

2 ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANALISIS DE TRAYECTORIAS DE PARCELAS EN LA ATMOSFERA DE MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

F I S I C O

P R E S E N T A:

GUILLERMO WRIGHT BARAJAS

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR O. MAGAÑA RUEDA

MEXICO, D. F. FACULTAD DE CIENCIAS SECRETARIA ACADÉMICA

1999

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

271920



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule  
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
P r e s e n t e

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "Análisis de trayectorias de parcelas en la atmósfera de México".

realizado por GUILLERMO WRIGHT BARAJAS

con número de cuenta 7235270-5 , pasante de la carrera de FISICA

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis Propietario DR. VICTOR ORLANDO MAGANA RUEDA

Propietario DR. TOMAS MORALES ALCOTZIN

Propietario DR. MARCO ANTONIO MARTINEZ NEGRETE

Suplente DR. CARLOS GAY GARCIA

Suplente M. EN C. ANA CECILIA CONDE ALVAREZ

*[Handwritten signatures of Victor Orlando Magaña Rueda, Tomas Morales Alcotzin, Marco Antonio Martínez Negrete, Carlos Gay García, and Ana Cecilia Conde Álvarez]*

Consejo Departamental de Física  
DR. ROBERTO ALEJANDRO RUELAS MAYORGA

*[Handwritten signature of Roberto Alejandro Ruelas Mayorga]*  
CONSEJO DEPARTAMENTAL DE FISICA

---

## Agradecimientos

---

Al Dr. Victor Magaña  
por su atinada dirección en este trabajo lo que me ha permitido la conclusión del  
mismo.

Al Fis. José Luis Pérez  
por su ayuda al desarrollo de este trabajo

A los Sinodales:

Dr. Tomas Morales Alcontzin

Dr. Marco Antonio Martínez Negrete

Dr. Carlos Gay García

M. en C. Ana Cecilia Conde Alvarez

Por todos sus comentarios, los cuales invariablemente mejoraron este trabajo.

---

## Muy especiales agradecimientos

---

A mi bella y querida esposa Alicia,

A mi hija Anais,

A mi hijo Guillermo

Les dedico este trabajo,  
ya que lo hice siempre pensando en ustedes. Estoy muy orgulloso de ustedes, los  
quiero mucho.

A mis padres Gil y Gloria por haberme inculcado el deseo de aprender. Soy lo que  
ustedes han querido que yo sea.

Al Fis. Gerardo Wright y al Ing. Graciela Wright por darme su ejemplo de buenos  
hermanos.

Marzo de 1999

---

# INDICE

---

## **1. Impactos ambientales de emisiones a nivel local, regional y transfronterizo.**

Introducción	1
1.1. Utilización de modelos de trayectorias en Protección ambiental	3
1.2. Erupciones volcánicas	4
1.3. Plantas de generación eléctrica	8
1.4. Plataformas marinas de Pemex	10
1.5. Incendios forestales y quemas agrícolas	12
1.6. Normas internacionales en protección ambiental	15
1.7. Industria, población y plantas eléctricas en la frontera	17

## **2. - Cinemática del movimiento de un fluido**

2.1.- Análisis de trayectorias	19
2.2.- Datos observados	28
2.3.- Esquema numérico: Traject	29
2.4.- Metodología	31

## **3. - Condiciones meteorológicas y emisiones**

3.1. -Volcán Popocatepetl	34
3.2. -El Chichón	38
3.3. -Frontera norte (Big Bend)	40
3.4. -Plataformas marinas de PEMEX	42
3.5. -Incendios forestales y quemas agrícolas	46

## **4. - Análisis de trayectorias: Estudio de casos.**

4.1.- Erupción del volcán Popocatepetl del 30 de junio de 1997	51
4.2.- Erupción del volcán El Chichón el 6 de abril de 1982	55
4.3.- Contaminación del Parque Big Bend en septiembre y octubre de 1982	58
4.4.- Quema de gas en plataformas marinas, 15 de enero de 1998	61
4.5.- Incendios forestales y quemas agrícolas durante abril y mayo de 1998	66

<b>5.- Discusión de resultados y conclusiones generales</b>	<b>74</b>
---	-----------

<b>Bibliografía</b>	<b>79</b>
---------------------	-----------

## **Capítulo 1.- Impactos ambientales de emisiones a nivel local, regional y transfronterizo.**

### **Introducción**

Dos de los objetivos de la meteorología son el describir el estado de la atmósfera y sus cambios en el tiempo, por lo que alcanzarlos implica un proceso de observación, análisis, diagnóstico y predicción. La medida del entendimiento de los procesos atmosféricos, lo da la calidad de los pronósticos. Hoy en día se dispone de una gran cantidad de información de la atmósfera, con datos colectados en estaciones dispersas por todo el mundo, de manera que mediante el acceso a la información en modernos sistemas cómputo, es posible mejorar los pronósticos. A nivel regional, la disponibilidad de datos y esquemas de análisis del movimiento de parcelas o de algún “material traza” disperso en el aire, como pueden ser contaminantes no reactivos, permite el aprovechar el trabajo en *meteorología y en asuntos de protección ambiental*.

Las condiciones climatológicas de un país o ciudad, están en función de aspectos geográficos como son su cercanía al mar, lagos, bosques, así como las características de la orografía que lo rodea. En términos de protección ambiental, las condiciones meteorológicas dominantes determinan como los contaminantes afectan local y regionalmente o incluso a grandes distancias el ambiente. Ciudades en donde se tengan mecanismos de protección ambiental, pueden ser afectadas por contaminantes generados a grandes distancias.

Se tiene que en situaciones de emergencia como son eventos geofísicos extremos (incendios, erupciones, etc), el riesgo de que la población sea afectada aumenta en la medida en que se desconozca como ocurre la dispersión y el transporte de contaminantes generados en estos eventos. Por ejemplo, trayectorias seguidas por las emisiones de un volcán o contaminantes de origen antropogénico puedan tener un gran impacto en la salud de la población si esta no toma medidas preventivas.

Por lo anterior, resulta importante utilizar herramientas de modelaje que permitan pronosticar el movimiento de contaminantes de acuerdo a las condiciones atmosféricas prevalecientes con

el fin de que se puedan tomar acciones preventivas y definir estrategias para mejorar la calidad de vida de la población.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un esquema de análisis de trayectorias, con fines de evaluación de impacto ambiental. Se compone de 5 capítulos, siendo el primero, el correspondiente a la descripción de las situaciones en las que se debe realizar un análisis de trayectorias. Los problemas ambientales bajo estudio son de actualidad en México de manera que la evaluación del transporte de contaminantes a través de la atmósfera, se vuelve relevante para diversos sectores encargados de la toma de decisiones en materia ambiental, tanto a nivel nacional como internacional.

La Física asociada al movimiento de parcelas en la atmósfera se discute en el Capítulo 2, junto con la metodología usada además de una descripción de los datos de viento que se utilizan para analizar los movimientos de las parcelas. También se describe la estructura del esquema numérico del análisis de trayectorias.

Dado que es importante determinar las condiciones meteorológicas medias para establecer trayectorias, en el Capítulo 3 se hace una revisión de la circulación atmosférica media mensual sobre México analizándose sobre la base de una estructura tridimensional en el espacio la cual influye en el transporte de emisiones.

Posteriormente, en el Capítulo 4, se analizarán en detalle algunos casos discutidos en el Capítulo 3, mediante un estudio de trayectorias.

Finalmente en el Capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos y la importancia del uso de esquemas de predicción de trayectorias de parcelas contaminantes en estudios de impacto ambiental.

## **1.1 - Utilización de modelos de trayectorias en Protección ambiental**

Con el fin de tomar decisiones en materia ambiental, es necesario entre otras cosas disponer de herramientas numéricas de simulación que permitan determinar los impactos que algunos contaminantes tienen al ser arrastrados por el viento.

El análisis de trayectorias constituye una de esas herramientas ya que actualmente existen fenómenos naturales, como la expulsión de materiales de volcanes como el Popocatepetl, o por fuentes antropogénicas como la emisión de contaminantes como pueden ser el bióxido de carbono, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, HCNM, etc producidos en fábricas o plantas generadoras de electricidad que frecuentemente se convierten en una amenaza a centros de población. Esta herramienta de modelaje numérico permite tener un panorama de las condiciones ambientales prevaletientes y de aquellas que pueden presentarse, disponiéndose así de información para la toma de decisiones sustentadas en aspectos científicos.

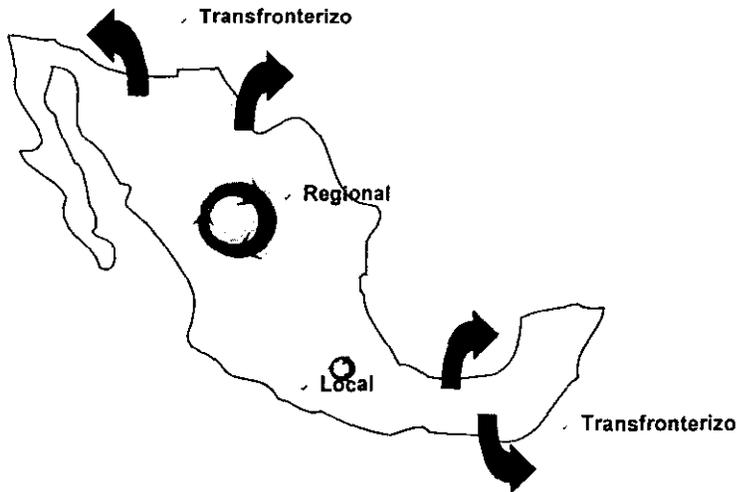
Desde hace ya algún tiempo, el Análisis de Trayectorias constituye un elemento indispensable en trabajo en contaminación ambiental (Keith, 1980).

El presente trabajo se examina sobre la base de determinar el impacto ambiental que pudiera tener una emisión, de acuerdo a la incidencia en el ámbito:

- **Local**
- **Regional**
- **Transfronterizo**

El caso local, se refiere a la contaminación relacionada a partículas y/o gases que al ser transportadas afectan zonas bien definidas dentro de una comunidad. En el caso Regional, la afectación por contaminantes incluye una área más extensa, por ejemplo, un estado de la República. Finalmente, el ámbito transfronterizo considera aquellos casos en que las parcelas se originan en nuestro país inciden en otros países, traspasando las fronteras. En este caso, la

principal afectación dentro de este último ámbito, se da en la frontera Norte, donde se encuentra la mayor concentración de industria, población y maquiladoras. También es el caso de las plantas de generación eléctrica, como la de Río Escondido y Carbón II en Coahuila, o la misma contaminación que se produce por vehículos automotores que circulan sin convertidores catalíticos quemando gasolina con bajo octanaje constituyendo fuentes de contaminación móvil que afectan a nuestros vecinos del norte. Ahí, las normas son más estrictas y las demandas por daños ambientales son frecuentes.



*Figura 1.1.- Las parcelas con contaminantes podrán afectar a la población en 3 ámbitos: local, regional y trans-fronterizo.*

## **1.2.- Erupciones volcánicas**

México se encuentra situado en una región con importante actividad volcánica. De los aproximadamente 3,000 volcanes que tiene el país, 14 son considerados activos. Algunos eventos con consecuencias desastrosas se deben, por ejemplo, al Parícutín, en Michoacán, que hizo erupción en 1943; El Chichón, en Chiapas, en 1982 y el Tacaná cerca de Chiapas, en 1986. Recientemente se ha detectado actividad importante de volcanes en fases eruptivas como han sido el volcán de Colima. El hecho más reciente se vivió a finales de 1994, cuando el



*Figura 1.2.- Durante el mes de junio de 1997, el volcán Popocatepetl expulso al aire una columna de cenizas que en forma extraordinaria se depositaron en la Ciudad de México.*

volcán Popocatepetl pasó de una fase de actividad moderada a una de gran actividad sísmica y fumarólica con abundante emisión de gases, cenizas, extrusión de lava e incluso, producción de flujos piroclásticos durante los eventos eruptivos de mayo y junio de 1997.

El evento del 30 de junio de 1997 es el más grande registrado en el presente periodo desde finales de 1994. Esta erupción generó una enorme pluma que alcanzó, en unos pocos minutos, los 8 Km por encima del volcán. Durante las siguientes 2 a 3 horas, la caída de ceniza fue reportada en muchos poblados alrededor del volcán incluyendo la Ciudad de México. No se registraron daños o víctimas derivadas de la erupción. El aeropuerto de la

ciudad de México tuvo que ser cerrado por cerca de 12 horas hasta que la ceniza depositada en las pistas pudo ser lavada.

Hay que señalar que se han establecido cuatro tipos de monitoreo en el volcán: visual, sísmico, geodésico y geoquímico, de los cuales el más importante es el sísmico. **Hasta la fecha no se cuenta con un sistema de pronóstico de la dirección que tomarían las cenizas en el caso de una erupción, y que permita tomar medidas precautorias en la población que pudiera ser afectada.**

Como ejemplo de la magnitud de destrucción y producción de cenizas que se generan en la erupción de un volcán, se puede considerar el caso del Monte Santa Helena, en el Estado de Washington, USA. El 18 de Mayo de 1980 hizo erupción generando una serie de fenómenos. Casi 400 metros del pico se colapsaron por lo que 64 Km<sup>2</sup> del valle se llenaron de lodos por

una avalancha. Por más de 9 horas una gran pluma de ceniza fue lanzada a la atmósfera alcanzando entre 20 a 25 Km de altura sobre el nivel del mar. La pluma se movió en dirección este del volcán a una velocidad promedio de 95 Km por hora. El depósito de la ceniza cubrió una importante área y estuvo en función de los vientos que la transportaron. El volumen total de la ceniza (antes de compactarse por efecto de la lluvia) fue de aproximadamente 1 kilómetro cúbico.

El Chichón es otro ejemplo de los efectos que se pueden tener por erupción volcánica y que se sienten a grandes distancias, pudiendo ser contempladas en el ámbito transfronterizo. Este volcán se encuentra ubicado en el Estado de Chiapas con una elevación de 1,060 metros. Hizo erupción en 1982 con tres eventos eruptivos; marzo 29 y el principal en abril.

El Chichón fue la primera gran erupción que ha tenido efectos atmosféricos estudiados en detalle utilizando instrumentos modernos. Esta erupción tuvo un volumen de lava menor a un kilómetro cúbico y fue similar al observado en el Monte Santa Elena, Washington, USA. Sin embargo, el Chichón fue notable debido a que generó una cantidad inusual de aerosoles (7 Megatonnes (Mt) de dióxido de sulfuro comparados contra 1 Mt para el Monte Santa Elena); con cenizas conteniendo un 2 por ciento de sulfato, además de cristales de anhídrita ( $\text{CaSO}_4$ ).

La nube de cenizas y gases que se generó alcanzó las Filipinas en 10 días y circuló el globo para retornar a México en 20 días (Matson & Robock, 1984). Las celdas de circulación atmosférica mantuvieron la nube entre 30°N y 30°S por más de 6 meses después de la erupción. Todos los gases de  $\text{SO}_2$  liberados en la erupción que alcanzaron la estratosfera fueron convertidos en un aerosol de ácido sulfúrico en aproximadamente seis meses. Medidas efectuadas por globos meteorológicos determinaron que un mes después de la erupción, 20 millones de toneladas de ácido sulfúrico aún permanecían en la atmósfera. Después de un año se llegó a determinar que quedaban 8 millones de toneladas.

Este volcán produjo cambios climáticos importantes (Robock, 1984), ya que la temperatura de la estratosfera se incrementó en 4°C como resultado de la absorción de radiación solar siendo

éste el incremento más grande registrado desde que las medidas comenzaron en 1958. Asimismo, se determinaron impactos en las temperaturas en el hemisferio norte ya que se observaron decrementos de alrededor de 0.2°C después de la erupción.

La nube generada por la erupción se expandió en las primeras 150 horas y permaneció prácticamente de un tamaño constante, a las 250 horas la nube fue de alrededor de 10,000,000 de Km. cuadrados. Se considero que un aspecto importante dentro del estudio de este volcán, fue la altitud que alcanzó del material expelido, siendo crucial para determinar el transporte de este material. En este caso, la altura que alcanzó la pluma fue de 26 kilómetros.

En general las condiciones meteorológicas determinan la dirección que toman las parcelas de cenizas y de gases, además de la concentración de los mismos.

El volcán El Chichón fue un fenómeno natural que tuvo un gran impacto tanto climático como ambiental y el cual afectó nuestro país, Centro América y el mundo (Rampino & Self, 1984). Las características de este fenómeno fueron importantes si se comparan con otros eventos como pueden ser las erupciones del Krakatau (1883), Santa Helena (1980) y otros que se indican en la siguiente tabla:

**Tabla 1.- Eventos eruptivos más importantes**

Erupción	VEI	Volumen de magma (km <sup>3</sup> )	Altura de la columna (km.)	Aerosoles H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (kg.)	Decremento en la temperatura en el hemisferio Norte
Laki, 1783	4	14-15		< 1 x 10 <sup>11</sup>	Alrededor 1.0
Tambora, 1815	7	> 50	>40	2 x 10 <sup>11</sup>	0.4 - 0.7
Krakatau, 1883	6	> 10	>40	5 x 10 <sup>10</sup>	0.3
Santa María, 1902	6	Alrededor 9	>30	< 2 x 10 <sup>10</sup>	0.4
Katmai, 1912	6	15	> 27	< 2 x 10 <sup>10</sup>	0.2
Santa Elena, 1980	5	0.35	22	3 x 10 <sup>8</sup>	0-0.1
Agung, 1963	4	0.3 - 0.6	18	1 - 2 x 10 <sup>10</sup>	0.3
El Chichón, 1982	4	0.3 - 0.35	26	1 - 2 x 10 <sup>10</sup>	0.4 - 0.6

VEI = Volcano Explosivity Index.

### **1.3.- Plantas de generación eléctrica**

La generación de energía eléctrica se produce por medio de quema de diferentes combustibles que son básicamente hidrocarburos y carbón, los cuales representan el 77% del total de la generación eléctrica a marzo de 1998 (CFE, 1998). Además, existe generación por energía hidráulica, geotérmica y nuclear.

La generación en nuestro país es fundamentalmente por la quema de hidrocarburos los cuales son en su mayoría producidos por PEMEX. Debido a problemas en las actuales configuraciones de las refinерías, algunos combustibles, como el combustóleo y el diesel, no cumplen con ciertas normas ambientales y generan una contaminación importante dentro de ciertas regiones. Otro combustible fósil que genera importantes problemas de contaminación, más que los hidrocarburos, es el carbón.

Durante el primer trimestre de 1998, el 10.2% de la producción total de la CFE se realizó con plantas carboeléctricas (3,970 GWh) utilizándose 2.03 millones de toneladas de carbón, siendo un combustible de poca calidad por su alto contenido de azufre, y por la alta generación de otros contaminantes que lleva aparejada.

