relación entre la dirección del viento y el número de sector	73
3.11 Valores de α_k para la estación de ENEP-Acatlán	75
3.12 Valores de α_k para las diez estaciones meteorológicas de la red de monitoreo y la estación Tacubaya	75
3.13 Altura de los niveles de cálculo	76
3.14 Coordenadas UTM de las barreras consideradas	77
3.15 Coordenadas UTM de las estaciones meteorológicas	79
4.1 Tiempos relativos de cómputo entre los métodos usados para el problema unidimensional de la figura 1	97
4.2 Comparación de valores máximos y mínimos para el problema de Crowley de la figura 2.	98

LISTA DE FIGURAS

2.1 Variación vehicular por sentidos, en Viaducto Río de la Piedad	13
2.2 Diagrama de flujo para el cálculo de las emisiones vehiculares	21
2.3 Diagrama de flujo del módulo de emisiones de la vialidad primaria	24
2.4 Diagrama de flujo del módulo de emisiones de la vialidad secundaria	29
2.5 Celda que contiene varios segmentos de vías	34
2.6 Segmento de vía entre dos celdas contiguas	34
2.7 Celda que contiene una vía de doble circulación	38

2.8	Celda que contiene una vía de un solo sentido de circulación	38
3.1	Relación entre el número de datos disponibles y la eficiencia de un modelo de interpolación	62
3.2	Ejemplos de la variación del viento con la altura para terrenos de diferente rugosidad	65
3.3	Direcciones del viento	73
3.4	Entorno físico de la estación en la ENEP-Acatlán	74
3.5	Barreras consideradas en el modelo	77
3.6	Estaciones meteorológicas en la Ciudad de México	78
3.7	Variación diaria y mensual de la diferencia en temperatura en Tacubaya y en el aereopuerto de la Ciudad de México, 1979	81
4.1	Estructura vertical del modelo numérico de difusión atmosférica en tres dimensiones	90
4.2	Procedimiento para el método de selección aleatoria de un paso	95
4.3	Resultados del problema de onda en una dimensión	99
4.4	Problema de Crowley par un cuarto y revolución completa usado en el método de seleción aleatoria ...	100
4.5	Concentración con forma cónica, siendo transportada por advección y difusión	102
4.6	Diagrama de flujo del programa de transporte atmosférico en tres dimensiones	106
4.7	Prueba al programa de advección	108
4.8	Comparación de los resultados del modelo con los datos medidos para el día 22 de febrero de 1991	109

1. INTRODUCCION

Como consecuencia del crecimiento de la población y la industria en el Valle de México y del rezago en la implantación de medidas técnicas para abatir la contaminación del aire, se han incrementado de manera apreciable las concentraciones de diversos contaminantes atmosféricos en la zona, particularmente en lo que se refiere al ozono, los oxidantes fotoquímicos y el monóxido de carbono. Actualmente la región del Valle de México presenta uno de los niveles de contaminación por ozono más altos del mundo, rebasándose en mas del 70 % de los días del año la Norma Mexicana de la Calidad del Aire referente a este compuesto. Para poder evaluar la eficacia de planes y estrategias que permitan reducir los niveles de contaminación y debido la complejidad del problema, es conveniente desarrollar modelos matemáticos que permitan simular el fenómeno de la contaminación atmosférica, así como formar recursos humanos con un

conocimiento cuantitativo e integral del problema. En particular, se requiere simular el fenómeno de transporte y dispersión de los contaminantes, tomando en consideración las condiciones meteorológicas prevaletientes y las propiedades fotoquímicas de los precursores del ozono y otros compuestos oxidantes. Esto hace necesario desarrollar y aplicar procedimientos para simular los siguientes aspectos:

- a) La dispersión y el transporte de contaminantes con base en la ecuación de difusión en tres dimensiones.
- b) El campo de vientos que se establece en el Valle de México utilizando métodos de pronóstico.
- c) Las emisiones de los contaminantes precursores de los compuestos fotoquímicos a intervalos de 1 hora y con una resolución espacial de 1 kilómetro cuadrado.
- d) Los mecanismos y la cinética de las reacciones fotoquímicas que caracterizan al Valle de México.

El presente estudio contempla dos fases: Una a corto plazo, la cual abarca un período de un año , y otra a largo plazo, con una duración de dos años a partir de la culminación de la etapa inicial. En la etapa inicial, a la cual le corresponde el presente informe, se desarrollaron las herramientas de simulación adecuadas (modelos de dispersión, emisiones y meteorológico) para predecir el comportamiento de compuestos de escasa reactividad química; es decir, del monóxido de carbono. De esta manera se estudió la eficacia de dichas herramientas para simular los aspectos que determinan la generación, dispersión y el transporte de contaminantes en el valle.

Con ello se sentaron las bases para el desarrollo, en la segunda etapa, de un modelo computacional de contaminación que involucre reacciones fotoquímicas y la obtención de un campo de vientos mediante un método de pronóstico.

El modelo de dispersión se formuló tomando en consideración componentes de transporte advectivo y dispersivo en un espacio de tres dimensiones, de manera que permite conocer la evolución en el tiempo de las concentraciones de los contaminantes en cualquier sitio del área urbana de la Ciudad de México. Con el objeto de aplicar el modelo, se desarrolló un programa de computadora con códigos que permitan su transportabilidad.

El modelo de emisiones constituye una herramienta que permite generar emisiones vehiculares con una resolución espacial de 1 kilómetro cuadrado a intervalos de 1 hora, tomando en consideración el tipo de vialidades existentes en la Ciudad de México, la composición vehicular, la velocidad promedio de los vehículos y otras características que pueden modificarse fácilmente de acuerdo con las necesidades del usuario del modelo. A fin de implementar este modelo se recopiló y procesó la información referente a los flujos vehiculares y su patrón de fluctuación en una base horaria.

El modelo meteorológico además de proporcionar información que debe ser alimentada al modelo de dispersión, como es la estabilidad atmosférica, los coeficientes de dispersión y el espesor de la capa de mezcla dentro de la zona de estudio, permite generar un campos de vientos tridimensional mediante un análisis objetivo (procedimiento de interpolación) adaptado a Valle de México. Es importante hacer notar que este procedimiento de interpolación para obtener una campo de vientos constituye un esfuerzo inicial cuyo único objetivo fue el

permitir operar el modelo de dispersión en esta primera etapa de estudio. El procedimiento de simulación que deberá emplearse generar esta información en el Valle de México debe basarse en un método de pronóstico, el cual será estudiado en la segunda etapa del estudio.

Los tres modelos previamente mencionados fueron integrados a un sistema de información geográfica el cual permite una interacción muy poderosa entre el usuario y los diferentes componentes anteriormente descritos.

1.1 Antecedentes

El desarrollo de modelos de dispersión para simular el comportamiento de los compuestos fotoquímicos se inició a finales de la década de los años 60, dando como resultado modelos como el EKMA (1981). Este constituye un método semiempírico para estimar el efecto de las emisiones de compuestos orgánicos y los óxidos de nitrógeno en valores pico de ozono. Mediante la aplicación de diversos métodos numéricos, la evolución de los modelos ha tendido hacia el desarrollo de herramientas que permiten obtener soluciones de las ecuaciones diferenciales que describen los fenómenos de dispersión, transporte y conversión química. Actualmente, se puede afirmar que los modelos denominados "Modelos-Malla" son los únicos capaces de simular, con un grado de aproximación aceptable, la formación y evolución de la niebla fotoquímica en sitios con características topográficas y meteorológicas similares a las del Valle de México. Las limitaciones que imponen estos modelos, provienen principalmente de la gran cantidad de información que requieren y de la confiabilidad de los

datos que deben ser alimentados. La operación de estos modelos, consiste en obtener la evolución dinámica de la solución numérica en el espacio tridimensional, de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales acopladas. El acoplamiento, está originado por términos cinéticos que describen la rapidez con que se efectúan las diferentes reacciones químicas involucradas y que son funciones no lineales de las concentraciones de los compuestos correspondientes. En la actualidad estas ecuaciones se resuelven numéricamente mediante la técnica denominada pasos fraccionados. Esta consiste en separar los términos advectivos y las componentes que describen el transporte por difusión turbulenta y la cinética de las reacciones químicas. Debido al número tan grande de celdas en las que normalmente se divide la región de estudio y a la cantidad de ecuaciones diferenciales que requieren ser resueltas, los aspectos numéricos de dichos modelos resultan de primordial importancia. Conviene destacar que en nuestro país, el uso de modelos de dispersión se ha limitado, con excepción del modelo denominado MONOX (Fuentes Gea 1988), a la evaluación de fuentes puntuales de contaminación, tales como plantas termoeléctricas y refinerías. MONOX, es un modelo bidimensional, que fue diseñado para predecir concentraciones de monóxido de carbono originadas por las emisiones vehiculares en el Valle de México. Dicho modelo fue empleado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM , a petición de la CFE, para evaluar los efectos que tendría en la calidad del aire del Valle de México un atraso de dos horas del uso horario actual.

1.2 Objetivos

Los objetivos particulares de esta primera etapa del estudio son los siguientes:

1.-Desarrollar mediante un programa de computadora que utilice código compatible, un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos tridimensional que permita conocer, tanto en el tiempo como el espacio, los niveles de contaminación de compuestos de escasa reactividad química.

2.-Desarrollar un modelo tridimensional de vientos basado en un análisis objetivo que permita conocer, tanto en el tiempo como el espacio, el campo de vientos que se establece en el Valle de México, de manera que esta información pueda ser alimentada al modelo de dispersión.

3.- Desarrollar un modelo de emisiones a nivel reticular que permita generar emisiones vehiculares de CO para ser alimentada al modelo de dispersión, considerando una resolución espacial de un kilómetro e intervalos de 1 hora.

4.- Adaptar y aplicar dichos modelos a las condiciones particulares del Valle de México, considerando sus características topográficas, meteorológicas y las referentes a los patrones de emisión de las fuentes móviles que circulan en la región

5.- Efectuar una evaluación de los resultados obtenidos de las simulaciones y determinar su grado de confiabilidad, utilizando la información captada por la infraestructura de monitoreo atmosférico actualmente instalada.

6.- Iniciar la creación de cuadros humanos entrenados en el desarrollo y aplicación de técnicas de simulación que permitan predecir el comportamiento de contaminantes atmosféricos.

2. MODELO DE EMISIONES VEHICULARES

Por fuentes móviles se entienden los vehículos de todo tipo que circulan en una zona de estudio, entre los cuales se incluyen los ferrocarriles y los aviones que sobrevuelan la región. Es importante hacer notar que no pueden considerarse de igual manera todos los vehículos circulando, aún cuando se trate de vehículos del mismo tipo, debido a que las emisiones producidas por dichos vehículos dependen del tiempo en el cual el vehículo está en circulación y de las distintas formas de operación del mismo (acelerado, desacelerado, crucero y en marcha), las cuales cambian en razón de los siguientes factores:

a) Los hábitos del conductor: por ejemplo, el conductor de un colectivo que se detiene y obstaculiza el tráfico cada vez que sube o baja un pasajero.

b) El tipo de vía en que se encuentra dicho vehículo: Dentro de

la clasificación de vías en la red vial se encuentran las vías amplias, las cuales tienen 2 o 3 carriles por sentido, las vías sencillas de doble circulación y las vías reducidas de un solo carril.

c) La cantidad de tráfico en dichas vías, provocando no únicamente mayor contaminación por la mayor densidad del tráfico, sino también que los vehículos contaminen por más tiempo.

En general existen tres tipos de emisiones vehiculares:

1.- Emisiones provenientes del escape.

2.- Emisiones producidas en la cámara de combustión, es decir las fugas de gas de combustión que se llevan a cabo entre el cilindro y el pistón.

3.- Emisiones producidas por la evaporación del combustible en el tanque y en el carburador, lo que se presenta cuando un vehículo se detiene y se apaga, quedando una cierta cantidad de combustible en el carburador y que posteriormente se evapora.

En particular, para la estimación de las emisiones de monóxido de carbono no se consideran los dos últimos tipos de emisión; por lo tanto, el modelo que se expone en este capítulo sólo considera las emisiones provenientes del escape de los vehículos

En lo que respecta a la Ciudad de México, la cual presenta características especiales que influyen en la producción de las emisiones de CO, es conveniente mencionar los siguientes factores que determinan un comportamiento específico:

I) Factores en función del vehículo:

a) El estado en que se encuentra el vehículo: Existe una cantidad considerable de vehículos que carecen de mantenimiento apropiado, provocando así un mayor grado de contaminación.

b) El año y el modelo del vehículo: La vida media de un vehículo que circula en la Ciudad de México es de más de 10 años, cuando en otros países, por ejemplo, es de menos de 5 años. Esto influye notablemente en los factores de emisión que se utilicen y en la cantidad de contaminación que produce un vehículo circulando en la ciudad de México.

c) El tipo de combustible que utiliza el vehículo: En la actualidad los combustibles utilizados son; la gasolina nova, la gasolina magna sin, el diesel y el gas LP. A cada uno de estos combustibles les corresponde un factor de emisión.

d) Si el vehículo tiene o no convertidor catalítico: Los únicos vehículos que por ley deben tener convertidor catalítico son los de modelo 1991 en adelante, este convertidor provoca que las emisiones se reduzcan considerablemente.

II) Factores de distribución del tránsito urbano:

a) Zonas Industriales: En estas zonas el tránsito vehicular se compone de una gran cantidad de vehículos pesados, los cuales presentan un índice de contaminación mayor que los vehículos ligeros.

b) Zonas Residenciales: Al contrario de las zonas industriales, estas se componen principalmente de vehículos ligeros y de modelos recientes, produciéndose emisiones más bajas.

c) Centros históricos: Para la conservación de estos centros, se restringe el acceso vehicular, provocando una alteración en el tránsito vehicular.

d) Eventos especiales: Se refieren principalmente a las marchas, desfiles, plantones y accidentes viales. En general todo evento especial provoca una alteración vial.

e) Obras públicas: Entre las más comunes se encuentran el

bacheo, la repavimentación, mantenimiento del sistema de alcantarillado, mantenimiento de señalización vial, además de algunas obras eventuales como la construcción del metro, construcción de puentes a desnivel y ampliaciones viales. Al igual que los eventos especiales todas las obras públicas provocan alteraciones viales.

Adicionalmente a los factores previamente mencionados es importante mencionar el efecto de la altura sobre el nivel del mar de la Ciudad de México, la cual propicia una combustión incompleta de los combustibles y provoca un incremento significativo de las emisiones de CO e hidrocarburos con respecto a las cantidades que se producen al nivel del mar.

El modelo de emisiones que a continuación se presenta permite incorporar la mayor parte de los factores anteriormente mencionados, siempre y cuando dicho modelo se alimente con la información requerida.

Entre los factores que más influyen en la producción de CO, es importante destacar el tipo de vía en la que se encuentran circulando los vehículos, es decir, las vías primarias y las secundarias. Con el objeto de simplificar la operación del modelo, principalmente en lo que se refiere al proceso de alimentación de la información, se decidió dividir el modelo de emisiones vehiculares en dos módulos.

El primero contempla únicamente las emisiones generadas en la vialidad primaria. Dentro de esta vialidad se encuentran las vías más importantes de la ciudad, las cuales están compuestas básicamente por vías rápidas, avenidas y ejes viales; sus características más relevantes son los grandes volúmenes vehiculares que maneja, accesos controlados, distancias de recorrido grandes y circulación continua. Estas vías se clasifican en:

I.- Vías de acceso controlado, por ejemplo: Anillo periférico, Circuito Interior, Viaducto M. Aleman y Viaducto Tlalpan.

II.- Ejes viales, en su mayoría con circulación vehicular en el sentido de Norte a Sur o de Oriente a Poniente.

III.- Avenidas principales, por ejemplo: Paseo de la Reforma, Insurgentes, Av. Universidad, Calz. I Zaragoza, etc.

El segundo módulo calcula las emisiones de lo que se denomina vialidad secundaria, la cual es un conjunto de vías de comunicación que conforman un subsistema que alimenta a las vías primarias. Este tipo de vías están integradas por calles colectoras y calles locales.

Con el objeto de calcular las emisiones de CO, las cuales provienen de ambos tipos de vialidades se dividió la región de estudio en una malla de celdas unitarias. Estas celdas pueden ser agrupadas conforme al requerimiento del usuario. En particular, a fin de poderse ajustar a los requerimientos del modelo de difusión, fue necesario hacer un agrupamiento de 9 celdas, de manera de formar una celda de 3 km x 3 km.

2.1 Emisiones provenientes de la vialidad primaria

Las emisiones vehiculares de CO que se producen en las vías primarias dependen del volumen del tráfico vehicular, la distancia que éste recorre, la composición vehicular y las velocidades promedio que alcanzan los vehículos circulando en las diferentes vías. Debido a que la mayoría de las vías primarias (vías de acceso controlado y arterias principales) constan de una doble circulación, existe una variación por sentidos en el volumen vehicular y en la velocidad

promedio, como se muestra en la figura 2.1, lo que hace importante el considerar el flujo vehicular por sentidos. Asimismo, se supone que todos los vehículos que se encuentran en dichas vías han alcanzado una temperatura de combustión estable, y por consiguiente, no se consideran en este tipo de vías los vehículos que arrancan con el motor frío, factor que será discutido más adelante en la sección correspondiente a las emisiones procedentes de las vías secundarias.

Ya que las emisiones de CO dependen del volumen vehicular y su composición, es necesario obtener los volúmenes vehiculares totales por tipo i de vehículo V_{veh_i} . Para una celda en particular de la región de estudio, esto implica obtener la siguiente información:

- 1.- La composición vehicular C_{veh_i} , la cual se estima multiplicando el número total de vehículos N_{veh} que hay en una celda especifica a la hora de máxima demanda (HMD), por el factor de composición correspondiente a cada tipo de vehículo existente, $FactComp_i$. Este factor de composición representa el porcentaje de vehículos de tipo i que se encuentra en el total de vehículos circulando en dichas vías. Lo anterior se representa con la siguiente ecuación:

$$C_{veh_i} = \left(N_{veh} \cdot FactComp_i \right) \quad (2.1)$$

- 2.- La distancia D_k asociada a cada segmento de vía k por donde circulan dichos vehículos, dada en kilómetros.
- 3.- El número total de segmentos de vías k , que hay dentro de dicha celda.

Obtenidos los datos anteriores, el volumen vehicular se determina sumando los productos de la composición vehicular C_{veh_i} de

VIADUCTO RIO DE LA PIEDAD
CALLE 47 - CALLE 41

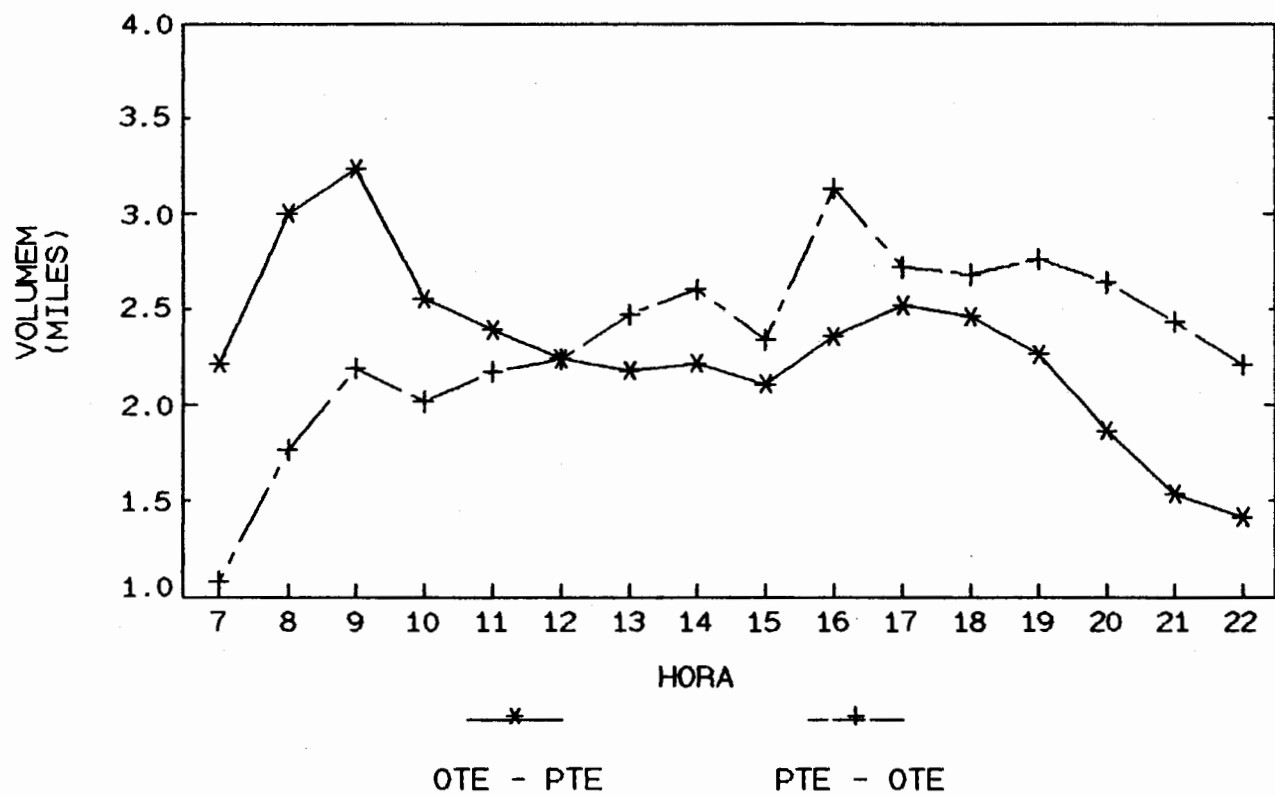


Figura 2.1 Variación vehicular por sentidos,
 en Viaducto Rio de la Piedad.

cada segmento k de la vía, descrita en la ecuación (2.1), por la distancia D_k asociada a dicho segmento. Esta suma se realiza hasta completar el número total de segmentos que hay en la celda en cuestión, como se muestra enseguida:

$$V_{veh_i} = \sum_{k=1}^m C_{veh_{ik}} * D_k \quad (2.2)$$

Es importante hacer notar que este volumen vehicular corresponde al existente a la HMD, por lo tanto, con el objeto de simular su variación temporal para así obtener las emisiones generadas a cada hora del día, es necesario multiplicar dicho volumen vehicular por la fracción de vehículos $f_{veh}(t)$ que circulan a diferentes horas del día con respecto a la hora de máxima demanda (HMD), es decir:

$$V_{veh_i}(t) = V_{veh_i} * f_{veh}(t) \quad (2.3)$$

En donde $f_{veh}(t)$ se obtiene dividiendo el volumen vehicular registrado a la hora t $V_{veh}(t)$, entre el volumen vehicular registrado a la hora de máxima demanda $V_{veh}(HMD)$, como sigue:

$$f_{veh}(t) = \frac{V_{veh}(t)}{V_{veh}(HMD)} \quad (2.4)$$

Una vez obtenido el volumen vehicular de tipo i a cada hora del día, es importante determinar, como se mencionó anteriormente, la cantidad de este volumen que se encuentra en cada sentido de la vía. Para ello se consideraron los sentidos de mayor y menor circulación, los cuales, debido a las diferentes velocidades promedio de los vehículos, se denominaron sentido lento y sentido rápido respectivamente.

Los volúmenes vehiculares correspondientes al tipo de vehículo i, por sentido son:

1.- El volumen vehicular de tipo i en el sentido rápido a cada hora $V_{veh_i R}(t)$, el cual se obtiene multiplicando el volumen vehicular total del tipo i $V_{veh_i}(t)$ circulando sobre la vía a cierta hora t, por una fracción de vehículos que se encuentran en el sentido de menor circulación a la misma hora $F_{vehMC}(t)$, lo anterior se representa con la siguiente ecuación:

$$V_{veh_i R}(t) = \left[V_{veh_i}(t) \cdot F_{vehMC}(t) \right] \quad (2.5)$$

Donde la fracción de vehículos que se encuentran en el sentido de menor circulación a la hora t $F_{vehMC}(t)$, se obtiene dividiendo el volumen vehicular correspondiente al sentido de menor circulación a la hora t, entre la suma de los volúmenes vehiculares de ambos sentidos, es decir:

$$F_{vehMC}(t) = \frac{V_{vehMenorC}(t)}{[V_{vehMayorC}(t) + V_{vehMenorC}(t)]} \quad (2.6)$$

2.- El volumen vehicular de tipo i en el sentido lento a cada hora $V_{veh_i L}(t)$, el cual se obtiene multiplicando el mismo volumen vehicular total a una hora t $V_{veh_i}(t)$, utilizado en la ecuación (2.5), por la diferencia que existe entre el 100% de los vehículos circulando en dicha vía a la misma hora, y la fracción $F_{vehMC}(t)$ antes mencionada, como sigue:

$$V_{veh_i L}(t) = \left[V_{veh_i}(t) \cdot [1 - F_{vehMC}(t)] \right] \quad (2.7)$$

Después de haber obtenido los volúmenes vehiculares a cada hora,

por tipo i de vehículo en ambos sentidos $V_{veh_i R}(t)$ y $V_{veh_i L}(t)$, mediante las ecuaciones (2.5) y (2.7), se requiere estimar la cantidad de emisión que producen los volúmenes vehiculares mencionados. Esta estimación se lleva a cabo multiplicando los volúmenes vehiculares de tipo i en ambos sentidos y a cada hora del día, por los factores de emisión $FactEmi_{i R}$ y $FactEmi_{i L}$, correspondientes a cada tipo de vehículo i y a cada sentido (sentido rápido y sentido lento). Estos factores de emisión dependen del tipo de vehículo y de la velocidad promedio a la que circulan y están dados en gramos por kilómetro recorrido (g/km). Lo anterior se representa con las siguientes ecuaciones:

$$E_{i R}(t) = \left(V_{veh_i R}(t) \cdot FactEmi_{i R} \right) \quad (2.8)$$

$$E_{i L}(t) = \left(V_{veh_i L}(t) \cdot FactEmi_{i L} \right) \quad (2.9)$$

Donde $E_{i R}(t)$ y $E_{i L}(t)$ representan las emisiones producidas en cada hora t , por los vehículos de tipo i que se encuentran en el sentido de menor y mayor circulación respectivamente. La emisión total en g/hr, por tipo i de vehículo $E_i(t)$ se calcula sumando las ecuaciones (2.8) y (2.9), como sigue:

$$E_i(t) = E_{i R}(t) + E_{i L}(t) \quad (2.10)$$

Finalmente, las emisiones totales $E_t(t)$ en g/seg correspondientes a cada hora t , producidas por n tipos vehiculares que caracterizan a la composición vehicular en una celda específica dentro de la región de estudio, se calcula sumando las emisiones $E_i(t)$ provenientes de cada tipo de vehículo a la hora t .

$$E_t(t) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n E_i(t)}{3600} \right) \quad (2.11)$$

Debido a que el procedimiento anteriormente descrito está referido a una celda en particular, es necesario repetirlo en cada una de las celdas que integran la región de estudio, para así conocer las emisiones en toda la región.

2.2 Emisiones provenientes de la vialidad secundaria

Las emisiones vehiculares de CO que se producen en las vías secundarias, de la misma manera que las emisiones generadas en las vías primarias, dependen del volumen de tráfico vehicular, la distancia que éste recorre, la composición vehicular y las velocidades promedio de cada vía. Sin embargo, debido a que dicho tipo de vía alimenta a las vías primarias, es necesario hacer las siguientes consideraciones, adicionales:

I.- La mayoría de los vehículos inician su recorrido sobre esta vías, por lo tanto su modo de arranque es en frío, lo cual provoca que las emisiones de un vehículo en particular sean mayores que si fuese sobre una vía primaria. A fin de determinar la emisión que resulta de este modo de operación, es necesario conocer lo que se denomina como la "fracción de vehículos que arrancan en frío", la cual se discute más adelante.

II.- Debido a que existe un lapso pequeño, en el cual la mayoría de los vehículos arrancan en frío y una cantidad considerable de vehículos están terminando su periodo de calentamiento del motor, es necesario multiplicar el factor de emisión correspondiente por un

parámetro de corrección que tome en cuenta esta situación.

A continuación se describe el procedimiento que se siguió para cuantificar las emisiones de CO producidas sobre las vías secundarias, en una celda en particular de la región de estudio.

Primero se requiere conocer el volumen vehicular total por tipo i de vehículo V_{veh_i} ; esto implica la necesidad de obtener la siguiente información:

- 1.- La composición vehicular C_{veh_i} , la cual se estima por el mismo método utilizado en las vías primarias.
- 2.- La distancia D_k asociada a cada segmento de vía k por donde circulan dichos vehículos, dada en kilómetros.
- 3.- El número total de segmentos de vías k , que hay dentro de dicha celda.

Utilizando esta información y siguiendo el procedimiento descrito en la sección anterior para obtener el volumen vehicular total de tipo i , a cada hora del día $V_{veh_i}(t)$ se procede a cuantificar el número de vehículos que inician su recorrido en modo "frío" y en modo "caliente". Si la fracción de vehículos que inician su recorrido con el motor frío se representa por $FracFrío(t)$ (Reynolds, 1973), entonces los volúmenes vehiculares de tipo i que inician su recorrido en el modo frío $V_{veh_i, Frío}(t)$ y los que inician un recorrido con el motor caliente $V_{veh_i, Cal}(t)$ se obtienen de la manera siguiente:

$$V_{veh_i, Frío}(t) = V_{veh_i}(t) * FracFrío(t) \quad (2.12)$$

$$V_{veh_i, Cal}(t) = V_{veh_i}(t) * \left(1 - FracFrío(t) \right) \quad (2.13)$$

Después de obtener los volúmenes vehiculares $V_{veh_i, Frío}(t)$ y

$V_{veh_i Cal}(t)$, se requiere estimar las emisiones de CO que producen estos volúmenes. Esta estimación se lleva a cabo multiplicando los volúmenes vehiculares antes nombrados, por los factores de emisión $FactEmi_i F$ y $FactEmi_i C$ correspondientes a cada tipo de vehículo i y al modo de arranque (arranque con motor frío o arranque con motor caliente). Estos factores de emisión además de depender del tipo de vehículo y de la velocidad promedio a la que circulan, varían de acuerdo al modo de arranque.

Lo anterior se representa con las siguientes ecuaciones:

$$E_i F(t) = \left(V_{veh_i Flo}(t) * FactEmi_i F \right) \quad (2.14)$$

$$E_i C(t) = \left(V_{veh_i Cal}(t) * FactEmi_i C \right) \quad (2.15)$$

Donde $E_i F(t)$ y $E_i C(t)$ representan las emisiones producidas en cada hora (t) , por los vehículos de tipo (i) que inician su recorrido con el motor frío y caliente respectivamente. Posteriormente, para calcular la emisión total por tipo i de vehículo $E_i(t)$, se suman las ecuaciones (2.14) y (2.15), como sigue:

$$E_i(t) = E_i C(t) + E_i F(t) \quad (2.16)$$

Finalmente, las emisiones totales en g/seg $E_t(t)$, producidas por un total de n tipos de vehículos, existentes en la composición vehicular dentro de una celda cualquiera, se obtiene a partir de la suma del producto de las emisiones provenientes de cada tipo de vehículo $E_i(t)$, por un factor de corrección de emisiones $FactCorrec(t)$ (Reynolds, 1973), que es función al número de vehículos que inician su recorrido con el motor frío. Esto se expresa de la

siguiente manera:

$$E_t(t) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n E_i(t) * FactCorrec(t) \right)}{3600} \quad (2.17)$$

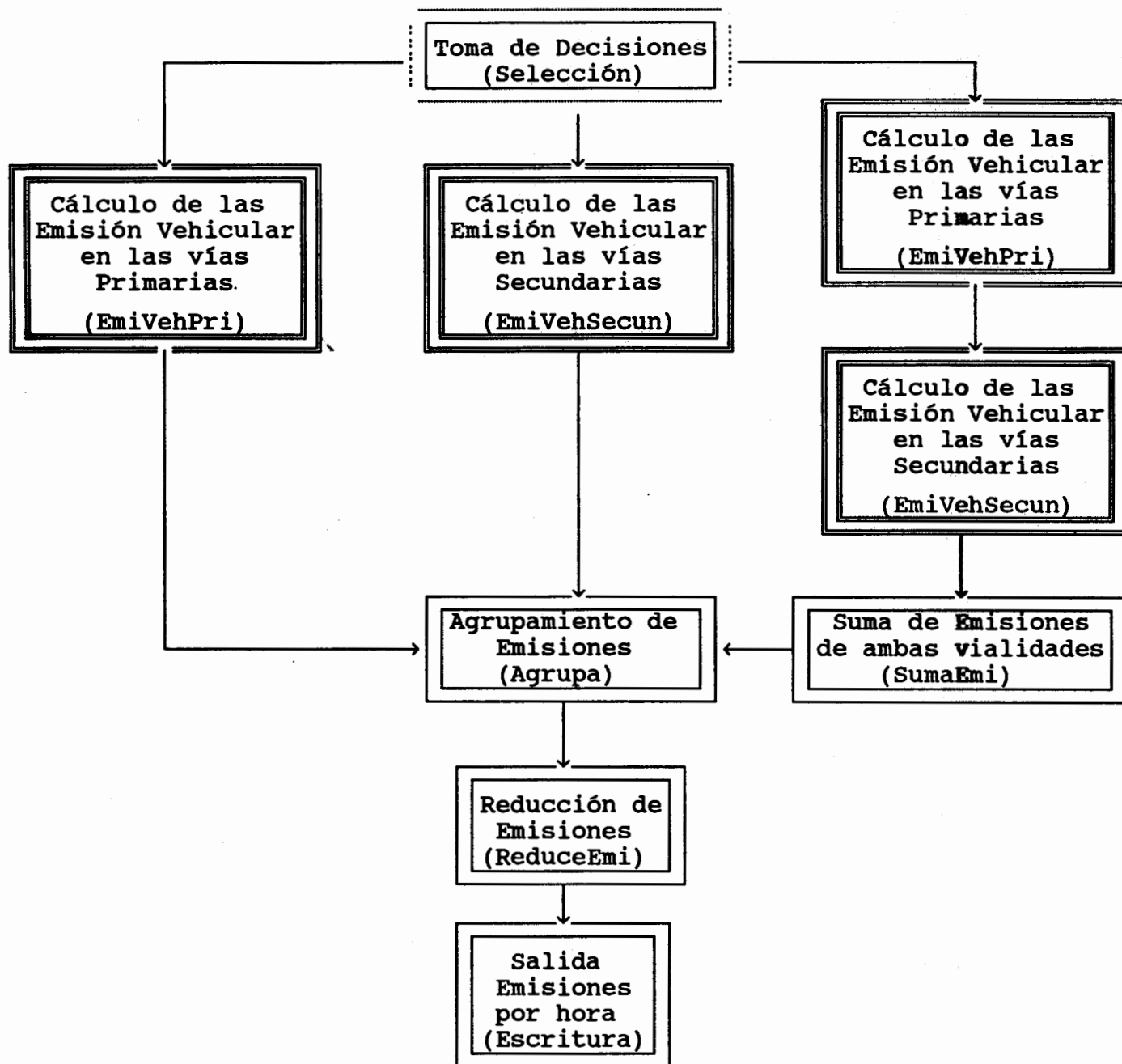
De la misma manera que el cálculo efectuado para determinar las emisiones procedentes de los vehículos circulando en la vialidad primaria, este procedimiento se repite en cada una de las celdas que integran la región de estudio, para así conocer las emisiones en toda la región.