Es importante señalar que la CFE pretende en el futuro convertir la mayoría de sus plantas de generación que utilizan combustóleo, a gas natural. Lo anterior, se plantea como el mecanismo para dar cumplimiento a la Normatividad ambiental existente y para disminuir las grandes importaciones de combustóleo de bajo contenido de azufre. La CFE lleva a cabo esta operación para resolver en parte el problema que resulta de la mala calidad del combustóleo lo cual genera gran contaminación.

Para el año 2005 se estima que el consumo de carbón, en términos calóricos, se incrementará al pasar de una participación del 13.6% observada en 1995, hasta llegar al 19.3% respecto al total de energía consumida para generar electricidad. Sin embargo, lo anterior implicara que en

términos de volumen consumido de carbón, este se incrementará a más del doble, al pasar de 7.6 a 16.6 millones de toneladas de carbón al año.

### Crecimiento y estructura del consumo de combustibles fósiles para la generación bruta de energía eléctrica

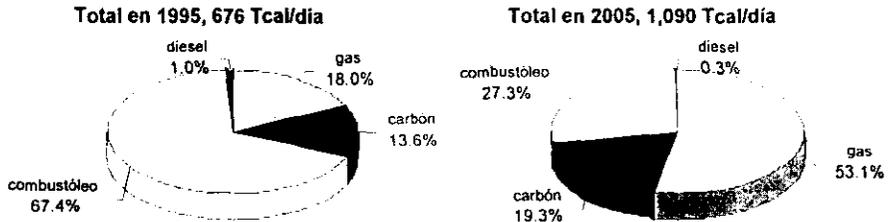


Figura 1.3.- Crecimiento y estructura del consumo de combustibles fósiles para la generación bruta de energía eléctrica

El anterior incremento en el consumo de carbón, y en el caso de que no se hagan uso de las mejoras tecnológicas en las plantas de CFE que generan altas emisiones en sus chimeneas, nos hacen considerar que la situación a futuro conlleva problemas ambientales que requieren ser analizados desde ahora.

Una importante medida precautoria que la CFE debería de considerar, se refiere a disponer de rutinas que le permitan determinar el movimiento de una “nube” contaminante con el fin de tomar previsiones ambientales, como en el caso de emisiones de gases de las calderas de generación de vapor que utilizan carbón o combustóleo de alto azufre, o en el caso de una fuga de gases radiactivos de la planta nuclear de generación eléctrica de Laguna Verde.

En la generación eléctrica con hidrocarburos resulta fundamental medir su impacto ambiental, el cual depende de las condiciones meteorológicas prevaletientes y que afecta, primeramente en forma regional a la población, y que se llegan a encontrar efectos de estas plantas a larga distancia, esto es, en un ámbito externo.

Respecto a esto último, actualmente las autoridades ambientales están estudiando el efecto que tienen las plantas de generación eléctrica de Río Escondido y Carbón II ubicadas al norte del Estado de Coahuila y cercanas a parques naturales de Texas, en donde al parecer se afecta la visibilidad de estos últimos.

#### **1.4.- Plataformas marinas de Pemex**

El importante desarrollo que ha tenido la industria petrolera ha implicado la emisión de importantes cantidades de gas quemado a la atmósfera, tanto por falta de ductos como de sistemas de compresión en la región marina del Golfo de Campeche. PEMEX quema en esta región del orden de 600 millones de pies cúbicos por día (MMPCD) que representan aproximadamente el 20% de la producción de gas natural del país (Pemex, 1998).

La quema de este gas natural ocurre aproximadamente a 110 Km de la costa de Campeche. El gas que se quema es gas amargo y lleva consigo hidrocarburos líquidos ricos en gasolinas. Al ser el gas natural quemado en sistemas de combustión que no son apropiados para este fin, se producen importantes cantidades de contaminantes cuyo impacto en la costa del Golfo de México está en función de las condiciones meteorológicas. En este caso en particular, se han hecho estudios sobre la cantidad de emisiones que se generan en estos complejos (Instituto de Ingeniería, 1996), pero no se ha determinado el movimiento de las emisiones como función de la época del año. Aún cuando en este estudio no se considera como se afecta la concentración de la parcela al final de la trayectoria, existen metodologías lagrangianas en donde se hacen estimaciones de como se afecto la concentración (A. Rúa et al., 1998).

Dentro de la contaminación por la producción de petróleo se debe considerar también la producción de azufre y óxido nitroso que pueden llegar a la costa de Campeche, y dependiendo de las condiciones meteorológicas, incluso llegar a la Florida o Cuba.

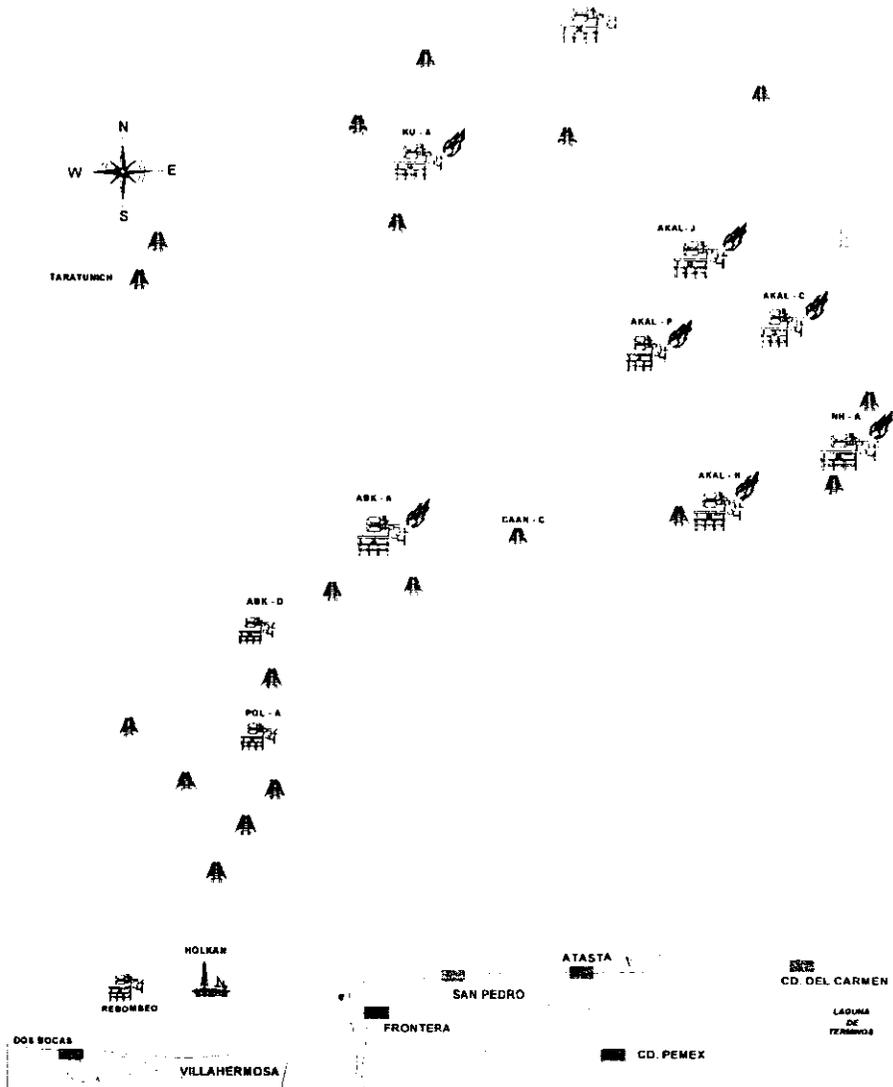


Figura 1.4. Ubicación de las plataformas de producción en la región marina de la Sonda de Campeche.

Se prevé que la quema de gas ya no existirá para finales del año 2000 pues se está construyendo infraestructura de proceso y conducción los cuales eliminarán esta quema. Sin embargo, se considera que a medida que se implementen normas ambientales más estrictas, PEMEX deberá contar con herramientas científicas que evalúen los impactos de los contaminantes que se emitan.



*Figura 1.5.- El complejo Akal y cuatro de los quemadores los cuales generan una importante nube de contaminantes como resultado de la combustión del gas*

### **1.5.- Incendios Forestales y quemas agrícolas**

Como resultado del fenómeno “El Niño” de 1997-98, las condiciones climatológicas cambiaron sustancialmente respecto a lo normal, produciéndose una sequía generalizada en nuestro país. La situación ambiental se agravó por la considerable cantidad de incendios forestales y de quemas agrícolas fuera de control. Esto generó una gran cantidad de contaminantes en la atmósfera, principalmente partículas suspendidas en el aire ( $PM_{10}$ ). Normalmente, cada año se presentan estos fenómenos, sin embargo, en 1998 los daños se magnificaron por la sequía.

Del 1 de enero al 20 de mayo de 1998 se generaron 11,448 incendios en el país, afectando 327,383 hectáreas. El máximo de incendios se presentó en abril y mayo. Como resultado, se generó una bruma que afectó Tabasco, Chiapas, Oaxaca, Sur de Veracruz, Campeche, Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit y el Distrito Federal. Desafortunadamente, por los incendios hubo un total de 32 personas muertas al tratar de combatir el fuego.

Esta bruma provocó que los índices de contaminación se incrementaran, afectando a toda la población y algunas actividades aeroportuarias. Es importante señalar que la bruma tuvo un impacto dentro del ámbito regional, pero este fenómeno también incidió en el ámbito transfronterizo, ya que a fines del mes de mayo de 1998, el humo de los incendios había llegado hasta los Estados de Dakota y Colorado afectando previamente a los Estados de Texas y Florida creando una bruma que molesto a los residentes de esos Estados (El Nacional, 1998).

Dadas las críticas condiciones ambientales en nuestro país, por el alto número de incendios forestales y agrícolas, los Estados Unidos, a través de su Presidente (Excelsior, 1998), hicieron un llamado para evitar las devastadoras técnicas de quema y tumba que son utilizadas por nuestros campesinos como potencial fuente de incendios fuera de control.

De acuerdo a diversas noticias, los Estados Unidos proporcionaron a México ayuda por 8 millones de dólares con el fin de eliminar los incendios que incluía apoyo con personal técnico y hasta científico. Posterior a esta ayuda y con mejores condiciones climatológicas, controlaron los incendios, disminuyendo la presión internacional a nuestro país por los efectos de la bruma en los Estados Unidos.

Actualmente se esta trabajando en un programa de reforestación de áreas dañadas, plantando 270 millones de arboles.

Los incendios se dan en todo el mundo y por las condiciones del efecto del "El Niño", se volvieron críticos, por lo que la presente es una experiencia importante en materia ambiental. Los incendios tuvieron un importante impacto en diversos aspectos naturales, materiales y hasta humanos, con costos económicos muy altos que pudieron ser prevenidos.



*Figura 1.6.- Los incendios forestales generan importantes problemas tanto a nivel interno y externo, llegando a darse reclamaciones entre países.*

La quema de bosques genera un gran deterioro en la biomasa. Considerando la sumatoria de biomasa quemada (Levine, J.S., 1994), se estima que en los trópicos se generan emisiones de partículas de biomasa generadas por incendios los cuales en conjunto son equivalentes a 140 millones de toneladas al año. En los años 60's, entre 300 a 500 millones de hectáreas fueron devastadas por cortes y quemas agrícolas estimándose que generaron aproximadamente 30 millones de hectáreas limpias para usarse en agricultura, de las cuales el 75% fueron bosques tropicales secundarios y las restantes, 25%, sabanas.

De acuerdo a lo anterior, se puede estimar la cantidad de partículas emitidas por hectárea de bosque quemado por unidad de tiempo:

$$\frac{140 \times 10^9 \text{ (kg/año)}}{(24 \text{ hora/día} \times 365 \text{ días/año} \times 30 \times 10^6 \text{ ha})} = 5 \text{ Kg./hora por hectárea}$$

Durante 1998 se registraron 12,267 incendios en áreas forestales, afectando 381,241 hectáreas (M. Aguilera, 1998), por lo que utilizando la relación anterior, se puede estimar el volumen de biomasa que se quemó en los incendios de 1998 en México:

$$(5 \text{ Kg./hora por hectárea}) \times 381,241 \text{ hectáreas} = 1,906,205 \text{ Kilos/hora}$$

Como se puede ver de la estimación anterior, se genera una importante cantidad de materia volátil en forma de ceniza y partículas microscópicas, por lo que la quema no solo genera bruma, sino que representa destrucción de la biomasa.



*Figura 1.7.- Los incendios forestales son generadores de una importante contaminación en nuestro país.*

### **1.6.- Normas Internacionales en Protección Ambiental**

Como resultado del Tratado de Libre Comercio se han adquirido diversas obligaciones sobre Protección ambiental que deben de ser cumplidas.

Los tres países miembros del TLC se han comprometido a aplicar y administrar el Tratado de manera compatible con la protección al medio ambiente, así como a impulsar el desarrollo

sostenible. Las disposiciones específicas del Tratado en materia ambiental se fundamentan en los siguientes compromisos:

- Las obligaciones comerciales de los tres países derivadas de convenios internacionales determinados sobre especies en vías de extinción, sustancias que dañan la capa de ozono y desechos peligrosos prevalecerán sobre las disposiciones del Tratado, sujeto al requisito de minimizar la incompatibilidad de estos convenios con el TLC. Con ello, se asegura que el TLC no limite el derecho de cada país para adoptar medidas conforme a dichos convenios.
- En el Tratado se confirma el derecho de cada país para determinar el nivel de protección que considere adecuados para el medio ambiente y para la vida o salud humana, animal o vegetal.
- Los tres países trabajarán conjuntamente para mejorar el nivel de protección del medio ambiente y de la vida y salud humana, animal y vegetal.
- En el Tratado se dispone que ningún país miembro deberá disminuir el nivel de protección de sus normas de salud, seguridad o medio ambiente, con el propósito de atraer inversión.
- Dentro del proceso de solución de controversias el país demandante tendrá la carga de probar que una medida en materia ambiental o de salud adoptada por un país miembro del TLC, es incompatible con el Tratado.

De acuerdo al TLC, se contemplan una serie de obligaciones legales que cada país debe observar para cumplir las leyes ambientales, por lo que se pueden generar conflictos “políticos” por el manejo de contaminantes en la frontera de México con los Estados Unidos. Para resolver lo anterior y en un esfuerzo conjunto, ya se han creado diversas instancias que investigan los problemas de contaminación.

### **1.7.- Industria, población y plantas eléctricas en la frontera**

A través del Grupo de Trabajo del Aire, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EE.UU. y la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) de México desarrollan planes de trabajo anuales para la zona fronteriza.

Los propósitos particulares y los objetivos de trabajo para la zona fronteriza, consisten en mantener monitoreo avanzado, el desarrollo del inventario de emisiones y la *modelación* e identificación de controles innovadores de emisiones. El propósito general de estas actividades es contar con un programa de administración de la calidad del aire para proteger la salud pública de la comunidad fronteriza.

Lo anterior se refuerza dado el reciente incremento en la población, tráfico vehicular y actividades industriales en la frontera en donde existe la necesidad inmediata de evaluar los niveles de contaminantes atmosféricos. El Anexo V del Acuerdo de la Paz (1983) encomienda a la EPA y al INE evaluar las causas y el desarrollo de soluciones a los problemas de calidad del aire en las ciudades hermanas fronterizas. Además de los lineamientos del Acuerdo de la Paz, el Acta del Aire Limpio autoriza a la EPA, en cooperación con su contraparte Mexicana, a realizar el monitoreo y mejorar la calidad del aire en las regiones fronterizas.

Como ejemplo de uno de los muchos estudios que se han desarrollados, destaca, entre otros, el de problemas significativos de visibilidad en el Parque Nacional Big Bend, derivados de la contaminación ambiental, tratando de identificar las fuentes regionales responsables.

En este caso, las partículas reducen la visibilidad y pueden permanecer en la atmósfera por varios días además de que son transportadas desde sus fuentes por varios cientos de kilómetros dependiendo de la intensidad y la dirección del viento, así como de la estabilidad atmosférica. Se estima que la mayor causa de deterioro en la visibilidad son las partículas de sulfato formado por el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), emitido por la combustión del carbón en calderas.

Se ha estimado que las fuentes emisoras fijas son las plantas de Río Escondido y Carbón II ubicadas al norte del Estado de Coahuila las cuales generan electricidad por combustión de carbón, y están localizadas a 20 millas al sur de *Eagle Pass, Texas* y 130 millas al sureste del *Big Bend National Park*. La planta carboeléctrica de Río Escondido fue construida en los años 1880 y Carbón II está aún bajo construcción. Estas plantas en conjunto serían la séptima fuente contaminante más grande de EE.UU., si estuviesen localizadas allí. Además, ninguna de estas centrales generadoras está equipada con controles para emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

Como se puede ver por los ejemplos anteriores, la implementación de una herramienta de estudio del movimiento de contaminantes a través del aire permitiría llevar a cabo una planeación adecuada para la ubicación de la industria. El diferenciar entre la posible incidencia de un contaminante generado en nuestro país o en otro lugar y que pudiera afectar otro país implicando problemas legales, políticos y económicos, permitiría diferenciar la responsabilidad y en su caso actuar con rapidez en caso de que sea un desastre natural o en el caso extremo de que se presente una nube explosiva o radiactiva.

Capítulo 2.- Cinemática del movimiento de un fluido

2.1.- Análisis de trayectorias

En cualquier fluido el análisis del movimiento puede ser descrito de forma Euleriana o Lagrangiana (Salby, 1995). Por lo anterior, un elemento material puede ser identificado por su posición inicial:

$$\xi = (x_0, y_0, z_0) \tag{2.1}$$

que puede ser referida como la *coordenada material* del elemento. El conjunto de puntos trazados por un elemento,

$$x(t) = [x(t), y(t), z(t)] \tag{2.2}$$

define una *trayectoria material* o la *trayectoria de una parcela*, la cual es únicamente determinada por la coordenada material  $\xi$  y el campo de movimiento  $v(x,t)$ , y puede obtenerse de la integración (Holton, 1993).

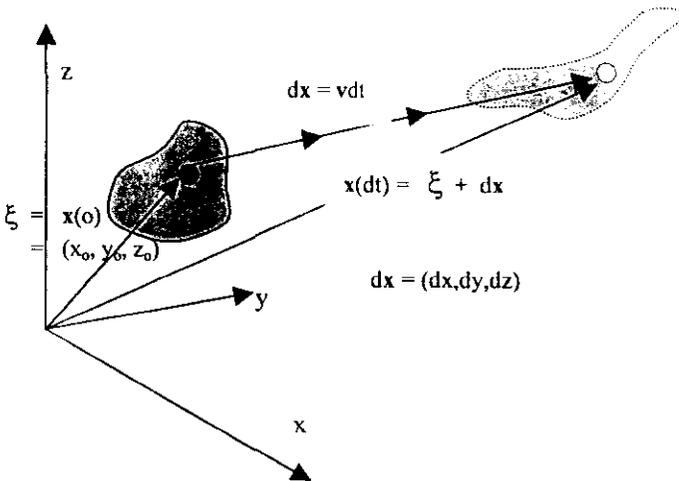


Figura 2.1 - Posición inicial de un elemento material y después de un intervalo  $dt$

Con  $\xi$  manteniéndose fija, el vector  $dx = (dx, dy, dz)$  describe el desplazamiento del elemento material durante el tiempo de intervalo  $dt$ . La velocidad del elemento está dada por:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad 2.3$$

con componentes

$$u = \frac{dx}{dt} \quad 2.4$$

$$v = \frac{dy}{dt} \quad 2.4$$

$$w = \frac{dz}{dt} \quad 2.4$$

Como la velocidad se evalúa para una  $\xi$  fija, la derivada en el tiempo en 2.1 corresponde a la de un elemento material individual y por lo tanto a la rapidez de cambio en el sistema Lagrangiano. Por restricciones cinemáticas que relacionan las descripciones Eulerianas y Lagrangeanas, la velocidad en 2.1 es igual al valor del campo  $v(x,t)$ , en la posición del elemento material  $x(t)$  al tiempo  $t$ .