2.3 Descripción del programa de computadora

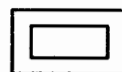
El programa de computadora que se elaboró para calcular las emisiones procedentes de las fuentes móviles consta de un módulo integrado por 2 subrutinas principales y 4 subrutinas auxiliares. Las subrutinas principales llaman a un conjunto de subrutinas en las cuales se le y procesa la información referente a las características del tráfico vehicular y a los factores de emisión correspondientes a los diferentes tipos de vehículos que se consideren. Como datos de entrada a este modulo se requieren 2 archivos ASCII: Decision.dat y ReduceEmi.dat, los cuales se describen en el inciso 2.4.

A fin de decidir sobre si se calculan las emisiones que se generan en la vialidad primaria, o las correspondientes a la vialidad secundaria, o a ambas vialidades, se invoca primeramente la función denominada Selección, como se ilustra en el diagrama que aparece en la figura 2.2.

A continuación se describe brevemente cada una de las subrutinas



Subrutina principal



Subrutina

Figura 2.2 Diagrama de flujo para el cálculo de las emisiones vehiculares

invocadas en este módulo.

I.- Selección: Esta función tiene por objeto leer un archivo de decisiones, dentro del cual se elige el tipo de vialidad para la cual se quiere calcular las emisiones y se pregunta si se han modificado o no los archivos de entrada al modelo para determinar que procedimientos se deben efectuar dentro de cada subrutina principal.

II.- EmiVehPri: Esta subrutina tiene por objeto el calcular las emisiones vehiculares producidas en la vialidad primaria.

III.- EmiVehSecun: En esta subrutina se realiza el cálculo de las emisiones vehiculares producidas dentro de la vialidad secundaria.

La descripción detallada de las 2 subrutina principales se dará más adelante.

IV.- SumaEmi: Esta subrutina se invoca solo si se desean calcular las emisiones de ambos tipos de vialidad y tiene la finalidad de sumar las emisiones provenientes de las subrutinas principales EmiVehPri y EmiVehSecun.

V.- Agrupa: Esta subrutina realiza el agrupamiento de las emisiones en 9 celdas unitarias a partir de matrices integradas por 39*45 elementos, para colocarlas en una sola celda. De esta manera se forman 24 matrices de 13*15 elementos, que corresponden a los requerimientos del modelo de dispersión.

VI.- ReduceEmi: En esta subrutina se le un archivo conteniendo las fracciones de reducción de emisiones, el cual esta compuesto por 24 matrices de 13 por 15 elementos. La finalidad de esta subrutina es el poder evaluar la eficacia de medidas de control de las emisiones vehiculares, de una manera sencilla y rápida. Por supuesto, las fracciones de reducción de las emisiones deben obedecer a una estrategia de control específica que permita determinarlas o

evaluarlas, independientemente del presente modelo.

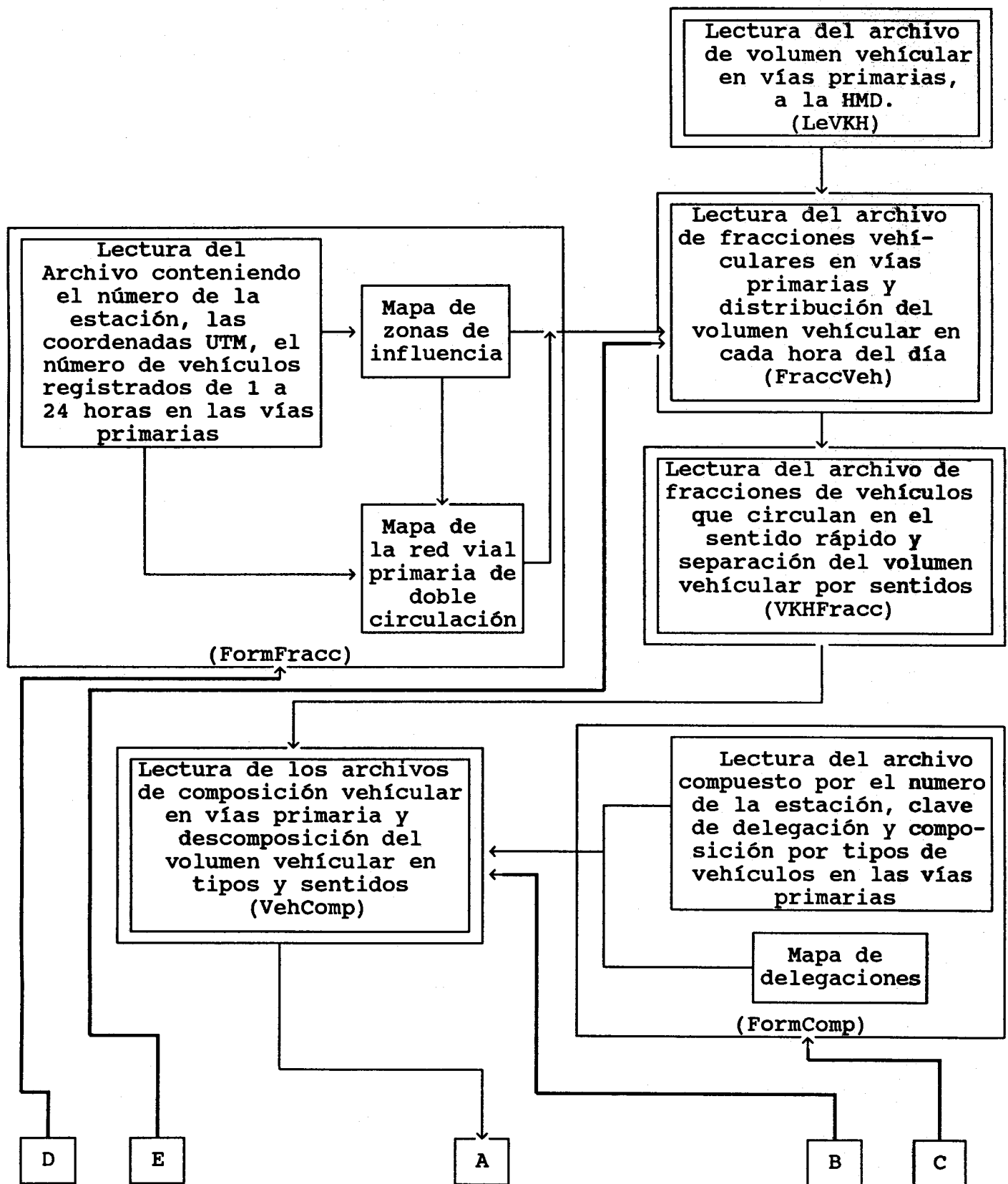
VII.- Escritura: El objeto de esta subrutina es elaborar un archivo de resultados llamado "Emision.veh", el cual se compone de 24 matrices de 13 por 15 emisiones vehiculares correspondientes a cada celda de 3 por 3 km de la región de estudio y cada hora del día.

2.3.1 Subrutina principal EmiVehPri

La subrutina principal que procesa los datos correspondientes a la vialidad primaria (EmiVehPri), está integrada por 7 subrutinas, las cuales tienen la finalidad de leer la información contenida en 5 archivos ASCII, cuyo contenido se describirá en el inciso 2.4; y efectuar los cálculos que se indicaron en la sección 2.1. En la figura 2.3 se presenta el diagrama de flujo que describe la estructura de dicha subrutina.

Los 5 archivos ASCII que requiere esta subrutina como datos de entrada son:

- 1) Volumen vehicular en las vías primarias, (VehKH.pri).
- 2) Fracciones de vehículos en vías primarias, (FracVehT.pri).
- 3) Factores de emisión utilizados en las vías primarias, (FactEmi.pri).
- 4) Factores de composición vehicular en las vías primarias, (TipoPriN.dat, donde N varia desde 1 hasta el número total de tipos de vehículos que se consideran en la composición vehicular).
- 5) Fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación, (FracSent.dat).



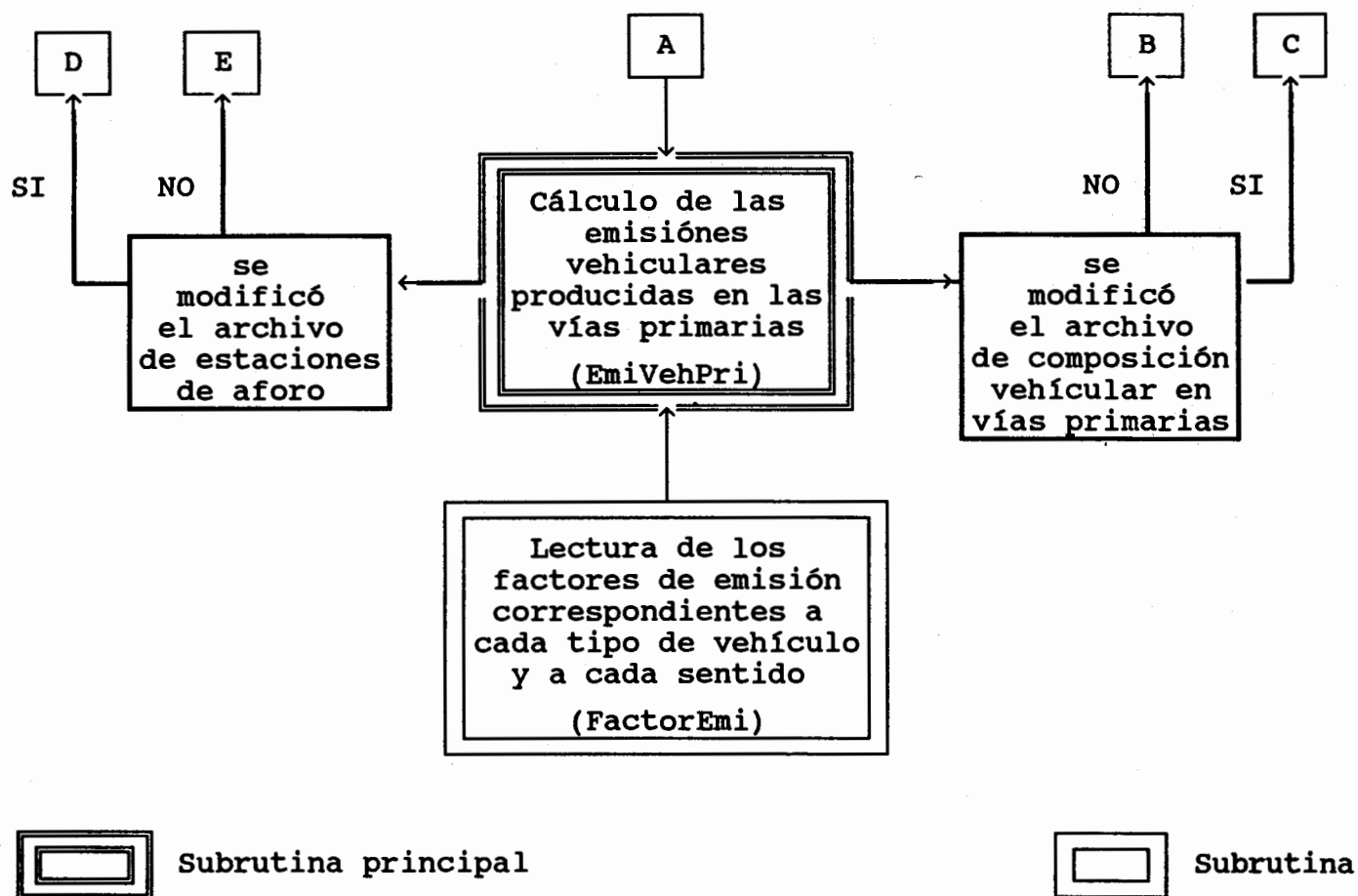


Figura 2.3 Diagrama de flujo del módulo de emisiones de la vialidad primaria.

A continuación se describen las 7 subrutinas anteriormente mencionadas:

I.- FormFrac: Esta subrutina tiene el carácter de opcional, de acuerdo a la existencia o no de información actualizada referente a los aforos realizados en las vías primarias (número de estaciones de aforos y a las lecturas obtenidas en éstas). Además puede ser invocada por las dos subrutinas principales. Al ser invocada por EmiVehPri, tiene por objeto elaborar dos archivos, el de Fracciones vehiculares en vías primarias (FracVehT.pri) y el de Fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación (FracSent.dat). Los datos de entrada que deben alimentarse a esta subrutina provienen de dos mapas: uno de las zonas de influencia de cada estación de aforo y el otro de la red vial de doble circulación.

II.- FormComp: En forma análoga a la subrutina anterior, esta también tiene constituya una subrutina opcional que es llamada si existe o no información actualizada relativa a la composición vehicular sobre la vialidad primaria. En el caso de ser invocada por EmiVehPri, elabora un archivo para cada tipo de vehículo existente dentro de la composición vehicular correspondiente a la vialidad primaria (TipoPriN.dat), en donde N varía desde 1 hasta el número total de tipos vehiculares que existan en la composición mencionada. La elaboración de estos archivos requiere de un mapa delegacional de la Ciudad de México.

III.- LeVKH: Esta subrutina es invocada por ambas subrutinas principales y tiene la finalidad de leer un archivo de volúmenes vehiculares circulando a la hora de máxima demanda (HMD), compuesto por una matriz de 39 por 45 elementos correspondientes a cada celda unitaria de la región de estudio. En este caso se lee el archivo de

volúmenes vehiculares circulando a la HMD sobre las vías primarias, llamado (VehKH.pri).

IV.- FraccVeh: Esta subrutina también es invocada por las dos subrutinas principales. Se utiliza para leer un archivo de fracciones vehiculares compuesto por 24 matrices de 39 por 45 elementos y posteriormente lo multiplica por la información obtenida en la subrutina LeVKH. El archivo que se lee en este caso (FracVehT.pri) permite formar 24 matrices de 39 por 45 volúmenes vehiculares primarios, correspondientes a cada celda unitaria de la región de estudio y a cada hora del día.

V.- VKHFracc: La finalidad de esta subrutina es la de leer un archivo que contiene las fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor velocidad (FracSent.dat) y procesar la información obtenida en la subrutina FraccVeh, para formar 24 matrices de volúmenes vehiculares en el sentido de menor y mayor circulación.

VI.- VehComp: Esta subrutina también se invoca desde cualquiera de las subrutinas principales y tiene por objeto leer y procesar N archivos de factores de composición, donde N varia desde 1 hasta el numero total de tipos de vehículos que existan en la composición primaria ó secundaria. Después de leer estos archivos, y en el caso de las emisiones en la vialidad primaria, se utiliza la información generada en la subrutina VKHFracc para formar 24 matrices de volúmenes vehiculares por tipos de vehículos y por sentidos. Los archivos antes mencionados se llaman (TipoPriN.dat) y están compuestos por una matriz de 39 por 45 celdas unitarias correspondiente a la región de estudio.

VII.- FactorEmi: De igual manera que la subrutina anterior, esta es invocada por ambas subrutinas principales. Cumple con el propósito

de leer un archivo de factores de emisión y asignar su contenido a una variable de dos dimensiones. En este caso el archivo se llama (FactEmi.pri). El primer índice de las variables corresponde a los N tipos de vehículos registrados que circulan sobre estas vías y el segundo, a los 2 sentidos de circulación (sentido rápido y sentido lento).

2.3.2 Subrutina principal EmiVehSecun

Constituye la subrutina principal que procesa los datos correspondientes a la vialidad secundaria (EmiVehSecun), la cual está compuesta por 7 subrutinas como se muestra en el diagrama de la figura 2.4, las cuales tienen la finalidad de leer la información contenida en 6 archivos ASCII y efectuar los cálculos que se indicaron en la sección 2.2.

Los 6 archivos ASCII que el programa de computadora requiere como datos de entrada son:

- 1) Volúmenes vehiculares en vías secundarias, (VehKH.sec).
- 2) Fracciones vehiculares en vías secundarias, (FracVehT.sec).
- 3) Factores de emisión en la vialidad secundaria, (FactEmi.sec).
- 4) Factores de composición vehicular en vías secundaria, (TipoSecN.dat, en donde N varia desde 1 hasta el número total de tipos de vehículos de la composición secundaria).
- 5) Fracciones de vehículos con modo de arranque frío, (FraArran.dat)
- 6) Factores de corrección de las emisiones, (FactVar.dat).

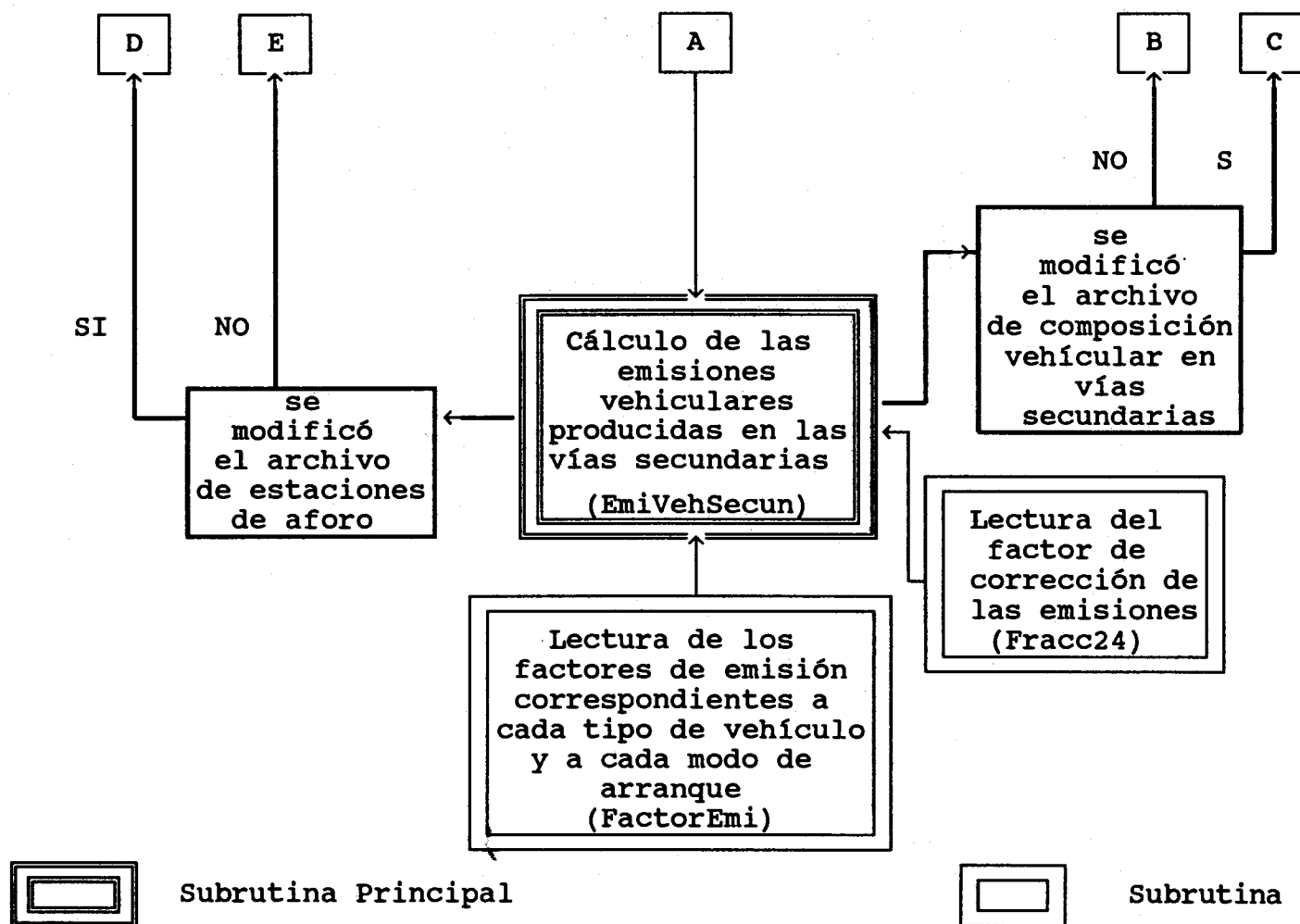


Figura 2.4 Diagrama de flujo del módulo de emisiones de la vialidad secundaria

En virtud de que la mayor parte de las subrutinas que se utilizan en este módulo se describieron con anterioridad, en la sección 2.3.1, a continuación se mencionan únicamente aquellas que realizan procesos diferentes a los ya discutidos.

En el caso de las subrutinas FormFrac, FormComp, LeVKH, y FraccVeh la única modificación que sufren al ser invocadas por EmiVehSecun, es en lo que respecta a los nombres de los archivos de entrada y de salida, por ejemplo: en la subrutina FormFrac el archivo de salida se llama (FracVehT.sec), en FormComp los archivos de salida se llaman (TipoSecN.dat), en la subrutina LeVKH el archivo de entrada se llama (VehKH.sec) y por último el archivo de entrada en la subrutina FraccVeh se llama (FracVehT.sec).

I.- Fracc24: Esta subrutina es invocada dos veces dentro de este módulo. En el primer caso tiene la finalidad de leer un archivo conteniendo 24 fracciones de vehículos que arrancan con el motor frío, el cual se llama (FraArran.dat) y en el segundo caso se le un archivo de 24 factores de corrección de emisiones llamado (FactVar.dat).

II.- VehComp: Después de leer el archivo llamado (TipoSecN.dat) el cual contiene la composición vehicular, se utilizan los volúmenes vehiculares correspondientes a los vehículos cuyo modo de arranque se efectúa con el motor frío y caliente y se procesa la información para formar 24 matrices de volúmenes vehiculares por tipos de vehículos y por modos de arranque.

III.- FactorEmi: Se le el archivo FactEmi.sec el cual contiene los factores de emisión correspondientes a los N tipos de vehículos registrados que circulan sobre estas vías y a los 2 modos de arranque (arranque con el motor frío y arranque con el motor caliente)

característicos de los vehículos que circulan sobre este tipo de vía.

2.4 Datos generales de los archivos

Los archivos que deben estar disponibles para correr el programa, son los siguientes:

I.- Archivo de decisiones:

Este archivo tiene la finalidad de proporcionar información que permita elegir el tipo de vialidad (primaria o secundaria) para la cual se desean calcular las emisiones vehiculares. También pregunta si fueron o no modificados los archivos de entrada de cada subrutina principal, para de esta manera determinar el procedimiento que se debe efectuar dentro de cada una de ellas. El archivo se llama "Decision.dat" y se muestra en la tabla 2.1.

"Archivo de Decisiones"

Seleccione cual de las siguientes opciones desea calcular las emisiones: 1

1 = Vias Primarias

2 = Vias Secundarias

3 = Ambas Vias

4 = Salir

Deseas modificar el archivo de Estaciones de Aforo (s/n): s

Deseas modificar el archivo de Composicion Vehicular Primaria (s/n): s

Deseas modificar el archivo de Composicion Vehicular Secundaria (s/n): s

Tabla 2.1. Archivo de decisiones.

II.- Factores de reducción de emisiones:

Este archivo esta compuesto por 24 matrices de 13 por 15 fracciones de reducción o incremento de las emisiones provenientes de cada celda de 3 por 3 km. de la región de estudio y a cada hora

del día. El archivo tiene la finalidad de permitir evaluar, rápidamente, el efecto de una variación prevista de las emisiones en la región antes citada. Si el usuario no desea reducir ni incrementar estas emisiones, entonces dicho archivo debe permanecer con el valor de 1.0, que corresponde al 100% de éstas.

III.-Volumen vehicular en las vías Primarias:

Este archivo fue solicitado a la Dirección de Estudios y Proyectos de la Coordinación General de Transporte, y está formado por los volúmenes vehiculares registrados en las vías primarias de 8:00 a 9:00 am, la cual corresponde a la hora de máxima demanda (HMD). Estos volúmenes representan el producto del número total de vehículos/hora que circulan en cada celda de la región de estudio, por la distancia recorrida en dichas celdas en KM.

Para formar este archivo se efectuaron las siguientes consideraciones:

En el caso en los que dentro de una celda existan varios segmentos de vías, como se muestra en la figura 2.5, para obtener el volumen vehicular total en dicha celda se calculó el producto de el número de vehículos por la distancia recorrida, para cada segmento, y posteriormente se efectuó la suma de dichos productos.

Por otra parte, en el caso de que la distancia entre las intersecciones se prolonga a más de una celda, como se muestra en la figura 2.6, se toma la distancia que existe entre la intersección que está dentro de la celda y el límite de la misma.

IV.- Fracciones de vehículos en vías primarias:

Para formar este archivo se siguió el procedimiento que se describe a continuación :

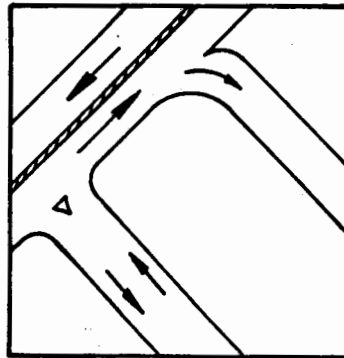


Fig 2.5 Celda que contiene varios segmentos de vías

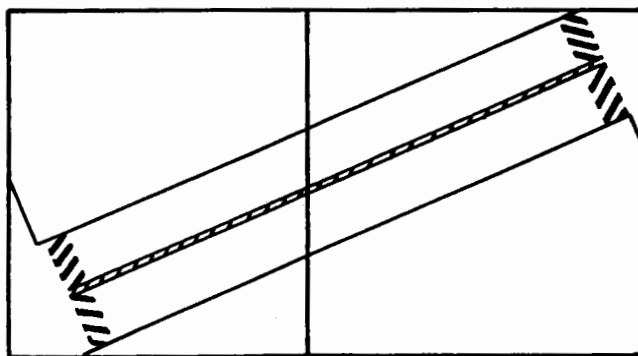


Fig 2.6 Segmento de vía entre dos celdas contiguas

1.- Con base en los números de vehículos registrados en el periodo de 7 a 22 horas de cada estación de aforo del estudio para la localización de estaciones aforadoras en el Distrito Federal, el cual fue proporcionado para la Coordinación General de Transporte, se elaboró un archivo denominado "Estacion.dat", el cual contiene: el número de estación registrada (número de renglón), el número de la estación de aforo, las coordenadas UTM y 24 volúmenes vehiculares correspondientes a cada hora del día. (Ver la tabla 2.2)

2.- Posteriormente IBM, a través de ARCINFO, y utilizando un archivo llamado "Aforo.dat" compuesto por: el número de estación de aforo y sus coordenadas UTM, y mediante el método de Polígonos de Thiessen, formó un mapa de las zonas de influencia de cada estación de aforo, el cual se llama "Zona.dat". Una fracción del "Zona.dat" se muestra en la tabla 2.3.

Numero de Renglones: 196

#REN	ESTA.	COORD. X	COORD. Y	HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	483348.9	2149498.5	285	357	446	558	697	871	1089	2608	2401	
2	2	483348.9	2149498.5	202	253	316	395	494	618	772	1958	2144	
3	3	479347.3	2151453.1	142	178	222	278	348	434	543	1525	1750	
4	4	479347.3	2151453.1	82	102	127	159	199	249	311	780	697	
5	5	490886.8	2147482.6	573	716	895	1119	1398	1748	2185	3398	3215	
6	6	490886.8	2147482.6	438	547	684	855	1068	1335	1669	2864	3112	
7	7	485836.6	2149752.7	243	304	380	475	594	742	928	1609	2046	
8	8	482968.1	2150228.4	334	417	522	652	815	1019	1274	2285	2232	
9	9	488121.8	2150396.7	371	464	580	724	906	1132	1415	3097	2921	
10	10	484609.7	2151224.9	357	447	558	698	872	1090	1363	2868	2644	

Tabla 2.2 Archivo de estaciones de aforo.

3.- Finalmente con la ayuda del mapa anteriormente mencionado y el archivo de estaciones de aforo (Estacion.dat) el modelo calcula las fracciones vehiculares correspondientes a cada hora del día y a cada celda unitaria de la región de estudio, dando como resultado 24 matrices de 39 por 45 fracciones vehiculares.

62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	48	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	72	48	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	72	48	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	72	48	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	72	72	48	48
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	12	72	72	48	48	
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	12	72	48	48	48	
79	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	12	72	48	48	48	
79	79	79	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	12	72	48	48	48	
97	79	79	79	79	62	62	62	62	62	62	62	62	62	12	12	72	48	48	48
97	97	79	79	79	79	62	62	62	62	62	62	62	62	12	12	72	48	48	48
97	97	97	79	79	79	79	79	62	62	62	62	62	62	40	62	40	12	12	72
97	97	97	97	79	79	79	79	79	79	11	11	62	40	40	40	12	72	72	48
97	97	97	97	97	79	79	79	79	79	11	11	11	40	40	40	12	72	48	48
97	97	97	97	97	97	79	79	79	79	79	11	11	63	63	40	12	72	55	55
97	97	97	97	97	97	97	79	79	79	79	79	9	11	63	63	8	10	10	55
97	97	97	97	97	97	97	97	2	2	79	79	9	9	63	63	8	81	10	55
97	97	97	97	97	97	97	97	2	2	2	2	5	9	7	7	8	82	82	6
97	97	97	97	97	97	97	97	97	89	89	80	80	5	5	7	7	4	82	6
97	97	97	97	97	97	97	97	97	87	86	80	80	93	5	1	41	4	49	6
85	85	97	97	97	97	97	84	84	87	86	80	73	83	83	41	52	49	6	92
85	85	85	88	88	97	84	84	84	84	86	69	66	14	64	44	13	52	92	92
85	85	85	85	88	88	84	98	84	98	69	70	70	16						

36

V.- Fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación:

Para formar dicho archivo se siguió el procedimiento que se describe a continuación :

1.- Primero se elaboró un mapa de la región de estudio localizando las celdas por donde atraviesan las vías primarias de doble circulación.

Para formar dicho mapa se efectuaron las siguientes consideraciones:

Si en una celda cualquiera, el mayor número de vehículos se encuentra en una vía primaria de doble sentido, como se muestra en la figura 2.7, se considera dicha celda como una celda de doble circulación. En el caso contrario, como se muestra en la figura 2.8, esta se considera como una celda de un solo sentido.

2.- Posteriormente con la ayuda del mapa antes mencionado y el mapa de zonas de influencia de cada estación de aforo utilizado para la formación del archivo de fracciones vehiculares en vías primarias, el modelo localiza las celdas y las estaciones de aforo donde exista doble circulación.

3.- Finalmente empleando el mismo archivo de estaciones de aforo (Estacion.dat) que se utilizó para la formación del archivo de Fracciones Vehiculares en vías Primarias, el modelo calcula las fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación, logrando al final las 24 matrices de 39 por 45 fracciones de vehículos.

VI.- Factores de composición vehicular en las vías primarias:

Para formar este archivo se siguió el procedimiento que a

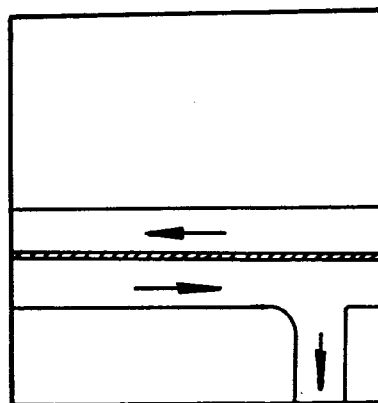


Fig 2.7 Celda que contiene una vía de doble circulación

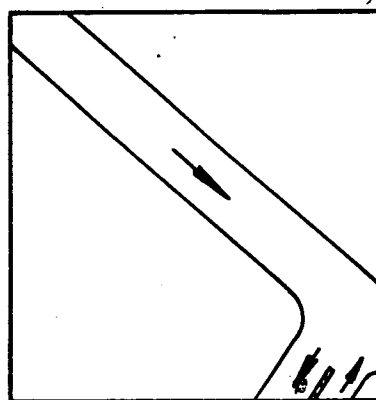


Fig 2.8 Celda que contiene una via de un solo sentido de circulación

continuación se enlista:

1.- Primero se elaboró un mapa de la región de estudio localizando las celdas unitarias que corresponden a las 16 delegaciones de la ciudad de México y al Estado de México. Este mapa se muestra en la tabla 2.4.

2.- Posteriormente se generó un archivo con la composición registrada en cada estación de aforo del estudio utilizado en la formación del archivo de Fracciones vehiculares en vía Primarias, para la localización de estaciones aforadoras en el Distrito Federal. Este archivo está compuesto por: el número de estación registrada (número de renglón), la clave de la delegación, el número de la estación de aforo y N número de columnas con la composición por tipo, en donde N varia desde 1 hasta el número total de tipos vehiculares en la composición primaria. Una parte de dicho archivo se muestra en la tabla 2.5.

Numero de Tipos de Composicion: 4

Numero de Renglones: 201

#Reng.	Del.	#Esta.	A	B	C	D
1	CU	1	97.86	0.53	1.60	0.00
2	CU	2	97.06	1.84	1.10	0.00
3	MH	3	95.47	0.86	0.17	0.00
4	MH	4	93.17	0.49	6.34	0.00
5	VC	5	89.80	1.49	6.84	1.87
6	VC	6	90.50	2.13	7.23	0.14
7	CU	7	93.19	4.21	2.61	0.00
8	CU	8	86.86	4.76	7.62	0.76
9	VC	9	95.34	1.17	3.37	0.13
10	CU	10	94.82	0.97	4.21	0.00

Tabla 2.5 Archivo de composición delegacional en vías primarias.

La composición vehicular obtenida del estudio mencionado está dada en porcentaje y fue de automóviles, autobuses, camiones y trailers. Las claves de las delegaciones son las siguientes:

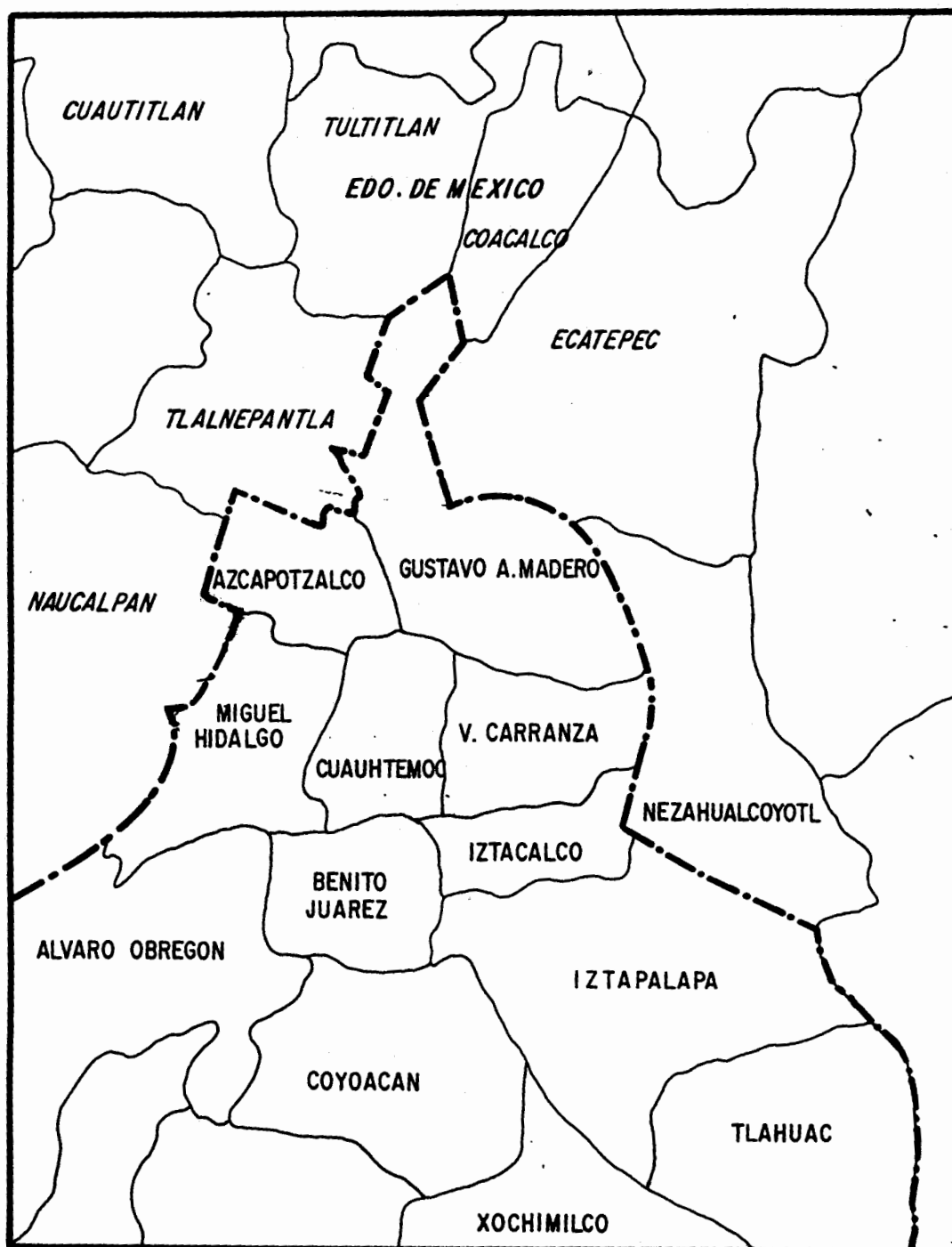


Tabla 2.4 Mapa de Delegaciones

AO: Alvaro Obregon
 AZ: Azcapotzalco
 BJ: Benito Juarez
 CO: Coyoacan
 CP: Cuajimalpa
 CU: Cuauhtemoc
 GM: Gustavo A Madero
 IC: Iztacalco
 IP: Iztapalapa

MA: Milpa Alta
 MC: Magdalena Contreras
 MH: Miguel Hidalgo
 TH: Tlahuac
 TL: Tlalpan
 VC: Venustiano Carranza
 XO: Xochimilco
 EM: Estado de México

3.- A continuación el modelo realiza un agrupamiento delegacional utilizando la clave de delegación de todas las estaciones de aforo, para calcular la composición promedio de cada tipo de vehículo. Lo anterior se muestra en la tabla 2.6.

DEL.	AUTOMOVILES	AUTOBUSES	CAMIONES	TRAILERS
AO	92.85	3.59	3.08	0.48
AZ	90.57	3.37	5.46	0.6
BJ	94.96	2.85	2.09	0.1
CO	94.48	3.43	2.07	0.02
CP	78.06	13.15	6.58	2.215
CU	95.88	1.76	2.29	0.08
GM	87.36	5.86	6.33	0.9
IC	90.13	4.28	5.71	0.6
IP	89.74	3.35	6.22	0.7
MC	83.8	2.1	14.1	0.0
MH	92.31	4.07	3.98	0.15
TH	70.7	6.9	22.4	0.0
TL	93.6	2.78	3.51	0.12
VC	91.85	2.19	5.5	0.46
XO	87.3	2.8	9.9	0.0
EDO	76.4	5.7	17.9	0.0

Tabla 2.6 Factores de composición por delegaciones en vías primarias.

4.- Con la ayuda del mapa de delegaciones, el modelo localiza las celdas que le corresponden a cada delegación, donde a cada una de ellas se le vacian los datos de la composición por tipo vehicular.

5.- El paso anterior se realiza para cada tipo de vehículo, de

manera que se forman los N archivos de composición vehicular, los cuales en el presente caso corresponden a los archivos TipoPri1.dat, TipoPri2.dat, TipoPri3.dat y TipoPri4.dat.

VII.- Factores de emisión utilizados en las vías primarias:

Con base a la información de las velocidades promedio por tipo de vía, proporcionada por la Coordinación General de Transporte (ver tabla 2.7) y al estudio realizado por JICA (Japan International Cooperation Agency), para la ciudad de México, se estimó una velocidad promedio para este tipo de vía, en el sentido de mayor circulación, de aproximadamente 60 km/hr, mientras que para el sentido de menor circulación se obtuvo aproximadamente 30 km/hr. Por lo tanto, los factores de emisión que se utilizaron para formar este archivo corresponden a 4 tipos de vehículos y a las velocidades promedio anteriorente mencionadas, los cuales se muestran en la tabla 2.8.

VIII.- Volúmenes vehiculares en vías secundarias:

Este archivo se obtuvo empleando las mismas fuentes y consideraciones que las mencionadas en el inciso III.

IX.- Fracciones vehiculares en vías secundarias:

Para formar este archivo el modelo sigue el mismo procedimiento que el utilizado para crear el archivo de fracciones vehiculares en vías primarias, empleando para ello el archivo de volúmenes vehiculares de la vialidad secundaria.

Tipo de Vía	Velocidad en Flujo Libre *			Velocidad de Marcha en HMD (8:00 - 9:00 Hrs.)		
	μ	σ	N	μ	σ	N
Vía de acceso controlado	67.29	16.28	362	36.75	15.03	362
Vías primarias	45.03	14.31	1638	27.12	11.45	1638
Ejes viales	40.81	12.21	748	26.08	10.14	748
Vías secundarias	42.82	13.59	1578	25.42	10.69	1578

* con un muy reducido número de vehículos circulando.

μ = Promedio estandar

σ = Desviación

N = Número de casos

HMD = Hora de máxima demanda

Tabla 2.7 Información sobre las velocidades promedio por tipo de vía.

FACTORES DE EMISION DE MONOXIDO DE CARBONO [g/Km]		
TIPOS DE VEHICULOS	(30 km/hr)	(60 km/hr)
AUTOS	33.66	18.75
AUTOBUSES	7.66	6.77
CAMIONES	84.19	40.15
TRAILERS	7.66	6.77

Tabla 2.8 Factores de emisión utilizados en las vías primarias

X.- Fracciones de vehículos con modo de arranque frío.

La información que contiene este archivo se obtuvo de (Reynolds, 1973) debido a la ausencia de información local que permitiera conocer las fracciones por periodo de los vehículos que arrancan con el motor frío. La información empleada se muestra en la tabla 2.9.

Periodo de Tiempo	FaccVehF
00:00 — 06:00	0.90
06:00 — 09:00	0.85
09:00 — 12:00	0.25
12:00 — 14:00	0.30
14:00 — 17:00	0.20
17:00 — 19:00	0.50
19:00 — 21:00	0.15
21:00 — 24:00	0.20

Tabla 2.9 Fracciones de vehículos que arrancan con el motor frio.

XI.- Factores de composición vehicular en vías secundarias.

Para formar este archivo el modelo utiliza la información respecto al número de vehículos registrados por placas y por delegación, proveniente del Programa de Placa Permanente proporcionado por la Coordinación General de Transporte. Dicha información se muestra en la tabla 2.10.

Posteriormente se obtuvo el promedio por tipo de vehículos que se encuentran en cada delegación, como se muestra en la tabla 2.11.

Finalmente, utilizando el mapa de delegaciones anteriormente mencionado, el modelo localiza las celdas que les corresponde a cada delegación y vacía la información de la tabla anterior, formando así N archivos de composición vehicular, que en el presente caso corresponden a los siguientes archivos TipoSec1.dat, TipoSec2.dat y TipoSec3.dat.

XII.- Factores de emisión en la vialidad secundaria:

Con base en las fuentes de información ya mencionadas en el inciso VII y tomando en consideración los modos de arranque previamente discutidos, se determinó una velocidad promedio de aproximadamente 30 km/hr en este tipo de vías. Por lo tanto, los

DELEGA.	AUTOS	CAMIONES	OMNIBUS	TOTAL
AO	131352	8980	234	140566
AZ	95794	15335	73	111202
BJ	189185	14370	8291	211846
CO	160217	7837	243	168297
CP	18014	1489	15	19518
CU	195242	26746	776	222764
BM	212939	15854	401	229194
IC	87685	10452	64	98201
IP	164630	19429	117	184176
MC	28926	1446	22	30394
MH	162440	15641	319	178400
MA	5413	1347	2	6762
TH	17032	2302	11	19345
TL	87152	6926	180	94258
VC	100512	8767	75	109354
XO	34328	5601	29	39958

Tabla 2.10 Composición vehicular en la vialidad secundaria

DELEGA.	AUTOS %	CAMIONES %	OMNIBUS %	TOTAL %
AO	93.44507	6.388458	0.166469	100
AZ	86.14413	13.79021	0.065646	100
BJ	89.30307	6.783229	3.913692	100
CO	95.19896	4.656648	0.144387	100
CP	92.29429	7.628855	0.076852	100
CU	87.64522	12.00642	0.348350	100
BM	92.90775	6.917284	0.174960	100
IC	89.29135	10.64347	0.065172	100
IP	89.38732	10.54914	0.063526	100
MC	95.17009	4.757517	0.072382	100
MH	91.05381	8.767376	0.178811	100
MA	80.05028	19.92014	0.029577	100
TH	88.04342	11.89971	0.056862	100
TL	92.46111	7.347917	0.190965	100
VC	91.91433	8.017082	0.068584	100
XO	85.91020	14.01721	0.072576	100

Tabla 2.11 Factores de composición por delegaciones en vías secundarias.

factores de emisión que se utilizaron para formar este archivo corresponden a los 3 tipos de vehículos y a los 2 modos de arranque (arranque con el motor frío y caliente). Lo anterior se muestra en la tabla 2.12.

FACTORES DE EMISION DE MONOXIDO DE CARBONO [g/Km]		
TIPOS DE VEHICULOS (30 km/hr)	MODOS DE ARRANQUE	
	FRIO	CALIENTE
AUTOS	33.66	18.75
CAMIONES	84.19	40.15
OMNIBUSES	7.66	6.77

Tabla 2.12 Factores de emisión para vehículos en vías secundarias.

VII.- Factores de corrección de las emisiones.

La información que contiene este archivo se obtuvo de (Reynolds, 1973) debido a la ausencia de información local que permitiera conocer los factores de corrección de las emisiones dado al número de vehículos que inician su recorrido con el motor en frío. Dichos factores se muestran en la tabla 2.13.

Periodo	Fac cVehF
00:00 — 05:00	1.00
05:00 — 06:00	1.16
06:00 — 07:00	1.20
07:00 — 08:00	1.04
08:00 — 09:00	0.97
09:00 — 24:00	1.00

Tabla 2.13 Factores de corrección de las emisiones vehiculares.

3. MODELO METEOROLOGICO

En este capítulo se revisan los factores que determinan la distribución de contaminantes en la atmósfera, la forma matemática de representarlos, las suposiciones realizadas para obtener un campo de vientos a partir de técnicas de interpolación, la adaptación del programa de interpolación seleccionado para ser usado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y, finalmente, los algoritmos para estimar la altura de capa de mezcla y los coeficientes de difusión que serán empleados por el modelo de difusión para monóxido de carbono.

3.1 *Fundamentos*

Para simular la dispersión atmosférica debe tenerse en cuenta que se analizan varios mecanismos de transporte que actúan

simultáneamente y por lo tanto la "distribución" de contaminantes no se puede relacionar únicamente con un proceso de difusión (producto de los gradientes de concentración o temperatura entre la pluma y el medio) o con la conducción del contaminante en estado pasivo dentro de corrientes de aire, o con el promedio numérico de ambos efectos. La medida en que uno u otro de estos procesos controlan la dispersión de contaminantes varía notablemente, por lo cual ambos deben evaluarse conjuntamente para los datos físicos particulares del caso que se analiza. Los parámetros que influyen o determinan la dispersión son: meteorológicos, topográficos y las características fisicoquímicas de la emisión.

3.1.1 Factores meteorológicos

Los parámetros meteorológicos de importancia dentro del proceso de dispersión atmosférica son: gradiente de temperatura, velocidad y dirección del viento, y altura de la capa de mezcla.

Gradiente térmico

Pocas veces se considera el gradiente térmico de la atmósfera como una variable explícita del modelo de dispersión, ya que está estrechamente relacionado con otro parámetro de mucho mayor uso conocido como *estabilidad atmosférica*.

El concepto de estabilidad atmosférica se refiere a la capacidad que tiene la atmósfera para suprimir o acrecentar los movimientos convectivos del aire, originados principalmente por los gradientes térmicos que existen en las capas atmosféricas cercanas a

la superficie del suelo, en donde el aire se calienta debido a la radiación solar y terrestre.

La estabilidad atmosférica se evalúa comparando el gradiente térmico medido en la zona de interés (dT/dz), con el gradiente adiabático seco teórico de la misma (-0.986 C/100 m). Si el valor del gradiente es menor, existirá más movimiento entre las capas atmosféricas (mayor mezclado y dispersión de contaminantes); pero, si este valor es mayor el movimiento se inhibe, llegando a ser nulo cuando el gradiente es cero o positivo (inversión térmica).

Pasquill (1962) efectuó una clasificación de las condiciones atmosféricas considerando siete categorías o clases de estabilidad, las cuales se presentan en la tabla 3.1.

En el modelo de interpolación que aquí se plantea, se emplea la clase de estabilidad atmosférica para estimar los perfiles verticales de velocidades, cuando no existen datos suficientes (ver inciso 3.3.1).

Desafortunadamente, la estabilidad atmosférica no es reportada por las estaciones meteorológicas, por lo que debe recurrirse a métodos empíricos auxiliares que permitan deducir una u otra información a partir de los datos reportados.

Campo de viento

La influencia que ejercen la dirección y la velocidad del viento sobre los niveles de la calidad del aire de una localidad es bien conocida: de la frecuencia con la cual sopla el viento en cierta dirección depende el grado de afectación de los receptores ubicados en esa dirección, viento abajo de la fuente emisora;

mientras que de su intensidad dependerá en gran parte la rapidez de dilución de los contaminantes que se emiten y por lo tanto su concentración a nivel del piso.

CLASE <i>m</i>	CATEGORIAS DE PASQUILL	DESCRIPCION	GRADIENTE TERMICO K/100 m
1	A	extremadamente inestable	< -1.9
2	B	inestable	-1.9 a -1.7
3	C	ligeramente inestable	-1.7 a -1.5
4	D	neutral	-1.5 a -0.5
5	E	ligeramente estable	-0.5 a 1.5
6	F	estable	1.5 a 4.0
7	G	extremadamente estable	> 4.0

Tabla 3.1. Categorías de estabilidad atmosférica.

Los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional corresponden a una altura de medición de 10 metros (sobre el piso o caseta de adquisición de datos), por lo que para obtener el perfil vertical correspondiente es necesario suponer la forma matemática de dicho perfil. Para esto se emplea la información reportada por el Aereopuerto y la fórmula sugerida por Csanady (1973):

$$u = u_0 (z/z_0)^p \quad (3.1)$$

válida para la capa atmosférica planetaria, y en donde u_0 es la velocidad del viento medida en z_0 y p es un exponente empírico que varía en función de características locales, y cuya evaluación

dentro de este trabajo se detalla en el inciso 3.3.1.

Altura de capa de mezcla

La altura de capa de mezcla (ACM) constituye el espesor de la capa de aire más próxima a la superficie de la tierra en donde el aire, debido a sus movimientos turbulentos, se mezcla vigorosamente. Este movimiento es provocado por vórtices convectivos que se forman principalmente como consecuencia del calentamiento del aire en contacto con el suelo. Dentro de esta capa de mezcla, la atmósfera se caracteriza por su inestabilidad, es decir, presenta una estructura térmica con un gradiente de temperatura de menor valor que el gradiente adiabático seco. Cuando el gradiente de temperatura es positivo (atmósfera estable), el concepto de altura de capa de mezcla carece de significado.

Dentro de una misma región geográfica, la ACM puede presentar variaciones temporales notables, las cuales influyen en forma significativa en los niveles de la calidad del aire. Así, las fluctuaciones diurnas de la ACM, la cual adquiere su valor máximo pasado el medio día y su valor mínimo poco antes de la salida del sol, coinciden sensiblemente con los niveles mínimos y máximos, respectivamente, de las concentraciones de contaminantes poco reactivos emitidos a la atmósfera.

La medición de la ACM se efectúa en forma indirecta utilizando las mediciones rutinarias del perfil térmico de la atmósfera, que propociona un radiosondeo. Para obtener la ACM mínima se asciende por una línea adiabática seca en el diagrama termodinámico hasta intersectar el perfil del radiosondeo observado a las 12 horas. La

ACM máxima se calcula en forma similar a la mínima, empleando la máxima temperatura superficial observada durante el día. Por encima de la ACM la temperatura del aire se mantiene constante o bien aumenta con la altura.

En la sección 3.4 de este capítulo se presentará la metodología propuesta para evaluar la altura de capa de mezcla dentro del área de este estudio y su evolución para un periodo de 24 horas.

3.1.2 Topografía

Las características del terreno (topografía y/o rugosidad) deben también tenerse en cuenta ya que pueden llegar a ser el factor determinante en la dispersión de contaminantes. La existencia de obstáculos (colinas, arboledas, edificios, etc.) en la trayectoria de una pluma contaminante puede favorecer su dispersión creando flujos turbulentos que aumenten el mezclado o por el contrario perjudicarla impidiendo la salida de una corriente contaminante atrapada en un valle o dentro de la zona de calma que se forma después del obstáculo. En uno u otro caso es importante el considerar dichas irregularidades topográficas dentro de los modelos de dispersión.

Los datos de topografía de la zona de estudio (topografía física), se introducen dentro del modelo mediante una corrección de la malla vertical de cálculo, la cual se explica en detalle dentro de la descripción del programa DWM (sección 3.2.2).

Para representar la rugosidad media del terreno (topografía urbana), considerando campo abierto, arboleda, zona urbana o semi-urbana, zona montañosa, etc., se emplean perfiles empíricos

(ver por ejemplo Turner, 1967) que se combinan para cada punto de cálculo con los perfiles de velocidad resultado de la interpolación.

3.1.3. Ecuaciones generales

Desde un punto de vista riguroso, el movimiento del aire atmosférico es un flujo turbulento tridimensional, y las expresiones matemáticas que lo describen son por tanto las ecuaciones generales de flujo de fluidos, esto es:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.2)$$

Ecuación de momento

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \quad (3.3)$$

Ecuación de escalares

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (3.4)$$

donde la expresión matemática a partir de la cual se evalúa el tensor de esfuerzos, σ_{ij} , que aparece en la ecuación de momento (3.3) es:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.5)$$

y la viscosidad del fluido, μ , se considera constante para las

condiciones de trabajo del presente modelo.

Además, se debe hacer notar que la última ecuación corresponde a todas aquellas propiedades del fluido, ϕ , que son transportadas por el flujo (esto es: calor, concentración de especies, energía cinética, etc). En este sistema de ecuaciones x_i y u_i representan los tres ejes coordenados y las tres componentes de velocidad respectivamente.

La ecuación (3.4) para la concentración de monóxido de carbono será reescrita nuevamente en el siguiente capítulo, donde se plantea su solución. Esta sección continua con el estudio de las ecuaciones (3.2) y (3.3) y su empleo dentro del modelo que se propone.

La solución de la ecuación (3.3) para un área como la ZMCM, mediante el uso de modelos de turbulencia y métodos numéricos de aproximación, no será realizada en este trabajo, recurriendo a la obtención de un campo de viento (componentes de velocidad) mediante técnicas de interpolación ampliamente conocidas.

A pesar de no emplearse la ecuación general de momento para obtener el campo de vientos, la técnica de interpolación empleada hace uso de la ecuación (3.2) para calcular, satisfaciendo el principio de continuidad, la componente vertical del campo de velocidades.

A continuación se describe el programa de interpolación empleado y posteriormente, las modificaciones realizadas para adaptarlo a la ZMCM.

3.2 Modelo DWM de interpolación

El modelo descrito en esta sección es uno de los modelos

alternativos usados por el código computacional *UAM* (*Urban Airshed Model*) aprobado por la EPA (*Environmental Protection Agency*) como herramienta de cálculo para el estudio de la contaminación atmosférica. El modelo *DWM* (*Diagnostic Wind Model*) puede ser usado en forma separada para la generación del campo de vientos en una zona determinada o como modelo de apoyo para alimentar datos al modelo de dispersión atmosférica *UAM*.

DWM fue originalmente desarrollado por Goodin et al (1980) y sufrió varias modificaciones antes de ser incluido dentro del modelo *UAM*. Este modelo produce un campo tridimensional de viento a partir de datos observados en lugares específicos, los cuales combina con información topográfica para estimar los datos de viento para todos los puntos de una malla horizontal y a varios niveles sobre el terreno de cálculo.

A diferencia de otros programas de interpolación, en este se incluyen algunos *criterios de flexibilidad* que permiten: ponderar los datos que se manejan; variar la zona de representatividad de cada dato; incluir el efecto de barreras físicas sobre el campo de vientos; y minimizar el efecto divergente que se produce al calcular la componente vertical de velocidad a partir de la ecuación de continuidad.

Para introducir estos criterios, el programa inicia realizando una estimación de los *valores medios* de velocidad y dirección de viento a nivel del piso, obteniendo así un *campo inicial de velocidades* dentro del cual se considera la existencia de barreras de flujo y el efecto topográfico de la zona; Goodin et al (1979). Posteriormente se realiza una interpolación, empleando los datos de viento reportados por las estaciones meteorológicas, y considerando

las existencia de barreras físicas y el área de influencia asignada a estas estaciones.

Finalmente se calcula la componente vertical del campo de velocidades, corrigiendo las componentes horizontales para minimizar la componente divergente de la ecuación de continuidad.

3.2.1 Campo inicial de viento

Dentro del programa de cálculo, los datos de velocidad y dirección del viento se descomponen en sus componentes vectoriales oeste-este, $u_1 = u$, y sur-norte, $u_2 = v$; teniendo en cuenta que la dirección del viento esta dada por el ángulo θ , correspondiente a la dirección desde la cual sopla el viento (ver tabla 3.2).

A partir de la información disponible sobre vientos dominantes de la zona, en forma vectorial, se estima un campo inicial de velocidades. Posteriormente, este campo inicial será relacionado con la información horaria de vientos para proseguir con el proceso de interpolación. Sin embargo, cuando no se cuenta con datos horarios, el campo inicial es corregido considerando el efecto de topografía de la zona y calculando el valor mínimo de divergencia hasta satisfacer continuidad. En este estudio, no se han empleado los valores de viento dominantes, construyendo el campo inicial de viento a partir de la interpolación los datos horarios disponibles.

3.2.2 Efecto topográfico

El modelo *DWM*, como la mayoría de los modelos meteorológicos, emplea una transformación matemática sobre la escala vertical de

cálculo que permite simplificar el manejo de información y la selección del método numérico de solución, la cual depende de manera importante de las condiciones de frontera.

Dirección	Valor angular	θ	Dirección	Valor angular	θ
NNE	11.3-33.7	22.5	SSW	191.3-213.7	202.5
NE	33.8-56.2	45	SW	213.8-236.2	225
ENE	56.3-78.7	67.5	WSW	236.3-258.7	247.5
E	78.3-101.2	90	W	258.8-281.2	270
ESE	101.3-123.7	112.5	WNW	281.3-303.7	292.5
SE	123.8-143.2	135	NW	303.8-326.2	315
SSE	143.3-168.7	157.5	NNW	326.3-348.7	337.5
S	168.8-191.2	180	N	348.8-11.2	360

Tabla 3.2 Angulo de dirección del viento

Al emplear una malla vertical modificada, que sea paralela a la topografía de la zona, es posible emplear como condición para la frontera inferior de cálculo las condiciones de pared ($u=v=0$), facilitando así notablemente los requerimientos numéricos. La transformación que se emplea en *DWM* es:

$$z^* = \frac{z - h}{H - h} \quad (3.6)$$

siendo z la altura del punto de cálculo, h la elevación del terreno en ese punto y H la altura del dominio de cálculo, todas referidas al nivel del mar.

Aplicando esta transformada a la ecuación de continuidad (ec. 3.2) en estado estacionario, se obtiene:

$$\frac{\partial w^*}{\partial z^*} + \frac{\partial(u\Delta H)}{\partial x} + \frac{\partial(v\Delta H)}{\partial y} = 0 \quad (3.7)$$

en la cual ΔH es igual a $H-h$, y w^* es la componente vertical de velocidad referida a un sistema de coordenadas paralelo a la superficie del terreno. Esta ecuación será posteriormente usada dentro del proceso de reducción de divergencia.

Además de esta corrección de escala, la topografía se emplea para evaluar la pendiente de flujo y el efecto de bloqueo, los cuales modifican los valores iniciales de la velocidad. La pendiente de flujo se calcula en cada punto de la malla, en donde se define un ángulo de drenaje el cual se suma a la dirección del viento en ese punto. Esto es:

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta + 90 - \beta' & 0 < \beta' < 90 \\ \theta' &= \theta + 450 - \beta' & 90 < \beta' < 360 \end{aligned} \quad (3.8)$$

en donde β' toma los valores que se presentan en la tabla 3.3, en la cual β corresponde al ángulo o pendiente de flujo:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial h / \partial y}{\partial h / \partial x} \right) \quad (3.9)$$

	$\partial h / \partial x = 0$	$\partial h / \partial x < 0$	$\partial h / \partial x > 0$
$\partial h / \partial y = 0$	*	$\beta + 180$	$\beta + 360$
$\partial h / \partial y < 0$	270	$\beta + 180$	$\beta + 360$
$\partial h / \partial y > 0$	90	$\beta + 180$	β

* No hay pendiente

Tabla 3.3 Ángulo de drenaje topográfico, β

El llamado efecto de bloqueo considera la posible desviación vertical que puede sufrir el viento al encontrar un obstáculo en su

trayectoria. Para considerar tal efecto, se evalúa el número de Froude en cada punto de la malla:

$$Fr = \frac{V}{F(h_m - z)} \quad (3.10)$$

donde h_m es la altura máxima dentro de la celda y F es el número de frecuencia de Brunt-Vaisala definido por la siguiente ecuación (ver Douglas et al, 1990):

$$F = [(g/\phi) (d\phi/dz)]^{1/2} \quad (3.11)$$

Cuando el número local de Froude es mayor que la unidad, no se modifican las condiciones del viento, pero cuando este número es menor se introduce un componente vertical ascendente (se modifica el ángulo, no la velocidad), de tal manera que el viento fluye tangencialmente a la superficie del terreno.

3.2.3 Interpolación horizontal

Dentro de esta etapa de interpolación, se corrige el campo inicial de velocidades calculado según los incisos anteriores, introduciendo los valores observados en las estaciones meteorológicas (u_{ik} , medidos). Esto es:

$$u_i = \frac{\sum_{k=1}^n [u_{ik} r_k^{-c}] + u'_{i0} R_0^{-c}}{\sum_{k=1}^n (r_k^{-c}) + R_0^{-c}} \quad (3.12)$$

en donde u'_{i0} son los valores iniciales, corregidos por topografía, y R_0 es el radio de influencia asociado a las estaciones.

En la ecuación (3.12) el valor del exponente c varía con el

número de datos disponibles para la interpolación. Para un número considerable de datos $c=2$ (generalmente datos superficiales) y, cuando existen pocos datos $c=1$ (datos en la vertical).

Una explicación detallada de este y otros métodos de interpolación recomendados, puede consultarse en los artículos publicados por Goodin et al (1979 y 1980) y Douglas et al (1990), ya que aquí sólo mencionaremos que debido al número de datos disponibles en la ZMCM, se uso $c=1$ para todas las interpolaciones.

3.2.4 Reducción de divergencia

Este método consiste en suavizar por medio de cálculos sucesivos los gradientes existentes entre los valores de velocidad de viento entre puntos vecinos de la malla de cálculo. Esto es:

$$u_{i,j}^{n+1} = 0.20 (u_{i,j}^n + u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n) (1 - \alpha_k) + \alpha_k u_{i,j}^n \quad (3.13)$$

en donde α_k es un parámetro de caracterización meteorológico. Cuando α_k es igual a la unidad el valor de velocidad se mantiene independiente de los datos vecinos, por ser un dato medido que no debe modificarse; mientras que si α_k es igual a cero corresponde a un dato calculado que debe recalcularse con base en los datos vecinos. Este parámetro permite además caracterizar la calidad de los datos meteorológicos que se introducen al programa; si la estación meteorológica esta localizada en una zona de grandes fluctuaciones de viento, o el equipo de medición es poco confiable, es posible reducir el valor de este parámetro ($\alpha_k < 1$), reduciendo

así la influencia de tales defectos.

La evaluación de este parámetro de caracterización para el caso de la ZMCM, es una de las principales contribuciones de este trabajo, y los detalles de esta evaluación se presentan en la sección 3.3.2 y en el apéndice A.

Una vez aplicada la ecuación (3.12) en cada una de las alturas de cálculo, se estima la componente vertical de la velocidad a partir de la ecuación de continuidad (3.7) discretizada centralmente, esto es:

$$\mathcal{D}_{1,j,k}^{n+1} = \frac{w_{1,j,k+1/2}^* - w_{1,j,k-1/2}^*}{\Delta z^*} + \Delta H \left[\frac{u_{1+1/2,j,k}^{n+1} - u_{1-1/2,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{1,j+1/2,k}^{n+1} - v_{1,j-1/2,k}^{n+1}}{\Delta y} \right] \quad (3.14)$$

donde $\mathcal{D}_{1,j,k}^{n+1}$ es la *divergencia remanente* después de $n+1$ iteraciones. Y $w_{1,j,k-1/2}^*$ se considera igual a cero, temporalmente, para desconectar las alturas de cálculo y reducir la divergencia en la frontera superior.

Posteriormente se recalculan las componentes horizontales de velocidad, de tal manera que los valores corregidos que se obtengan, u^* y v^* satisfagan los siguientes criterios:

$$\begin{aligned} u_{1+1/2,j,k}^{n+1} &= u_{1+1/2,j,k}^n + u^* \\ u_{1-1/2,j,k}^{n+1} &= u_{1-1/2,j,k}^n - u^* \\ v_{1,j+1/2,k}^{n+1} &= v_{1,j+1/2,k}^n + v^* \\ v_{1,j-1/2,k}^{n+1} &= v_{1,j-1/2,k}^n - v^* \end{aligned} \quad (3.15)$$

Y:

$$0 = \mathcal{D}_{i,j,k}^n + \Delta H \left(\frac{2u^*}{\Delta x} + \frac{2v^*}{\Delta y} \right) \quad (3.16)$$

La solución sucesiva de las ecuaciones (3.14) a (3.16) permite estimar un campo de velocidades en el cual el valor de la divergencia, será siempre menor a la componente vertical de velocidades, además de minimizar el valor del error local.