En cualquier instante, el campo de velocidad define una familia de líneas de corriente (fig. 2.2) que son en cualquier lugar tangenciales a  $v(x,t)$ . Si el movimiento del campo es estacionario, es decir, si las velocidades locales no cambian con el tiempo, las trayectorias de las parcelas coinciden con las líneas de corriente, debido a que un elemento material es desplazado a lo largo de la misma línea de corriente, que permanece fija. Bajo condiciones no estables, las trayectorias de las parcelas no coinciden con las líneas de corriente, las cuales entonces evolucionan a nuevas posiciones.

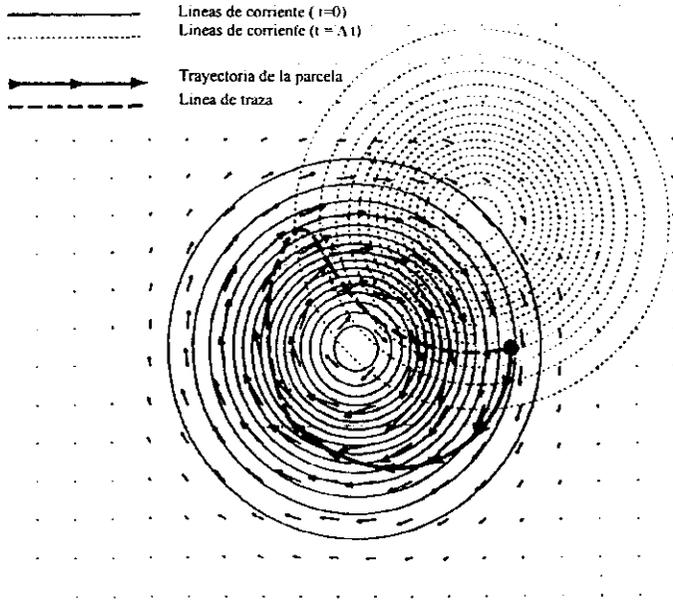


Fig. 2.2 Se muestra el movimiento de las líneas de corriente iniciales (líneas sólidas) y las líneas de corriente después de un intervalo  $\Delta t$  (líneas punteadas) para un vórtice trasladándose uniformemente. Superpuesto se encuentra (1) la trayectoria de la parcela a un tiempo  $\Delta t$  (línea sólida gruesa) de un elemento material el cual está inicialmente posicionado en el círculo negro y (2) la línea de traza al tiempo  $\Delta t$  (línea discontinua gruesa) que se origina en la misma posición.

Así, la velocidad de un elemento material inicialmente tangencial a una línea de corriente, podrá desplazarse a una diferente línea de corriente, en la cual será otra vez temporalmente tangencial. Una línea de traza, la cual también caracteriza el movimiento, es el lugar geométrico de los puntos trazados por una marca que ha sido soltada en el flujo en una posición particular. Como se ilustra en la fig. 2.2, una línea de traza representa las posiciones, a un tiempo dado, de elementos materiales contiguos que han pasado a través de una localización donde un trazador a sido soltado. Como las trayectorias de las parcelas, las líneas punteadas coinciden con las líneas de viento únicamente si el movimiento del campo es estable.

Además de traslación, un elemento material experimenta rotación y una deformación, conforme se mueva a través de una circulación. Estos efectos están incluidos en el gradiente de velocidad, definido como:

$$\nabla \mathbf{v} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad 2.5$$

el cual es un tensor en dos dimensiones con los subíndices  $i$  y  $j$  referidos a tres direcciones coordenadas Cartesianas. El gradiente de velocidad local  $\nabla \mathbf{v}(\mathbf{x})$  determina el movimiento relativo entre las coordenadas materiales y por lo tanto, la distorsión experimentada por el elemento material localizado en  $\mathbf{x}$ .

### *Trayectorias y líneas de corriente*

Una línea de corriente es una línea que en cualquier punto es tangente al campo vectorial de movimiento instantáneo del fluido. Una línea de corriente da por lo tanto una imagen instantánea del campo de vientos en la atmósfera. Las isobaras por ejemplo representan líneas de corriente si el viento geostrofico o de gradiente es estacionario (Gordon 1962). La trayectoria, por otra parte corresponde al "camino" por el cual viaja una parcela de aire durante un intervalo de tiempo definido.

La ecuación de una línea de corriente dada por

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v(x, y, t)}{u(x, y, t)}$$

establece que la dirección de la línea de corriente en cualquier punto  $x, y$  coincide con el vector de viento en un instante  $t_0$ . La pendiente de la línea de corriente está dada por

$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u}$ . Por otro lado, la ecuación de la trayectoria de una parcela, dada por

$$\frac{dx}{dt} = u(x, y, t) \quad y \quad \frac{dy}{dt} = v(x, y, t)$$

no está restringida a un valor inicial  $t_0$ . La trayectoria se puede obtener integrando las ecuaciones anteriores en el tiempo para condiciones iniciales  $x_0, y_0, t_0$ .

La relación entre trayectorias y líneas de corriente puede mostrarse de la siguiente manera. Si  $d\beta$  denota el cambio de dirección del viento,  $r d\beta = ds$  corresponde a un desplazamiento infinitesimal a lo largo de una trayectoria horizontal, donde  $r$  es el radio de curvatura. Así,

$$r \frac{d\beta}{dt} = \frac{ds}{dt}$$

por lo que

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{V}{r} = VK,$$

donde  $K$ , es la curvatura de la trayectoria. Ahora bien,

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial\beta}{\partial t} + u \frac{\partial\beta}{\partial x} + v \frac{\partial\beta}{\partial y}$$

donde  $\frac{\partial\beta}{\partial t}$  es el cambio local en el cambio de dirección del viento. Por definición  $\frac{\partial\beta}{\partial t} = 0$

para una línea de corriente, ya que la línea de corriente se refiere a un patrón instantáneo de movimiento, así que

$$\frac{d\beta}{dt} = u \frac{\partial\beta}{\partial x} + v \frac{\partial\beta}{\partial y} = \frac{\partial\beta}{\partial s} = \frac{V}{r} = VK,$$

donde  $K$ , es la curvatura de la línea de corriente. Considerando que

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{V}{r} = VK,$$

entonces

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = V(K_r - K_s).$$

Cuando el movimiento es estacionario  $\frac{\partial \beta}{\partial t} = 0$

$$V(K_r - K_s) = 0 \quad \text{y} \quad K_r = K_s$$

con lo que se muestra que las curvaturas coinciden y por tanto, la trayectoria y la línea de corriente coincide en el caso estacionario.

### La derivada material

Para pasar a una descripción Euleriana, la derivada Lagrangiana que aparece en las leyes de conservación puede ser expresada en términos de las propiedades de campo. Considerando la variable de campo  $\psi = \psi(x, y, z, t)$ , el cambio en el tiempo de la propiedad de  $\psi$  se describe por la diferencial total:

$$\begin{aligned} d\psi &= \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy + \frac{\partial \psi}{\partial z} dz \\ &= \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \nabla \psi \cdot dx \end{aligned} \quad 2.11$$

Donde  $dx, dy, dz$ , y  $dt$  son definidas como incrementos en el espacio y tiempo. En la ecuación anterior,  $dx = (dx, dy, dz)$  y  $dt$  en 2.11 los incrementos ocurren al mantenerse fija la coordenada material  $\xi$ , por lo que  $dx$  representa el desplazamiento del elemento material  $\xi$  durante un intervalo  $dt$  de la trayectoria a lo largo del eje  $x$  (fig. 2.1).

Con la posición y el tiempo relacionados de esta manera, la diferencia total describe el incremento en el cambio de la propiedad de  $\psi$  observada “en un marco moviéndose con el elemento material”. Diferenciando con respecto al tiempo (con  $\xi$  manteniéndose fija)

se obtiene la razón de cambio del tiempo de  $\psi$  “siguiendo el elemento material” o la rapidez de tiempo de cambio “siguiendo el movimiento” que define la derivada material del campo  $\psi$ .

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \frac{\partial\psi}{\partial t} + u \frac{\partial\psi}{\partial x} + v \frac{\partial\psi}{\partial y} + w \frac{\partial\psi}{\partial z} \\ &= \frac{\partial\psi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \psi \end{aligned} \quad 2.12$$

La derivada material considera dos contribuciones. La primera que es la derivada local que describe los cambios que el campo  $\psi$  experimenta en la posición  $\mathbf{x}$  en el tiempo.

La segunda contribución,  $\mathbf{v} \cdot \nabla \psi$ , la cual se define como la *contribución advectiva*, representa el cambio de la propiedad material  $\psi$  debido al movimiento del elemento material a posiciones de diferentes valores de campo. Aún si el campo es estable, esto es, si  $\psi(\mathbf{x}, t) = \psi(\mathbf{x})$ , si los valores locales no cambian en el tiempo, la propiedad de un elemento material podrá cambiar si el elemento se mueve a través de los contornos de el campo  $\psi$ . La razón con que  $\psi$  cambia por el elemento material es entonces dada por el campo de movimiento en la dirección del gradiente de  $\psi$ .

### Teorema de transporte de Reynolds

Debido a las relaciones cinemáticas entre las descripciones Lagrangianas y Eulerianas, la derivada material surge constantemente en las leyes que gobiernan las propiedades del campo. Los cambios de  $\psi$  descritos anteriormente se aplican a un elemento material infinitesimal. Considérense ahora cambios para un volumen material finito  $V(t)$ , ésto es, uno conteniendo una acumulación fija de materia. Como  $V(t)$  tiene dimensión finita, se deben considerar las variaciones de la velocidad  $\mathbf{v}$  y la propiedad de  $\psi$  a través del volumen material. Considerando la propiedad integral

$$\int_{V(t)} \psi(x, y, z, t) dV' \quad 2.13$$

sobre un sistema finito. La rapidez de cambio en el tiempo de esta propiedad se obtiene por diferenciación del volumen integral. Sin embargo, la derivada en el tiempo  $d/dt$  no puede ser conmutada dentro de la integral porque los límites de integración (i.e. la posición y la forma del volumen material) son variables en si mismas.

La rapidez de cambio del tiempo de la propiedad de la integral material tiene dos contribuciones (fig 2.3), análogas a aquellas tratadas anteriormente para un elemento material infinitesimal:

1. Los valores de  $\psi(x,t)$  dentro de un volumen material instantáneo cambian temporalmente debido a fluctuaciones del campo.
2. El volumen material se mueve a regiones de diferentes valores de campo. Relativo a un marco de referencia que se mueve con  $V(t)$ , tal movimiento introduce un flujo de propiedad  $\psi$  a través de la superficie del volumen material,  $S(t)$ .

La primera contribución es justamente el cambio colectivo de la rapidez de tiempo de  $\psi(x,t)$  dentro del volumen material:

$$\int_{V(t)} \frac{\partial \psi}{\partial t} dV'$$

2.14

La segunda, es la transferencia neta de  $\psi$  a través de la frontera de  $V(t)$ . Si  $S(t)$  tiene la normal local  $\mathbf{n}$  hacia fuera y una velocidad  $\mathbf{v}$ , el flujo local de  $\psi$  relativo a la sección de la superficie material es  $-\psi\mathbf{v}$ . Entonces el flujo de  $\psi$  en el volumen material, está dado por  $-\psi\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = \psi\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$ . Integrando sobre  $S(t)$  se obtiene la rapidez neta con que  $\psi$  es transferido al volumen material  $V(t)$  debido al movimiento a través de los contornos de  $\psi$ :

$$\int_{S(t)} \psi\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS'$$

2.15

Juntando las dos contribuciones y aplicando el teorema de Gauss se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \psi dV &= \int_{V(t)} \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \psi) \right\} dV \\ &= \int_{V(t)} \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial t} + \psi \nabla \cdot \mathbf{v} \right\} dV \end{aligned} \quad 2.16$$

para la rapidez del tiempo de cambio de la propiedad de la integral. Conocido como el Teorema de Transporte de Reynolds, éste relaciona la razón de cambio en el tiempo de alguna propiedad de un volumen finito de fluido la correspondiente variable de campo y al movimiento dado por  $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ . Como tal, constituye una transformación entre las descripciones Lagrangiana y Euleriana del movimiento de un fluido. Para desarrollar las ecuaciones que gobiernan las variables de campo en la descripción Euleriana del movimiento atmosférico, se aplica el teorema de Reynolds a propiedades de un volumen material arbitrario

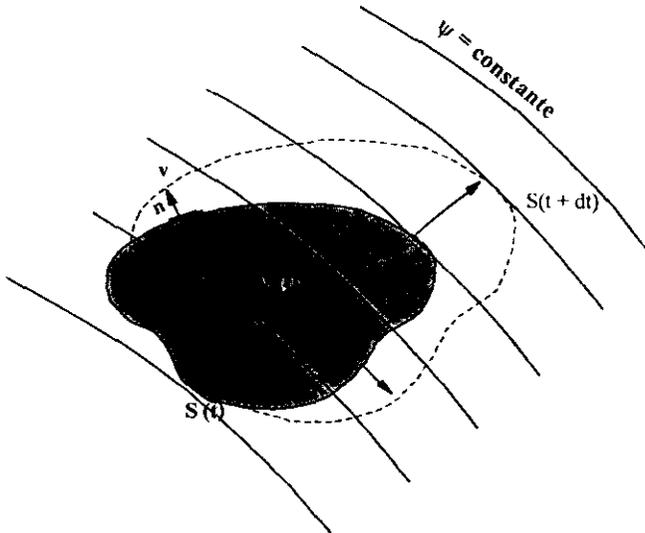


Fig. 2.3 Un volumen de material finito  $V(t)$  conteniendo una cantidad de material fijo el cual es desplazado a través de un campo con propiedad  $\psi$ .

## **2.2.- Datos Observados**

Considerando el objetivo inicial de este trabajo, el cual consiste en determinar las trayectorias que seguirían parcelas de materiales contaminantes a través de la atmósfera y bajo diversas fuentes que originan contaminación, se consideró que este análisis se tendría que desarrollar sobre dos etapas: primeramente hacer un análisis mensual promedio que sirviera como un pronóstico para lo cual se utilizaría información promedio mensual y posteriormente correr el programa TRAJECT (Nelson, 1987) considerando información meteorológica real de acuerdo a las fechas en que sucedió cada evento por analizar, de tal manera que se pueda comprobar nuestro diagnóstico, y en su caso, poder confirmar en el futuro algún pronóstico bajo la metodología propuesta.

### **Base de datos de Reanálisis**

Para llevar a cabo el análisis climático mensual promedio se utilizó la base de datos del Centro Nacional de Predicción del Ambiente (NCEP, por sus siglas en inglés) la cual se desarrolló en conjunto con el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, (NCAR por sus siglas en inglés) los cuales consideran la información sobre la base del Proyecto de Reanálisis. La base de datos considera información promedio mensual de 1982 a 1994 (versión marzo de 1996).

Esta base de datos produce análisis global de campos atmosféricos que se han generado durante 12 años aun cuando existe en proyecto una versión en proceso de Reanálisis por 40 años, 1957-1996 (Kalnay, 1996). El manejo de esta información, sobre la base de un análisis promedio, tuvo el objetivo de eliminar “cambios climáticos” que resultaban debido a falta de información que era requerida por el modelo, y no debido a verdaderos cambios climatológicos.

De esta manera, la idea básica del Proyecto de Reanálisis, es el uso de un sistema de análisis/predicción y de asimilación del desarrollo de datos usando información histórica

y que podría ser utilizada para continuar evaluando el desarrollo de información en el futuro.

En lo que toca al desarrollo de la modelación de las trayectorias de las parcelas, también se utilizó la base de datos de Reanálisis la cual se alimentó al programa para el cálculo de aceleración de las parcelas. En este caso se utilizó la información que correspondía a las fechas de análisis, esto es, la información que se procesó corresponde a información meteorológica real.

### 2.3.- Esquema numérico: TRAJECT

Los esquemas de análisis de trayectorias se basan en el principio de que en cualquier punto de la trayectoria, el desplazamiento tridimensional se produce por las componentes del viento  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , en ese punto (Krishnamurti y Bounoua, 1995). En la práctica, las componentes del viento no están disponibles en todos los puntos del espacio tridimensional, ya que generalmente se dispone de estos valores en un arreglo regular de puntos de malla, en muchas ocasiones con poca resolución. Por lo tanto, es necesario realizar una interpolación de los valores del viento al punto de interés donde se encuentre la parcela, a partir del arreglo regular de puntos en donde se definen las componentes del viento. Los desplazamientos en cualquier punto de la trayectoria se obtienen para periodos cortos de tiempo utilizando la segunda Ley de Newton. Los desplazamientos a través de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $p$  son descritos como

$$\begin{aligned} Dx &= u \, Dt + 0.5 \, a_x \, Dt \, Dt \\ &= 0.5 (u + (u + a_x \, Dt)) \, Dt \\ &= 0.5 (u + u') \, Dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Dy &= v \, Dt + 0.5 \, a_y \, Dt \, Dt \\ &= 0.5 (v + (v + a_y \, Dt)) \, Dt \\ &= 0.5 (v + v') \, Dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Dz &= w \, Dt + 0.5 \, a_p \, Dt \, Dt \\ &= 0.5 (w + (w + a_p \, Dt)) \, Dt \\ &= 0.5 (w + w') \, Dt \end{aligned}$$

donde  $a_x$ ,  $a_y$ , y  $a_p$  son las aceleraciones a lo largo de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $p$ , respectivamente. Los términos primados  $u'$ ,  $v'$  y  $w'$  representan la velocidad en el punto final del segmento de trayectoria recorrida. Inicialmente, la primera estimación del desplazamiento es calculado sin aceleración. En el punto final, las componentes del viento  $u'$ ,  $v'$  y  $w'$  son interpoladas para estimar el siguiente desplazamiento a partir del punto donde quedo la parcela en el intervalo anterior. Este punto es obtenido al sumar los desplazamientos  $Dx$ ,  $Dy$  y  $Dp$ . Este procedimiento se sigue para calcular la trayectoria durante el periodo de tiempo de interés.

En el programa de computo para calcular las trayectorias, los campos de viento son leídos secuencialmente, en orden cronológico dependiendo del tipo de trayectoria deseada. A partir de estos campos, los datos se interpolan en el tiempo cada 10 minutos para tener una mejor resolución temporal en los cálculos. Las posiciones de la parcela son definidas en términos de latitud y longitud geográfica, así como de la presión en la vertical. Las posiciones de las trayectorias son registradas cada 10 minutos o con la frecuencia deseada.

Para el caso climatológico, se utilizaron datos de vientos de NCEP correspondientes a valores diarios del ciclo anual. Estos datos se construyeron a partir de medias climatológicas del periodo 1968-1993. En este caso, las salidas fueron grabadas cada tres horas. Es claro que el caso climatológico es muy cercano al análisis de líneas de corriente debido a que las aceleraciones o cambios en el campo de viento de un día para otro son relativamente suaves. Los casos particulares sin embargo, reflejan de mucho mejor manera los efectos que las aceleraciones en el campo de viento tienen en las trayectorias seguidas por algunas emisiones.

## 2.4.- Metodología

Se determinaron 5 diferentes casos, en los cuales habría que determinar las trayectorias de las parcelas. Estos eventos son: humo generado en las plataformas marinas de PEMEX; cenizas emitidas en el volcán Popocatepetl; cenizas y gases emitidos por el volcán El Chichonal; contaminación detectada en el Parque Big Bend en Texas, USA y los incendios forestales (para este caso en particular se consideran 7 diferentes puntos de análisis).

Para cada uno de los eventos se considero llevar a cabo el análisis promedio mensual y la modelación de la trayectoria de una parcela.

### **Análisis Climatológico Promedio Mensual**

Con el fin de determinar las trayectorias de los vientos a lo largo de la República Mexicana, se analizaron los datos de viento ( $u, v$ ) para generar las corrientes de viento en los niveles de altura que se consideraron idóneos de acuerdo a cada caso.

Debido a que muchos de los fenómenos de transporte se generan con base en patrones de corrientes de viento ascendentes o descendentes, se analizo el corte transversal de las componentes ( $u, -\omega$ ) y ( $v, -\omega$ ) para cada punto en cuestión, donde  $-\omega$  es proporcional a  $w$ , la velocidad vertical. La gráfica resultante considera todos los niveles barométricos de altura y el análisis de la trayectoria considera las condiciones iniciales de cada evento de manera que se hace en el nivel de altura (mb) en que se haya determinado la posición de la fuente emisora.

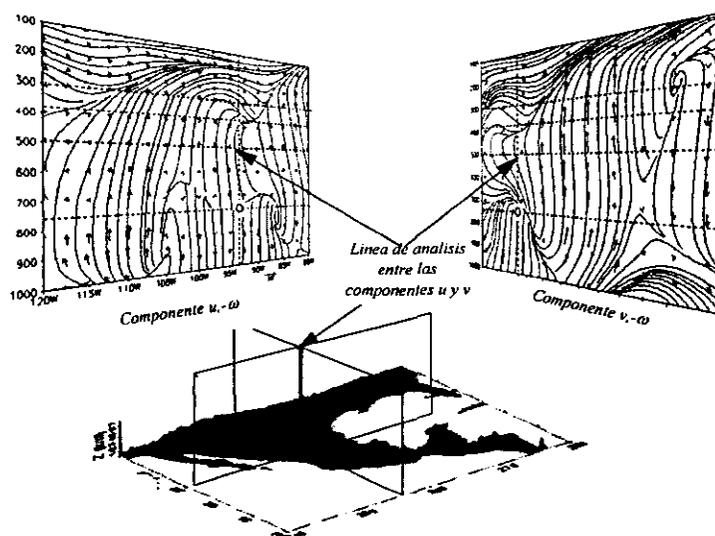


Figura. 2.4.- Descripción del análisis de las componentes  $(u, -\omega)$  y  $(v, -\omega)$  sobre la topografía del país.

Disponiendo tanto de las corrientes de viento como de los cortes transversales de cada una de las componentes de viento, se hace un análisis conjunto con lo cual se elaborara un diagnostico de la posible trayectoria de las parcelas que posteriormente se vayan a simular.

Para utilizar la base datos de Reanalisis y poder generar una salida gráfica, se utilizo el graficador GRADS.

### Modelación de trayectorias

Utilizando la base de datos de Reanalisis y después de procesada dicha información en los niveles barométricos, esta puede ser accesada a TRAJECT. Ya habiendo procesado la información, se corre el modelo, al cual solo se le tendrá que accesar los datos de altura a

la que se debe de considerar la salida de la parcela; la ubicación geográfica; fecha en que saldrá y el tiempo que durara la trayectoria .

Para ser congruentes y poder verificar los resultados, en la modelación de trayectorias se utilizan las mismas alturas que se utilizaron con la aproximación de la climatología promedio.

Para los resultados de la modelación se creo una representación gráfica que permite determinar la trayectoria desde varios puntos de vista con respecto a la República Mexicana.

### Capítulo 3: Condiciones meteorológicas y emisiones

#### Análisis de trayectorias bajo condiciones medias (Climatología de la circulación atmosférica)

#### 3.1- Volcán Popocatépetl

El Popocatépetl es un volcán activo que por encontrarse a pocos kilómetros de la Ciudad de México es sumamente peligroso. En fechas recientes, el volcán ha venido arrojando una cantidad importante de cenizas y de gas. El Popocatépetl se encuentra localizado en la colindancia de los estados de Puebla y México con una ubicación geográfica  $19.0^{\circ}\text{N}$  y  $98.6^{\circ}\text{W}$  y una altura sobre el nivel del mar de 5,465 mts (aprox. 500 mb).

Una de las principal erupciones de este volcán sucedió el 30 de junio de 1997 produciendo una pluma de ceniza que se elevó hasta 12 km. de altura (González, 1997). La erupción generó una gran cantidad de cenizas, los cuales tuvieron un alcance incluso más allá de la Cd. De México.

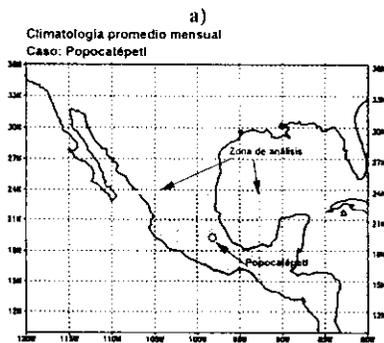


Figura. 3.1.- Región de análisis para el caso del volcán Popocatépetl.

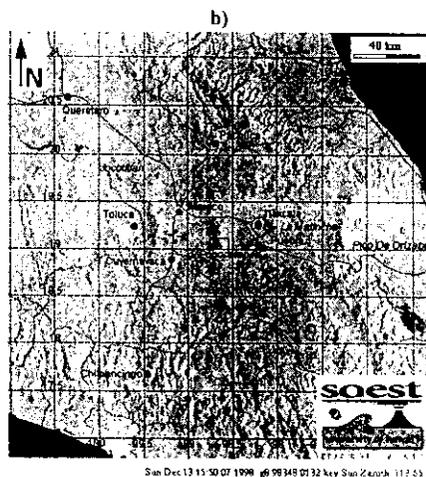


Figura. 3.2.- Área de influencia del volcán Popocatépetl, Cd. De México y Puebla.

Hasta la fecha no se cuenta con estimaciones mensuales que determinen, si las grandes cantidades de cenizas que genera el Popocatepetl, tuvieran una dirección tal que pudieran llegar a la Ciudad de México, pudiendo generar problemas a la población.

Para estimar la trayectoria de emisiones, se hace un análisis climatológico de la circulación atmosférica media mensual para el mes de julio (fig. 3.2). Para este análisis, se consideraran tres alturas: 500, 400 y 300 mb, de manera que se pueda determinar las corrientes de viento entre una altura de 5,500 y 12,000 mts. snm aprox. El análisis de la circulación media permite tener una idea cercana de la trayectoria que podrían seguir las parcelas, ya que en el caso estacionario las líneas de corriente y la trayectoria coinciden.

Para determinar la dirección que toma una parcela, se deben examinar las condiciones meteorológicas prevalecientes así como la altura de la emisión o altura efectiva H, la cual considera que la concentración de un contaminante atmosférico, evaluada mediante la suposición de la distribución gaussiana del humo, supone que la altura H es el punto de origen del cono de dispersión.

Para estimar el valor numérico de H, además de la altura física de la fuente de emisión, se considera la velocidad la cual es afectada por la velocidad y temperatura de salida de los gases, así como las condiciones atmosféricas reinantes. Esto es:

$$H = h + \Delta h$$

en donde h es la altura física de la fuente de emisión y  $\Delta h$  es la altura de ascenso de la pluma (Instituto de Ingeniería, 1996).

Hay que mencionar que los factores que limitan el alcance de la trayectoria y que no se consideran son el efecto de la gravedad en las cenizas y la dispersión de los contaminantes. Las parcelas consideradas no viajan eternamente, sino que tienen un tiempo finito de permanencia en la atmósfera. En la mayoría de los casos se considera menor a una semana.

Una primera idea de la dirección que podrían seguir las parcelas o emisiones de un volcán como el Popocatepetl se tiene al considerar la circulación media en la troposfera. Como ejemplo, en la fig.3.3, se muestra la circulación media de julio en varios niveles troposféricos medios. Los vientos que más afectan las emisiones de gases que diariamente emite el Popocatepetl están cercanos a esos niveles.

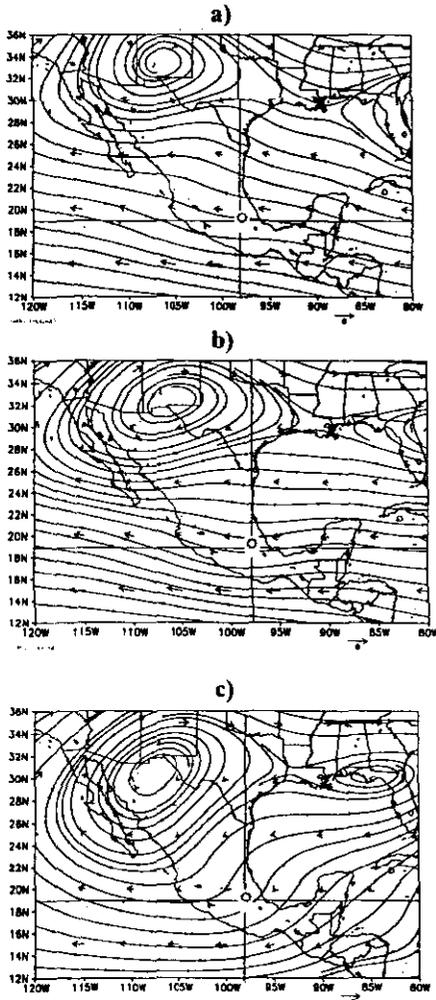


Fig. 3.3.- Vientos: a) a 500 mb; b) a 400 mb; y c) a 300 mb, para la media de julio.

Considerando que la Ciudad de México se encuentra en dirección noroeste respecto al Popocatepetl y de acuerdo a la climatología de la circulación, se tiene que los vientos del nivel de 500 y 400 mb podrían transportar emisiones del Popocatepetl y afectar a la Ciudad. Para el caso de los vientos de más alto nivel, como puede ser 300 mb, con dirección suroeste, la afectación sería en lugares como Cuernavaca. En principio, la región de Puebla no parecería ser afectada durante verano, debido a la dominancia de los alisios.

Se debe de considerar además que el tiempo que las emisiones permanezcan en la atmósfera dependerá de la estabilidad de ésta, y las corrientes dominantes (ascendentes o descendentes). Un corte transversal de la circulación media mensual de julio, permite observar dichas corrientes dominantes.

El corte zonal del pseudo vector de viento ( $u, -\omega$ ) en 20°N muestra que entre 500 - 300 mb las corrientes de viento son ascendentes y con dirección hacia el oeste, lo que permite que una parcela pueda viajar por un mayor periodo de tiempo.

Por otro lado, un corte transversal a 100°W muestra que al norte los efectos de subsidencia cobran importancia, mientras que hacia el sur, mantienen su preferencia de movimiento ascendente (fig. 3.4)

La gran actividad convectiva que se registra en esta época del año coincide con la tendencia al movimiento ascendente.

Es claro que la condición variará al pasar a invierno, etc., pero un primer análisis sinóptico permite diagnosticar posibles trayectorias e impactos de emisiones del Popocatépetl.

Con base en la climatología de circulación atmosférica horizontal

media de julio, se estima que las trayectorias de los vientos tendrán dirección entre el noroeste y el suroeste dependiendo de la altura que se considere, por lo que se puede estimar que en esta dirección se transportarían las parcelas asociadas a la erupción de cenizas y gases.

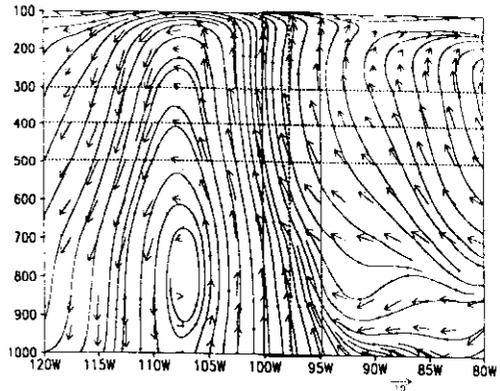


Fig. 3.4.- Corte transversal de la componente  $u, -\omega$ .

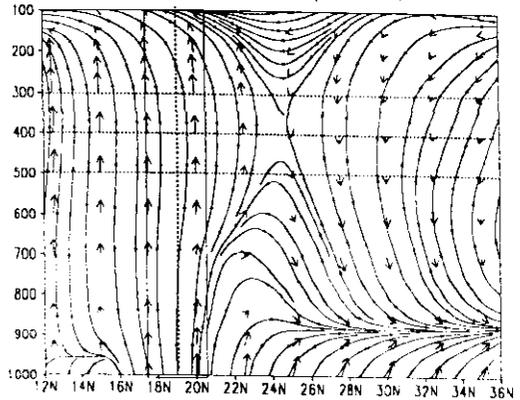


Fig. 3.5.- Corte transversal de la componente  $v, \omega$ .

Considerando el análisis transversal de las componentes  $(u, -\omega)$  y  $(v, -\omega)$  para los tres niveles de altura, se tiene que para este mes de análisis, las corrientes son ascendentes lo cual permitiría que las cenizas tengan un alcance importante.

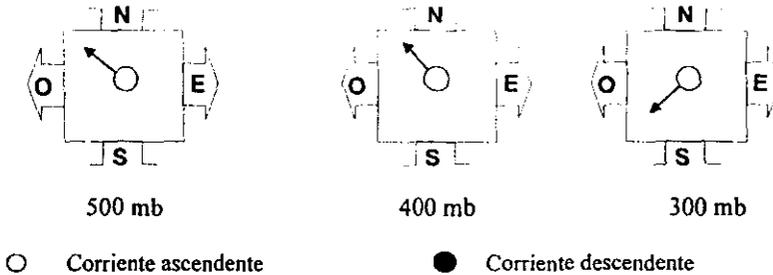


Fig. 3.6.- Resultados de los cortes horizontales y transversales de las componentes del viento medias en el punto de interés

### 3.2.- El Chichón

Un evento que tuvo considerables efectos al medio ambiente y que fue ampliamente estudiado, fue la erupción del volcán El Chichón. Este volcán se encuentra ubicado en el estado de Chiapas y muy cerca a la frontera con Guatemala. La ubicación geográfica promedio del volcán es  $17.4^{\circ}\text{N}$  y  $93.2^{\circ}\text{W}$ .

La principal erupción de este volcán sucedió el 6 de abril de 1982, aunque inicio sus erupciones dos días antes, es decir, el 4 de abril. La erupción generó una cantidad muy importante de cenizas y de gases como  $\text{SO}_2$ , los cuales tuvieron un alcance muy importante (Matson, 1984).

Hasta la fecha no se cuenta con estimaciones que determinen, si las grandes cantidades de humo que se genera en esta zona pudieran llegar a la costa del Golfo de Campeche, inclusive Cuba y la Florida.

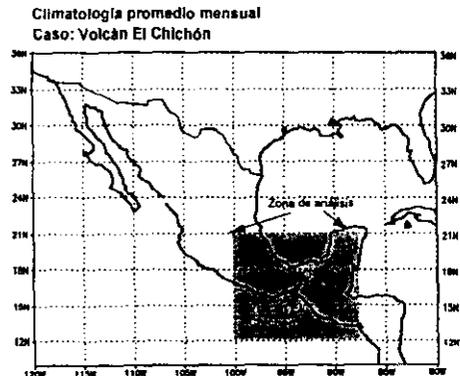


Fig. 3.7.- Región de análisis para el caso de el volcán El Chichon ( $17.4^{\circ}\text{N}$ ,  $100.4^{\circ}\text{W}$ ).

Por lo anterior y para estimar la trayectoria de estas emisiones, se realizó un análisis climatológico de la circulación atmosférica media mensual para el mes de abril, poniéndose especial énfasis en la región donde se supone que los efectos de las plumas de cenizas y gases fueron mayores (fig. 3.7).

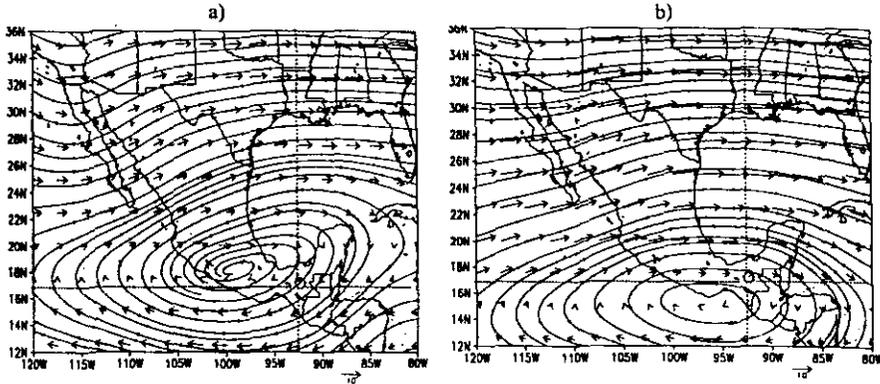


Fig. 3.8.- Vientos a 750 y 500 mb, para abril.

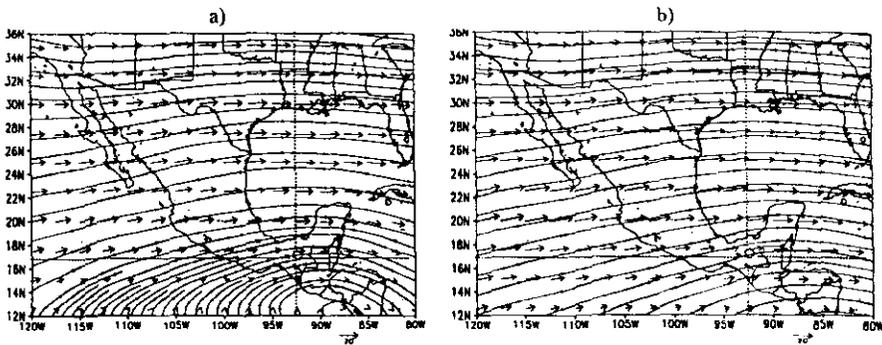


Fig. 3.9.- Vientos a 380 y 300 mb, para abril.