3.3. Adaptación del modelo

Como cualquier otro modelo de interpolación, éste dará buenos resultados si existen suficientes datos para efectuar la interpolación, y disminuirá la calidad de su respuesta con la escasez de estos; esto es, la eficiencia del modelo está directamente relacionada con el número de datos disponibles, como se ve en la figura 3.1:

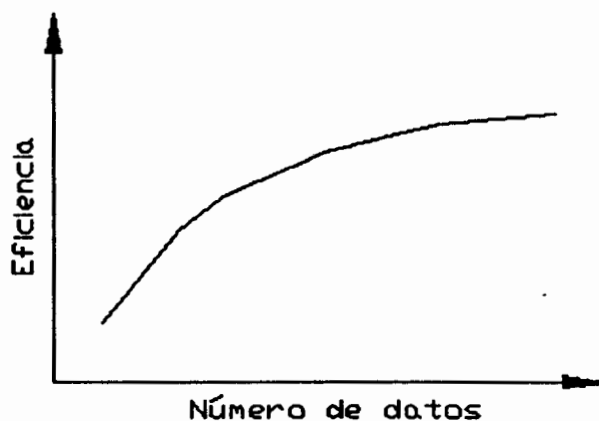


Figura 3.1 Relación entre el número de datos disponibles y la eficiencia de un modelo de interpolación.

Para evitar resultados erróneos debido al reducido número de datos disponibles para la ZMCM, se hicieron algunas suposiciones que

permiten adaptar el modelo anteriormente descrito para su uso en esta región y asegurar la eficiencia del programa y la calidad de los resultados.

En México, desafortunadamente, no hay muchas estaciones en donde se midan la dirección y la velocidad del viento. A nivel del piso sólo se miden estos parámetros en 10 de las 25 estaciones de la red de monitoreo operada por el Instituto Nacional de Ecología (antes SEDUE) y en dos estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, ubicados en el Observatorio de Tacubaya y en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Sólo en esta última se registra el perfil vertical de velocidades, medido dos veces al día por medio de una radiosonda.

Recientemente se han instalado otras estaciones que miden parámetros meteorológicos, como por ejemplo la estación de SEDUE en el Palacio de Justicia y la estación del Centro de Ciencias de la Atmósfera ubicada sobre el Palacio de Minería. Sin embargo, estas estaciones tienen poco tiempo operando y por problemas de calibración todavía no existen datos continuos.

Para el caso de la ZMCM se adaptó el modelo introduciendo dos consideraciones principales. En primer lugar, se estima el perfil vertical de viento para diferentes puntos de la ciudad, tomando en cuenta el perfil medido en la estación del Aeropuerto Internacional, su evolución horaria esperada y la topografía urbana en el punto de interés. Un segundo cambio es la asignación de factores de caracterización para cada estación meteorológica, los cuales se emplean para reducir los posibles efectos negativos asociados a la localización de estas estaciones.

3.3.1. Perfil vertical de viento

Debido a que el aire es un fluido viscoso, el efecto de la superficie de la tierra sobre la velocidad del viento produce un perfil vertical *característico*, el cual indica un aumento de la velocidad del viento con la altura. Esto no sucede bruscamente; la influencia de la superficie sobre el viento se extiende varios metros sobre la superficie, dentro de la llamada *capa de mezcla*. En esta capa la velocidad del viento decrece gradualmente ya que la cantidad de momento del flujo se transporta verticalmente hasta tener un valor de cero en la superficie; la turbulencia (mecánica o térmica) proporciona un mecanismo eficiente para transferir el momento de un nivel a otro.

A meso y microescala, las características topográficas del terreno influyen fuertemente en el perfil vertical que se puede observar en cierta zona. La presencia de edificios, casas y árboles (rugosidad o *topografía urbana*) provoca efectos de fricción sobre las corrientes de aire y origina circulaciones locales que modifican los patrones de viento: se pueden generar remolinos (zonas de turbulencia), o zonas de calma atrás del obstáculo. En la figura 3.2 se ilustra la manera en la cual influye la rugosidad del terreno sobre el perfil de viento, Turner (1967).

La estabilidad atmosférica, que produce la llamada turbulencia térmica, también afecta la distribución de los vientos dentro de la capa de mezcla a través de su influencia en los movimientos verticales de las parcelas de aire. En condiciones inestables, el mezclado vigoroso en la atmósfera disminuye la diferencia de velocidades entre las capas de aire, y el perfil vertical de viento es suave y asemeja el perfil observado sobre un terreno liso; en condiciones estables,

fuerzas de flotación inhiben intercambios de momento y se desarrollan importantes gradientes verticales de dirección y velocidad del viento, y se produce un perfil semejante al observado en zonas poco rugosas.

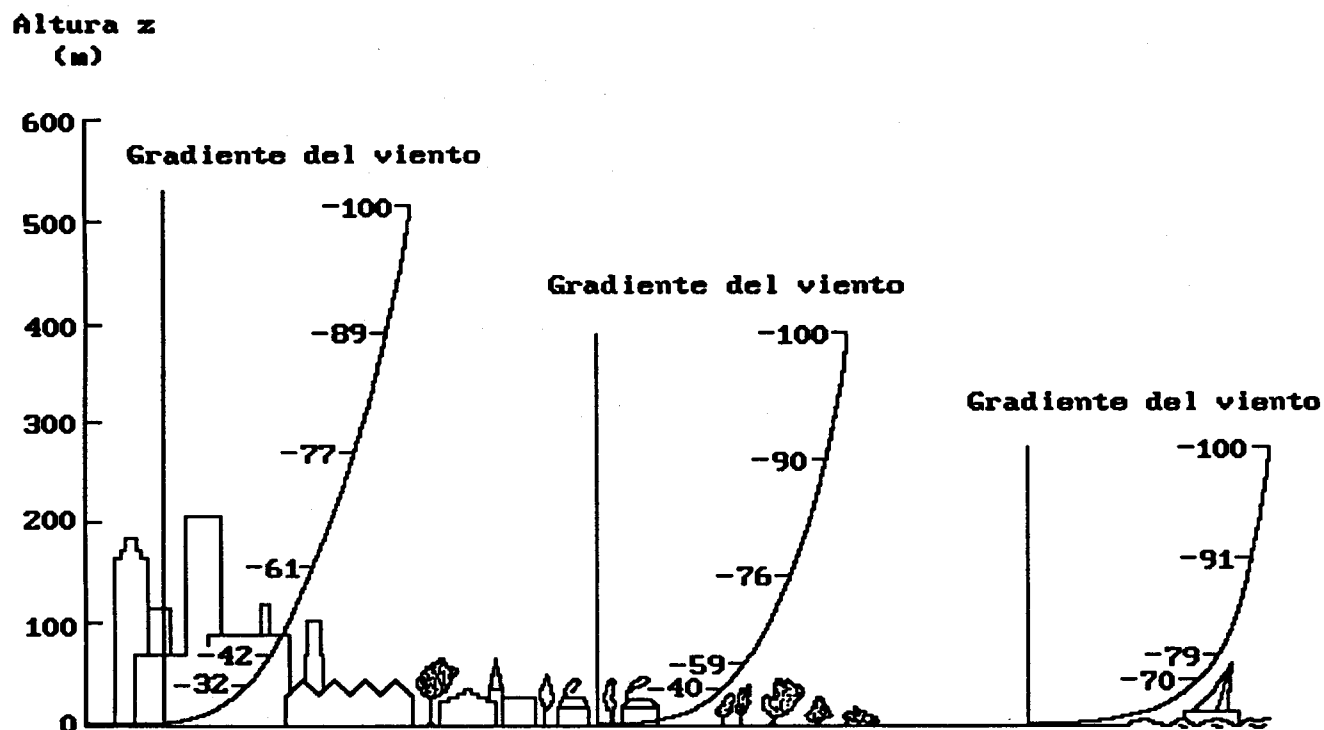


Figura 3.2 Ejemplos de la variación del viento con la altura para terrenos de diferente rugosidad.¹

La fórmula que se emplea en este trabajo para estimar el perfil vertical de velocidad es la ecuación (3.1). Esta ecuación tiene bases empíricas y proporciona un ajuste razonable de los perfiles observados en la parte más baja de la atmósfera (Arya, 1988). El exponente empírico p depende no sólo de la estabilidad atmosférica, sino también de la rugosidad de la superficie. En condiciones neutras, el valor de p varía de 0.1 para superficies planas hasta 0.4 para superficies rugosas.

¹ Los números sobre el perfil se refieren al porcentaje de la velocidad de viento libre o geostrófico alcanzado a cierta altura. El viento libre es el viento observado a una altura en la cual ya no influye el terreno.

Para encontrar una expresión para el exponente p , es necesario estimar la estabilidad atmosférica y la rugosidad del terreno a partir de los datos disponibles, ya que estos parámetros no se reportan directamente. A continuación se presentará un método para estimar la estabilidad atmosférica y la rugosidad y para calcular p a partir de ellos.

A. Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica se estima a partir de la velocidad del viento, la radiación solar incidente y la nubosidad (Turner, 1967). Irradiación solar "fuerte" corresponde a un ángulo de elevación solar mayor que 60° con cielo despejado; irradiación "leve" corresponde a un ángulo de 15° a 35° en condiciones despejadas (tabla 3.4).

Elevación solar	Insolación	Indice neto de radiación
$60^\circ < \alpha$	fuerte	4
$35^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	moderado	3
$15^\circ < \alpha \leq 35^\circ$	ligero	2
$\alpha \leq 15^\circ$	débil	1

Tabla 3.4 . Insolación en función de la elevación solar.

Para determinar el ángulo de elevación solar, se puede usar la tabla 170, *Solar Altitude and Azimuth* de las tablas meteorológicas Smithsonianas (List, 1951), o las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \sin^{-1} (\sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta \cos \delta) \quad (3.17)$$

en donde: α es el ángulo de elevación solar

La declinación solar θ está dada por la siguiente fórmula (Long, 1984):

$$\theta = 23.5 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{182.5} [\text{Día juliano} + 10]\right) \quad (3.18)$$

y el ángulo horario δ es (Fuentes y Aguirre, 1980):

$$\delta = \frac{\pi}{12} (h-12) \quad (3.19)$$

siendo h la hora del día (tiempo local).

La presencia de nubes disminuye la radiación solar incidente, por lo que se tiene que considerar ésta junto con el ángulo de elevación solar para la determinación de un índice neto de radiación *corregido*. Condiciones de radiación "fuerte" con cielo despejado se pueden reducir a radiación "media" con nubes de altura media, o "leve" con nubes a baja altura. Un sistema de clasificación basado en el método descrito, en donde se obtiene un índice neto de radiación solar corregido por las características de nubosidad, se presenta en la tabla 3.5.

Período	Fracción nublada	Altura de cielo raso (pies)	Índice neto de radiación para un ángulo de elevación solar α :			
			$\leq 15^\circ$	$15^\circ-35^\circ$	$35^\circ-60^\circ$	$\geq 60^\circ$
día	≤ 1.0	≤ 16000	1	2	3	4
	0.5 - 1.0	≤ 7000	1	1	1	2
	0.5 - 1.0	7000-16000	1	1	2	3
	1.0	≤ 7000	0	0	0	0
	1.0	7000-16000	1	1	1	2
	1.0	≥ 16000	1	1	2	3
noche	≤ 0.4		-2			
	0.4 - 1.0		-1			
	1.0	≤ 7000	0			
	1.0	≥ 7000	-1			

Tabla 3.5 Índice neto de radiación

En esta tabla, *noche* se refiere al período de 1 hora antes de la puesta del sol hasta 1 hora después de la salida del sol. Los números

negativos indican que la tierra irradia energía hacia la atmósfera, debido a la disminución de la temperatura durante la noche.

Con el índice neto de radiación obtenido y la velocidad del viento en el punto de interés (a una altura de 10 m), se estima la clase de estabilidad atmosférica, como se indica en la tabla 3.6:

Velocidad de viento (m/s)	Índice neto de radiación						
	4	3	2	1	0	-1	-2
≤ 1	A	A	B	C	D	F	G
1 - 2	A	B	B	C	D	F	G
2 - 3	A	B	C	D	D	E	F
3	B	B	C	D	D	E	F
4	B	B	C	D	D	D	E
4 - 5	B	C	C	D	D	D	E
5	C	C	D	D	D	D	E
6	C	C	D	D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D	D	D

Tabla 3.6 Categorías de estabilidad atmosférica

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) reporta en forma horaria el tipo de nube y la fracción del cielo cubierta con nubes. Estos datos, a pesar de no corresponder exactamente para toda la ZMCM, serán usados para estimar la estabilidad atmosférica. La altura de cielo raso se asigna a los datos de nubosidad reportados por el SMN empleando la tabla 3.7, construida a partir de las clasificaciones propuestas por LLaugé (1976) y Moran y Morgan (1989).

Nombre	Símbolo	Altura (m)	Altura típica (m)
Cirros	Ci	6000 - 18000	8000
Cirroestratos	Cs	6000 - 18000	8000
Cirrocúmulos	Cc	6000 - 18000	7000
Altoestratos	As	2000 - 6000	3500
Altocúmulos	Ac	2000 - 6000	3000
Estratocúmulos	Sc	0 - 2000	1500
Estratos	St	0 - 2000	800
Nimboestratos	Ns	0 - 4000	1200
Cúmulos	Cu	0 - 3000	900
Cumulonimbos	Cb	0 - 3000	800

Tabla 3.7 Clasificación de los tipos de nubes.

B. Rugosidad

Un parámetro utilizado comunmente para representar la rugosidad de un terreno es la *longitud de rugosidad* z_o , que depende de la altura de los elementos rugosos, ε . El rango de la variación de z_o sobre diferentes tipos de superficie es grande y las mediciones requeridas para estimar la rugosidad efectiva son muy complejas; a través de experimentos se encontró que $z_o \approx \varepsilon/30$ (Seinfeld, 1986). Valores de la longitud de rugosidad z_o para superficies típicas están dados en la tabla 3.8 (McRae et al., 1982; Seinfeld, 1986).

	Superficie	z_o , m
1	Muy liso (hielo, superficie de lodo)	10^{-5}
	Asfalto	2×10^{-5}
	Agua	10^{-4}
	Nieve	10^{-3}
	Mar en calma	10^{-3}
	Desierto (arena)	10^{-3}
2	Pasto corto	10^{-3}
	Césped cortado	10^{-2}
3	Césped sin cortar	0.05
	Cosechas desarrolladas	0.1
	Zona de árboles	1
4	Zona residencial de baja densidad	2
	Zona residencial de alta densidad	3 - 4
	Zona de oficinas y hoteles	5 - 10

en general:

- 1 Relieve plano sin vegetación
- 2 Relieve plano con vegetación
- 3 Relieve moderado
- 4 Areas urbanas

Tabla 3.8 Longitud de rugosidad para varias superficies

C. Cálculo de p

Para calcular p se propone emplear la siguiente ecuación (Huang, 1979):

$$p = \frac{\Phi_m \left(\frac{z}{L} \right)}{g \left(\frac{z}{L'} \frac{z_o}{L} \right)} \quad (3.20)$$

en donde L es la longitud de Monin-Obukhov, que es un parámetro que caracteriza la "estabilidad" de la capa superficial y cuyo valor se calcula a través de la fórmula (Seinfeld, 1986):

$$L = \frac{-\rho C_p T_o u_*^3}{\kappa g \bar{q}_3} \quad (3.21)$$

donde u_* es la velocidad de fricción

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}$$

$\bar{q}_3$ es el flujo vertical de calor debido a turbulencia

κ es la constante de von Karman (0.4)

T_o es la temperatura de referencia

Otra forma para obtener L es a través de una relación semiempírica establecida por Golder en función de la estabilidad atmosférica y la rugosidad z_o (Huang, 1979):

$$\frac{1}{L} = a + b \log z_o \quad (3.22)$$

Los coeficientes a y b están dados en la tabla 3.9.

	Clase Pasquill de estabilidad	Coeficientes	
		a	b
Extremadamente inestable	A	-0.096	0.029
Inestable	B	-0.037	0.029
Ligeramente inestable	C	-0.002	0.018
Neutra	D	0	0
Ligeramente estable	E	0.004	-0.018
Estable	F	0.035	-0.036

Nota: Para G (extremadamente estable) se empleará el valor de la clase F.

Tabla 3.9 Coeficientes a y b para la ecuación (3.22)

En la fórmula (3.20), $\Phi_m(z/L)$ es el esfuerzo cortante adimensional y $g(z/L', z_o/L)$ es la velocidad de viento adimensional (Huang, 1979; Zannetti, 1990), que se definen por:

$$\Phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.23)$$

$$g\left(\frac{z}{L'}, \frac{z_o}{L}\right) = \frac{\kappa u}{u_*} \quad (3.24)$$

En condiciones neutras se puede usar:

$$\Phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = 1 \quad (3.25)$$

$$g\left(\frac{z}{L'}, \frac{z_o}{L}\right) = \ln \frac{z}{z_o} \quad (3.26)$$

en condiciones inestables:

$$\Phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = 1 \quad (3.27)$$

$$g\left(\frac{z}{L'}, \frac{z_o}{L}\right) \approx \ln \frac{z}{z_o} - \ln \left[\left(\frac{1+x^2}{2} \right) \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2 \operatorname{ATN} x + \frac{\pi}{2} \quad (3.28)$$

con $x = (1 - 16z/L)^{1/4}$

en condiciones estables:

$$\Phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + 5\frac{z}{L} \quad (3.29)$$

$$g\left(\frac{z}{L'}\frac{z_o}{L}\right) = \ln\frac{z}{z_o} + 5\frac{z}{L} \quad (3.30)$$

3.3.2. Caracterización de las estaciones meteorológicas²

Debido a los pocos datos registrados, es importante aprovechar lo mejor posible la información disponible para generar resultados aceptables. Para esto se realizó una caracterización de la información que redujera los posibles errores de medición debido a la ubicación física de las estaciones meteorológicas. A cada estación se han asignado factores de caracterización, dependiendo de la precisión con la cual el valor reportado puede representar la velocidad del viento en una dirección determinada. Estos factores están basados en la ubicación de la estación y la presencia de obstáculos alrededor de la torre meteorológica, tienen un valor entre cero y uno, y fueron asignados mediante inspección directa a cada una de las estaciones.

Los factores se introducen en el módulo de reducción de divergencia del modelo de CALTECH a través del parámetro α_k . Este parámetro permite considerar la velocidad medida para cada dirección en la estación k como muy significativa ($\alpha_k=1$), o tomar en cuenta sólo parte de su influencia original ($\alpha_k<1$) cuando se considera la velocidad poco representativa. A cada una de las 10 estaciones se asignaron 16

² Cuando en este texto se habla de estaciones *meteorológicas*, se refiere a las estaciones de *monitoreo atmosférico*, operadas por el Instituto Nacional de Ecología (antes SEDUE), que además de contaminantes atmosféricos también miden parámetros meteorológicos.

factores, representando las 16 posibles direcciones de viento empleados, como se muestra en la figura 3.3 y en la tabla 3.10.

Para asignar los factores de caracterización se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- * Altura de medición
- * Presencia de árboles altos
- * Presencia de edificios altos
- * Presencia de valles o cerros

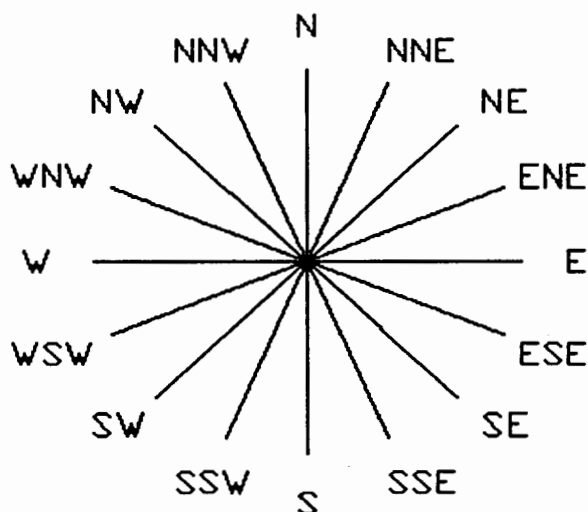


Figura 3.3 Direcciones del viento

Dirección		Dirección		Dirección		Dirección	
NNE	1	ESE	5	SSW	9	WNW	13
NE	2	SE	6	SW	10	NW	14
ENE	3	SSE	7	WSW	11	NNW	15
E	4	S	8	W	12	N	16

Tabla 3.10 Relación entre la dirección del viento y el número de sector.

Como ejemplo se analiza aquí el contorno físico de la estación meteorológica ubicada en la ENEP-Acatlán (figura 3.4).

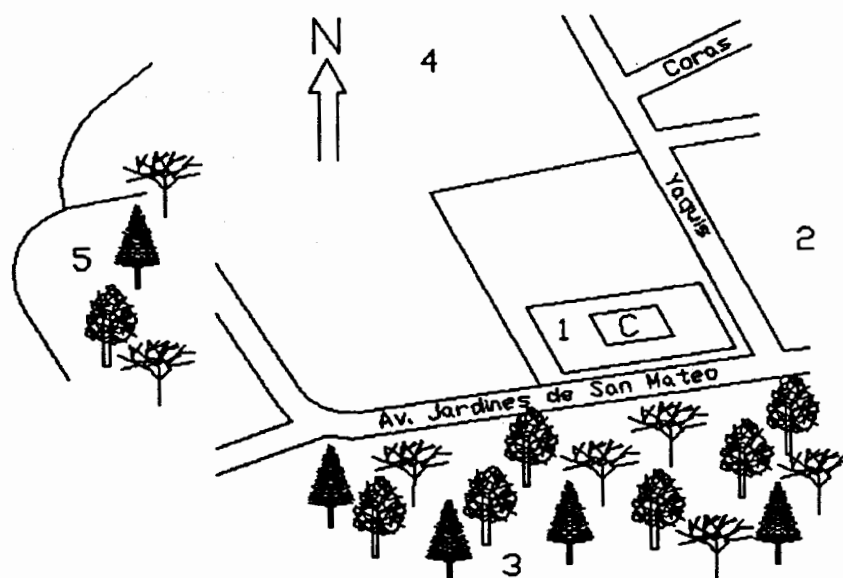


Figura 3.4 Entorno físico de la estación en la ENEP-Acatlán.

La torre meteorológica de esta estación de monitoreo está ubicada sobre los edificios de la ENEP-Acatlán (1), por lo que se estima que la altura efectiva de medición es 22 m. Al sur de la estación, a no más de cien metros, se observa una zona arbolada (3), sobre una colina. En el norte-noroeste existe un espacio abierto (4) a menor altura que el terreno de la ENEP y que se extiende aproximadamente 500 m. Al este de la estación se encuentra una zona de edificios bajos de un piso (2) y al oeste, a una distancia de aproximadamente dos kilómetros hay cerros (5), lo suficientemente alejados como para no influir en la medición de la velocidad y la dirección del viento.

Tomando en cuenta el entorno físico de esta estación, se concluye que las mediciones de los parámetros meteorológicos no son muy representativas para el viento que proviene del sur y, como la presencia de edificios bajos no influye en la medición, se proponen los siguientes valores para α_k (tabla 3.11):

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	0.6
2	1	10	0.7
3	1	11	0.8
4	1	12	0.8
5	1	13	1
6	0.9	14	1
7	0.8	15	1
8	0.6	16	1

Tabla 3.11 Valores de α_k para la estación de ENEP-Acatlán.

Las otras 9 estaciones meteorológicas del INE se analizaron de la misma manera y los valores α_k se resumen en la tabla 3.12, mientras que el diagrama de ubicación y la descripción del entorno físico se proporcionan en el apéndice C. En la tabla 3.12 también se indican los valores de α_k para la estación Tacubaya del Servicio Nacional Meteorológico.

		Xalostoc	Tlalnepantla	Pedregal	Acatlán	San Agustín	Plateros	Tacuba	Cerro de la Estrella	Merced	Hangares	Tacubaya
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
NNE	1	0.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NE	2	0.8	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1	1
ENE	3	0.8	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	4	0.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ESE	5	0.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SE	6	0.8	1	1	0.9	1	0.6	1	1	1	1	1
SSE	7	0.8	1	0.8	0.8	0.9	0.6	1	1	1	1	1
S	8	0.8	1	0.8	0.6	0.9	1	1	1	1	1	1
SSW	9	0.8	0.9	0.8	0.6	0.9	1	1	1	1	1	1
SW	10	0.8	1	0.8	0.7	0.9	1	1	1	1	1	1
WSW	11	0.8	1	1	0.8	1	1	1	1	1	1	1
W	12	0.8	1	1	0.8	1	1	1	1	0.8	1	1
WNW	13	0.8	1	1	1	1	1	1	1	0.6	1	1
NW	14	0.8	1	1	1	1	1	1	0.8	0.5	1	1
NNW	15	0.8	1	1	1	1	1	1	0.8	0.8	1	1
N	16	0.8	1	1	1	1	1	1	0.8	1	1	1

Tabla 3.12 Valores de α_k para las diez estaciones meteorológicas de la red de monitoreo y la estación Tacubaya.

3.3.3. Parámetros de cálculo

Los parámetros de cálculo que se mencionan a continuación corresponden específicamente a una área fija dentro de la ZMCM y deberán ser modificados si algún cambio ocurre dentro de esa área. Para definir la malla horizontal, se usa el sistema de coordenadas UTM (universal Transverse Mercator). La región de modelación consiste de una malla de 39 x 45 km, de la cual el vértice inferior izquierdo está situado en 470000, 2130000 UTM, incluyendo la mayor parte de la zona conurbada de la Ciudad de México; es la misma que emplean los modelos de emisiones y de difusión. La interpolación se efectúa en una malla horizontal de 3 km en x y en y, y en seis niveles verticales cuyo espesor se expande con la altura (tabla 3.13).

N° de nivel	Altura (m)
1	100
2	260
3	516
4	926
5	1580
6	2610

Tabla 3.13. Altura de los niveles de cálculo.

La topografía física de la región de estudio se obtuvo de una digitalización a partir de cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) a intervalos de 60 m; esta digitalización se efectuó en el Centro Científico de IBM. Además, se tomaron en cuenta cinco barreras de flujo, de las cuales cuatro se encuentran en el norte de la región de modelación (sierra de Guadalupe) y una en el sur (figura 3.5). Las coordenadas de las

barreras están presentadas en la tabla 3.14; en esta tabla, los números 1 y 2 corresponden a los puntos límites izquierdo y derecho de cada barrera respectivamente.

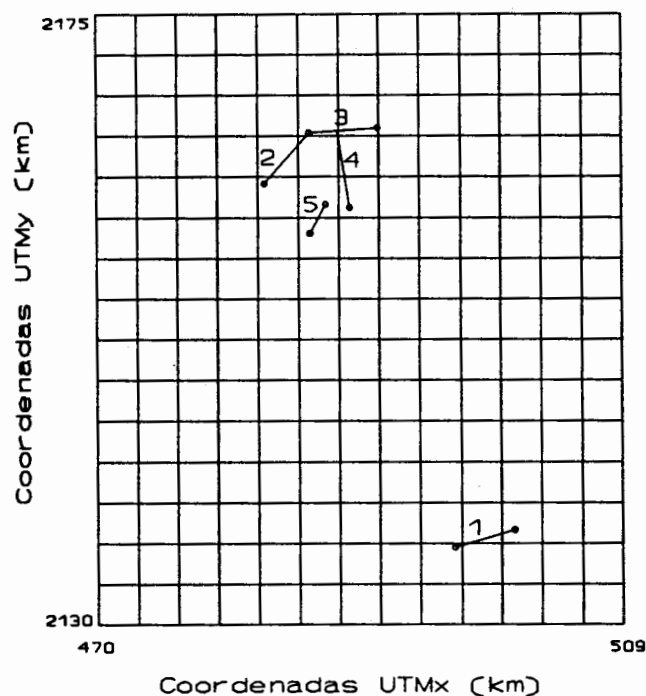


Figura 3.5. Barreras consideradas en el modelo

N° de barrera	UTMx(1) (km)	UTMy(1) (km)	altura (m)	UTMx(2) (km)	UTMy(2) (km)	altura (m)
1	496.50	2135.70	2500	501.00	2137.00	2800
2	482.50	2162.50	2700	485.80	2166.25	2750
3	485.80	2166.25	2750	490.90	2166.60	2800
4	487.90	2166.40	2900	488.80	2160.75	2700
5	485.85	2158.85	2650	487.00	2161.00	2600

Tabla 3.14. Coordenadas UTM de las barreras consideradas

El tiempo de simulación siempre es 24 horas, es decir de 1:00 a 24:00 horas.

Las características (coordenadas y altura de localización) de las diez estaciones meteorológicas de la ZMCM se incorporaron como base de datos dentro del programa (ver tabla 3.15 y figura 3.6) para facilitar el proceso de entrada de datos. Para el cálculo de los campos de velocidad en cada capa en la vertical, se introdujo al programa la información de la estación de monitoreo en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, y en caso de ser este el único dato disponible, se estiman los perfiles verticales de viento para las estaciones *Tlalnepantla* y *Pedregal*, según el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1).

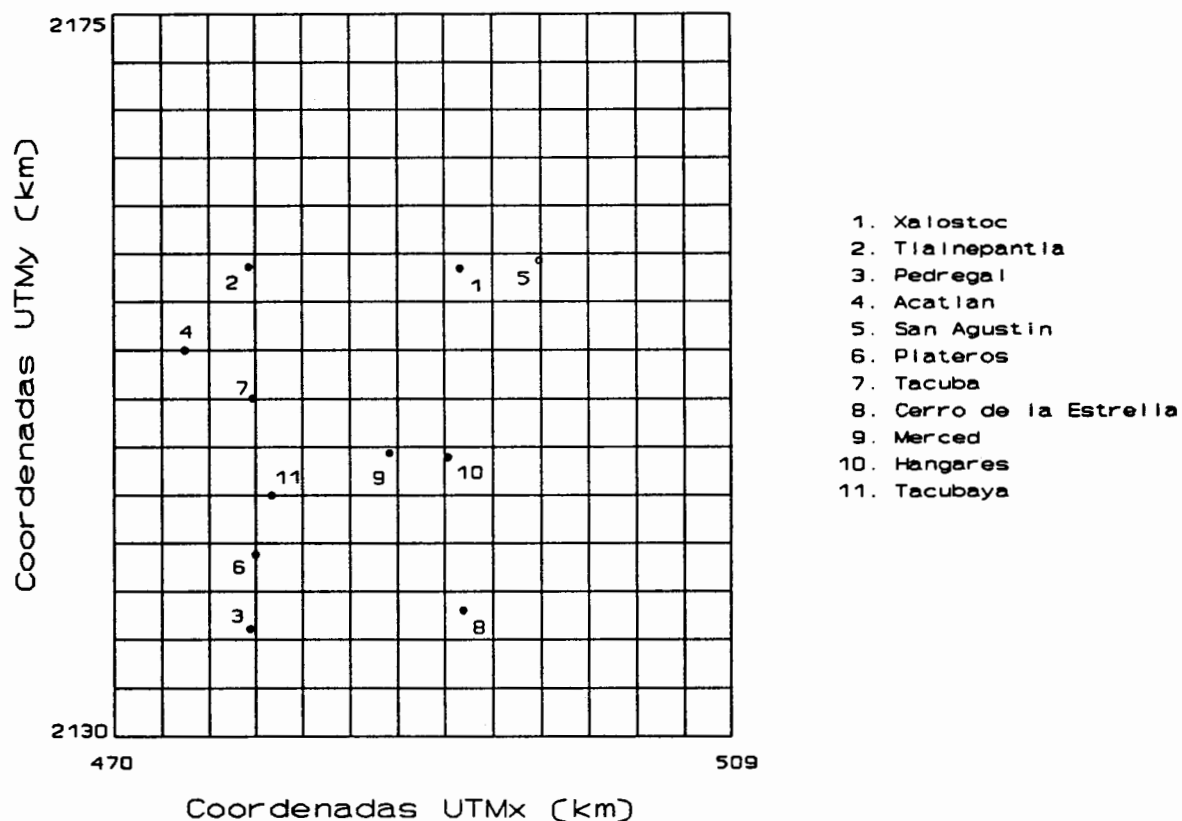


Figura 3.6. Estaciones meteorológicas en la Ciudad de México.

Estación		UTMx (km)	UTMy (km)	altura (m)
N°	Nombre			
1	Xalostoc	491.98	2159.07	2240
2	Tlalnepantla	478.56	2159.16	2260
3	Pedregal	478.62	2136.66	2340
4	Acatlán	474.47	2154.00	2240
5	San Agustín	496.91	2159.56	2240
6	Plateros	478.96	2141.30	2330
7	Tacuba	478.76	2151.03	2240
8	Cerro de la Estrella	492.16	2137.82	2240
9	Merced	487.48	2147.63	2240
10	Hangares	491.21	2147.36	2240
11	Tacubaya	485.85	2158.85	2240

Tabla 3.15. Coordenadas UTM de las estaciones meteorológicas

3.4. Cálculo de ACM

La evolución diurna de la altura de capa de mezcla es un dato indispensable para poder correr el modelo de dispersión. La ACM se evalúa dentro del modelo meteorológico a partir del perfil vertical de temperatura que, desafortunadamente, sólo se mide dos veces al día (a las 6 AM y 6 PM) en la estación meteorológica Aeropuerto por medio de radiosondeo.

3.4.1. Método directo

En las horas para las cuales se mide el perfil vertical (6 AM y 6 PM), se calcula la ACM comparando directamente el perfil observado con el gradiente térmico. La altura a la cual el valor del gradiente medido Λ es mayor o igual al gradiente adiabático Γ_a (ver inciso 3.1.1, gradiente térmico) se fija como la altura de capa de mezcla. Si existe una inversión térmica, la ACM calculada es igual a zero y el



programa adopta $ACM = ACM \text{ mínima} = 30 \text{ m}$ (Jauregui, 1993) para zonas urbanas, debido a la rugosidad. Cuando la altura de capa de mezcla es mayor a la altura máxima proporcionada en los datos de perfil del aeropuerto, se supone que ésta es infinita y el programa fija $ACM = 5650$ que corresponde a la altura máxima del dominio de cálculo.

3.4.2. Método de Holzworth

Para las horas en las cuales no existe un perfil vertical de temperaturas la ACM se estima a través del método de Holzworth (1964 y 1967), quien ha propuesto que la ACM matutina (ACM mínima) se obtiene agregando 5° a la temperatura mínima del día y con esta temperatura se asciende por una adiabática seca, hasta intersectar el perfil del radiosondeo observado a las 12:00Z (6 AM en la Ciudad de México). Los 5 grados se agregan para tomar en cuenta el efecto de isla de calor de la ciudad, ya que las mediciones de radiosondeo generalmente se hacen en el aeropuerto y este generalmente se encuentra fuera de la ciudad.

Para estimar la profundidad máxima de la CM se utiliza un método semejante, con la diferencia de que en este caso se utiliza la temperatura máxima alcanzada durante el día.

Las suposiciones hechas por Holzworth al proponer este método fueron:

- (1) Sólo se consideran efectos de convección, despreciando la advección o efectos de calma que pueden causar cambios en la estructura vertical de temperatura entre el momento de observación y el momento de cálculo.
- (2) No se consideran los esfuerzos cortantes o la turbulencia

mecánica que pueden aumentar o disminuir el mezclado vertical.

- (3) Finalmente, como rara vez las mediciones de radiosondeo se hacen a la hora de ACM máxima, se usa el perfil observado más reciente.

En este trabajo se utiliza el método de Holzworth para estimar la ACM horaria. Para esto, la adiabática seca que se traza parte de la temperatura superficial medida a la hora de cálculo y el perfil a interceptar es por lo tanto el más cercano a esa hora.

Según estudios hechos por Jauregui (1984), se ha encontrado que el efecto de isla de calor es variable en tiempo y en espacio (figura 7.3): para el mes de febrero, durante el día (10:00 - 18:00 hrs), la temperatura entre el aeropuerto y el centro de la ciudad es prácticamente la misma; sin embargo, a las 6 de la mañana, se encontró una diferencia media máxima de 3 grados. Se utilizarán estos resultados en vez de los cinco grados propuestos por Holzworth.

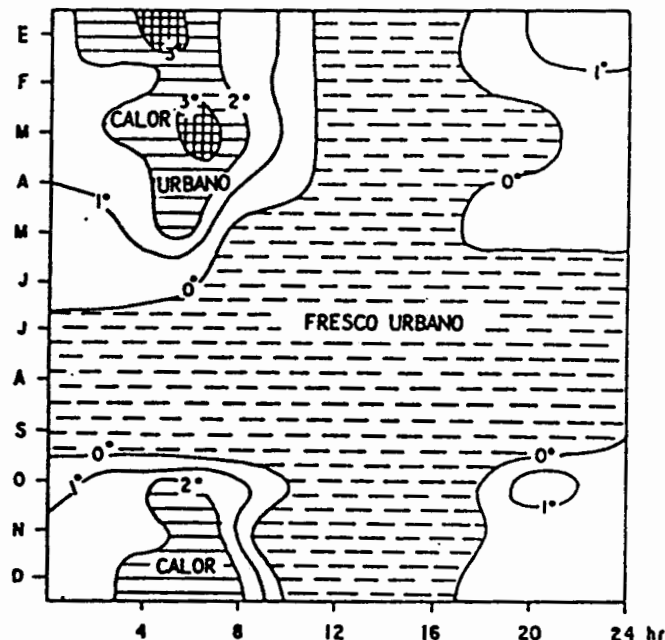


Figura 3.7 Variación diaria y mensual de la diferencia en temperatura en Tacubaya y en el aeropuerto de la Ciudad de México, 1979.

Después de estimar el valor para la ACM en el aeropuerto, se fija este como ACM para toda la ciudad. También aquí se fija como límite mínimo una ACM de 50 m y un límite máximo de 5650 m.

3.5. Coeficientes de difusión

Otro parámetro de importancia para el modelo de dispersión de contaminantes es el llamado coeficiente de difusión, el cual es función de la estructura atmosférica y por lo tanto también se evalúa dentro del modelo meteorológico.

Para el estudio de la concentración de monóxido de carbono en la atmósfera, la ecuación (3.4) será reescrita como:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \chi) = \frac{\partial}{\partial x_j} (K_j \frac{\partial \chi}{\partial x_j}) \quad (3.31)$$

en donde el término fuente ha desaparecido por considerarse el CO un gas inerte y dentro del término difusivo aparece la variable K_j cuyas tres componentes pueden ser expresados como funciones conocidas del espacio y de propiedades promedios del flujo.

Se han propuesto varias funciones para evaluar la difusividad horizontal K_H ($K_1=K_2=K_H$) y la difusividad vertical K_v . A continuación se mencionan algunas de las más empleadas.

3.5.1. Difusividad horizontal

1. Una aproximación sencilla y usada en varios modelos tradicionales, por ejemplo el modelo gaussiano, es que

$$K_H = K_y \quad (3.32)$$

en donde K_y es el coeficiente de difusividad turbulenta en la dirección perpendicular a la dirección del viento (con el viento soplando sobre el eje x positivo).

Considerando que la emisión puntual se distribuye aproximadamente como una gaussiana, la constante de difusión lateral K_y , para una pluma que se origina en $x=0$ y que es transportada sobre el eje x , está relacionada con la desviación estándar $\sigma_y(x)$ en la dirección y , esto es:

$$K_y = \frac{d\sigma_y^2}{2dx} = \frac{\bar{u}}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dx} \quad (3.33)$$

y la integración de esta ecuación:

$$\sigma_y(x) = \sqrt{\frac{2K_y x}{\bar{u}}} = \sqrt{2K_y t} \quad (3.34)$$

indica que σ_y crece linealmente con $x^{0.5}$ (Turner, 1967; Zannetti, 1990). Sin embargo, el análisis de datos sobre dispersión horizontal no confirman la última ecuación.

2. También Willis y Deardorff suponen que $K_H \approx K_y$ y derivan de mediciones la siguiente fórmula empírica para K_H , para condiciones inestables (Seinfeld, 1986):

$$\begin{aligned} K_H &\approx 0.1 w_* z_i \\ &\approx 0.1 z_i^{3/4} (-\kappa L)^{-1/3} u_* \end{aligned} \quad (3.35)$$

en donde z_i es la altura de la capa límite planetaria, w_* es la escala convectiva de velocidad, κ es la constante de von Karman (≈ 0.4), L es la longitud de Monin-Obukhov y u_* es la velocidad de

fricción.

McRae et al (1982) han usado esta relación, que proporciona valores entre 3000 y 6000 m^2/min para condiciones meteorológicas inestables; sin embargo, no es ampliamente usada por requerir de la evaluación de parámetros como u , z_i y L .

3. Finalmente, Reynolds et al (1973) propusieron un valor constante de $K_H = 2980 \text{ m}^2/\text{min}$ para la difusividad horizontal, el cual ha sido empleado en varios trabajos al igual que en este.

Difusividad vertical K_v

Es difícil estimar la constante de difusión vertical turbulenta K_v y también es difícil medir su valor directamente, así que muchas veces se calcula a través de datos observados. Para determinar K_v se tiene que tomar en cuenta lo siguiente:

1. Generalmente K_v aumenta linealmente con la altura cerca del suelo.
2. Cerca de la base de inversión se supone que K_v disminuye con el aumento de altura por la inhibición del efecto de flotación.
3. K_v puede variar de 30 m^2/min en condiciones estables hasta 3000 m^2/min en condiciones inestables (Reynolds et al, 1973).

Muchas teorías especifican la difusividad vertical K_v como función de la altura, entre ellas están las siguientes:

1. Para condiciones neutras Shir adopta la siguiente expresión (Seinfeld, 1986; Zannetti, 1990):

$$K_v = \kappa u_* z \exp\left(\frac{-8 z f}{u_*}\right) \quad (3.37)$$

en donde f es el parámetro de Coriolis, que se define por:

$$f = 2 \Omega \sin \Psi \quad (3.38)$$

Ω es la rotación de la tierra ($7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) y Ψ es la latitud.

2. También para condiciones *neutras*, Myrup y Ranzieri proponen (Seinfeld, 1986; Zannetti, 1990):

$$\begin{aligned} K_v &= \kappa u_* z && \text{para } z/z_i < 0.1 \\ K_v &= \kappa u_* z \left(1.1 - \frac{z}{z_i}\right) && \text{para } 0.1 \leq z/z_i \leq 1.1 \\ K_v &= 0 && \text{para } z/z_i > 1.1 \end{aligned} \quad (3.39)$$

3. Businger and Ayra proponen para condiciones *estables* las siguientes expresiones (McRae et al, Seinfeld, 1986):

$$K_v = \frac{\kappa u_* z}{0.74 + 4.7(z/L)} \exp\left(-\frac{8 f z}{u_*}\right) \quad (3.40)$$

y

$$K_v = \frac{\kappa u_* z}{1 + 4.7(z/L)} \exp\left(-\frac{8 f z}{u_*}\right) \quad (3.41)$$

que están basados en datos obtenidos en estudios de campo y no son aplicables para condiciones extremadamente estables ($z/L > 1$).

4. McRae et al (1982) usan, para la capa superficial *inestable* ($0 \leq z/z_i < 0.05$):

$$K_v = 2.5 w_* z_i \left[\kappa \frac{z}{z_i} \right]^{\frac{4}{3}} \left[1 - 15 \left(\frac{z}{L} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.42)$$

y, en la capa límite planetaria inestable ($z/z_i > 0.05$):

$$K_v = w_* z_i f \left(\frac{z}{z_i} \right) \quad (3.43)$$

en donde, para $0.05 \leq z/z_i \leq 0.6$:

$$f \left(\frac{z}{z_i} \right) = 0.021 + 0.408 \left(\frac{z}{z_i} \right) + 1.351 \left(\frac{z}{z_i} \right)^2 - 4.096 \left(\frac{z}{z_i} \right)^3 + 2.56 \left(\frac{z}{z_i} \right)^4$$

para $0.6 < z/z_i \leq 1.1$

$$f \left(\frac{z}{z_i} \right) = 0.2 \exp \left[6 - 10 \left(\frac{z}{z_i} \right) \right]$$

y para $z/z_i > 0.6$:

$$f \left(\frac{z}{z_i} \right) = 0.0013 \quad (3.44)$$

5. Seinfeld (1986) menciona una relación para K_v que se puede usar en la capa superficial:

$$K_v = \frac{\kappa u_* z}{\Phi(z/L)} \quad (3.45)$$

en donde:

$$\begin{aligned} \Phi(z/L) &= 1 + \frac{4.7z}{L} & z/L > 0 & \text{estable} \\ \Phi(z/L) &= 1 & z/L = 0 & \text{neutro} \\ \Phi(z/L) &= \left[1 - \frac{15z}{L} \right]^{-\frac{1}{2}} & z/L < 0 & \text{inestable} \end{aligned} \quad (3.46)$$

pero que no es aplicable arriba de esta capa.

6. Finalmente, Reynolds et al (1973) proponen la siguiente relación:

$$K_v = \begin{cases} [2.5q(x,y,t) - 77.3]z^* + 30.9 & 0 \leq z^* < 0.4 \\ q(x,y,t) & 0.4 \leq z^* < 0.8 \\ 5[30.9 - q(x,y,t)]z^* + 5q(x,y,t) - 123.6 & 0.8 \leq z^* \leq 1 \end{cases} \quad (3.47)$$

$$\text{donde } q(x,y,t) = 0.85 \sqrt{(u^2 + v^2) + 232} \quad (3.48)$$

Esta relación expresa la variación de K_v con la altura a través de las ecuaciones (3.47) y su variación con la posición geográfica (x, y) y el tiempo por medio de la ecuación (3.48), en la cual aparecen los componentes locales de velocidad de viento.

Considerando las limitaciones y estructura de cada una de las ecuaciones anteriores, así como los datos disponibles en el modelo meteorológico, esta última aproximación (Reynolds et al, 1973) fue elegida para su inclusión dentro de este estudio.

4. MODELO DE DISPERSION ATMOSFERICA

En este capítulo se presenta el modelo computacional tridimensional de monóxido de carbono para el Valle de México. La ecuación que gobierna este fenómeno es la ecuación de transporte atmosférico, que se describe a continuación; dentro de un dominio espacial Ω_t cambiante con el tiempo acotado por $\partial\Omega_t$, la conservación de masa de cada especie química p , $c_i(X,t)$; $i = 1, \dots, p$, puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones diferenciales acopladas,

$$\partial c_i / \partial t + \nabla \cdot (u c_i) = \nabla \cdot (K \cdot \nabla c_i) + f_i(c_1, \dots, c_p)$$

Para este sistema u es el campo de velocidades conocido, K es el tensor diagonal de difusividad de segundo orden y f_i la razón de cambio de la formación de especies química i , que no tomaremos en cuenta ya que al monóxido de carbono se le considerará como un gas inerte. Para completar éste problema se requiere especificar las condiciones iniciales y de frontera. Las condiciones iniciales

$c_i(X,0)$, están dadas mediante

$$c_i(X,0) = c_i^0(X); \quad i=1, \dots, p; \quad X \in \Omega_0.$$

Las condiciones frontera, que representan continuidad de masa a través de la frontera $\partial\Omega$, pueden ser de forma Dirichlet y Newmann combinadas,

$$a(X,t)c_i + b(X,t) \partial c_i / \partial \sigma = g_i(X,t),$$

donde σ indica la normal a $\partial\Omega$ y las funciones $a(X,t)$, $b(X,t)$ y $g_i(X,t)$ describen funciones que se especifican según sea el caso, ver Reynolds y Roth 1973.

El esquema general que se ha adoptado para la solución de esta ecuación, es la utilización de coordenadas que siguen el contorno del terreno y la definición de una estructura vertical que consiste en seis capas horizontales superpuestas al dominio de modelación, ver Figura 4.1. En cada capa se obtiene el transporte horizontal del monóxido de carbono debido a procesos difusivos y de advección, y a continuación se resuelven las componentes verticales difusivas y advectivas, interconectando las capas y logrando de ésta manera un modelo tridimensional.

Computacionalmente esto se logra utilizando la técnica de separación de operadores conocida como pasos fraccionados (Yanenko 1971 y Marchuk 1974) que permite descomponer la ecuación de transporte atmosférico tanto en sus componentes advectivas y difusivas, como en las dimensiones vertical y horizontal.

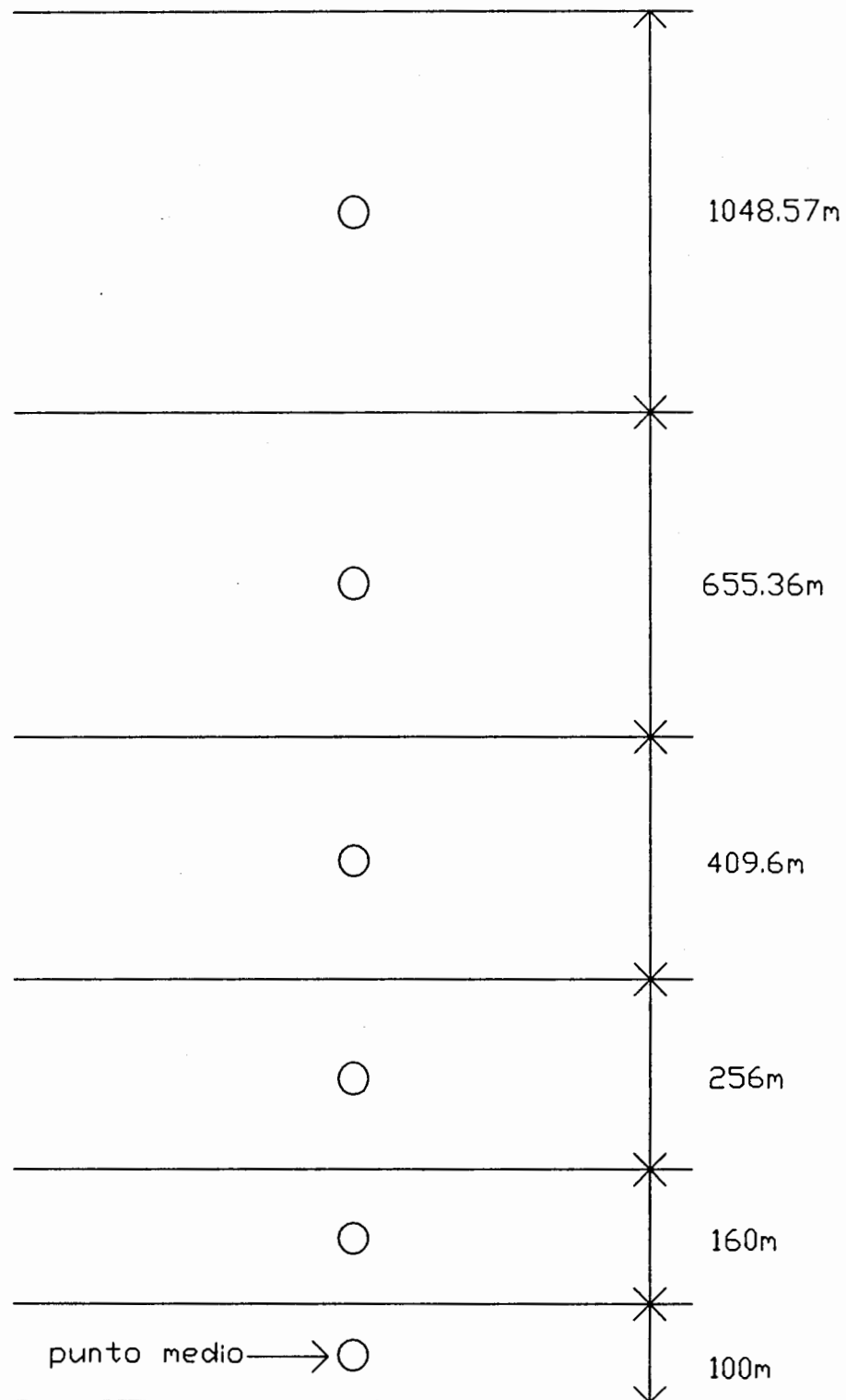


Figura 4.1 Estructura vertical del modelo numérico de difusión atmosférica en tres dimensiones.

La descripción de la estructura vertical y los métodos numéricos usados para la solución de las componentes advectivas y difusivas serán presentados en las siguientes secciones.

4.1 Estructura Vertical

La estructura vertical del modelo consiste de seis capas horizontales que siguen el contorno del terreno. Cada capa posee un punto medio, dividiendo la capa en dos celdas de cómputo. La capa inferior tiene una altura de cien metros y la separación de las capas aumenta conforme avanzamos sobre el eje vertical de acuerdo con un factor de crecimiento de 1.6, ver Figura 4.1.

El número de celdas en la vertical dentro de la capa de mezcla, o sea la altura de mezcla computacional, se escoge de la siguiente manera; empezando por la capa inferior, si la altura de capa de mezcla generada por el modelo meteorológico es mayor que la altura de la celda en el centro de la capa, pásese a la capa inmediatamente superior y continúese hasta que se deje de satisfacer ésta condición. De esta manera, el número mínimo de celdas en la vertical es de dos, o sea la capa adyacente al suelo. Entonces, para propósitos computacionales, la altura mínima de la capa de mezcla es de cien metros. A la celda que esta en el límite superior de la capa de mezcla computacional, se le asigna una frontera de Dirichlet con un valor constante de 0.2 p.p.m.. A la celda que corresponde al nivel del suelo, se le considera como una barrera, o bien,

$$\partial c_1 / \partial \sigma = 0.$$

En la siguiente sección se describe la solución de la componente advectiva de la ecuación de transporte atmosférico mediante el Método de Selección Aleatoria (MSA).

4.2 Solución Numérica de la Componente Advection

La dificultad principal para resolver numéricamente la componente advectiva en la ecuación de transporte atmosférico, consiste en evitar la aparición de difusión numérica y ondas dispersivas. El Método de Selección Aleatoria, MSA, evita ambos problemas en forma computacionalmente económica, como se muestra a continuación, (ver Jazcilevich Fuentes 1993).

MSA se justifica matemáticamente y se describen sus aplicaciones en Chorin 1977 y Concus Proskurowski 1979, entre otros. Una versión conveniente para nuestro problema se encuentra en Sod 1987, pp.237-238. En forma resumida, el método consiste en resolver la ecuación hiperbólica en una dimensión,

$$\partial c / \partial t + \partial f(c) / \partial x = 0, \dots (1)$$

con condiciones iniciales

$$c(x, 0) = c^0(x), \dots (2)$$

de la siguiente manera: Sea c_i^n la aproximación numérica de $c(ih, nk)$, donde h y k son los intervalos de espacio y tiempo respectivamente. Para encontrar c_i^{n+1} a partir de c_{i-1}^n , c_i^n , c_{i+1}^n , considere la secuencia

de problemas de Riemann dados por la ecuación (1) y las condiciones iniciales

$$v(x, nk) = c_1^n, \quad (i-1/2)h < x < (i+1/2)h.$$

La solución c_1^{n+1} se basa en la solución de dos problemas de Riemann con condiciones iniciales,

$$v_{1-}(x, nk) = \begin{cases} c_{1-1}^n, & x < (i-1/2)h \\ c_1^n, & x > (i-1/2)h \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{1+}(x, nk) = \begin{cases} c_1^n, & x < (i-1/2)h \\ c_{1+1}^n, & x > (i-1/2)h. \end{cases} \quad (4)$$

Sea ξ_n una variable aleatoria equidistribuida en el intervalo $[-1/2, 1/2]$. Muestree los problemas de Riemann asociados con (3) y (4),

$$S_{1-1/2}^{n+1/2} = v^o((i-1/2+\xi_n)h, nk)$$

y

$$S_{1+1/2}^{n+1/2} = v^o((i+1/2+\xi_n)h, nk),$$

donde v^o es la solución exacta del problema de Riemann y de la que se debe proveer al método. Finalmente encontramos la solución numérica

haciendo,

$$C_i^{n+1} = \begin{cases} S_{i-1/2}^{n+1/2}, & \xi_n > 0 \\ S_{i+1/2}^{n+1/2} \xi_n > 0. \end{cases}$$

En la Figura 4.2, se describe en forma esquemática el algoritmo del MSA. Su estabilidad está dada por la siguiente condición de Courant-Friedericks-Lewy (CFL) , ver Sod 1987,

$$|u|k/h < 1,$$

donde $|u|$ es la velocidad absoluta del viento, k y h los intervalos temporales y espaciales, respectivamente. Para calcular el intervalo de tiempo máximo que satisfaga la condición CFL, se encuentran los valores absolutos máximos del viento en una hora y se calcula la máxima k que satisfaga la inigualdad anterior.

Aplicamos MSA a dos problemas que sirven para probar métodos numéricos para la parte advectiva de la ecuación de transporte atmosférico, ver Mcrae et. al. 1982. El primero consiste en resolver la ecuación unidimensional

$$\partial c / \partial t = -a \partial c / \partial x$$

donde $a = 5$ km/hr. y $x \in [0, 100]$, $k=0.1$ hrs. , $h=2$ km.. La solución exacta consiste en la onda inicial viajando a la derecha con velocidad

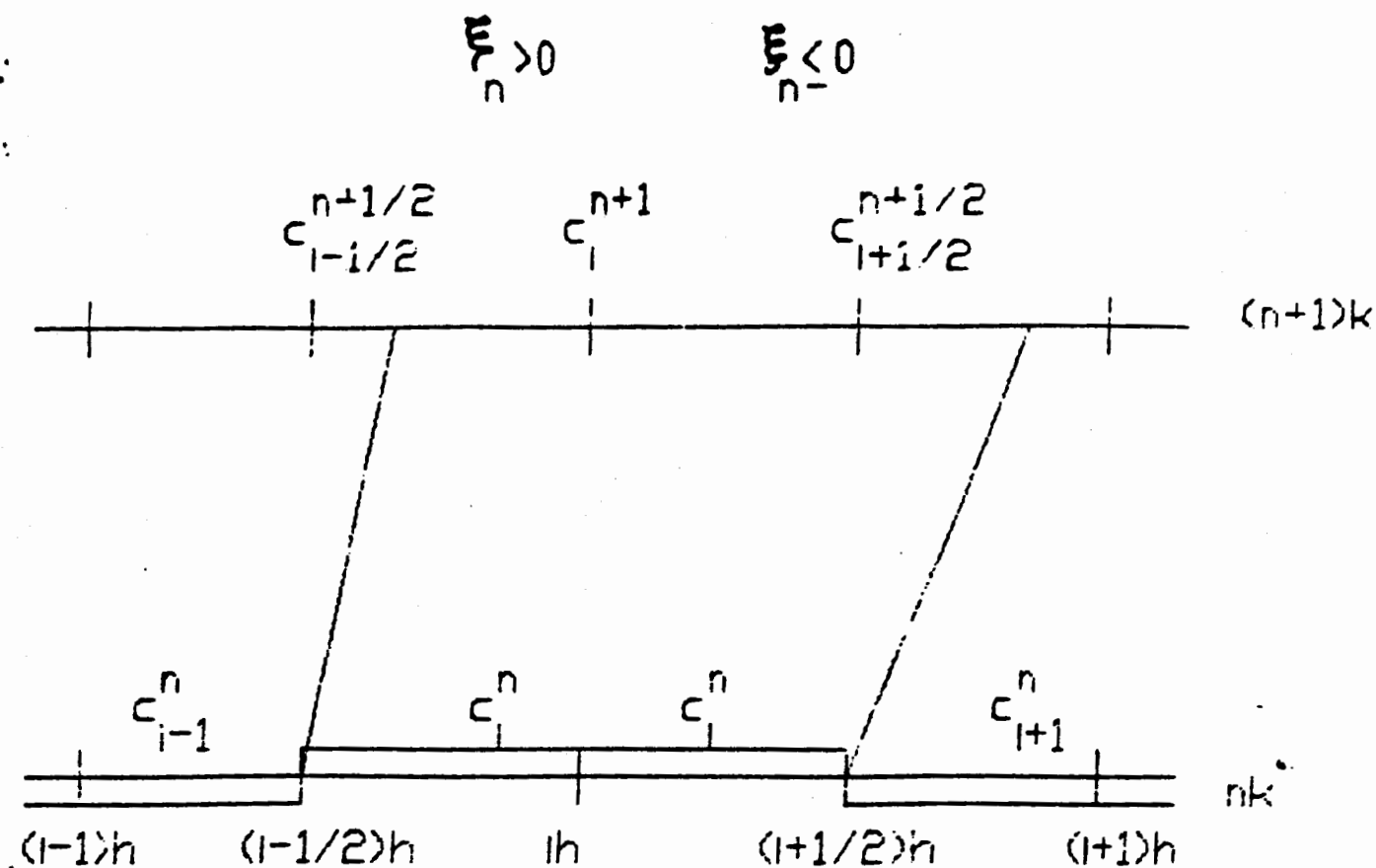


Figura 4.2 Procedimiento para el Método de Selección Aleatoria de un paso.
(ver Sod, 1987)

de 5 km./hr..En la Figura 4.3 se encuentran graficadas la solución proporcionada por MSA junto con las de otros métodos utilizados en la literatura. Nótese como MSA conserva la forma de la onda inicial. En la Tabla 4.1, se encuentra una comparación de tiempos relativos de cómputo. MSA es comparable en tiempo computacional, con el sencillo método de diferencias finitas "atrasadas en el tiempo y en el espacio".

Un problema bidimensional mas difícil de resolver es el problema del cono de Crowley, ver Crowley 1968,

$$\partial c / \partial t + \omega \partial c / \partial \theta = 0$$

donde θ es una coordenada angular y ω es una velocidad angular. Como condición inicial se encuentra un cono centrado en $(-8,0)$ con radio igual a 4. Se escoge $h=1$ km., $k=0.5$ hrs. La solución exacta de éste problema, es el cono rotando alrededor del origen con una velocidad ω , sin sufrir deformación. En la figura 4.4, se aprecia la solución de MSA y la de otros métodos. Nótese la ausencia total de difusión numérica y de ondas dispersivas en el caso de MSA. En la Tabla 4.2, se encuentra una comparación numérica entre MSA y otros métodos.

4.3. *Solución Numérica de la Componente Difusiva*

Desde un punto de vista numérico, el operador difusivo es mas sencillo de resolver, ya que se trata de un proceso físico que tiende a suavizar y estabilizar la solución.

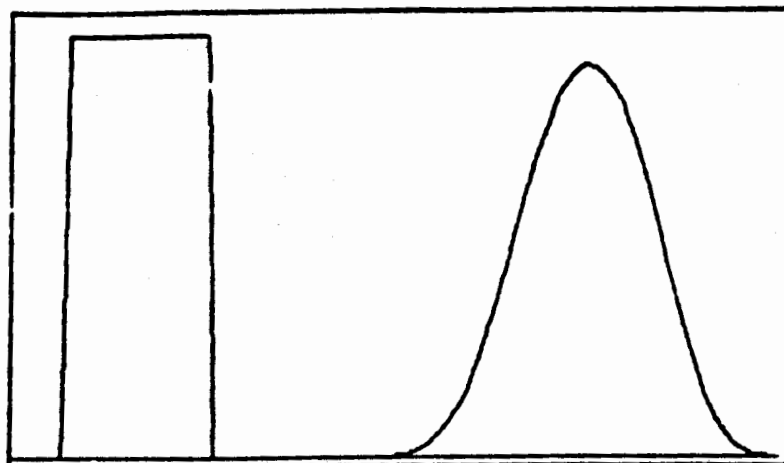
Para el caso de difusión en el plano horizontal y considerando isotropía, el rango de valores para el coeficiente de difusividad

	Tiempo Computacional Relativo
Diferencias atrasadas en el tiempo y espacio	1.0
Método de selección Aleatoria	1.3
Método de Momentos (Eagan Mahoney 1972)	8.0

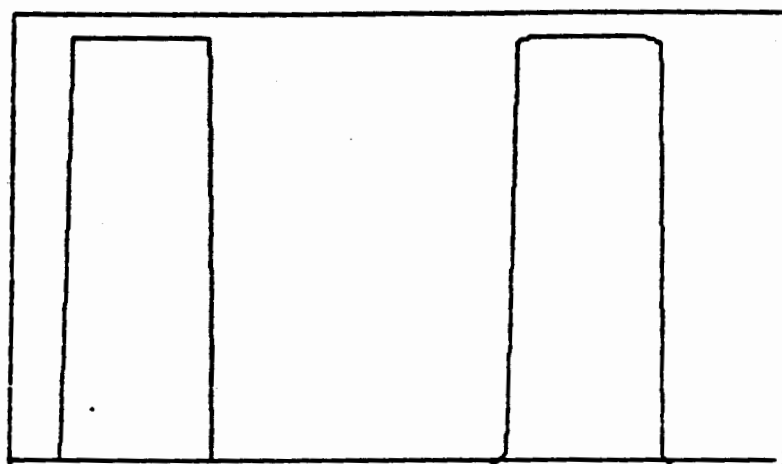
Tabla 4.1.-Tiempos relativos de cómputo entre los métodos usados para e problema unidimensional de la Figura 1.

	1/4 Revolución		1 Revolución	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Elemento Finito	.873	-0.033	.864	-.055
SHASTA (Boris Book 1976)	.667	0.0	.512	0.0
Método de Selección Aleatoria	1.0	0.0	1.0	0.0
Sol. exacta	1.0	0.0	1.0	0.0

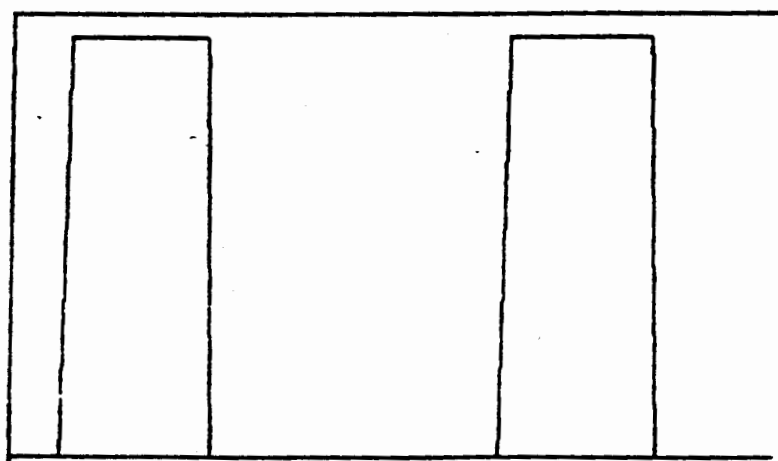
Tabla 4.2.- Comparación de valores máximos y mínimos para el problema d
Crowley de la Figura 2. Los valores para SHASTA y Elemento
Finito se obtuvieron de MacCrae et. al. 1981.



a) DIFERENCIAS FINITAS ATRASADAS EN EL ESPACIO Y EL TIEMPO.