Del análisis de condiciones medias para el mes de abril (figs. 3.8 y 3.9), se tiene que a cada nivel de altura las corrientes varían, es decir, existe un fuerte cizallamiento en el

viento. Así, las afectaciones por cenizas y gases podrían variar dependiendo de la altura efectiva (H) de la emisión considerada.

En abril, esta región presenta subsidencia en la tropósfera, aunque de llegar la erupción a altos niveles, los transportes de contaminantes serían más duraderos.

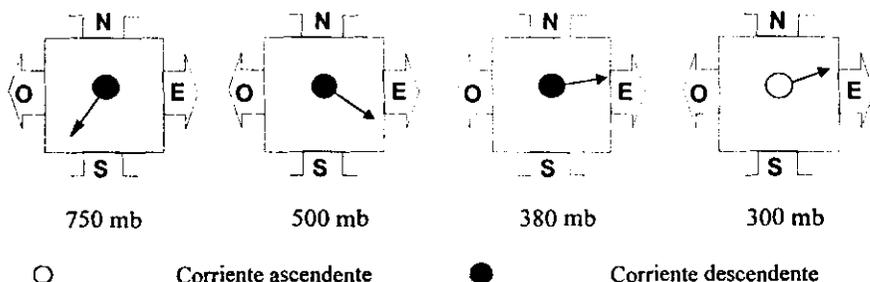
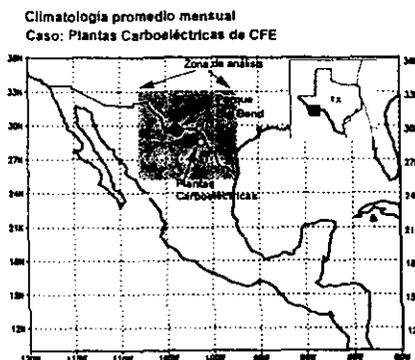


Fig. 3.10.- Resultados de los cortes horizontales y transversales de las componentes del viento medias en el punto de interés

### 3.3.- Frontera Norte (Big Bend)

Para el caso de afectaciones al Parque Nacional del Big Bend en el Estado de Texas, se tiene que la autoridad de este parque consideró que la planta termoeléctrica de Río Escondido, ubicada en el poblado de Piedras Grandes Coahuila, había generado tal cantidad de contaminantes que afectaron la visibilidad en este parque. De acuerdo a reportes ambientales, el periodo del 10 de septiembre al 14 de octubre de 1996, fue cuando el parque se vio mayormente



3.11.- Area de análisis entre la planta carboeléctrica de CFE y el Parque Big Bend en Texas, USA.

afectado. Este parque se encuentra ubicado en 29°.5N y 103°.1W mientras que la planta de CFE está en 28°.15 y 100°.3W (Fig. 3.11.).

Para evaluar la posible contaminación al parque por parte de esta planta termoeléctrica, primeramente se examinó la climatología mensual promedio de los vientos con el fin de determinar, en forma preliminar, la dirección que el humo seguiría. Debe recordarse que en una situación estacionaria las trayectorias coinciden con las líneas de corriente.

Análisis climatológico promedio mensual:

Se considera como punto inicial de la trayectoria la planta carboeléctrica de CFE la cual se encuentra a una altura de aproximadamente 220 mt., de manera que considerando la elevación de la chimenea además por los efectos dinámicos que se generan sobre el humo, corresponde aproximadamente a una altura efectiva de salida (H) de 925 mb.

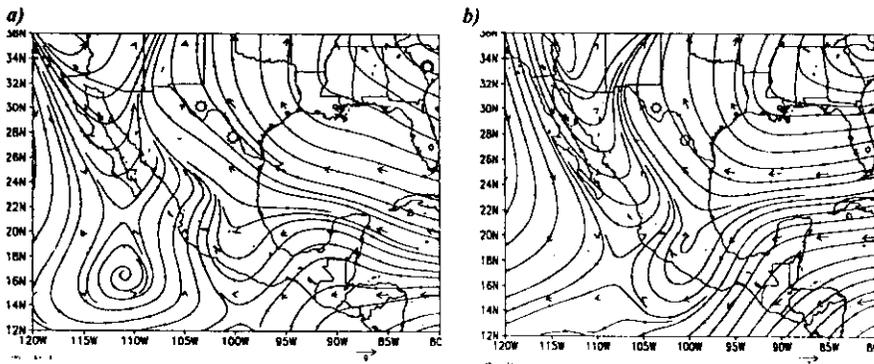


Fig. 3.12.- Vientos correspondientes a los meses de septiembre y octubre sobre la República Mexicana en 925 mb.

A este nivel de referencia y considerando los meses de septiembre y octubre, se encuentran vientos dominantes del sur (fig. 3.12). Si se consideran las líneas de corriente que cruzan por el área de influencia de las plantas de CFE y se toma como destino el parque del Big Bend, se observa que es posible la afectación del parque.

Aunque en la capa límite aparecen movimientos ascendentes, en la mayor parte de la región existen fuertes movimientos descendentes, característicos de estas latitudes, por lo que las emisiones no viajarían grandes distancias (fig. 3.13)

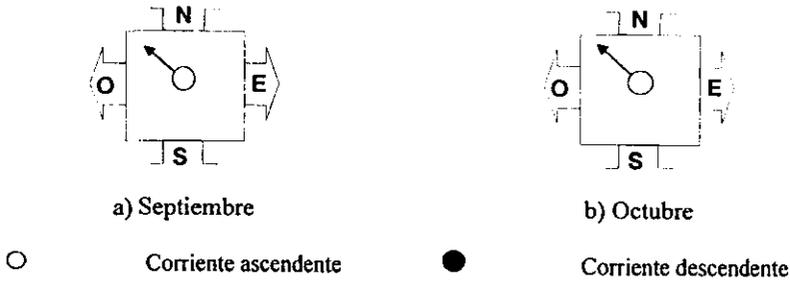


Fig. 3.13.- Resultados de los cortes horizontales y transversales de las componentes del viento medias en el punto de interés

### 3.4- Plataformas marinas de PEMEX

Actualmente, Petróleos Mexicanos lleva a cabo actividades de producción de crudo y gas natural asociado en el Golfo de Campeche, en donde se tiene el área de mayor producción de estos hidrocarburos. En esta zona se tienen varios complejos de producción los cuales se encuentran al norte de la Isla del Carmen (80 km.). A partir de esta distancia y hasta aproximadamente 160 km., se encuentran otras plataformas de producción. Se estima la ubicación geográfica promedio de los complejos de producción en 19.5°N y 92°W (fig. 3.14).

A partir de 1997 Petróleos Mexicanos incrementó considerablemente la producción de crudo y por ello la producción de gas natural. Particularmente durante el mes de enero de 1998 y debido a trabajos de mantenimiento, se llegó a quemar casi un 20% de la producción total de gas natural por falta de equipos de proceso y de transporte (Pemex, 1998). La quema de este gas se lleva a cabo en los complejos de producción y las llamas son tan grandes que pueden ser vistas por los satélites.

Hasta la fecha no se cuenta con estimaciones que indiquen, si las grandes cantidades de humo que se genera en esta zona pudieran llegar a la costa del Golfo de Campeche, o inclusive Cuba y la Florida.

Por lo anterior y para estimar la trayectoria de estas emisiones, se hizo un análisis climatológico de la circulación atmosférica media mensual para el mes de enero, como un ejemplo de un periodo cuando los efectos de las plumas de humo de las plataformas son mayores.

Se consideraran para el análisis de este caso, dos niveles: 1000 y 850 mb, de manera que se pueda determinar el efecto cerca del nivel del mar y a una altura de 1,500 mts. snm aprox.

Al nivel de superficie (1000 mb) durante enero, se encuentran vientos dominantes del este, los cuales entran a las costas mexicanas, modulados por la orografía, principalmente en el Istmo de Tehuantepec. Si se considera una latitud similar a la ubicación de las plataformas (19.5°N), una corriente de viento del este pasa por la región de las plataformas para luego dirigirse al Istmo de Tehuantepec y cruzar nuestro país (fig. 3.15).

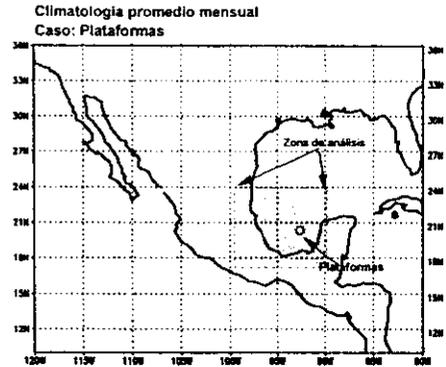


Fig. 3.14.- Región de análisis para el caso de plataformas ( 17°N a 23°N y 99°W a 90°W).

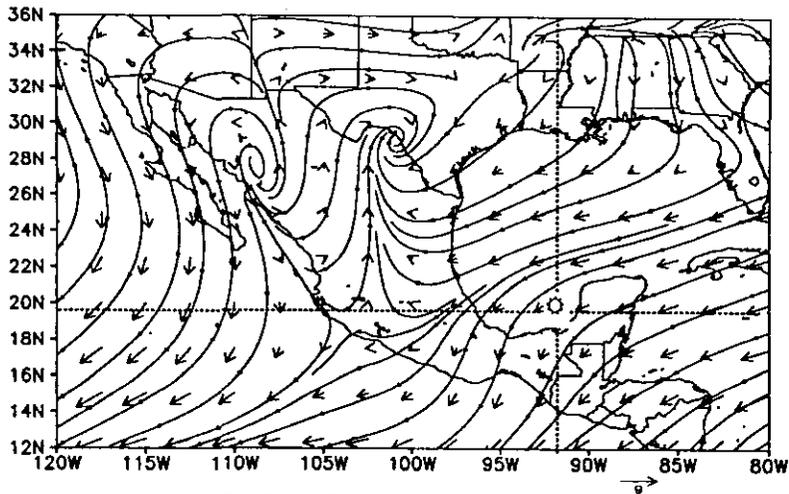


Fig. 3.15.- Vientos a 1000 mb, para enero.

Analizando la misma ubicación geográfica, pero para el nivel de 850 mbar, se observan flujos similares del este, esto es, se tienen vientos que vienen del Caribe hacia México y al Golfo de México. Considerando las corrientes observadas en 20°N, las emisiones pudieran dirigirse solamente a la costa del Golfo, pero debido a que la corriente presenta una componente al norte por efecto de la circulación anticiclonica, existen posibilidades de afectación a estas latitudes (fig. 3.16).

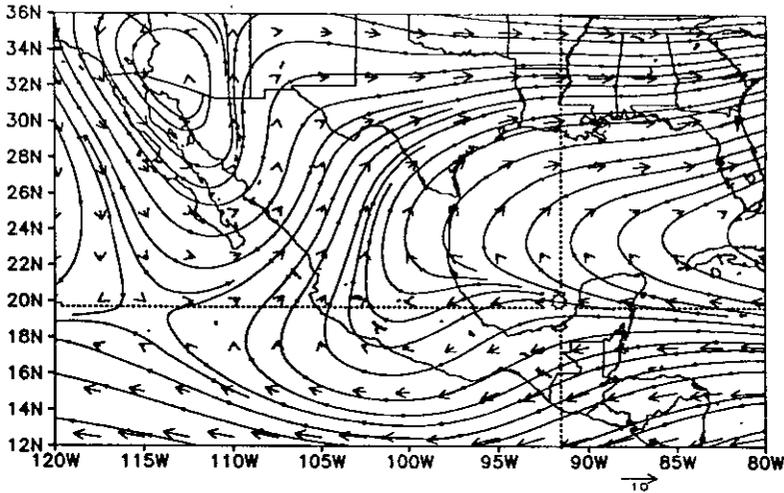


Fig. 3.16.- Vientos a 850 mb, para enero.

En este punto es necesario señalar que es clave determinar la altura de la emisión (H) para poder estimar la trayectoria de los contaminantes. Hay que mencionar que en este estudio no se considerara el efecto de la dispersión, por lo que la interpretación de trayectorias se reduce a la de parcelas de gases inertes.

Para hacer un análisis anual, en base a climatología mensual de vientos, se consideran las condiciones predominantes, estimando la posible trayectoria, dentro del área geográfica de análisis. Para ello, se ha considerado la altura de 850 mb debido a que se ha estimado por observaciones en el lugar de análisis, que esta es la altura que alcanzan las plumas de humo en la zona.

Las condiciones dominantes de circulación en bajos niveles a 850 mb, para cada mes del año y que afectan las trayectorias de emisiones en plataformas, se pueden analizar en las gráficas correspondientes a esta altura, de donde se determina que existe la posibilidad de que el humo de la quema de gas natural llegue a costa, y muy en particular en el mes de Octubre; lo anterior debido a que en este mes se estima que las trayectorias de viento hacen que una parcela de humo se dirija, por la distancia más corta hacia la costa, esto es, hacia el estado de Campeche y Tabasco.

Adicionalmente habrá que señalar que la región del Golfo de México presenta movimientos descendentes que en muchas ocasiones inhiben el transporte de las emisiones de las plataformas por grandes distancias.

Considerando la climatología de circulación atmosférica mensual, se puede estimar que los vientos a las alturas en donde se transportan las parcelas asociadas a emisiones de plataformas marinas de PEMEX, tienen dirección hacia el oeste en casi todo el año.

### 3.5 Incendios Forestales y quemas agrícolas

Los incendios forestales en la República Mexicana se presentaron en los primeros meses del año de 1998, agudizándose en los meses de abril y mayo a consecuencia de una sequía en gran parte del país y prácticas agrícolas obsoletas como la de roza, tumba y quema. Las fotografías de satélite muestran los grandes incendios forestales que ocurrieron en los Estados de Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Jalisco, Tabasco, Chiapas, Nuevo León y Tamaulipas (Fig. 3.17).

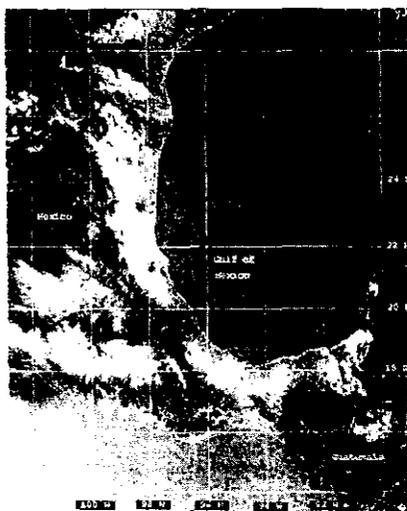


Figura 3.17.- Imagen de satélite en donde se muestran los puntos en donde se han presentado incendios. Destacan los incendios de Guatemala y del Istmo de Tehuantepec. Esta fotografía corresponde al 25 de mayo de 1998.

Para determinar en forma preliminar la dirección que el humo seguiría, se

examinó la climatología mensual promedio de los vientos, para los meses de abril y mayo,. Debe recordarse que durante este periodo, se habló de que el humo de los incendios afectó los estados de la costa del Golfo hasta la Florida.

Se consideró que un nivel de referencia adecuado para examinar los campos de viento que influyeron en el transporte de cenizas de los incendios, está entre 700 y 850 mb, ya que sin mostrar exactamente lo que ocurre en la capa de transición, estos niveles corresponden a la orografía donde se produjeron los incendios forestales. Además de evaluar los campos de viento, se estimó la altura efectiva de la emisión sobre el nivel del mar y se consideró que por efectos dinámicos del fuego, la columna de humo ascendió en ocasiones hasta 500 mts sobre el punto de análisis.

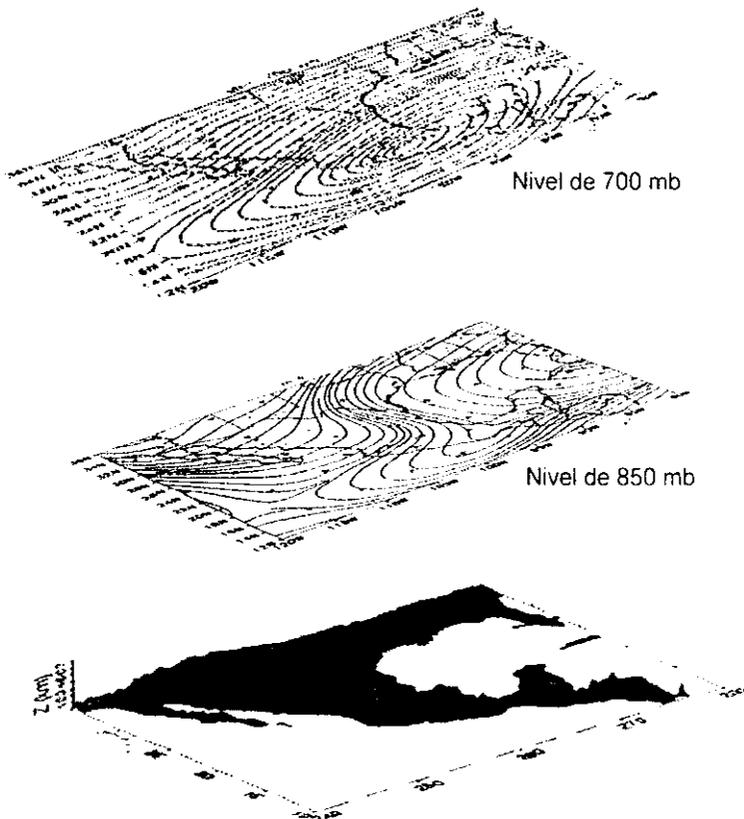


Figura 3.18.- Vientos correspondientes al mes de abril en 700 y 850 mb, así como relieve topográfico

Al nivel de 850 mb y para los meses de primavera (abril), época en la que el número de incendios se incrementó, se encuentran vientos dominantes del este, que cruzan por

Centro América y la península de Yucatán (Fig. 3.19). Estos vientos convergen con una corriente al noreste por la costa del Golfo de México. Tal condición evidentemente varía día con día.

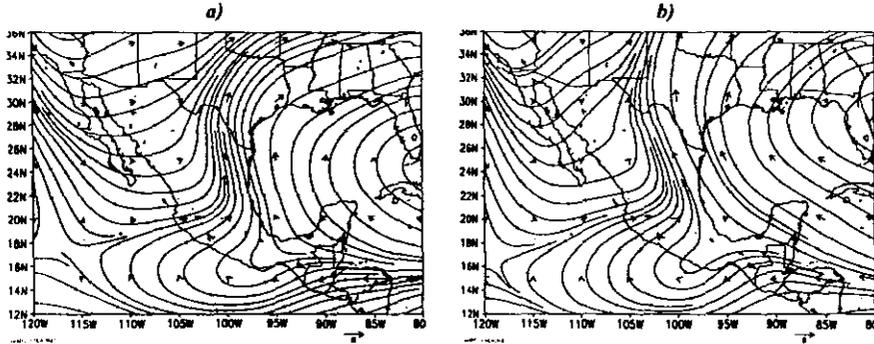


Figura 3.19. Corrientes de viento a 850 mb para el mes de abril a) y para mayo b)

Del análisis a las corrientes de viento de las componentes  $(u,v)$ , se tiene que para todas las ubicaciones revisadas en la altura de 850, se generan corrientes de aire con dirección hacia los Estados Unidos.