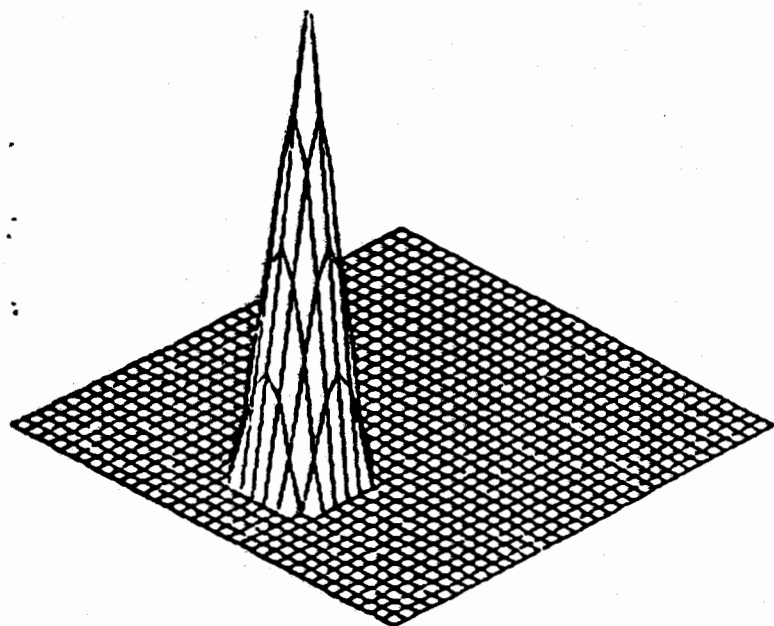


b) METODO DE MOMENTOS. Ver [EM72]

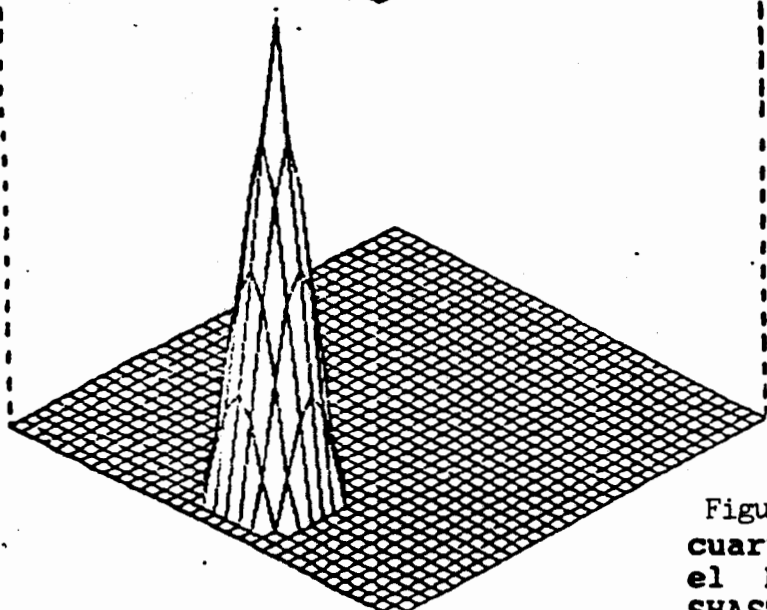
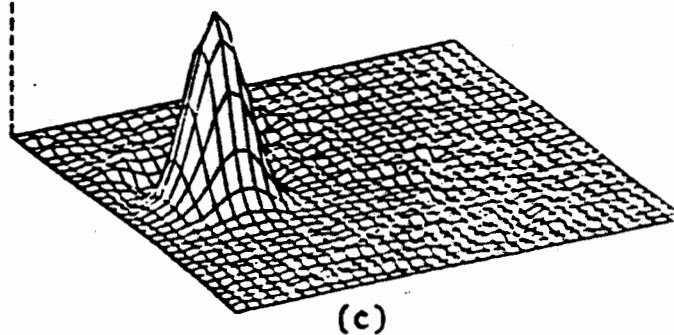
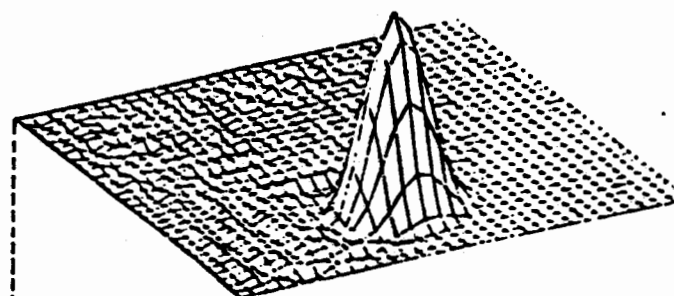
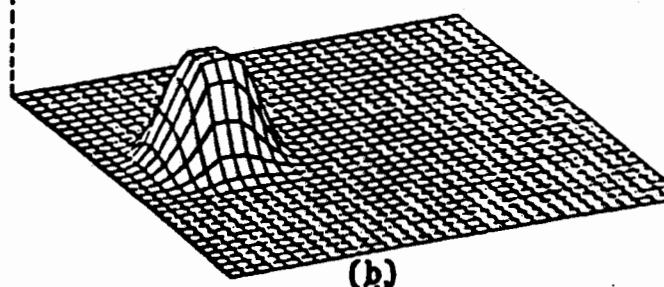
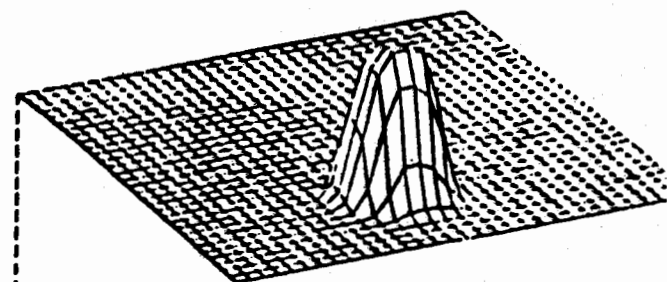
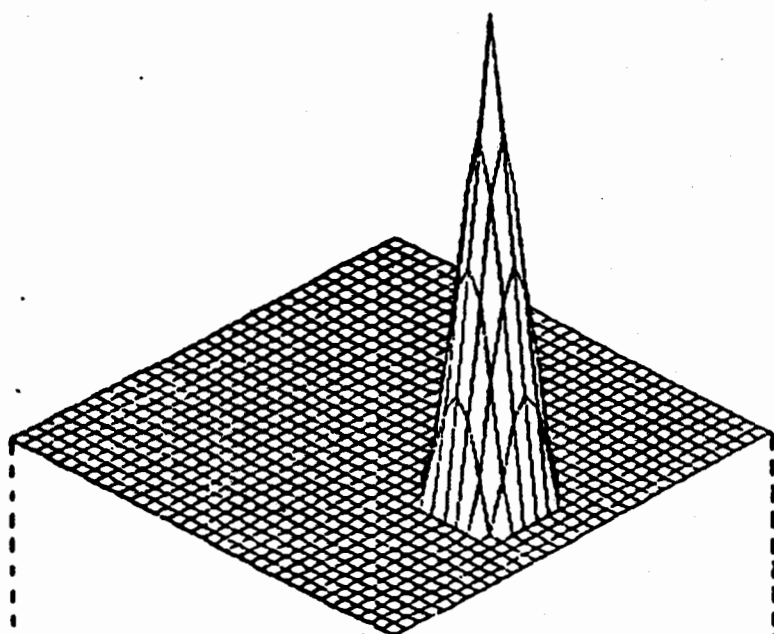


c) METODO DE SELECCION ALEATORIA.

Figura 4.3 Resultados del problema de Onda en Una Dimensión.



cono inicial



(a)

Figura 4.4 Problema de Crowley para un cuarto y revolución completa usado en (a) el Método de Selección Aleatoria, en SHASTA (ver Boris, 1976), y en (c) elemento finito lineal (ver MacRae, 1982). Las gráficas (b) y (c) fueron tomadas de MacRae (1982).

horizontal es de 27 a 80 m²/seg. y debido a las escalas temporales y espaciales de modelo, cualquier método de diferencias finitas explícito operará en forma estable por lo que se calcula las componentes de difusión en los ejes x e y mediante la fórmula,

$$c_1^{n+1} = \lambda K_{11} (c_{1-1}^n - 2.0 c_1^n + c_{1+1}^n) + c_1^n$$

donde $\lambda = k/h^2$ y K_{11} es la componente del coeficiente de difusividad en la dirección x e y. La condición de estabilidad para éste método es $\lambda K_{11} < 0.5$, ver Sod 1987. Como el modelo operará, en la horizontal, con $h=3,000m$. y un intervalo de tiempo máximo de $k=600$ segundos, se satisface fácilmente esta condición.

En la figura 4.5, se aprecia una concentración en forma cónica siendo transportada computacionalmente en el plano por el viento y por difusividad. Esto se logra resolviendo para cada iteración temporal la componente advectiva en el eje x, la componente difusiva en el eje x, la componente advectiva en el eje y, terminando con la componente difusiva en el eje y. Este procedimiento se incorpora, en el modelo tridimensional, en cada capa horizontal.

Para calcular la difusión en el eje vertical es necesario utilizar métodos mas estables ya que los coeficientes verticales de difusión tienen un rango de valores de .3 a 30 m²/seg. . Además la distancia entre capas variará de 100 mts. a 1,048 mts.. Se escogió el método de Crank-Nicolson ya que es incondicionalmente estable y al ser semi-implícito es relativamente rápido y fácil de implementar, ver por ejemplo Mitchell Griffiths 1980. La ecuación que describe este método es,

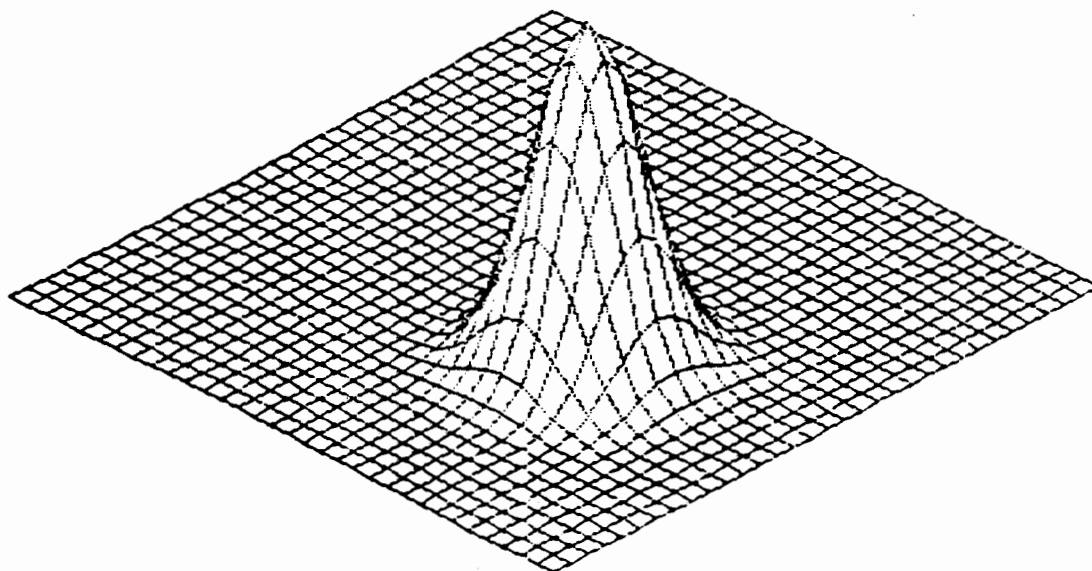
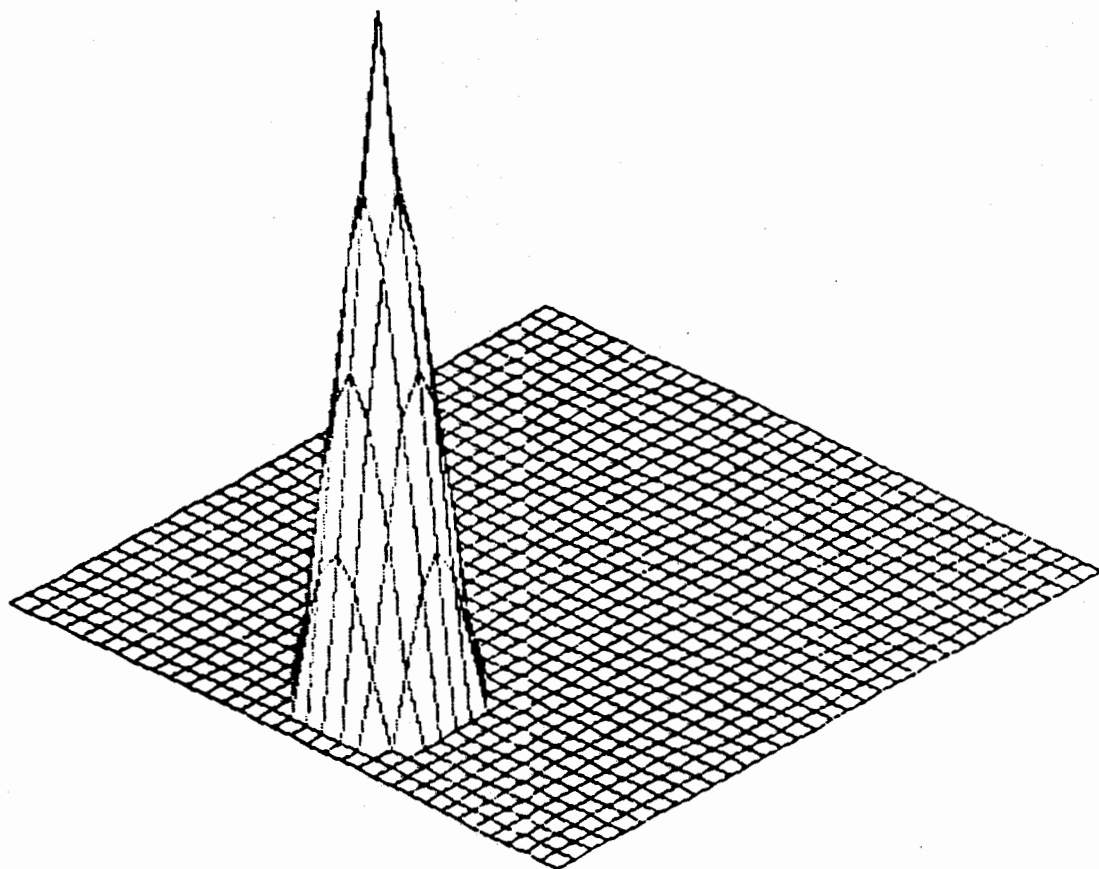


Figura 4.5 Concentración con forma conica, siendo transportada por advección y difusión. El viento tiene componentes iguales $u=1.2$ km/hr y $v=1.2$ km/hr. El coeficiente de difusividad es de 0.2 km/hr. El volumen inicial del cono es de 16.74 y el volumen final es de 16.70 (Los volúmenes fueron calculados utilizando la regla de Simpson $3/8$).

$$c_1^{n+1} = c_1^n + 0.5 * \lambda \left((u_{1+1}^n - 2 u_1^n + u_{1-1}^n) + (u_{1+1}^{n+1} - 2 u_1^{n+1} + u_{1-1}^{n+1}) \right).$$

Al utilizar este método numérico se obtiene un sistema tridiagonal de ecuaciones lineales. Para su solución se utilizó el método de Thomas, ver Strikwerda 1989.

En la siguiente sección se presenta la estructura computacional del programa de advección-difusión.

4.4. Estructura Computacional del Modelo de Transporte Atmosférico

A continuación se detalla la estructura del programa de cómputo que realiza la advección y difusión de contaminantes en tres dimensiones.

Inicialización,

Semillas para generación de números aleatorios.

Lectura,

Arreglos de emisiones horarias.

Campo de vientos.

Coeficientes de difusión.

Subrutina RT2D,

Genera arreglo $\zeta(n)$ de números aleatorios equidistribuidos mediante el Método de Van der Corput.

Subrutina VCP2D,

Método de Van der Corput;

$$\zeta(n) = \sum_{l=0}^m q_l k_l^{-(l+1)}$$

Subrutina BASE,

Genera expansión base k_1 de n ;

$$n = \sum_{l=0}^m i_l k_1^l, \quad i_l = 0, \dots, k_1 - 1.$$

Subrutina INTPAR,

Encuentra la velocidades máximas del viento en cada hora para, encontrar intervalos de tiempo $k(nhr)$ máximos de integración para cada hora nhr satisfaciendo la condición de CFL.

Subrutina VSTR,

Generar la estructura vertical. La primera capa es de 100 mts. de ancho. Las siguientes crecen con un factor de crecimiento de 1.6. Se tienen un total de 6 capas.

DO para cada intervalo de tiempo $k(nhr)$ until completar una hora,

Subrutina RCX,

Advección en el eje x mediante el Método de Selección Aleatoria.

DO para todo punto j en el eje y

DO para todo punto i en el eje x

Subrutina HFST,

Medio paso resolviendo el problema de

Riemman obtenido $S_{1-1/2}^{n+1/2}$.

Subrutina HFST,

Obtención de $S_{1+1/2}^{n+1/2}$.

IF $\zeta(n) > 0$ THEN $S_{1-1/2}^{n+1/2}$

ELSE $S_{1+1/2}^{n+1/2}$

ENDDO

ENDDO

Subrutina DIFX

Difusión en el eje x mediante diferencias finitas

Subrutina RCY,

Advección en el eje y mediante el Método de Selección Aleatoria.

DO para todo punto i en el eje x

DO para todo punto j en el eje y

Subrutina HFST,

Medio paso resolviendo el problema de

Riemman obtenido $S_{1-1/2}^{n+1/2}$.

Subrutina HFST,

Obtención de $S_{1+1/2}^{n+1/2}$.

IF $\zeta_{(n)} > 0$ THEN $S_{1-1/2}^{n+1/2}$

ELSE $S_{1+1/2}^{n+1/2}$

ENDDO

ENDDO

Subrutina DIFY

Difusión en el eje y mediante diferencias finitas

Inyección de emisiones

Subrutina CRNK,

Difusión en la vertical mediante el Método de Crank-Nicolson.

Subrutina THOM,

Método de Thomas para resolver sistema tridiagonal.

ENDDO

Escribir arreglo con resultados.

Un diagrama de flujo del programa se muestra en la Figura 4.6..

4.5. Pruebas y Evaluación Preliminar

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE TRANSPORTE ATMOSFERICO EN 3 DIMENSIONES.

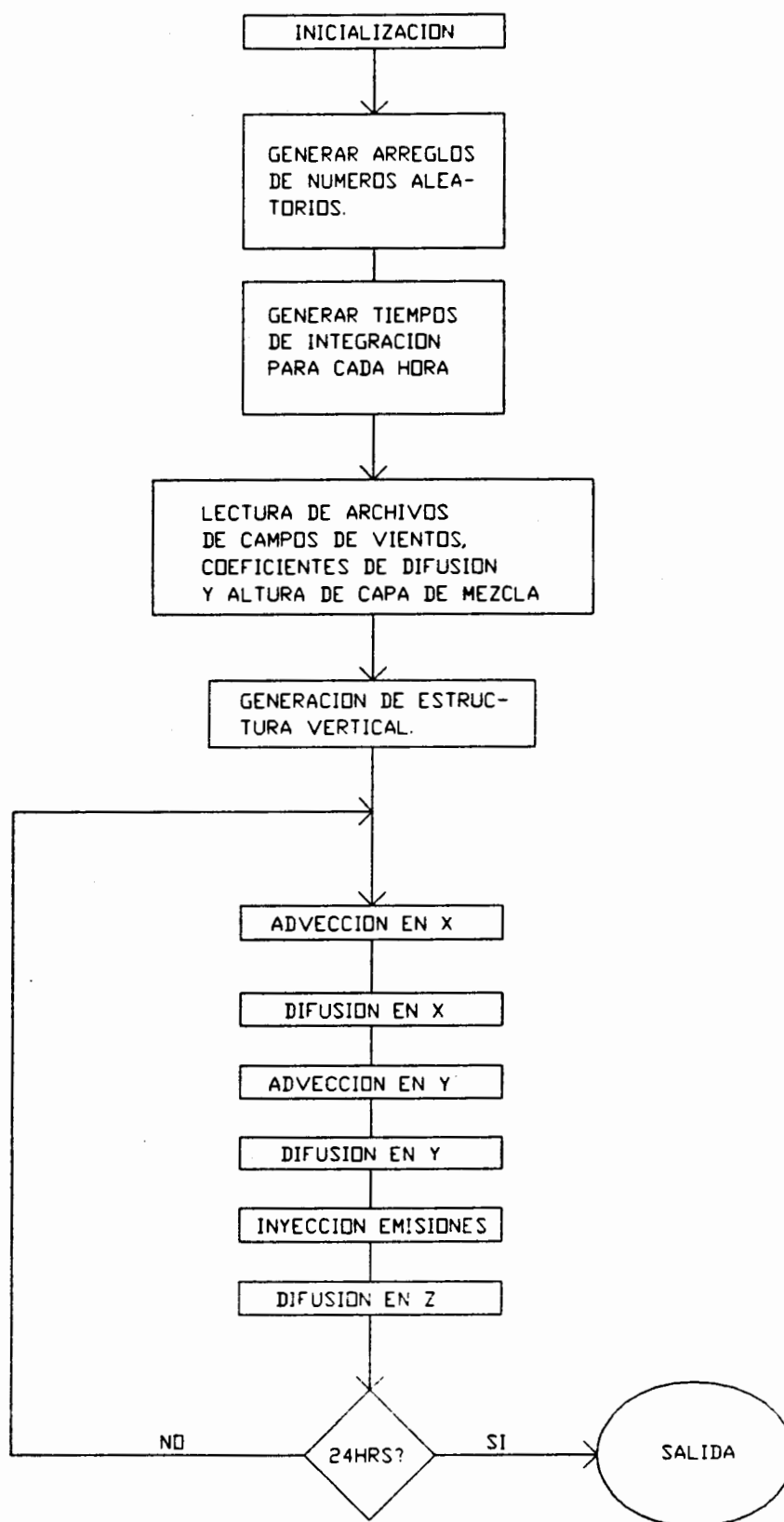


Figura 4.6 Diagrama de flujo del programa de transporte atmosferico en tres dimensiones.

Se sometió el modelo computacional a un conjunto de pruebas para comprobar su funcionamiento. A continuación se describen las mas importantes.

4.5.1 Prueba del Modelo de Advección

Para probar la parte advectiva del programa se hizo el siguiente experimento; se igualó el coeficiente horizontal de difusión con cero y se generó un campo de vientos constante con velocidad de 12km./hr. con dirección del noreste. Se encendió una sola fuente de emisión durante una hora en la celda (7,9), obteniéndose los resultados que se aprecian en la Figura 4.7 después de una hora de integración. Nótese como la concentración recorrió exactamente los 12 km., verificando que el modelo de advección trabaja correctamente.

4.5.2 Evaluación Preliminar del Modelo Tridimensional

Con datos generados por el modelo meteorológico para el día 21 de febrero de 1992 y los datos del modelo de emisiones, se compararon los resultados del modelo de transporte de monóxido de carbono con la información para ese día en seis estaciones en el Valle de México, ver Figura 4.8. Nótese como el modelo sigue la tendencia general de los datos medidos en las estaciones. El resultado menos satisfactorio se encontró en la estación Cerro de la Estrella, donde el modelo trabaja correctamente hasta las trece horas y después la diferencia entre las concentraciones del modelo y las mediciones crece. Esto se puede deber a que el campo de vientos en el Sureste del Valle de México, no ha sido correctamente calculado ya que se cuenta solamente con la

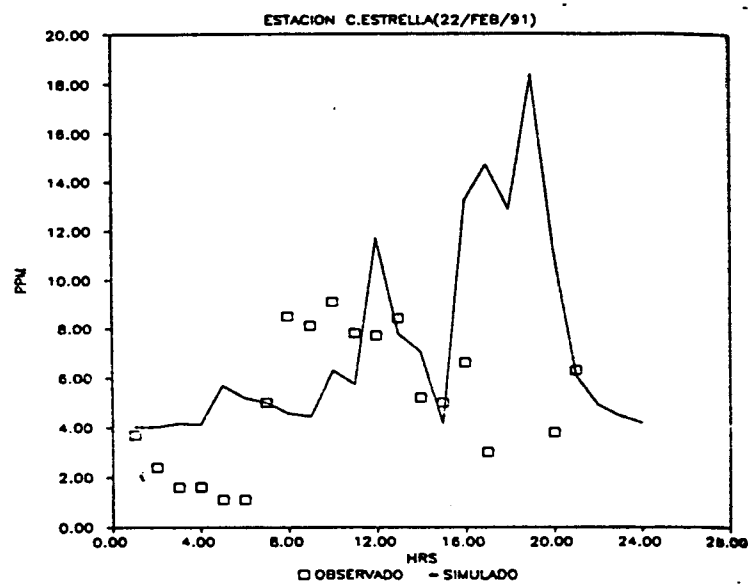
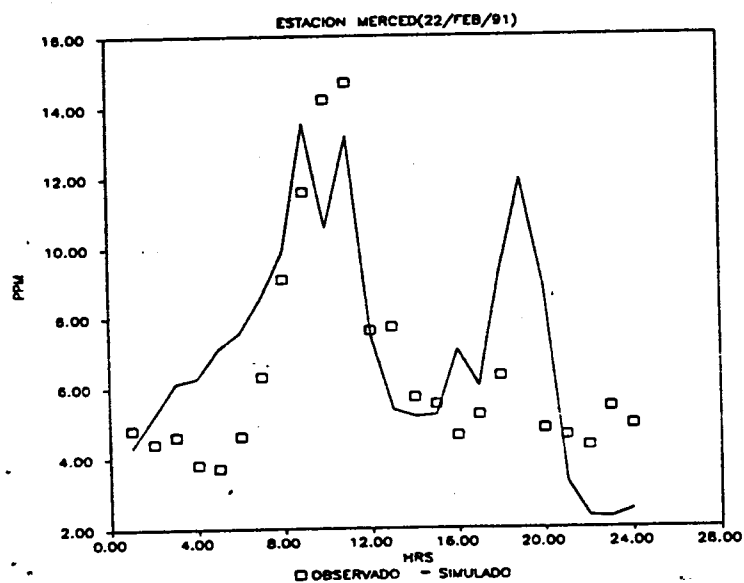
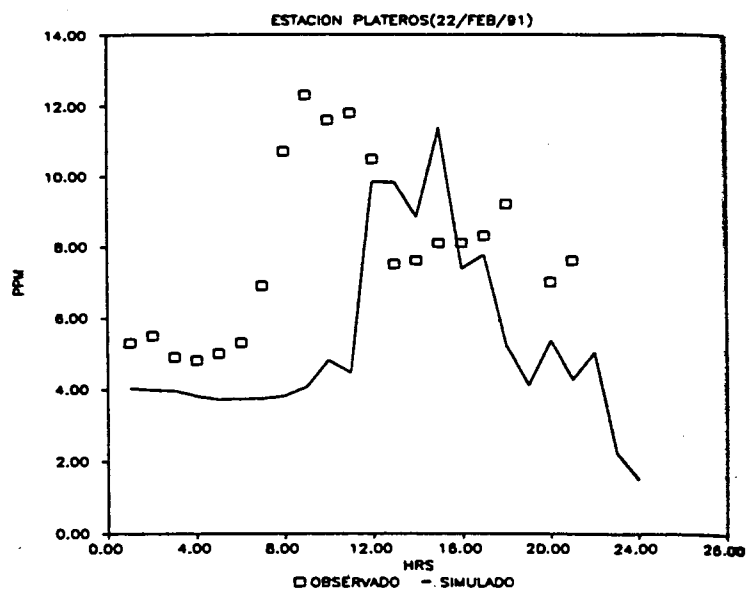
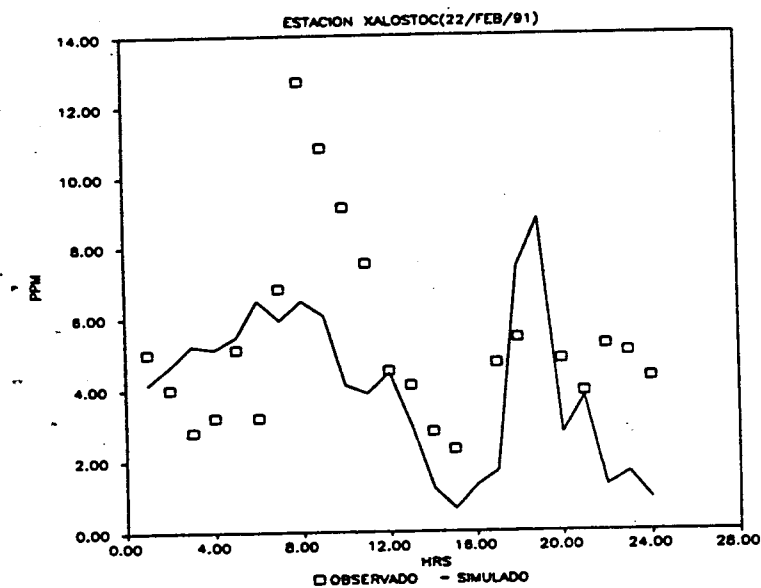
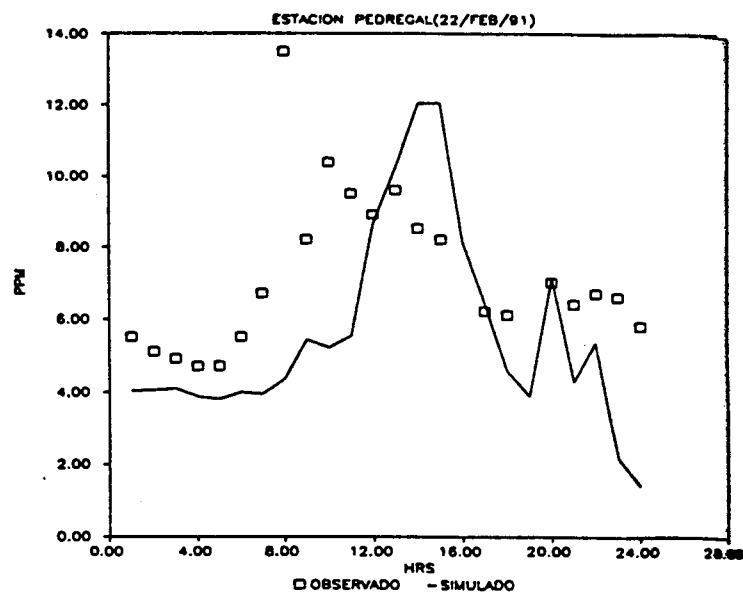
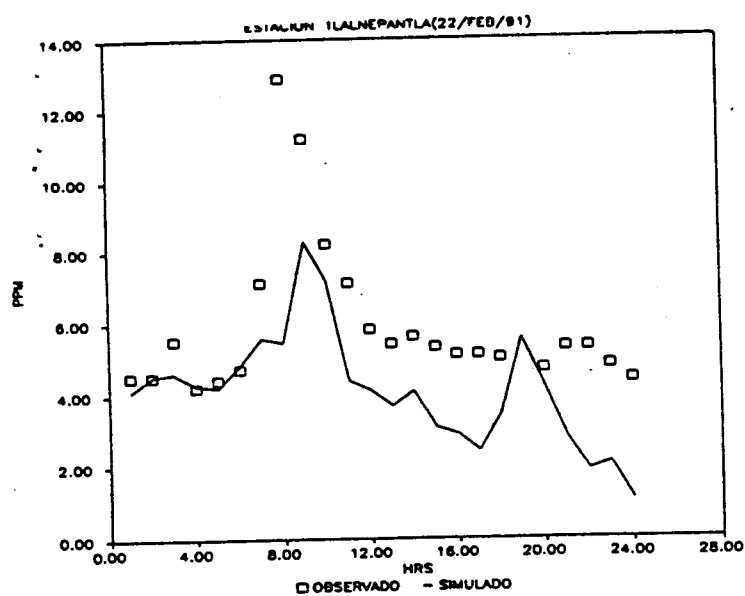


Figura 4.8 Comparación de los resultados del modelo con los datos medidos para el día 22 de febrero de 1991.

estación en el Cerro de la Estrella como el único punto de medición para toda esa zona, resultando la información incompleta.