Para el mes de abril, se tienen corrientes que por la dirección del viento afectarían los estados del sur de los Estados Unidos aun cuando para latitudes bajas (Chiapas, Oaxaca, Guatemala y Centro América) las corrientes de viento observadas tendrán direcciones hacia el Pacífico y tenderán a regresar hacia el centro de México para dirigirse hacia el norte. Para el mes de mayo, esta situación es similar. Para el nivel de 700 mb y debido a un anticiclón, las corrientes de viento tendrán dirección hacia la Florida para latitudes arriba de  $22^{\circ}\text{N}$ , mientras que abajo de esta latitud serán en dirección hacia el Pacífico.

Mientras que para el mes de Mayo este patrón de vientos es similar, solo que se observa que las corrientes de viento, arriba de la latitud de  $22^{\circ}\text{N}$  tienden a irse más hacia el norte de México.

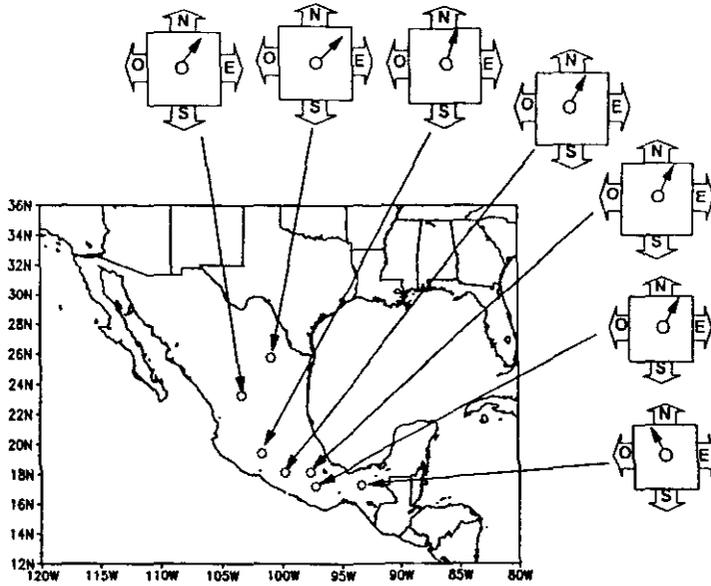


Figura 3.20. Dirección de la corriente de viento para el mes de abril a 850 mb en cada uno de los 7 puntos de análisis. Para todos los casos se tienen corrientes ascendentes.

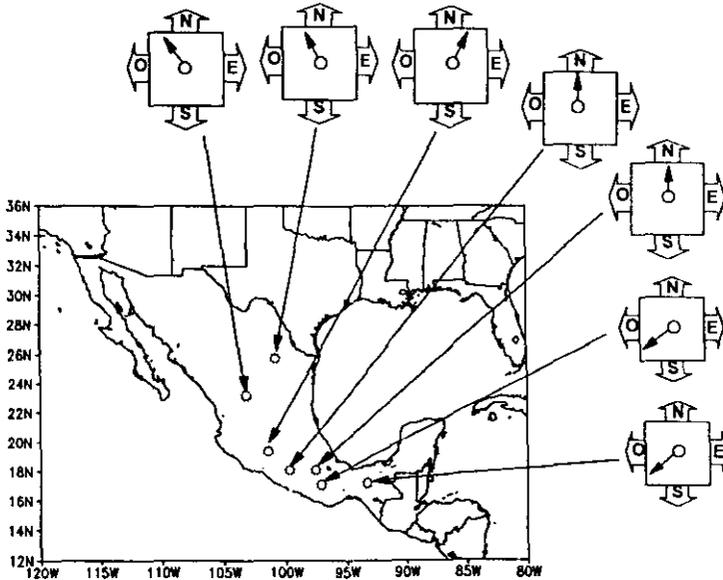


Figura 3.21.- Dirección de la corriente de viento para el mes de abril a 850 mb en cada uno de los 7 puntos de análisis. Para todos los casos se tienen corrientes ascendentes.

Del estudio anterior se encuentra que las diferencias en la circulación de un nivel a otro, hace que resulte crucial para el análisis de trayectorias el nivel al cual se produce la emisión. Cerca de niveles muy bajos, la emisión tiene pocas posibilidades de propagarse. Tal condición es bien conocida en estudios de emisiones por chimeneas bajo condiciones de alta estabilidad atmosférica. Por otro lado, bajo condiciones de estabilidad neutra, la parcela tiene mayores posibilidades de alcanzar mayores alturas y por tanto de ser transportada a grandes distancias.

**Capítulo 4.- Análisis de Trayectorias: Estudio de casos**

**4.1 Erupción del Popocatepetl el 30 de junio de 1997**

Como primer paso en el análisis de trayectorias de emisiones de volcanes se consideró el caso del Popocatepetl. Para ello se analizo la climatología promedio mensual para el mes de julio encontrándose que la circulación en tres niveles troposféricos correspondían a vientos dominantes del este con trayectoria entre el norte de la ciudad de México (a 70 Km de distancia) y la ciudad de Cuernavaca. También se encontró que en función a la altura y dependiendo de los niveles que se analizaron, se podría tener algunas variantes en esa dirección.

Para examinar con mayor precisión la trayectoria de las emisiones de gases del Popocatepetl, se puede simular el movimiento de tres parcelas, las cuales partirían de la boca del cono del Popocatepetl a diferentes niveles a partir del 30 de junio y por 5 días, considerando que la altura en que se suelta la parcela, es uno de los factores que resulta importante en la modelación de la trayectoria.

Tabla 2.- Datos para la simulación de la parcela soltada para el caso Popocatepetl

Latitud (gratitud meca)	Área geográfica analizada (global)	Altura (msnm)	Altura (efectiva) de salida	Fecha de salida	Período de análisis
19.02°N/ 98.62°W	Volcán Popocatepetl	5,465 mts	500, 400 y 300 mb	30 de junio	5 días

Los resultados observados en cada una de las trayectorias se tienen en la fig 4.1. la cual muestra las 3 trayectorias obtenidas. Para 500 mb se tiene una trayectoria con dirección oeste, esto es, hacia el Pacífico; para los 400 mb la trayectoria se dirigió inicialmente hacia el oeste recurvando hacia el norte. Finalmente la trayectoria correspondiente a los 300 mb se dirigió inicialmente hacia el oeste para luego girar hacia el norte. En el caso de estas parcelas se observa en el corte lateral como tienden a incrementar su altura después de haber sido soltadas, lo cual les permitiría tener un gran alcance.

Finales de junio corresponde a un periodo de baja estabilidad atmosférica, permitiendo algunos movimientos ascendentes. Algunos reportes para la fecha de estudio indican que las cenizas alcanzaron la Ciudad de Queretaro, dado que las emisiones alcanzaron los 8 Km. de altura.

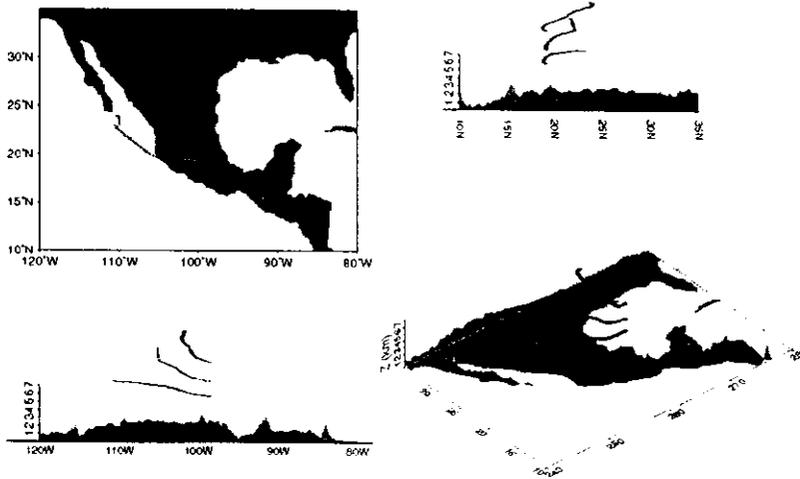


Figura 4.1.- Modelación de la parcela liberada desde el Popocatepetl

Comparando los resultados de la modelación con los obtenidos en el análisis de circulación atmosférica media mensual para el mes de julio y considerando los 3 niveles de altura propuestos se tiene una cierta similitud, ya que se observa una dirección preferencial, siendo esta hacia el oeste del volcán. Lo anterior implica que las cenizas pueden depositarse en la ciudad de México.

Es importante señalar que en este estudio se trata de determinar la trayectoria de una parcela con gases o cenizas, lo anterior sin considerar el destino final de las mismas ya que para poder llegar a una determinación de esta naturaleza implica la utilización de

análisis adicionales que involucren dispersión del contaminante, características de la partícula emitida (peso, forma, etc), así como altura efectiva de la emisión bajo estudio.

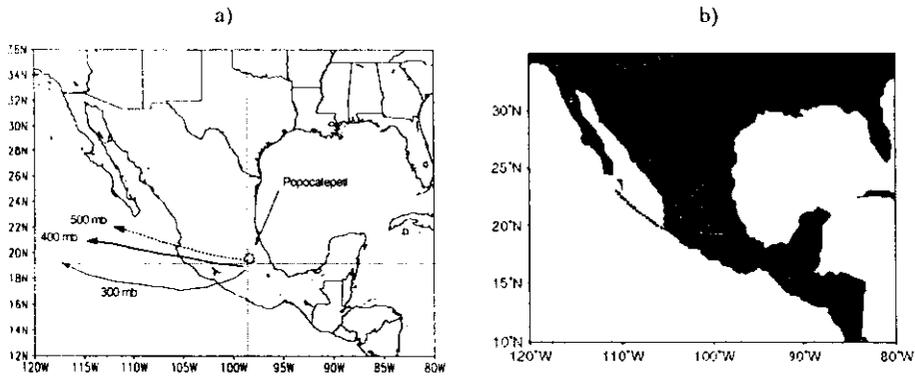


Figura. 4.2.- Comparación entre los resultados obtenidos en la climatología promedio mensual y la modelación de la parcela liberada desde el Popocatépetl. En el caso a) solo se toman las corrientes de viento que pasan por el punto de análisis.

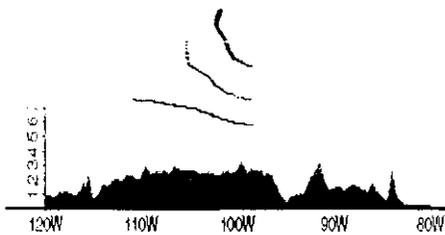


Figura 4.3.- Vista lateral en donde se observa el incremento de altura de las parcelas.



Figura 4.4.- Vista del Popocatépetl en donde se muestra como la ceniza toma un nivel de vientos horizontal.

Habiendo realizado la modelación de la trayectoria de las parcelas de ceniza que la climatología promedio es una herramienta simple para predecir trayectorias pues una determinación precisa requiere examinar los cambios en los vientos (aceleraciones) en un

espacio tridimensional. Solo así, se puede hablar de regiones con mayor posibilidad de ser afectadas.

Sin embargo, en principio, y para planeación de acciones de prevención de desastres un análisis climatológico permite una caracterización de regiones que pueden ser afectadas (Tabla 3).

Tabla 3.- Probabilidad anual de trayectoria de las cenizas del volcán Popocatepetl

Mes	Dirección*	Ciudad afectada
Enero	Noreste	Puebla
Febrero	Noreste	Puebla
Marzo	Este	Puebla
Abril	Este	Puebla
Mayo	Este	Puebla
Junio	Suroeste	Puebla. Morelos
Julio	Oeste	Cd. de México
Agosto	Noroeste	Cd. de México
Septiembre	Noroeste	Cd. de México
Octubre	Noroeste	Cd. de México
Noviembre	Noroeste	Cd. de México
Diciembre	Noreste	Puebla

- Se considera la dirección que tomaría una parcela de cenizas y gases con respecto a la ubicación del volcán.

#### 4.2 Erupción del volcán El Chichón el 6 de abril de 1982

Al analizar la climatología promedio mensual del mes de abril, se tiene que las cenizas y los gases producto de la erupción del volcán, tendrían al menos dos direcciones, esto es, hacia el Pacífico y hacia el Caribe. Se encuentra que en función a la altura, se podría tener algunas variantes en las direcciones de las trayectorias, pero siempre tendiendo a las dos direcciones antes comentadas.

Para examinar las trayectorias de emisiones en El Chichón, se procedió a simular el movimiento de cuatro parcelas, las cuales partirían de la ubicación del volcán a partir del 6 de abril por 5 días en los niveles de 750, 500, 380 y 300 mb, cubriendo así los niveles troposféricos más representativos.

Tabla 4.- Datos para la simulación de la parcela soltada para el caso El Chichón

Latitud/ longitud inicial	Area geográfica analizada (global)	Altura (msnm)	Altura (efectiva) de salida	Fecha de salida	Periodo de análisis
17.4°N/ 93.2°W	Volcán El Chichón	1,060 mts	750, 500, 380 y 300 mb	6 de abril	5 días

Según reportes, la erupción del Chichón alcanzó la estratosfera, sin embargo, no se contó con datos de viento para un análisis más completo.

Los resultados observados en cada una de las trayectorias se tienen en la fig 4.5. la cual muestra las 4 trayectorias obtenidas. Para 750 mb se tiene una trayectoria con dirección oeste, esto es, se dirigió hacia el Pacífico; para los 500 mb la trayectoria se dirigió inicialmente hacia el suroeste para ir girando sobre el Pacífico y hacia el norte, ajustándose a una trayectoria similar a la de las corrientes de un anticiclón.

Para el nivel de 380 mb la dirección de la parcela es primero hacia el sureste del volcán y luego tiende a hacer un amplio giro, pasando por Guatemala y el Salvador, para luego internarse hacia el Pacífico y tomar dirección hacia el oeste, ya sobre el mar. En el caso

de la parcela ubicada a 300 mb, esta tiene una dirección hacia el sureste pasando por Belice y Nicaragua para salir al Caribe.

De lo anterior, se tiene que los niveles entre 750 y 380 mb las trayectorias tienden a ir hacia el oeste mientras que la parcela que se inicio en el nivel de 300 mb se dirige hacia el mar Caribe, esto es dirección contraria con respecto a las tres primeras.

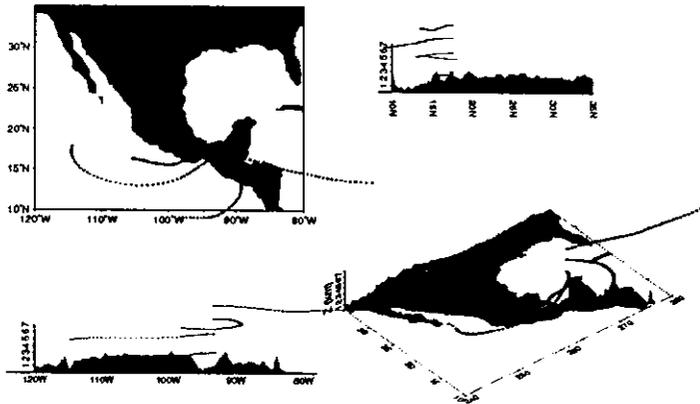


Figura 4.5.- Modelación de la parcela liberada abril desde la localización del Volcán El Chichón.

Si se comparan los resultados de la modelación (fig.4.5) con los obtenidos en los observados en la circulación atmosférica media mensual para el mes de abril y considerando los 4 niveles de altura propuestos (figs. 3.8 y 3.9 del Capítulo 3.2), se tiene una importante similitud, ya que se observan que existen dos direcciones preferenciales de viento hacia el Pacífico y hacia el mar Caribe. Nuevamente, es necesario analizar niveles estratosféricos, para el caso de erupciones volcánicas.

Como prueba observacional de las trayectorias, se presentan imágenes de mediciones hechas por el satélite Nimbus-7/TOMS, de ceniza y SO<sub>2</sub> del volcán El Chichón durante

varios días (M.J. Post, 1997). En ellas se observa que la propagación de las emisiones es preferentemente zonal. Del análisis de trayectorias se puede concluir que las propagaciones hacia el Caribe ocurrieron en los niveles troposféricos altos.

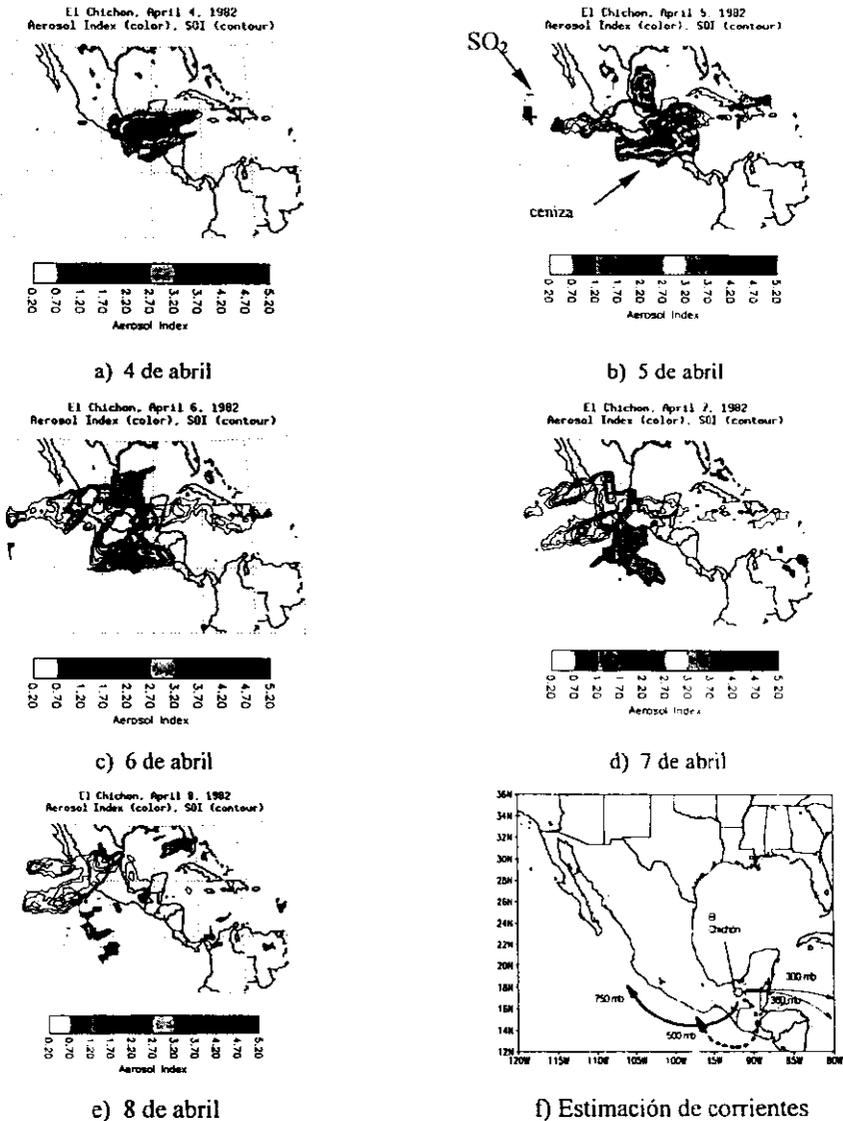


Figura 4.6.- De a) a e), se tiene la secuencia de las trayectorias de las cenizas y SO<sub>2</sub> caso f), muestra la estimación de las 4 corrientes de viento que pasan por el volcán y bajo el análisis climático mensual del mes de abril.

### 4.3.- Contaminación del Parque Big Bend en septiembre y octubre de 1982

Al analizar la climatología promedio mensual se tiene que para los meses de septiembre y octubre, se detectaron altos niveles de contaminación en el parque Big Bend. Los patrones de vientos indican la posibilidad de trayectorias que se podrían generar entre las regiones de la planta de CFE y el parque.

Se procedió a simular el movimiento de dos parcelas, una de ellas partiendo de la planta carboeléctrica. La otra corresponde a una trayectoria hacia atrás de las parcelas que llegaron al Parque el 20 de septiembre. Los periodos de viaje son de 5 días. Considerando los análisis transversales de las componentes  $u$  y  $v$ , y habiendo visto que uno de los factores que resulta importante en la modelación, es la altura en que se suelta la parcela, se decidió considerar un nivel de 925 mb, cerca de la superficie.

Tabla 5.- Datos para la simulación de la parcela soltada para el caso Big Bend

Latitud/ longitud inicial	Area geográfica analizada (global)	Altura (msnm)	Altura (efectiva) de salida	Fecha de salida	Periodo de análisis
28.15°N/ 100.3°W	Planta carboelectrica de CFE	220 mts	925 mb	20 septiembre	5 días

Simulación de trayectorias hacia adelante

Punto inicial: Planta Carboeléctrica de CFE

De acuerdo a lo obtenido en la simulación de la trayectoria de una parcela partiendo en las fechas en que se observo la mayor emisión de contaminantes (disminución de visibilidad) por la planta carboeléctrica, se encuentra que la parcela se dirige hacia el norte, lo que en última instancia no implica necesariamente contaminación en el parque Big Bend en Texas. En promedio, tal condición debiera ser común en esta época del año, basados en el análisis de la climatología de la circulación promedio.

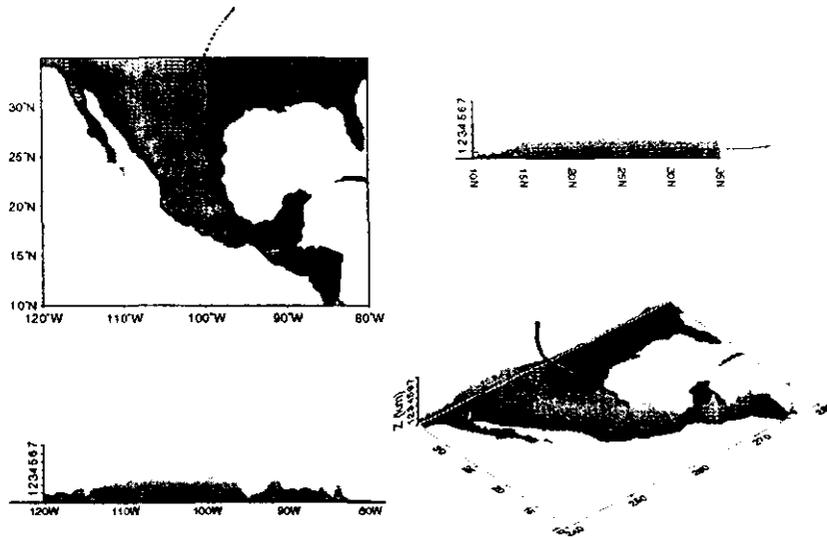


Fig. 4.7.- Modelación de la parcela liberada el 20 de septiembre de 1998 desde la planta Carboeléctrica.

#### Análisis de trayectoria hacia atrás

Punto inicial: Parque Big Bend (Texas)

La modelación de la parcela para este caso, se hizo considerando la trayectoria hacia atrás, encontrándose que el origen de las parcelas no coincide con las plantas de CFE, que se pensaba afectaron al Big Bend (fig. 4.7), sino que pareciera venir de algún lugar cercano de el noreste mexicano cerca de la costa del Golfo de México.

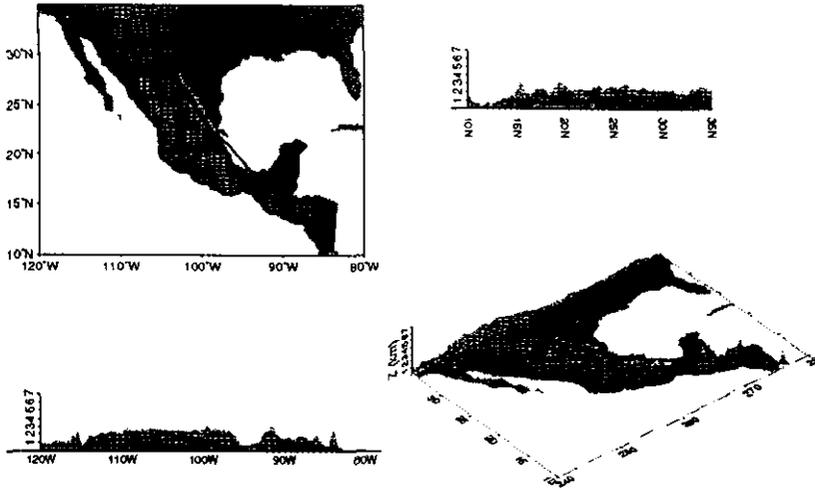


Fig. 4.8.- Modelación de la parcela liberada el 20 de septiembre de 1998 desde el Parque Big Bend.

Los resultados obtenidos en el análisis climatológico mensual muestran además que las corrientes de viento cerca de la superficie para el mes de septiembre tienen pocas posibilidades de que la planta de CFE afecte el Big Bend.

La trayectoria de las parcelas que inciden en el parque Big Bend no corresponden a la planta carboeléctrica. Por lo anterior, se puede considerar que estas plantas generadoras no necesariamente contaminan el parque. Es posible que la contaminación del parque pudiera venir de lugares tan remotos como Monterrey, Veracruz y hasta las mismas plataformas marinas.

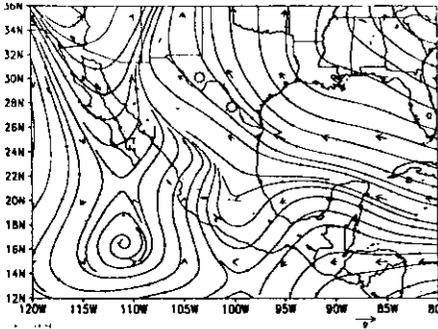


Figura 4.9.- Climatología promedio mensual para el mes de septiembre

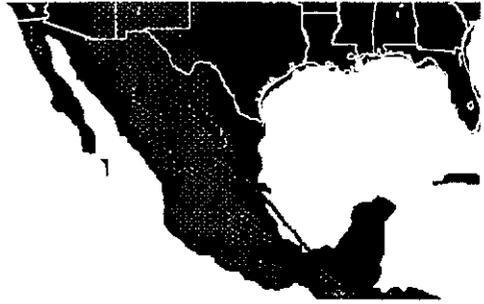


Figura 4.10.- Modelación de la parcela en forma regresiva

Debe tomarse en cuenta además el efecto de dispersión de los contaminantes. En el presente estudio este efecto no es considerado, sin embargo, un análisis de impacto ambiental completo quizá muestre que la concentración de las emisiones de la carboeléctrica, al llegar a Texas, ya es baja.

#### 4.4.- Quema de gas en plataformas marinas de Pemex, 15 de enero de 1998

De acuerdo al análisis de la climatología promedio mensual, se encontró que en enero existen posibilidades de que el humo producido por la quema de gas en plataformas pueda llegar a la costa, aunque también hay grandes posibilidades de que esto ocurra en octubre.

Para ejemplificar el impacto que las emisiones contaminantes puedan tener en la región del Golfo de México, se procedió a simular el movimiento de una parcela a partir del 15 de enero por 5 días tomando como punto inicial de salida, la ubicación de las plataformas marinas de Pemex en la sonda marina de Campeche. Se consideró para este caso, tomar el nivel de 900, 850 y 800 mb (400 - 2000 msnm aprox.) para el inicio de la simulación. Lo anterior sobre la base de haber comprobado que uno de los factores que resulta importante en la trayectoria, es la altura en que se suelta la parcela (altura efectiva de

emisión, H). Por observaciones directas se encontró que las columnas de humo pueden llegar a los niveles de altura antes indicados.

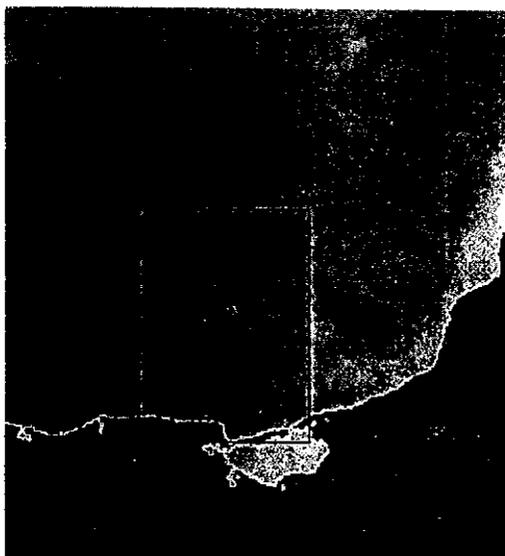


Figura 4.11.- Fotografía de satélite donde se muestran las huellas infrarrojas de las llamas de los quemadores de las plataformas marinas de Pemex.

Tabla 6.- Datos para la simulación de la parcela soltada para el caso de las plataformas de PEMEX

Latitud/ longitud inicial	Area geográfica analizada (global)	Altura (msnm)	Altura (efectiva) de salida	Fecha de salida	Periodo de análisis
19.5°N/ 92.0°W	Plataformas marinas de PEMEX	1000-2000 mts	925, 850 y 800 mb	15 de enero	5 días

La modelación de la trayectoria de una parcela partiendo de las plataformas marinas de Pemex, muestra que las parcelas que salen en los niveles de 925 y 850 mb se dirigen hacia las costas de Tabasco, mientras que la parcela que se considero al nivel de 800 mb tuvo una trayectoria hacia el norte del Golfo de México (fig. 4.12). Tal resultado tiene importantes implicaciones, pues la estabilidad atmosférica jugaría un papel clave al determinar la trayectoria (afectando la altura efectiva de emisión, H). También entrarían otros factores en juego, como son la temperatura y la composición de las emisiones.

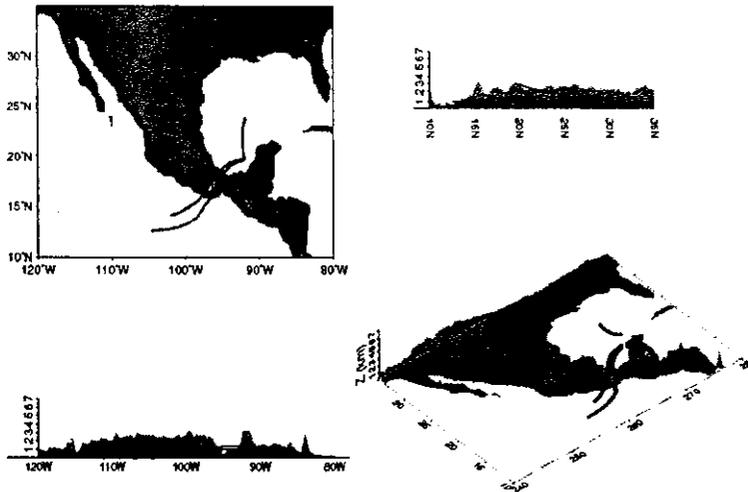


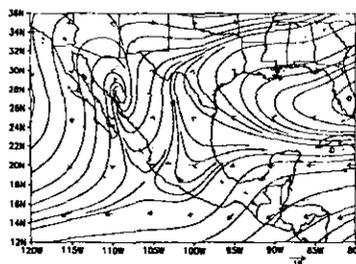
Fig. 4.12.- Modelación de la trayectoria de una parcela a 925, 850 y 800 mb.

Hay que señalar que esta modelación presenta una similitud con los resultados de los patrones climáticos mensuales de viento observados para estos niveles, en esta época del año. Es evidente que también influirán las condiciones meteorológicas reales día con día, (una gran tormenta o un huracán, modificarán los patrones obtenidos), pero en promedio se puede tener una idea de las regiones que resultan más afectadas.

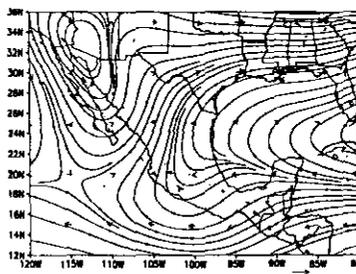
Las corrientes de viento cerca de la superficie (925 mb) muestran que los vientos del este afectan las costas del estado de Tabasco y cruzan hasta salir al océano Pacífico. A 850 mb los vientos afectan el estado de Veracruz y tienden en promedio a seguir trayectorias hacia el norte. Finalmente el patrón de 800 mb para el mes de enero nos indica que las corrientes que pasan por el punto de análisis se irán en dirección hacia el noreste, esto es, en dirección hacia el Golfo de México. Esto implicaría que parte de las emisiones de plataformas pueden afectar a los Estados Unidos si estas alcanzan niveles altos (por encima de los 1,500 msnm). Esto se produce si las condiciones atmosféricas son poco estables.

Hay que señalar que la modelación de una trayectoria de una parcela para el mes de octubre produce trayectorias para los tres niveles muy similares a lo obtenido en la climatología mensual promedio, consistiendo en que se producen trayectorias de las plataformas hacia el estado de Tabasco en una ruta corta entre estos dos puntos (fig. 4.13), aún cuando se consideran niveles entre 2,000 y 400 mts.

a) 925 mb



b) 850 mb



c) 800 mb

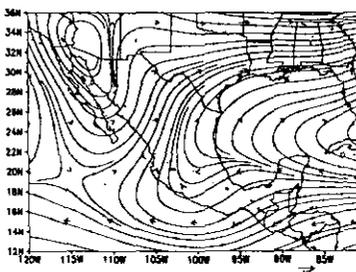
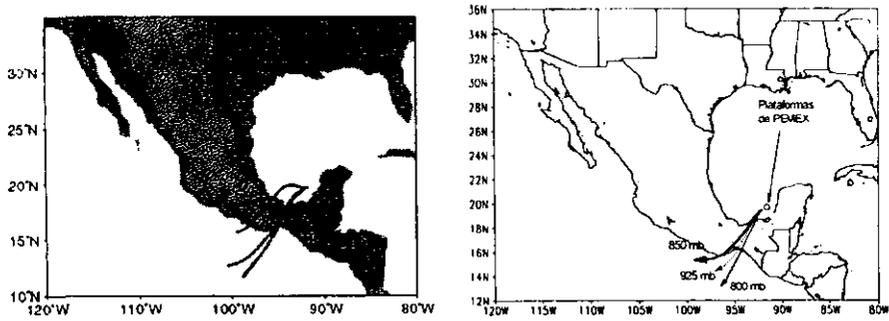


Figura. 4.13.- Corrientes de viento promedio mensuales para el mes de enero en los niveles de 925 mb a); 850 mb , b) y 800 mb en c).



*Fig. 4.14.- Comparación entre la modelación de la trayectoria de una parcela para el mes de octubre a los niveles de 800, 850 y 925 mb, a) y los resultados obtenidos para el mismo mes pero con información climatológica promedio mensual, b).*

#### 4.5.- Incendios Forestales y quemas agrícolas durante abril y mayo de 1998

Del análisis de circulación media mensual para abril y mayo de 1998, se puede pensar que:

- Cualquier parcela que fuera soltada dentro de nuestro país, durante estos meses, viajará hacia el Golfo de México y a los Estados Unidos de Norteamérica.
- El alcance de las emisiones depende de la altura efectiva de la emisión (H) y de la estabilidad atmosférica.

Como caso de estudio, se simuló el movimiento de una parcela a partir del 1 de abril y a partir del 20 de mayo, por 6 días, en posiciones geográficas aproximadas a las de incendios forestales observados. Nuevamente uno de los factores que resulta importantes, es la altura a la que se suelta la parcela, por lo que se consideraron los mismos datos que sirvieron para el análisis climático mensual. Se decidió “soltar” siete parcelas de acuerdo a los datos de la tabla I, determinando las alturas de emisión por la altura sobre el nivel del mar del punto en cuestión.

Tabla 7.- Distribución geográfica de las 7 parcelas

Parcela	Latitud/ Longitud (Grados)	Área Geográfica (Delimitar Global)	Altura (msnm)	Altura (Efectiva) de altura	Fecha de emisión	Período de análisis
1	16.55°N/ 93.24°W	Selva el Ocote, Chiapas	908	~ 850 mb	1 abril	6 días
2	17.22°N/ 96.35°W	Bosques de Oaxaca	1,312	~ 800 mb	1 abril	6 días
3	19.1°N/ 99.18°W	Bosques Desierto de los Leones, Zempoala, D.F.	2,735	~ 700 mb	1 abril	6 días
4	19.4°N/ 100.5°W	Bosques de Michoacán	1,900	~ 750 mb	1 abril	6 días
5	20.45°N/ 103.34°W	Bosque de La Primavera, Jalisco	1,647	~ 750 mb	1 abril	6 días
6	24.45°N/ 106.3°W	Bosques de Durango	2,600	~ 700 mb	1 abril	6 días
7	25.17°N/ 100.13°W	Bosques Cumbres de Monterrey, N.L.	1,575	~ 750 mb	1 abril	6 días

La modelación de las trayectorias de parcelas para los meses de abril y mayo, se hace en dos partes; la primera corresponde a incendios en Durango, Michoacán y Oaxaca, mientras que la segunda es para Chiapas, D.F., Jalisco y Monterrey.

#### Trayectoria de parcelas para el mes de abril:

Se lanzaron tres parcelas correspondiendo a los Bosques de Oaxaca, Michoacán y Durango, las cuales siguieron una trayectoria primeramente hacia el norte y posteriormente tomaron hacia el este. Lo anterior implica haber trasladado las parcelas de humo a los Estados Unidos de Norteamérica. En particular las parcelas de Oaxaca, se dirigieron a la Florida, USA mientras que la parcela de humo de Durango tomaron dirección hacia los estados de Texas y Louisiana (fig. 4.15).

Para la segunda modelación de trayectorias del mes de abril, se lanzaron 4 parcelas las cuales tuvieron un comportamiento similar al de las otras 3 parcelas, esto es, su dirección fue hacia el noreste afectando los estados del sur de los Estados Unidos (Fig. 4.16).