En las otras estaciones los resultados del modelo han sido satisfactorios. A pesar de que el campo de vientos ha sido generado con información de un número reducido de estaciones, el modelo de transporte trabaja correctamente en la mayor parte de el área de estudio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

a) La primera etapa del presente estudio permitió desarrollar las herramientas de simulación apropiadas (modelos de dispersión, emisiones y meteorológico) para predecir el comportamiento de compuestos de escasa reactividad química; es decir, del monóxido de carbono. Se estudió la eficacia de dichas herramientas para simular los aspectos que determinan la generación, dispersión y el transporte de contaminantes en el valle, y se sentaron las bases para el desarrollo, en la segunda etapa, de un modelo de contaminación atmosférica que involucre reacciones fotoquímicas y la obtención de un campo de vientos mediante un método de pronóstico.

b) Con base en los resultados obtenidos de la evaluación preliminar efectuada a los modelos, donde se contrastaron los resultados obtenidos mediante simulación y los correspondientes a las mediciones efectuadas el día 21 de febrero de 1992, se puede concluir que la herramientas de simulación desarrolladas en este estudio son capaces de modelar adecuadamente el comportamiento del monóxido de carbono en el Valle de México.

c) Los métodos numéricos utilizados en el modelo de dispersión, particularmente el de selección aleatoria, constituyen procedimientos que demostraron su eficiencia en términos de rapidez y precisión, por lo cual, deberán ser el fundamento para el desarrollo de las herramientas de simulación que se estudien en la segunda etapa del estudio.

d) El modelo de emisiones permite obtener emanaciones vehiculares de CO con una resolución espacial de 1 Km^2 a intervalos

de una hora, y ha sido diseñado de forma tal que es factible su utilización con características viales diversas, de manera que la evolución natural que tengan dichos sistemas en el Valle de México podrán ser incorporados con un mínimo de esfuerzo. Sin embargo, se deberán dedicar recursos humanos y materiales para generar información confiable sobre las características específicas de la vialiidad secundaria en el Valle de México, a fin de incluir las emisiones procedentes de estas vías en los datos de entrada al modelo de dispersión.

d) Los campos de viento obtenidos con el modelo de interpolación de vientos empleado, satisfacen las necesidades establecidas por el modelo de difusión; esto es, un campo tridimensional de flujo con consistencia másica. Estos campos de viento no presentan, pese al reducido número de estaciones de muestreo disponibles, zonas en las cuales no sea posible definir una dirección dominante de flujo, o donde las velocidades predichas no correspondan al orden de magnitud esperado de acuerdo con la topografía y hora del día. Es importante hacer notar sin embargo, que este procedimiento de interpolación para obtener un campo de vientos constituye un esfuerzo inicial cuyo único objetivo fue el permitir operar el modelo de dispersión en esta primera etapa de estudio. El procedimiento de simulación que deberá emplearse generar en el futuro esta información en el Valle de México, debe basarse en un método de pronóstico que no esté sustentado en una condición de aereoestabilidad.

f) Es deseable incrementar el número de estaciones meteorológicas para datos de superficie, con el fin de reducir el radio de influencia e interpolación asignado actualmente a cada una de las diez estaciones empleadas. Para esto, es conveniente emplear

la información de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, la UNAM (Centro de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Ingeniería y Palacio de Minería), la nueva estación en el Palacio Legislativo, y cualquier otro punto que estuviese disponible para el día a modelar.

g) Se requiere incrementar los puntos de medición de perfiles verticales de viento y temperatura para evitar la modelación con "perfiles estimados", los cuales consideran rugosidad, nubosidad, posición geográfica y velocidad de viento, pero no pueden evaluar los cambios de dirección con la altura. Asimismo, conviene ampliar el área de estudio hacia el sur para incluir la topografía de esa zona, de tal manera que el efecto valle-montaña y las corrientes convergentes matutinas que este produce, puedan ser estimadas.

REFERENCIAS

- ARYA, S. P. (1988), *Introduction to Micrometeorology*, Academic Press, Inc., San Diego.
- BORIS J. P., BOOK D. L. (1976), *J. of Computational Physics*, 20, 397.
- CHORIN A. J. (1977), *Journal of Computational Physics*, 25, 253-272.
- CONCUS P., W. Proskurowski. (1979), *Journal of Computational Physics*, 30, , 153-166.
- CROWLEY W. P. (1968), *Monthly Weather Review*, 96, 1.
- CSANADY, G. T. (1973), *Turbulent Diffusion in the Environment*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- DOUGLAS S.G., KESSLER R.C., CARR E.L. (1990), *User's guide for the urban airshed model. Vol III: User's manual for the Diagnostic Wind Model*. Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency. EPA-450/4-90-007C
- EAGAN B. A., MAHONEY J. R. (1972), "Numerical Modeling of Advection and Diffusion of Urban Area Source Pullutants", *Journal of Applied Meteorology*, 21.
- FALLS A .H., SEINFELD J. H. (1978), *Environement Science Technology*, 12, 1398.
- FUENTES GEA V., (1988), *Simulación de la calidad del aire del Valle de México mediante un modelo de dispersión*. DEPFI, UNAM.
- FUENTES, V., AGUIRRE, R. (1980), *Criterios y normas para ubicar zonas industriales con objeto de prevenir problemas de contaminación atmosférica*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, Proyecto 9165.
- GARDNER L., CHINKIN L. R., HEIKEN J. G. (1991), *Pocedures for the Preparation of Emission Inventories for Carbon Monoxide and Precursors of Ozone, Vol II: Emission Inventory Requirements for Photochemical Air Quality Simulation Models*. Systems Applications International, San Rafael, CA., Chapter 7.
- GOODIN W.R., McRAE G.J., SEINFELD J.H. (1979), A comparison of interpolation methods for sparse data: application to wind and concentration fields. *American Meteorology Society*, 18, pp 761-771

GOODIN W.R., MCRAE G.J., SEINFELD J.H. (1980), An objective analysis technique for constructing three-dimensional urban-scale wind fields. *Journal of applied meteorology*, 19, pp 98-108.

HOLZWORTH, G. C. (1964), Estimates of Mean Maximum Mixing Depths in the Contiguous United States, *Monthly Weather Review*, Vol. 92, No.5, pp. 235-242.

HOLZWORTH, G. C. (1967), Mixing Depths, Wind Speeds and Air Pollution Potential for Selected locations in the United States, *J.Applied Meteorology*, Vol. 6, pp. 1039-1044.

HUANG, C. H. (1982), Theory of Dispersion in Turbulent Shear Flow, *Atmos. Environ.*, 16, pp 679-696.

JAUREGUI E. (1984), El Clima Urbano de la Ciudad de México, Memoria de la Conferencia Técnica "La Climatología Urbana y sus Aplicaciones con Especial Referencia a las Regiones Tropicales", México D. F., OMM-No.652.

JAZCILEVICH A.J., FUENTES G.V. (1993), " The Random Choice Method in the Numerical Solution of the Atmospheric Transport Equation", *Environmental Software*, sometido para publicación.

JICA (Japan International Cooperation Agency). (1988), *The Study on Air Pollution Control Plan in the Federal District*. Final Report.

LIST, R. J. (1970), *Smithsonian Meteorological Tables*, Washington D.C., Smithsonian Institution.

LLAUGE F. (1976), ¿ La meteorología?. ¡Pero si es muy fácil!, Marcombo S.A.

MARCHUK G. I. (1974), *Numerical Methods in Weather Prediction*, Academic Press.

MCRAE G.J., GOODIN W.R., SEINFELD J.H. (1982), Development of a second-generation mathematical model for urban air pollution. I Model formulation. *Atmospheric Environment*, 16, 4, pp 679-696

MCRAE G. J., GOODIN W. , SEINFELD J. H. (1982), *Journal of Computational Physics*, 45, 1-42.

MITCHELL A. R., GRIFFITHS D.F. (1980), *The Finite Difference Method in Partial Differential Equations*, Wiley.

MORAN J.M., MORGAN M.D. (1989), *Meteorology. The atmosphere and the science of weather*, MacMillan Publishing Company.

PASQUILL, F. (1974), *Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and other Sources*, 2nd edition, Halstad Press by John Wiley & Sons, New York.

REYNOLDS S. D., ROTH P.M., SEINFELD J. H. (1973), *Atmospheric Environment*, 7, 1033.

REYNOLDS S.D., ROTH P.M., SEINFELD J.H. (1973), *Atmospheric Environment. Mathematical Modeling of Photochemical Air Pollution - I. Formulation of the Model.*, Vol 7, pp 1033-1061

REYNOLDS S.D., ROTH P.M., SEINFELD J.H. (1973), *Atmospheric Environment. Mathematical Modeling of Photochemical Air Pollution - II. A Model and Inventory of Pollutant Emissions.*, pp 97 - 130.

SEINFELD, J. H. (1975), *Air Pollution: Physical and Chemical Fundamentals*, McGraw-Hill, 523 p.

SEINFELD, J. H. (1986), *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. New York: John Wiley.

SOD G. A. (1987), *Numerical Methods in Fluid Dynamics*, Cambridge Press.

STRIKWERDA J. C. (1989), *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*, Wadsworth Brooks/Cole, California, USA.

TURNER D. B. (1967), *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Cincinnati.

YANENKO N. N., (1971), *The Method of Fractional Steps*, Springer Verlag, N. Y.

ZANNETTI, P. (1990), *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*, Van Nostrand Reinhold, New York, 444 p.

U.S. EPA. (1981), *Guidelines for use of city specific EKMA in preparing ozoneSIP'S*. EPA-650/3-77, Research Triangle Park, NC.

APENDICE A

Estructura de los archivos de entrada para el modelo de emisiones vehiculares

A.1 Descripción del modelo

La descripción detallada del modelo se puede consultar en el capítulo 2 del informe final.

A.2 Datos de entrada

Para correr el modelo se necesitan los archivos que se enlistan a continuación, cuya característica general es tener un formato ASCII.

- 1) Archivo de decisiones (Decision.dat).
- 2) Archivo de fracciones de reducción de emisiones (Reduce.dat).
- 3) Archivo de volúmenes vehiculares en vías primarias (VehKH.pri) y volúmenes vehiculares en vías secundarias (VehKH.sec).
- 4) Archivo de fracciones vehiculares en vías primarias (FracVehT.pri) y fracciones vehiculares en vías secundarias (FracVehT.sec).
- 5) Fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación (FracSent.dat).
- 6) Archivo de factores de emisión en la vialidad primaria (FactEmi.pri) y factores de emisión en la vialidad secundaria (FactEmi.sec).
- 7) Archivo de factores de composición vehicular en vías primarias (TipoPriN.dat) y factores de composición vehicular en vías

secundaria (TipoSecN.dat) , donde N varia desde 1 hasta el numero total de tipos de vehiculos que existen en cada composicion.

8) Fracciones de vehículos con modo de arranque frio (FraArran.dat).

9) Archivo de estaciones de aforo (Estacion.dat).

10) Mapa de zonas de influencia de las estaciones de aforo (Zona.dat).

11) Mapa de vías primarias de doble circulación (Doblecir.dat)

12) Mapa delegacional (Delega.dat)

13) Archivo de composición vehicular en vías primarias (DelPri.dat) y archivo de composición vehicular en vías secundarias (DelSec.dat).

14) Archivo de factores de corrección de emisiones (FactVar.dat).

A continuación se proporcionaran algunos ejemplos y las observaciones necesarias para la formación de los archivos necesarios para calcular las emisiones provenientes de las fuentes moviles.

1) Archivo de decisiones (Decision.dat).

Un ejemplo de dicho archivo se muestra en la tabla A.1.

"Archivo de Desiciones"

Seleccione cualquiera de las siguientes opciones para calcular emisiones: 3

1 = Vias Primarias

2 = Vias Secundarias

3 = Ambas Vias

4 = Salir

Se tiene un nuevo archivo de Estaciones de Aforo (s/n)?: s

Se modifico el archivo de Composicion Vehicular Primaria (s/n)?: s

Se modifico el archivo de Composicion Vehicular Secundaria (s/n)?: s

Tabla A.1 Archivo de decisiones.

Observaciones:

- Es importante respetar el orden indicado de los datos para evitar errores en los cálculos.

- La primera línea es donde se especifica el nombre del archivo.

- En la segunda línea se tiene:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 74	Comentario	Alfanumérico
75 -- 76	Opcion	Entero

- De la tercera línea a la sexta línea solamente existen comentarios.

- En la séptima línea se tiene:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 58	Comentario	Alfanumérico
59 -- 61	ea	Alfanumérico

donde ea es la variable lógica relacionada a las estaciones de aforo.

- En la octava línea se tiene:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 66	Comentario	Alfanumérico
67 -- 70	cvp	Alfanumérico

donde cvp es la variable lógica relacionada con la composición vehicular en vías primarias.

- En la novena línea se tiene:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 68	Comentario	Alfanumérico
69 -- 71	cvs	Alfanumérico

3) Archivo de volúmenes vehiculares en vías primarias (VehKH.pri) y volúmenes vehiculares en vías secundarias (VehKH.sec).

Estos dos archivos constan de una matriz de 39*45 elementos de tipo real. Como ejemplo se muestra a continuación en la tabla A.3 el archivo (VehKH.pri).

Vehículos*Kilometro/Hora de vías primarias (1989) C.G.T												
0	0	0 ..	0	22865	0 ..	0	0	12684	..	0		
0	0	0 ..	0	22865	0 ..	0	0	12684	..	0		
0	0	0 ..	0	11433	11433 ..	0	9384	3300	..	0		
0	0	0 ..	0	0	22865 ..	3754	5630	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	22865 ..	9384	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	22865 ..	3754	3300	3300	..	0		
0	0	0 ..	0	0	22865 ..	3300	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	22865 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	13839	22865 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	22865	0 ..	0	0	0	..	0		
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:		
0	0	0 ..	0	11830	0 ..	0	8259	2950	..	0		
0	0	0 ..	0	11830	4774 ..	5899	0	0	..	0		
0	0	0 ..	2366	20719	7235 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	11830	0	0 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	0 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	11830	11830	11830 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	0 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	0 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	0 ..	0	0	0	..	0		
0	0	0 ..	0	0	0 ..	0	0	0	..	0		

Tabla A.3 Archivo de volúmenes vehiculares en vías primarias.

Observaciones:

- La primera línea es donde se especifica el nombre del archivo.

- El único requerimiento para este archivo es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

4) Archivo de fracciones vehiculares en vías primarias (FracVehT.pri) y fracciones vehiculares en vías secundarias (FracVehT.sec).

Estos dos archivos constan de 24 matrices de 39*45 elementos de tipo real. Debido a que ambos archivos tiene el mismo formato y que son muy grandes solo se muestra parte del archivo (FracVehT.pri) en la tabla A.4.

```

hora = 1
0.2330 0.2330 0.2330 0.2330 .. 0.2299 0.2299 0.2299 0.2299
0.2330 0.2330 0.2330 0.2330 .. 0.2299 0.2299 0.2299 0.2299
0.2330 0.2330 0.2330 0.2330 .. 0.2299 0.2299 0.2299 0.2299
0.2330 0.2330 0.2330 0.2330 .. 0.2299 0.2299 0.2299 0.2299
0.2330 0.2330 0.2330 0.2330 .. 0.2299 0.2299 0.2299 0.2299
:      :      :      :      :      :      :      :
0.0975 0.0975 0.0975 0.0975 .. 0.1801 0.1801 0.1801 0.1801
0.0975 0.0975 0.0975 0.0975 .. 0.1801 0.1801 0.1801 0.1801
0.0975 0.0975 0.0975 0.2055 .. 0.1801 0.1801 0.1801 0.1801
0.0975 0.0975 0.0975 0.2055 .. 0.1801 0.1801 0.1801 0.1801
0.0975 0.0975 0.2055 0.2055 .. 0.1801 0.1801 0.1801 0.1801
hora = 2
0.2913 0.2913 0.2913 0.2913 .. 0.2870 0.2870 0.2870 0.2870
0.2913 0.2913 0.2913 0.2913 .. 0.2870 0.2870 0.2870 0.2870
0.2913 0.2913 0.2913 0.2913 .. 0.2870 0.2870 0.2870 0.2870
:      :      :      :      :      :      :      :

```

Tabla A.4 Archivo de fracciones vehiculares en vías primarias.

Observaciones:

- * La primera linea es donde se especifica el nombre del archivo.
- * Existe una linea de separación entre cada matriz.
- * El único requerimiento para este archivo es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

5) Fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación (FracSent.dat).

Este archivo, al igual que los dos anteriores, consta de 24 matrices de 39*45 elementos de tipo real. En la tabla A.5 se presenta una fracción del mismo.

```

hora = 1
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.7984 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.7984 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.7984 0.7984 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 .. 0.7984 0.7984 0.0000 0.7984 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 .. 0.7984 0.0000 0.0000 0.7984 .. 0.0000 0.0000 0.0000
:
:
:
0.5169 0.5169 .. 0.0000 0.4454 0.4454 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.5169 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.4454 0.4454 .. 0.0000 0.0000 0.0000
:
:
:
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
hora = 2
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.7989 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.7989 0.0000 .. 0.0000 0.0000 0.0000
:
:
:
:
:
:

```

Tabla A.5 Archivo de fracciones de vehículos que circulan en el sentido de menor circulación.

Observaciones:

- * La primera línea es donde se especifica el nombre del archivo.
- * Existe una línea de separación entre cada matriz.
- * El único requerimiento para este archivo es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

6) Archivo de factores de emisión utilizados en las vías primarias (FactEmi.pri) y factores de emisión utilizados en las vías secundarias (FactEmi.sec).

Como ejemplo se muestran ambos archivos en las tablas A.6 y A.7.

```

FACTORES DE EMISION DE MONOXIDO DE CARBONO [g/Km]
      (30 km/hr) (60 km/hr)
AUTOS      33.66      18.75
AUTOBUSES   7.66       6.77
CAMIONES   84.19     40.15
TRAILERS    7.66       6.77

```

Tabla A.6 Archivo de factores de emisión utilizados en las vías primarias.

FACTORES DE EMISION DE MONOXIDO DE CARBONO [g/Km]		
ARRANQUE EN	FRIO	CALIENTE
AUTOS	33.66	18.75
CAMIONES	84.19	40.15
OMNIBUSES	7.66	6.77

Tabla A.7 Archivo de factores de emisión utilizados en las vías secundarias.

Observaciones:

- Es importante respetar el orden indicado de los datos para evitar errores en los cálculos.
- Los factores de emisión se dan en gramos por kilometro [g/km]
- La primera línea es donde se especifica el nombre del archivo.
- En el caso del archivo FactEmi.pri, de la segunda en adelante se tiene lo siguiente:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 12	Comentario	Alfanumérico
13 -- 20	FactEmi(1), a 30 km/h.	Real
21 -- 28	FactEmi(2), a 60 km/h.	Real

- En el caso del archivo FactEmi.sec, de la segunda en adelante se tiene lo siguiente:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 12	Comentario	Alfanumérico
13 -- 20	FactEmi(1), modo de arranque en frio	Real
21 -- 28	FactEmi(2), modo de arranque en caliente	Real

7) Archivo de factores de composición vehicular en vías primarias (TipoPriN.dat) y factores de composición vehicular en vías secundaria (TipoSecN.dat).

Estos archivos constan de una matriz de 39*45 elementos reales. Como ejemplo de ellos se muestra a continuación en la tabla A.8, el archivo de (TipoPri1.dat).

0.7640	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640	..	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640
0.7640	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640	..	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640
0.7640	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640	..	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640
:	:	:	:	:		:	:	:	:
0.7806	0.7806	0.9285	0.9285	0.9285	..	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640
0.7806	0.7806	0.9285	0.9285	0.9285	..	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640
0.7806	0.7806	0.7806	0.9285	0.9285	..	0.7640	0.7640	0.7640	0.7640
:	:	:	:	:		:	:	:	:
0.9285	0.8380	0.8380	0.8380	0.8380	..	0.7070	0.7640	0.7640	0.7640
0.8380	0.8380	0.8380	0.8380	0.8380	..	0.7070	0.7640	0.7640	0.7640
0.8380	0.8380	0.8380	0.8380	0.9360	..	0.7070	0.7640	0.7640	0.7640

Tabla A.8 Archivo de factores de composición vehicular en vías primarias (TipoPri1.dat).

Observaciones:

- Estos archivos se crean dentro del programa, por lo tanto son internos.
- El único requerimiento para este archivo es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

8) Fracciones de vehículos cuyo modo de arranque ha sido en frio (FraArran.dat).

Un ejemplo de dicho archivo se muestra en la tabla A.9.

Fracciones de vehiculos que arrancaron en frio

.90
.90
.90
.90
.90
.90
.85
.85
.85
.25
.25
.30
.30
.20
.20
.20
.50
.50
.15
.15
.15
.20
.20
.20

Tabla A.9 Archivo de Fracciones de vehículos cuyo modo de arranque es en frio.

Observaciones:

* La primera linea es donde se especifica el nombre del archivo y de la segunda linea en adelante se tiene lo siguiente:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 5	Fact	Real

9) Archivo de estaciones de aforo (Estacion.dat).

A continuación en la tabla A.10 se muestra un ejemplo de dicho archivo.

Numero de Renglon: 196

#REN	ESTA.	COORD. X	COORD. Y	HORA1	2	3	4	5	...	22	23	24
1	1	483348.9	2149498.5	285	357	446	558	697	...	1568	1254	1004
2	2	483348.9	2149498.5	202	253	316	395	494	...	1469	1175	940
3	3	479347.3	2151453.1	142	178	222	278	348	...	863	690	552
4	4	479347.3	2151453.1	82	102	127	159	199	...	371	297	237
5	5	490886.8	2147482.6	573	716	895	1119	1398	...	1722	1378	1102
6	6	490886.8	2147482.6	438	547	684	855	1068	...	3506	2805	2244
7	7	485836.6	2149752.7	243	304	380	475	594	...	1404	1123	899
8	8	482968.1	2150228.4	334	417	522	652	815	...	1093	874	700
9	9	488121.8	2150396.7	371	464	580	724	906	...	1116	893	714
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
10	10	484609.7	2151224.9	357	447	558	698	872	...	1182	946	756
190	190	479886.4	2141568.4	474	593	741	927	1158	...	2310	1848	1478
191	191	479886.4	2141568.4	362	453	566	707	884	...	986	789	631
192	192	479886.4	2141568.4	390	487	609	761	951	...	614	491	393
193	193	480024.4	2134068.6	493	617	771	964	1204	...	1618	1294	1036
194	194	480024.4	2134068.6	483	603	754	943	1178	...	1988	1590	1272
195	195	480024.4	2134068.6	354	443	554	692	865	...	1381	1105	884
196	196	480024.4	2134068.6	371	464	580	725	906	...	2666	2133	1706

Tabla A.10 Archivo de estaciones de aforo.

Observaciones:

* Es importante respetar el orden indicado de los datos para evitar errores en los cálculos.

* En la primera linea:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 21	Comentario	Alfanumérico
22 -- 27	NumEst	Entero

* En la segunda linea existe solamente un comentario y de la tercera linea en adelante tenemos lo siguiente:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 4	g1 (# Reng)	Entero
5 -- 9	q (# Esta)	Entero
10 -- 20	CoorX	Real con 1 decimal
21 -- 31	CoorY	Real con 1 decimal
32 -- 151	24 Nveh, con 5 espacios cada uno	Real

- Las unidades para CoorX y CoorY estan dadas en UTM.

10) Mapa de zonas de influencia de las estaciones de aforo (Zona.dat)

Este mapa consta de una matriz de 39*45, compuesta por los números claves de cada estación de aforo, como se puede observar en la tabla A.11 que a continuación se muestra.

Observaciones:

- Las primeras 7 lineas contiene comentarios.
- El único requerimiento para este archivo es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

11) Mapa de vías primarias de doble circulación (Doblecir.dat)

Este mapa consta de una matriz de 39*45, compuesta por unos (1) y ceros (0), como se puede observar en la tabla A.12 que a continuación se muestra.

Observaciones:

- La primera linea es donde se especifica el nombre del mapa
- El único requerimiento para este mapa es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

[illegible]

Mapa de Vías Primarias de doble circulación.

```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ... 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ... 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
: : : : : : : : : : : : : : : : : :
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 ... 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 ... 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 ... 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 ... 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 ... 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 ... 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ... 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ... 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

```

Tabla A.12 Mapa de Vías Primarias de doble circulación.

12) Mapa delegacional (Delega.dat)

Este mapa consta de una matriz de 39*45, compuesta por los números clave de cada delegación, como se puede observar en la tabla A.13.

Observaciones:

- * La primera línea es donde se especifica el nombre del mapa
- * El único requerimiento para este mapa es que exista 1 espacio de separación entre cada elemento.

[illegible]

13) Archivo de Composición Vehicular en vías primarias (DelPri.dat) y Archivo de Composición Vehicular en vías secundarias (DelSec.dat).

Observaciones:

- | Columna: | Variable: | Denominación: |
|----------|------------|---------------|
| 1 -- 32 | Comentario | Alfanumérico |
| 33 -- 34 | NumComp | Entero |

Numero de Tipos de Composicion: 4

Numero de Renglones: 201

#Reng.	Del.	#Esta.	A	B	C	D
1	CU	1	97.86	0.5	1.60	0.00
2	CU	2	97.06	1.8	1.10	0.00
3	MH	3	95.47	0.8	0.17	0.00
4	MH	4	93.17	0.4	6.34	0.00
5	VC	5	89.80	1.4	6.84	1.87
6	VC	6	90.50	2.1	7.23	0.14
7	CU	7	93.19	4.2	2.61	0.00
8	CU	8	86.86	4.7	7.62	0.76
9	VC	9	95.34	1.1	3.37	0.13
10	CU	10	94.82	0.9	4.21	0.00
:	:	:	:	:	:	:
193	TL	193	97.26	0.3	2.23	0.17
194	TL	194	95.90	0.7	3.21	0.18
195	TL	195	95.92	0.3	3.61	0.16
196	TL	196	86.39	6.3	7.21	0.00
197	CP	0	78.06	13.1	6.58	2.215
198	MC	0	83.80	2.1	14.10	0.00
199	TH	0	70.70	6.9	22.40	0.00
200	XO	0	87.30	2.8	9.90	0.00
201	EM	0	76.40	5.7	17.90	0.00

Tabla A.14 Archivo de composición vehicular en vías primarias.

Numero de Tipos de Composicion: 3

Numero de Renglones: 17

#Reng.	Del.	#Esta.	A	B	C
1	AO	1	93.45	6.3	0.17
2	AZ	1	86.14	13.7	0.07
3	BJ	1	89.30	6.7	3.91
4	CO	1	95.20	4.6	0.14
5	CP	1	92.29	7.6	0.08
6	CU	1	87.65	12.0	0.35
7	GM	1	92.91	6.9	0.17
8	IC	1	89.29	10.6	0.07
9	IP	1	89.39	10.5	0.06
10	MC	1	95.17	4.7	0.07
11	MH	1	91.05	8.7	0.18
12	MA	1	80.05	19.9	0.03
13	TH	1	88.04	11.9	0.06
14	TL	1	92.46	7.3	0.19
15	VC	1	91.91	8.0	0.07
16	XO	1	85.91	14.0	0.07
17	EM	1	76.40	5.7	17.90

Tabla A.15 Archivo de composición vehicular en vías secundarias.

- En la segunda línea se tiene:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 21	Comentario	Alfanumérico
22 -- 25	NumLin	Entero

- En la tercera línea tenemos un comentario y de la cuarta línea en adelante tenemos lo siguiente:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 9	q	Entero
10 -- 11	a	Alfanumérico
12 -- 17	num	Entero
18 -- 44	4 tipo, con 7 espacios cada uno	Real

14) Factores de corrección de emisiones (FactVar.dat).

Un ejemplo de dicho archivo se muestra en la tabla A.16.

Observaciones:

- La primera línea es donde se especifica el nombre del archivo y de la segunda línea en adelante se tiene lo siguiente:

Columna:	Variable:	Denominación:
1 -- 5	Fact	Real

Factor de correccion de los vehiculos que varian en su modo de arranque

1.0

1.0

1.0

1.0

1.16

1.2

1.04

0.97

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

Tabla A.16 Archivo de factores de corrección de emisiones.

APENDICE B

Formato de los archivos para el modelo meteorológico

B.1 Datos de entrada

Para correr el modelo se necesitan 3 archivos en formato ASCII: (1) un archivo topográfico, (2) datos horarios de las estaciones de superficie, y (3) datos de los perfiles verticales, incluyendo la temperatura superficial horaria en el día de simulación.

B.1.1. Archivo topográfico

El archivo topográfico, *zmcm.top* contiene las alturas topográficas que corresponden a la región de estudio. Los valores están dados en metros sobre el nivel del mar, a cada 3000 m de distancia, o sea en cada nodo de la malla.

B.1.2. Archivo de datos de superficie

Un ejemplo del archivo de datos de superficie, *zmcm.sup*, está dado en la tabla A.1. Los primeros tres renglones de este archivo contienen la fecha (año, mes, día); el cuarto renglón indica el total de estaciones de superficie usados para la interpolación. Después de esta información general se da, para cada estación, (1) posición geográfica de la estación (UTMx y UTM_y) y clave de la misma, (2) dirección de viento a cada hora, (3) velocidad de viento a cada hora, y (4)

factores de caracterización de cada estación.

Observaciones:

- * Es importante respetar el orden indicado de los datos para evitar errores en los cálculos.
- * La velocidad del viento se da en metros por segundo. Las coordenadas UTM se dan en kilómetros.
- * Año, mes, día, número de estaciones y dirección del viento son números enteros; para que el modelo acepte los archivos de entrada, es necesario respetar estas convenciones.
- * Coordenadas UTM en x y en y, velocidad del viento y factores de caracterización son números reales.
- * Como hora inicial se considera 1:00, como hora final 24:00. Es necesario proporcionar todos los valores para los 24 horas. Para indicar que no existen datos de velocidad o de dirección del viento, se usa el valor "-1" para la dirección, y "-1.0" para la velocidad del viento.
- * Los factores de caracterización deben tener un valor entre 0 y 1, dependiendo de la precisión con la cual el valor reportado puede representar la velocidad del viento que viene de una dirección determinada. Para el procedimiento que se siguió para la asignación de estos factores se refiere al inciso 3.3.2 y el apéndice C.

Tabla B.1 Datos de entrada de superficie

B.1.3. Archivo de perfiles verticales

Un ejemplo del archivo que contiene la información de perfiles verticales, *zmcm.upr*, se presenta en la tabla B.2. Como en el archivo de datos en la superficie, los primeros cuatro renglones indican respectivamente el año, el mes, el día y el total de estaciones de radiosondeo. Después se indica para la primera estación (1) posición geográfica de la estación (UTMx y UTM_y), altura sobre el nivel del mar, número de datos en cada radiosondeo y número de radiosondeos para esta estación. Para cada radiosondeo que corresponde a la estación respectiva, se especifica (2) día y hora del radiosondeo, (3) datos de altura de la medición, (4) datos de dirección de viento que corresponden a cada altura, (5) datos de velocidad de viento, (6) temperatura a cada altura y (7) nubosidad y altura de las nubes. Los últimos dos renglones indican la temperatura superficial horaria medida en la estación de radiosondeo. Estos valores se necesitan para calcular la altura de la capa de mezcla.

Después de especificar todos los datos para una estación, se sigue el mismo orden para las otras estaciones. Si existe más que una estación de radiosondeo, no es necesario proporcionar sus valores de temperatura superficial; la altura de capa de mezcla siempre se calcula con los datos de la estación *Aeropuerto*, que es en este momento la única estación que efectúa radiosondeos.

Observaciones:

- * Es importante respetar el orden indicado de los datos para evitar errores en los cálculos.
- * La velocidad del viento se da en metros por segundo, las coordenadas UTM en kilómetros, la temperatura en grados Celcius, la nubosidad en octavos y la altura de las nubes en pies.
- * Año, mes, día, número de estaciones, altura topográfica de la estación, altura de medición y dirección del viento son números enteros.
- * Coordenadas UTMx y UTM_y, velocidad del viento y temperatura son números reales.
- * El número máximo de mediciones en la vertical es 12. Se recomienda dar más mediciones a alturas bajas, y mediciones más dispersas a alturas mayores.
- * Se recomienda que el último valor sea el que corresponde a una altura de alrededor de 5000 metros.
- * Si no existen datos hasta una altura de 5650 metros, el último perfil que se detecta se extrapola para utilizar el método de Holzworth.
- * Es necesario dar valores hasta una altura de por lo menos 1000 metros, para evitar resultados no confiables.
- * Los radiosondeos tienen que ser periódicos (p.e. cada 12 horas). En la Ciudad de México se proporcionan los radiosondeos diariamente a las 6 AM y a las 6 PM.

```

91
2
22
1
490.0 2147.0 2234 12 3
22 600
2234 2300 2368 2437 2503 2567 2760 3081 3524 4091 4673 5260
100 221 268 288 293 294 316 10 42 60 149 224
2.0 1.3 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.8 3.6 3.6 1.8 6.3
14.5 15.5 15.3 15.1 14.7 14.2 12.8 10.8 7.4 2.4 -1.9 -6.5
0 0
22 1800
2234 2306 2379 2454 2531 2612 2873 3380 3867 4342 4761 5040
40 32 32 32 33 35 44 83 139 187 218 225
2.0 3.7 4.1 4 3.8 3.5 2.8 2.3 2.6 3.9 6.2 7.0
21.5 20.1 18.8 17.5 16.1 14.7 12.2 7.1 4.4 0.1 -2.9 -4.2
4 7000
23 600
2234 2308 2385 2465 2543 2616 2887 3204 3629 4073 4562 4988
360 334 328 324 321 320 334 30 66 21 232 190
2.0 2.5 2.5 2.3 2 1.6 1 0.8 1.8 1.4 1.5 3.4
14.4 14.1 13.7 12.9 12.2 11.5 9 7.6 5.3 1.5 -2 -4.2
0 0
14.8 14.0 12.6 11.6 9.8 9.5 9.0 9.0 11.1 14.0 17.1 19.8
21.8 23.2 24.2 24.3 24.4 22.7 20.5 18.8 16.0 15.5 15.6 14.3

```

Tabla B.2 Datos de perfiles verticales

B.2. Archivos de salida

El programa genera 3 archivos de salida: el archivos *viento.out* que contienen los valores de vientos calculados, el archivo *hcm.dat* que contiene los valores de la altura de la capa de mezcla y *kver.dat* que contiene los coeficientes de difusión vertical.

B.2.1. Archivo de vientos calculados

El archivo que contiene los vientos calculados en cada celda de la malla se llama *vientos.out* y está ejemplificado en la tabla B.3; este archivo contiene los valores de los componentes horizontales *u* y *v* de la velocidad de viento por cada hora en cada uno de los 6 capas de cálculo.

B.2.2. Archivo de ACM

El archivo *hcm.dat* tiene un formato similar al archivo *viento.out*; contiene los valores de la altura de la capa de mezcla SOBRE EL NIVEL DEL SUELO, para los 24 horas del día. En la estación Aeropuerto se calcula la ACM respecto al nivel del mar; para obtener el valor en toda la malla, se substraee la altura del terreno (topografía física) del valor de ACM sobre el nivel del mar en el Aeropuerto.

B.2.3. Archivo de coeficientes de difusión vertical

El archivo *kver.dat* contiene el valor de los coeficientes de difusión vertical en cada punto de la malla, para cada capa y en cada hora; tiene el mismo formato que *viento.out*.

HORA	1												
CAPA	1												
VALORES	DE U												
3.21	3.09	2.93	2.87	2.75	2.51	2.23	1.47	0.53	1.03	1.12	0.73	1.21	
2.96	2.95	2.83	2.75	2.67	2.39	1.98	1.28	0.39	0.68	1.29	1.19	1.25	
2.82	2.80	2.74	2.66	2.50	1.94	1.16	1.08	0.78	0.73	0.88	0.63	0.50	
2.65	2.67	2.66	2.59	2.28	1.53	0.90	0.81	0.68	0.55	0.42	0.38	0.90	
2.52	2.57	2.63	2.54	2.09	1.16	0.69	0.46	0.22	0.13	-0.09	0.29	1.02	
2.40	2.48	2.59	2.48	1.97	0.98	0.49	0.18	-0.05	-0.21	-0.07	0.59	1.04	
2.22	2.29	2.47	2.29	1.65	0.73	0.17	-0.22	-0.29	-0.15	0.29	0.75	0.99	
2.22	2.31	2.49	2.10	1.20	0.25	-0.24	-0.47	-0.35	-0.02	0.39	0.70	0.88	
2.36	2.37	2.34	1.73	0.71	-0.09	-0.59	-0.67	-0.46	-0.08	0.27	0.58	0.77	
2.32	2.19	1.91	1.18	0.41	-0.16	-0.74	-0.74	-0.47	-0.12	0.21	0.51	0.68	
2.08	1.91	1.58	0.90	0.22	-0.22	-0.59	-0.56	-0.32	-0.03	0.26	0.58	0.74	
1.75	1.58	1.33	0.85	0.29	-0.17	-0.34	-0.29	-0.13	0.07	0.33	0.69	0.92	
1.58	1.41	1.24	0.95	0.52	0.07	-0.16	-0.16	-0.04	0.12	0.39	0.78	1.06	
1.56	1.39	1.23	1.01	0.69	0.33	0.05	-0.01	0.02	-0.01	0.30	1.02	1.43	
1.56	1.41	1.21	1.03	0.80	0.54	0.29	0.21	0.14	-0.08	0.31	1.16	1.45	
VALORES	DE V												
-0.95	-0.74	-0.75	-0.72	-0.65	-0.65	-0.73	-0.91	-1.34	-0.38	-0.37	-1.34	-1.34	
-0.73	-0.52	-0.48	-0.50	-0.48	-0.54	-0.73	-0.78	-1.26	-0.92	-0.71	-1.07	-1.14	
-0.42	-0.22	-0.12	-0.16	-0.22	-0.52	-1.27	-0.90	-0.86	-0.74	-0.95	-1.27	-1.38	
-0.10	0.12	0.27	0.24	0.29	0.29	-0.67	-0.50	-0.06	0.09	-0.79	-1.17	-1.07	
0.18	0.43	0.62	0.52	0.52	0.80	0.05	0.20	0.24	0.28	-0.71	-1.04	-0.88	
0.36	0.57	0.73	0.57	0.51	1.03	0.73	0.52	0.26	-0.21	-0.72	-0.82	-0.78	
0.41	0.43	0.37	0.30	0.17	0.41	0.36	0.04	-0.20	-0.53	-0.65	-0.69	-0.72	
0.25	0.12	-0.20	-0.34	-0.56	-0.41	-0.26	-0.39	-0.49	-0.57	-0.60	-0.63	-0.58	
-0.13	-0.26	-0.54	-0.77	-1.08	-0.94	-0.54	-0.47	-0.49	-0.51	-0.57	-0.64	-0.66	
-0.64	-0.81	-0.95	-1.10	-1.28	-1.11	-0.51	-0.32	-0.30	-0.38	-0.47	-0.53	-0.56	
-1.32	-1.38	-1.37	-1.34	-1.15	-0.74	-0.20	0.00	-0.05	-0.20	-0.27	-0.10	0.18	
-1.89	-1.97	-1.91	-1.65	-1.06	-0.21	0.48	0.63	0.34	0.03	-0.13	0.01	0.22	
-2.12	-2.33	-2.31	-1.86	-1.02	0.05	0.98	1.09	0.62	0.14	-0.09	-0.03	-0.05	
-2.09	-2.28	-2.27	-1.82	-1.02	-0.09	0.73	0.88	0.45	-0.29	-0.78	-0.45	-0.70	
-1.91	-2.03	-2.01	-1.66	-1.05	-0.35	0.30	0.46	0.21	-0.43	-0.86	-0.76	-0.99	
HORA	1												
CAPA	2												
VALORES	DE U												
3.45	3.48	3.50	3.51	3.50	3.43	3.17	2.44	1.55	1.51	1.38	1.03	1.05	
3.47	3.51	3.54	3.55	3.52	3.30	2.73	1.92	1.36	1.24	1.15	1.02	1.01	
.													
.													

Tabla B.3 Archivo de salida viento.out

APENDICE C

Caracterización de las estaciones meteorológicas

Esta caracterización se efectuó para conocer la calidad de los datos meteorológicos medidos en 10 de las estaciones de monitoreo atmosférico del Instituto Nacional de Ecología (INE), para su utilización optimizada en el modelo meteorológico de interpolación, descrito en el capítulo 5. La información está basada en visitas guiadas por el INE (junio de 1992), comunicación oral con el Ing. Pedroza del INE, los mapas de uso del suelo del DDF (1987) y la guía Roji de la Ciudad de México (1990).

C.1.

Nombre:	Xalostoc	Localización	
Clave:	12-L	Longitud:	99°04'47"
Zona:	Noreste	Latitud:	19°31'34"
		Altitud:	2240 msnm

Dirección:

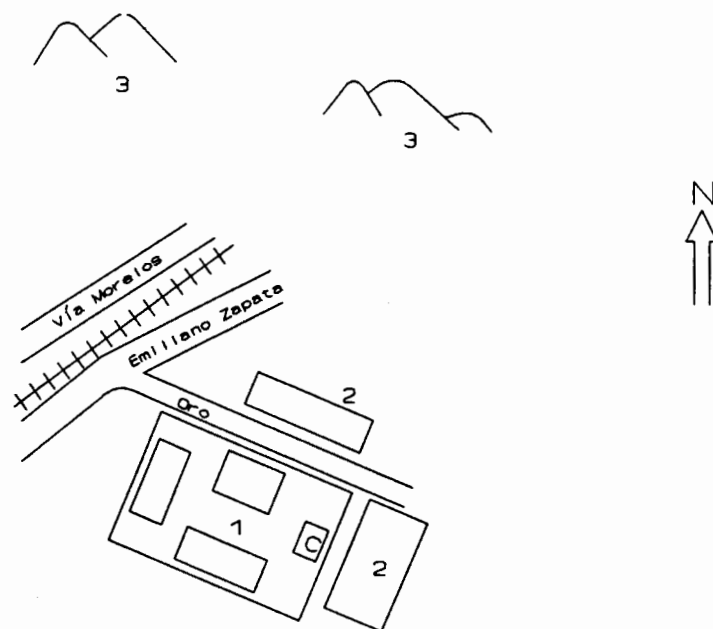
Distribuidora Volkswagen "Santa Clara"

Carr. a Pachuca (Emiliano Zapata) km 13.5 y calle del hierro

Xalostoc, Mun. Ecatepec, Estado de México.

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de medición: 10 m



1. Predio de la agencia de VW
2. Edificio con una altura de ± 9 m
3. Cerros

Entorno urbano:

El uso de suelo en esta zona es fundamentalmente industrial. La estación se encuentra dentro de los talleres de una agencia VW, ubicada a espaldas de una fundidora y cercana a una cementera. El flujo vehicular es alto en cada tipo de vehículo.

Entorno físico:

Alrededor y dentro del predio de la agencia VW (1) hay varios edificios con una altura entre 8 y 10 m. Se observan cerros (3) en el noreste a una distancia de aproximadamente 4 km y en el norte a una distancia de 6 km respectivamente.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	0.8	9	0.8
2	0.8	10	0.8
3	0.8	11	0.8
4	0.8	12	0.8
5	0.8	13	0.8
6	0.8	14	0.8
7	0.8	15	0.8
8	0.8	16	0.8

C.2.

Nombre: Tlalnepantla

Localización

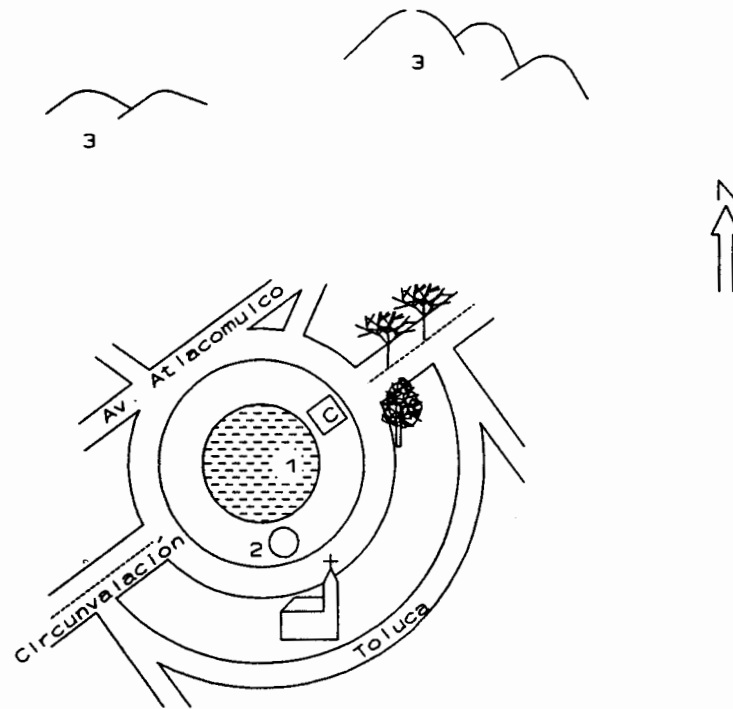
Clave: 11-F

Longitud: 99°12'17"

Zona: Noroeste

Latitud: 19°31'44"

Altitud: 2260 msnm



1. Tanque de almacenamiento de agua
2. Tanque de almacenamiento de agua
3. Cerros

Dirección:

Glorieta Atlacomulco, Av. Toluca, s/n, esq. Atlacomulco

Fracc. Tlalnemex, C.P. 54070

Mun. Tlalnepantla, Estado de México.

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 10 m

Entorno urbano:

El uso del suelo es mixto. En la zona cercana a la estación predominan las casas habitación y comercios de desarrollo horizontal.

El flujo vehicular es alto; circulan principalmente vehículos particulares y autobuses urbanos.

Entorno físico:

La estación se encuentra en un predio del municipio de Tlalnepantla, en donde está ubicado un tanque de almacenamiento de agua (1) de 40 metros de diámetro y 6 metros de altura. Al sur de la torre meteorológica se encuentran un segundo tanque de almacenamiento (2), que es más pequeño, pero que tiene una altura de aproximadamente 30 m, y una iglesia de 9 m de altura. Al noreste de la estación se detectaron unos cuatro árboles de una altura de 10 m. Se observan cerros (3) en el nornoreste a aproximadamente 5 km de distancia y en el nornoroeste a 3 km respectivamente.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	0.9
2	0.9	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	1	15	1
8	1	16	1

C.3.

Nombre: Pedregal

Localización

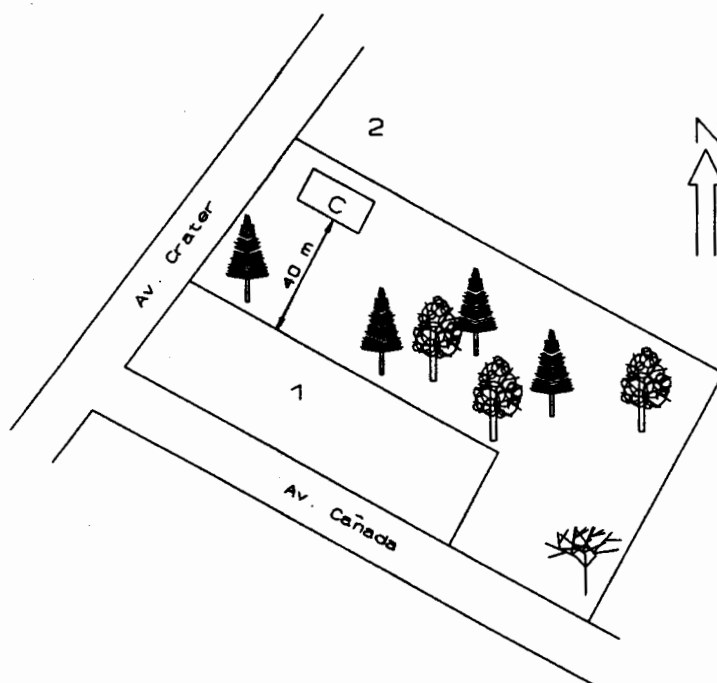
Clave: 14-T

Longitud: 99°12'15"

Zona: Suroeste

Latitud: 19°19'30"

Altitud: 2340 msnm



- 1. Edificios de la escuela "John F. Kennedy"
- 2. Zona baja sin edificios

Dirección:

Escuela primaria "John F. Kennedy"

Cañada 370 y Av. Crater, Col. Pedregal de San Angel

C.P. 01900, Del. Alvaro Obregón

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 10 m

Entorno urbano:

El uso de suelo en esta zona es habitacional, de tipo residencial y con baja densidad de población. La flujo vehicular es baja y principalmente de tipo particular. La zona cuenta con todos los servicios; la disposición de residuos es controlada.

Entorno físico:

En el predio de la escuela se observan varios árboles altos con una altura alrededor de 9 m, a una distancia de 30 a 80 m de la torre meteorológica. Los edificios de la escuela (1) tienen aproximadamente una altura de 8 m. Al noreste de la estación se encuentra una zona sin edificios, y más baja que el predio de la escuela.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	0.9
2	1	10	0.9
3	1	11	1
4	1	12	1
5	0.8	13	1
6	0.8	14	1
7	0.8	15	1
8	0.9	16	1

C.4.

Nombre: Acatlán

Localización

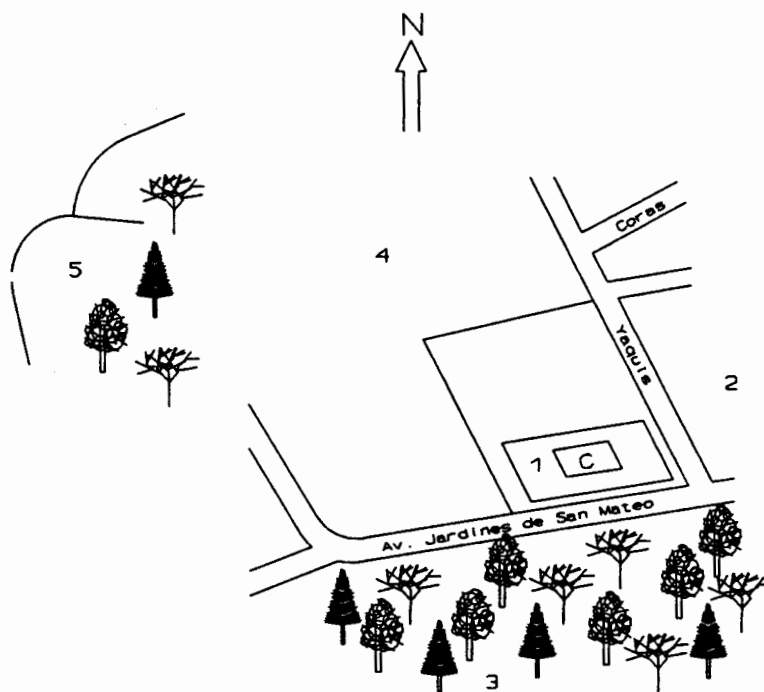
Clave: 5-G

Longitud: 99°14'32"

Zona: Noroeste

Latitud: 19°29'08"

Altitud: 2330 msnm



1. Edificios de la ENEP-Acatlán
2. Edificios bajos
3. Bosque
4. Zona despejada
5. Cerros

Dirección:

Escuela de Odontología ENEP-Acatlán

Av. Jardines de San Mateo, Mun. Naucalpan

Estado de México.

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 22 m

Entorno urbano:

La estación se encuentra en una zona de densidad habitacional baja. El flujo vehicular es bajo, predominando los vehículos particulares.

Entorno físico:

La torre meteorológica se encuentra sobre los edificios de la ENEP-Acatlán (1), por lo que se estima que la altura de medición es de 22 m. Al sur de la estación se observa un bosque (3), ubicado en una colina. En el norte-noroeste existe un espacio abierto (4) con una altura más baja que el terreno de la ENEP y que se extiende por aproximadamente 500 m. Al este de la estación se encuentra una zona de edificios bajos de 1 piso (2) y al oeste, a una distancia de aproximadamente 2 kilómetros, unos cerros (5).

Tomando en cuenta el entorno físico de la estación, se concluye que las mediciones de velocidad y dirección del viento no son muy representativas para un viento que viene del sur o del oeste.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	0.6
2	1	10	0.7
3	1	11	0.8
4	1	12	1
5	0.9	13	1
6	0.8	14	1
7	0.7	15	1
8	0.6	16	1

C.5.

Nombre: San Agustín

Localización

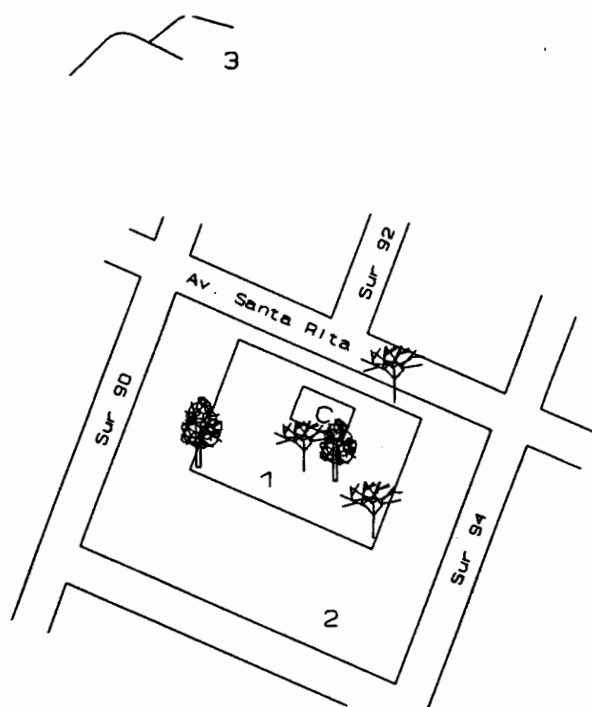
Clave: 9-N

Longitud: 99°01'50"

Zona: Noreste

Latitud: 19°31'58"

Altitud: 2240 msnm



1. Predio del centro de Salud "San Agustín"
2. Zona con viviendas de un piso
3. Cerro

Dirección:

Centro de salud comunitario "San Agustín"

Av. Santa Rita y sur 90, Col. Nvo. Paseo de San Agustín

Del. Ecatepec de Morelos, Estado de México.

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 14 m

Entorno urbano:

En la zona en donde se encuentra la estación existen varios depósitos de basura a cielo abierto y a aproximadamente 2 km de la estación se encuentra un canal de aguas negras. El uso de suelo es predominantemente habitacional de densidad baja. Todavía existe una considerable cantidad de terrenos baldíos, por lo que las tolvaneras son frecuentes. La circulación vehicular es baja, fundamentalmente de vehículos particulares. A una distancia de 3 km se encuentra una avenida de flujo vehicular alta con alto tránsito de autobuses suburbanos.

Entorno físico:

La torre meteorológica está ubicada arriba del centro de salud (1), por lo que la medición se efectúa a una altura de 14 m. En el predio del centro de salud, así como atravesando la calle, se encuentran unos seis árboles altos de casi la misma altura que la torre. La estación está rodeado por viviendas de un solo piso (2).

Al norte de la estación, a una distancia de aproximadamente 5 km, se observa un cerro (3).

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	0.9
2	1	10	0.9
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	0.9	15	1
8	0.9	16	1

C.6.

Nombre: Plateros

Localización

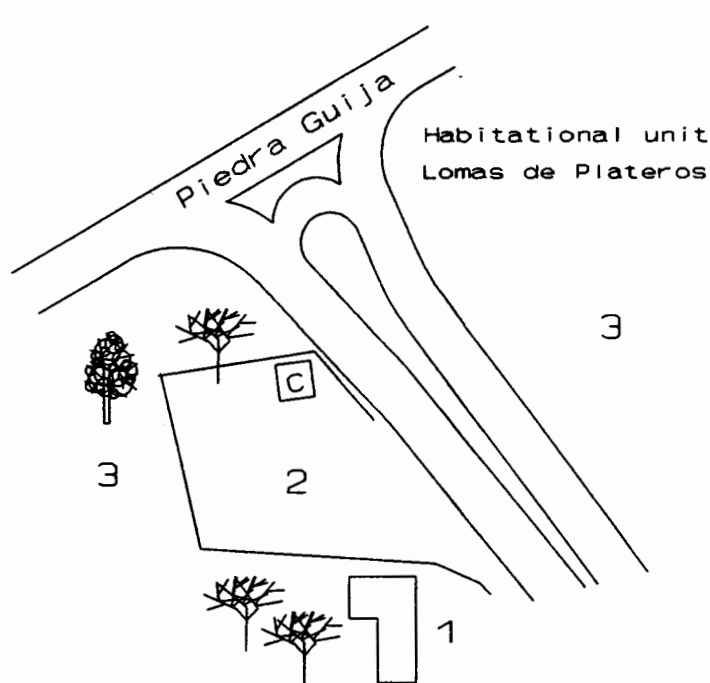
Clave: 16-U

Longitud: 99°12'00"

Zona: Suroeste

Latitud: 19°22'00"

Altitud: 2330 msnm



1. Edificio con una altura de 25 m
2. Estacionamiento
3. Zona con edificios bajos (4-6 m)

Dirección:

Escuela de Salud Pública "Francisco de P. Miranda"

Calle Francisco de P. Miranda #177

Col. Lomas de Plateros, C.P. 01600, Del. Alvaro Obregón

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 10 m

Entorno urbano:

La zona está totalmente urbanizada y cuenta con servicios y áreas verdes. El uso de suelo es mixto, predominando el habitacional, de desarrollo vertical y con una densidad de población media. El flujo vehicular es intenso; sobre Río Mixcoac circulan principalmente vehículos particulares y autobuses de la ruta 100.

Entorno físico:

La torre meteorológica se encuentra en el estacionamiento de una escuela de salud pública (2). Al sureste de la torre, a una distancia de aproximadamente 50 m, se encuentra el edificio principal de la escuela (1) que tiene una altura de 25 m. Al noreste de la estación se observa una zona de edificios bajos (3), en promedio 5 m de altura, y varios árboles con una altura menor que 10 m.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	1
2	1	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	0.6	13	1
6	0.6	14	1
7	1	15	1
8	1	16	1

C.7.

Nombre: Tacuba

Localización

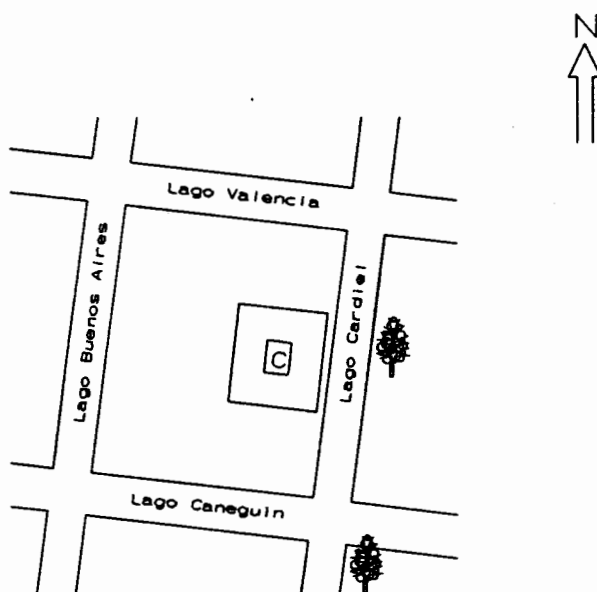
Clave: 4-B

Longitud: 99°12'08"

Zona: Noroeste

Latitud: 19°27'19"

Altitud: 2240 msnm



Dirección:

Centro de Salud "Lago Cardiel", Lago Cardiel #61

Col. Argentina Antigua, C.P. 11270, Del. Miguel Hidalgo

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 16 m

Entorno urbano:

El uso de suelo es habitacional con una densidad poblacional media y de desarrollo horizontal. El flujo vehicular es medio. Al norte y al sur de la estación están ubicados varios panteones, y en el norte se encontraba anteriormente la refinería 18 de marzo.

Entorno físico:

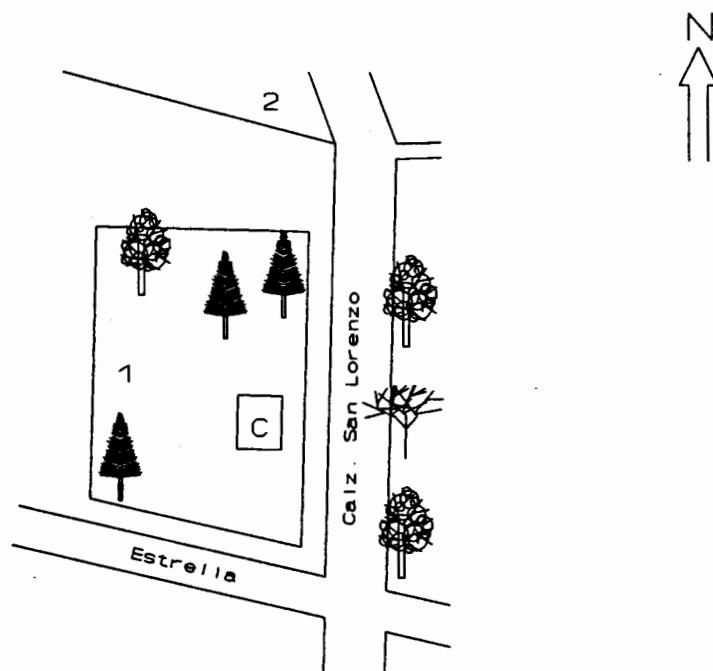
La torre meteorológica esta ubicada arriba de un edificio de dos pisos, por lo que la altura de medición es aproximadamente 16 m. La estación está rodeada por edificios de diferente altura, pero por lo general más bajos que la altura de medición; cerca de la estación, a más de 15 metros de distancia, se encuentran dos árboles. Por los factores mencionados se justificó que alrededor de la torre meteorológica no hay obstáculos que pueden influir en la medición de la dirección y la velocidad del viento.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	1
2	1	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	1	15	1
8	1	16	1

C.8.

Nombre:	Cerro de la Estrella	Localización
Clave:	15-Q	Longitud: ° / "
Zona:	Sureste	Latitud: ° / "
		Altitud: 2240 msnm



1. Planta de tratamiento "Cerro de la Estrella"
2. Panteón Civil

Dirección:

Planta de tratamiento de aguas negras "Cerro de la Estrella",
DDF, Av. San Lorenzo, C.P. 09830, Del. Iztapalapa

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 10 m

Entorno urbano:

El uso de suelo es habitacional con baja densidad: la zona está en expansión y no cuenta con todos los servicios. Existen algunos tiraderos de basura cerca. La circulación de vehículos es alta; principalmente camiones de carga.

Entorno físico:

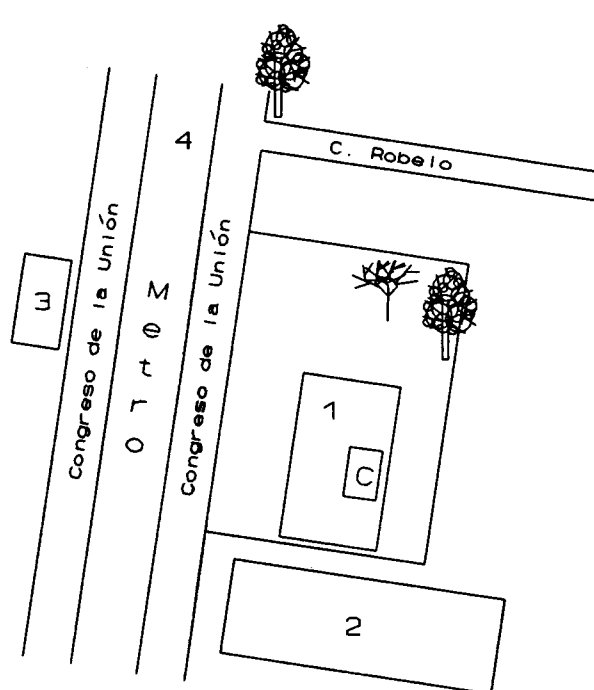
La estación está ubicada en el terreno de la planta de tratamiento "Cerro de la Estrella" (1) y está rodeada por árboles. A una distancia de aproximadamente 20 m se pueden observar varios árboles con una altura comparable con la de la torre meteorológica, tanto dentro del terreno de la planta de tratamiento como atravesando la calle. No se encuentran edificios altos cerca de la caseta de medición.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	1
2	1	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	0.8
7	1	15	0.8
8	1	16	0.8

C.9.

Nombre:	Merced	Localización	
Clave:	13-X	Longitud:	99°07'10"
Zona:	Centro	Latitud:	19°25'20"
		Altitud:	2240 msnm



1. Centro de salud "Luis E. Ruiz"
2. Escuela secundaria, 10 m de altura
3. Edificio con una altura de 15 m
4. Vía del metro

Dirección:

Centro de salud "Luis E. Ruiz"

Av. Congreso de la Unión 148 (antes Fco. Morazán)

y prolongación de Carretones

Col. Merced Balbuena, C.P. 15850, Del. Venustiano Carranza

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 14 m

Entorno urbano:

La zona en donde se encuentra la estación cuenta con todos los servicios urbanos y es de circulación vehicular alta. El uso del suelo es mixto, fundamentalmente habitacional. Frente a la estación se encuentra un parque deportivo que es fuente generadora de polvos en época de tolvaneras.

Entorno físico:

La torre meteorológica está colocada el techo del centro de salud (1), que tiene una altura de aproximadamente 4 m. Al sur de la estación se encuentra una escuela secundaria (2), que tiene una altura de 12 m y al noroeste se observa un edificio con una altura de 15 m (3). La vía del metro (4), que también se encuentra al noroeste de la estación, llega hasta una altura de 15 m. Se observan también unos tres árboles con una altura de 12 m.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	0.9	9	1
2	1	10	1
3	1	11	0.8
4	1	12	0.6
5	1	13	0.5
6	1	14	0.6
7	1	15	0.8
8	1	16	1

C.10.

Nombre: Hangares

Localización

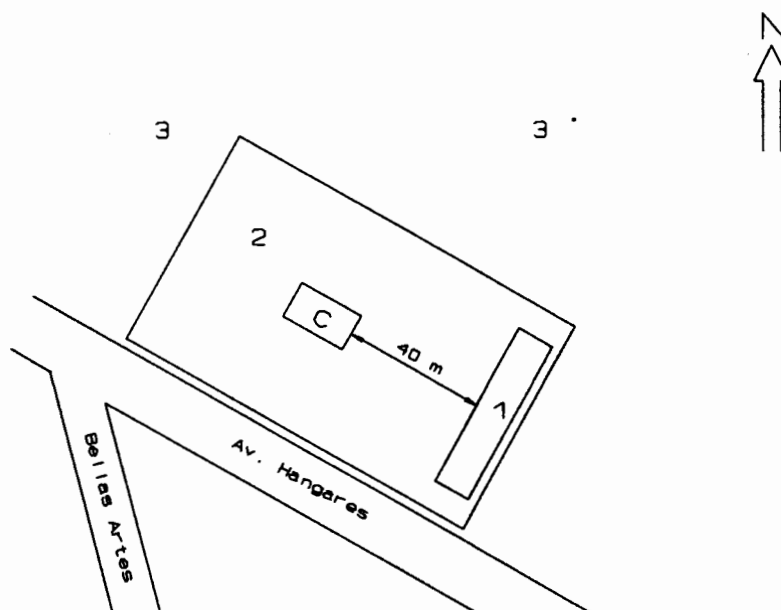
Clave: 17-Y

Longitud: 99°05'00"

Zona: Centro

Latitud: 19°25'20"

Altitud: 2240 msnm



1. Edificio con una altura de 8 m
2. Predio del estacionamiento CIAAC
3. Terreno del aeropuerto

Dirección:

Estacionamiento CIAAC, Blvd. Hangares nº 235

Col. Federal, C.P. 15700, Del. Venustiano Carranza

Parámetros meteorológicos: DV, VV, T, Hum. rel.

Altura de la medición: 10 m

Entorno urbano:

El uso de suelo es mixto, predominando el habitacional. El flujo vehicular en la zona es alta. La estación se encuentra dentro de la zona del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Cerca de la estación se encuentran los almacenes generales del metro y el módulo 28 de la ruta 100.

Entorno físico:

A 40 m de distancia de la caseta de medición está ubicado un edificio de aproximadamente 8 m de altura (1); no se detectaron edificios más altos, ni árboles. Al norte y noreste de la estación se encuentra el predio del aeropuerto (3), prácticamente sin obstáculos.

Por la naturaleza del entorno físico, se considera que la lectura del viento (a una altura de 10 m) no está influida por el contorno de la estación.

Valores propuestos para los factores α_k :

Dirección del viento	α_k	Dirección del viento	α_k
1	1	9	1
2	1	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	1	15	1
8	1	16	1

F-DEPFI/IF/1993



720954

F-DEPFI
IF
1993

6.2) 22.04