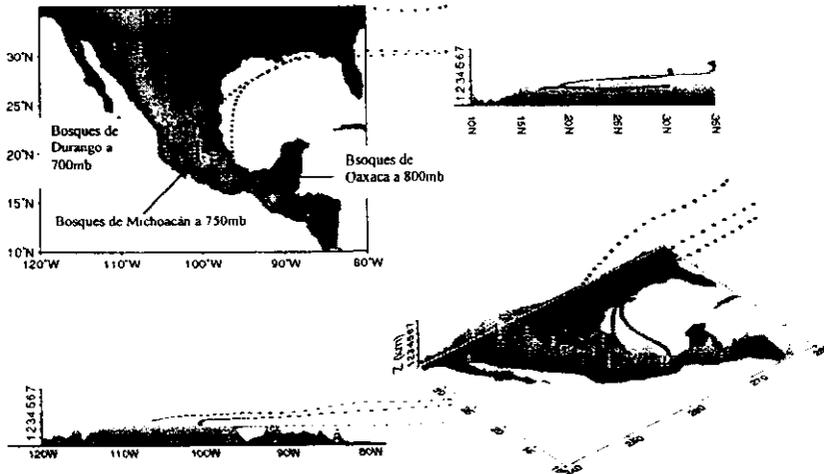


Figura 4.15.- Modelación de las parcelas liberadas el 1 de abril de 1998 en los Estados de Oaxaca, Michoacán y Durango.

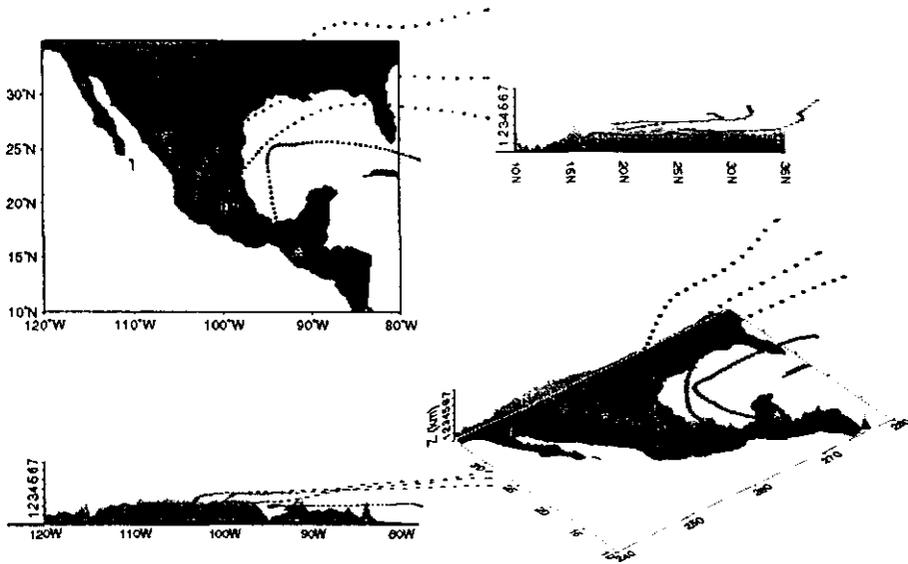


Figura 4.16.- Modelación del segundo grupo de parcelas liberadas el 1 de abril de 1998 en los Estados de Chiapas, Distrito Federal, Jalisco y Nuevo León.

Las evidencias (fotografías de satélite), confirman que en la República Mexicana se generaron una cantidad importante de incendios, particularmente en los estados del Centro y Norte del país, así como en el Istmo de Tehuantepec y Centroamérica (fig 4.17)

Las trayectorias de los dos grupos de parcelas que han sido simuladas y coinciden con lo observado en imágenes de satélite. De acuerdo a la circulación atmosférica en niveles bajos para esta época del año, los incendios en bosques mexicanos, que se encuentran a una altura considerable con respecto al nivel del mar, efectuaron en gran medida el sureste de los Estados Unidos, disminuyendo la visibilidad de la región.

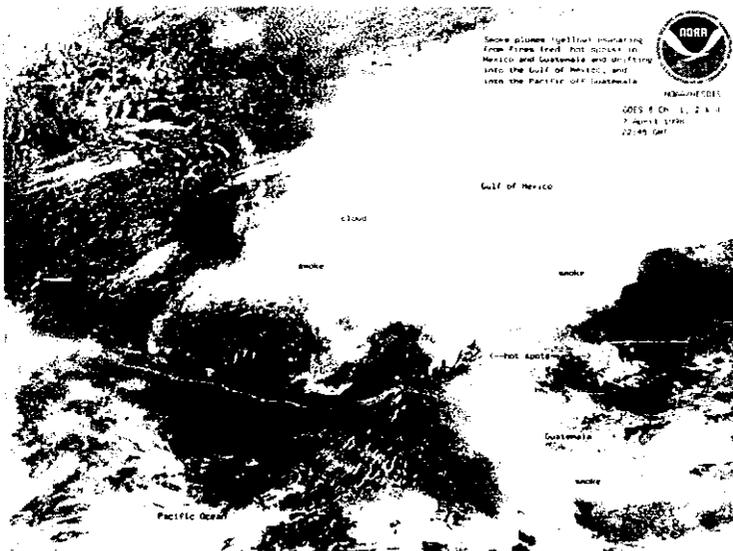


Figura 4.17.- Fotografía de satélite del 7 de abril de 1998 en donde se muestra la gran cantidad de incendios y la dirección que toman, preponderantemente hacia el noreste

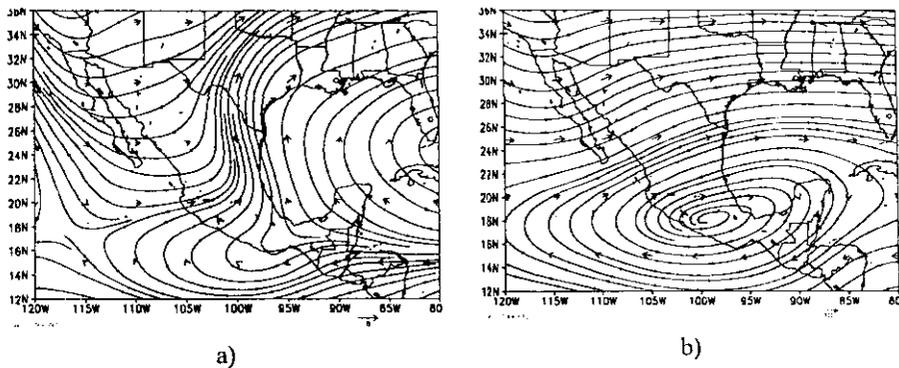


Figura 4.18.- Se observan las corrientes de viento a 850 mb a), y a 700 mb b) con el fin de comparar las corrientes con la fotografía de satélite.

### Simulación de una parcela para el mes de mayo de 1998

Para este mes se simularon varias trayectorias iniciando el 20 de mayo de 1998 por 6 días. Se consideraron 7 parcelas para las mismas latitudes y longitudes del caso anterior y se hicieron los análisis por grupos.

Para el primer grupo, se soltaron parcelas correspondientes a los estados de Oaxaca, Michoacán y Durango en niveles de 800, 850 y 700 mb, respectivamente. Las primeras parcelas se dirigieron hacia el Pacífico mientras que la última parcela ubicada en Durango mostró una trayectoria hacia el norte llegando a las latitudes más altas de los Estados Unidos (fig. 4.19).

Respecto al segundo grupo de simulación correspondiente a los estados de Chiapas, D.F., Jalisco y Nuevo León, se soltaron a 850, 700 y 750 mb, respectivamente. Se tiene que con excepción de la parcela soltada en el norte (lat 25.17°N), el resto de las parcelas se dirigió hacia el Pacífico (fig. 4.20).

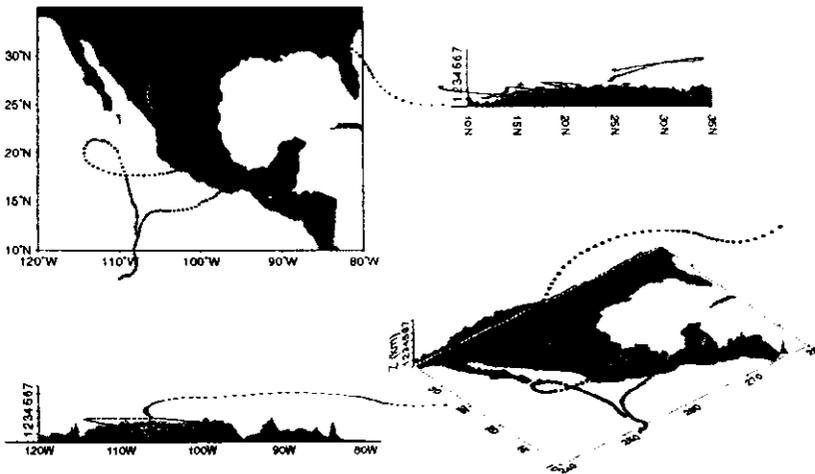


Figura 4.19.- Modelación de las parcelas liberadas el 20 de mayo de 1998 en los Estados de Oaxaca, Michoacán y Durango.

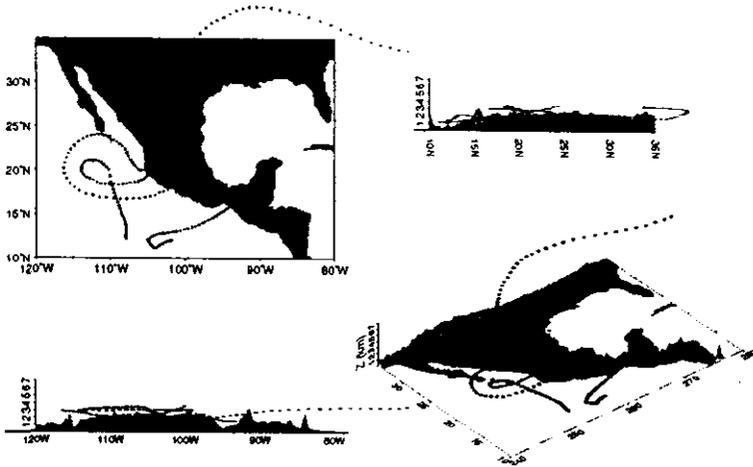


Figura 4.20.- Modelación del segundo grupo de parcelas liberadas el 20 de mayo de 1998 en los Estados de Chiapas, Distrito Federal, Jalisco y Nuevo León.

Se puede concluir que para el mes de mayo, las parcelas que se ubicaban en las latitudes más al norte y cercanas al Golfo de México, afectaron parcialmente con humo los Estados Unidos de Norteamérica. El resto de las emisiones siguieron trayectorias hacia el Pacífico, debido a que en esta época del año, los alisios se intensifican al sur de México.

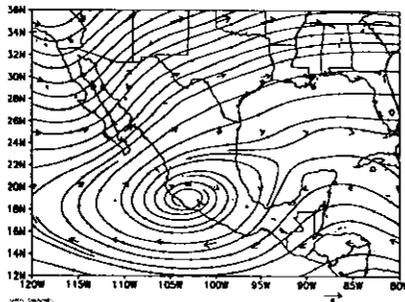


Figura 4.21.- Se tiene el patrón promedio mensual de las corrientes de viento a 700 mb para el mes de mayo.

El mes de mayo en que los incendios forestales en México, parecen haber tenido un mayor impacto contaminante en los Estados Unidos. La evidencia satelital considera que las plumas de humo siguieron una trayectoria que incidió primeramente en el estado de Texas y otros estados más del sur de los Estados Unidos, a diferencia del mes de abril, en que la trayectoria fue en dirección de la Florida. También resalta que las plumas que se originaron en las latitudes de más al sur, incluyendo Centro América, presentan una trayectoria en dirección hacia el Océano Pacífico, esto es, en dirección contraria de las plumas que se han generado más hacia el Centro y Norte de nuestro país.

Si se compara contra la climatología mensual promedio del mes de mayo a una altura de 700 y 850 mb se encuentra la circulación que aproximadamente generó el patrón observado, tanto en la simulación de la parcela como con las fotografías de satélite.

La similitud entre simulaciones numéricas y fotos de satélite muestra que la ubicación de la altura efectiva de emisión fue bastante aproximada.

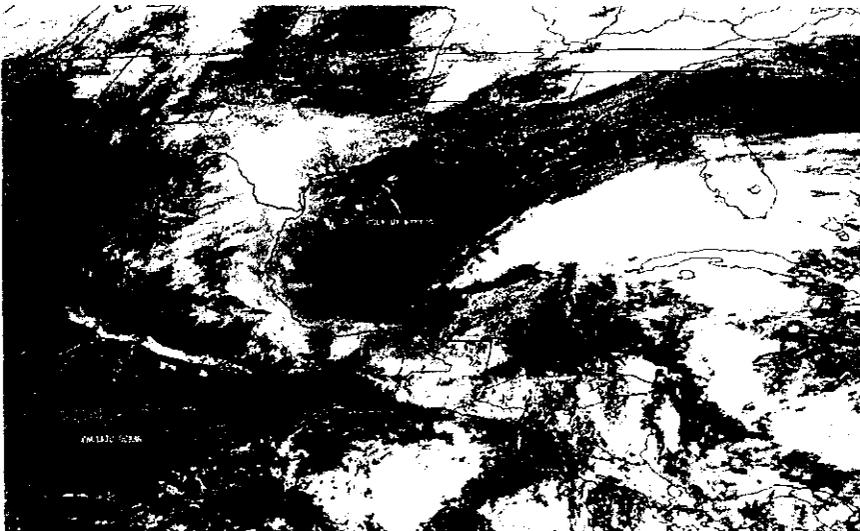


Figura 4.22.- Fotografía del satélite para el 27 de mayo en donde se observan las plumas de humo a lo largo de la costa del Golfo de México y en dirección hacia el Pacífico.

La coincidencia entre la simulación de las trayectorias de las parcelas y las fotografías satelitales, sugiere que durante la época de incendios en nuestro país (primavera), los impactos ambientales a Estados Unidos pueden ser importantes. Las corrientes de viento pueden llevar parcelas de humo a grandes distancias, convirtiendo el problema de contaminación transfronteriza en algo que puede tener consecuencias políticas.

Prácticas como las de roza, tumba y quema deben ser por tanto, substancialmente modificadas.

## **5.- Discusión de resultados y conclusiones generales.**

La metodología aquí planteada para análisis de trayectorias en la atmósfera, puede ser utilizada en diversas situaciones de emisiones, contaminación atmosférica e impacto ambiental. Basta contar con análisis de vientos (diagnósticos y pronósticos) para estimar el movimiento de las parcelas de aire. La utilización de la base de datos de Reanálisis ha permitido generar información sobre la climatología de vientos diarios permite estimar trayectorias preferentes para varias épocas del año, etc. El estudio de casos particulares ejemplifica en que medida las situaciones medias varían resultando en trayectorias específicas.

La utilización del programa TRAJECT ha permitido generar pronósticos, los cuales son en ciertos casos confirmados por la evidencia de fotografías de satélite (incendios).

En cada caso se tiene que la altura de la emisión ( $H$ ) es un punto importante para determinar la posible trayectoria que puede seguir una parcela. Existen diversas formas de estimar este parámetro (referencias), que en muchos casos requiere de un análisis detallado de la fuente de emisión.

Habría que señalar que en este estudio se consideran que las parcelas se constituyen de gas inerte y que por lo tanto, no tienen cambios en su composición en su "viaje" por lo que constituyen trazas de las corrientes de viento. Sin embargo, se ha encontrado (caso de EL Chichón) que las cenizas, poseen características que hacen que las trayectorias puedan variar debido a que otros factores (peso, forma, tamaño, etc.) deben de ser incluidos en la dinámica de sus movimientos.

Para los casos analizados en el presente estudio se pueden obtener algunas conclusiones:

### **Popocatépetl**

Se determina que la modelación trayectorias de emisiones, se ajusta a la realidad en casos particulares. Al hacer uso del análisis promedio mensual de vientos, se puede concluir

que la ciudad de México esta expuesta a la caída de cenizas en los meses de julio a noviembre, principalmente por la presencia de los alisios. Los restantes meses será en dirección hacia el estado de Puebla y con menos probabilidad al estado de Morelos, excepto en algunos casos particulares (Magaña y Pérez, 1998). El alcance de las cenizas, estará en función de la altura que se logre en la expulsión, aunque como el volcán lanza cenizas en todo un continuo de alturas a partir del cono del volcán, es de esperarse que estas aparezcan a lo largo de varias trayectorias y distancias.

### **El Chichón**

El estudio de este evento ha permitido comprobar la utilización de la metodología al confirmar que las trayectorias de las emisiones del volcán coinciden con la distribución de gases detectada por satélite. Cabe señalar sin embargo, que la coincidencia depende de la altura de emisión considerada. Esto último será motivo de otros estudios, que incluyan aspectos físicos y químicos adicionales para que la modelación de la trayectoria sea más acorde con la realidad y pueda determinar el alcance.

Otro aspecto que destaca de este estudio, es que para el caso real de una gran erupción en el Popocatepetl o en otro volcán, se genera una importante cantidad de SO<sub>2</sub> y que aún cuando las cenizas no son un problema inmediato. Las emanaciones de gases constituyen importantes problemas a la población por lo que un monitoreo constante de los volcanes debiera incluir pronósticos de trayectorias de emisiones.

### **Parque Big Bend (Texas, USA)**

Este ha sido un ejemplo de como un fenómeno interno puede convertirse en transfronterizo. La contaminación ambiental desconoce fronteras y puede ser en un momento dado, motivo de reclamos diplomáticos. El poder disponer de una herramienta como la utilizada en este trabajo, permite determinar que las plantas carboeléctricas de CFE no contaminan el Parque Big Bend y que en todo caso se deben de investigar otras fuentes de contaminación. Considerando las corrientes de viento, en ciertas épocas del

año, estas transportan parcelas de México en regiones donde al Parque esté generando contaminación, un análisis hacia atrás de las trayectorias podría ayudar a resolver parte de este problema ambiental.

De esta manera se pueden dirimir de mejor forma controversias además planear la construcción de la industria con altos índices de emisión de contaminantes, particularmente en la frontera. Lo anterior ayudará a eliminar posibles reclamos.

### **Plataformas Marinas de PEMEX**

Aún cuando la quema de gas en las cantidades que se han venido llevando a cabo en la sonda marina de Campeche van a desaparecer, el estudio ha permitido encontrar que existen trayectorias de emisiones hacia el estado de Veracruz y Tabasco debido a las corrientes de viento que se tienen en esta dirección (los alisios). Sin embargo, es posible que por mecanismos de dispersión en el aire, fenómenos químicos de interacción entre la parcela y el medio ambiente, sea difícil que estas parcelas lleguen a tierra. En todo caso, es aquí donde la utilización de esquemas de análisis de dispersión son una herramienta adicional para cuantificar el área en donde se deposita esta contaminación, y por tanto su impacto ambiental en la región. Como en otros casos, las emisiones podrían en ciertos casos afectar a nuestros vecinos del norte.

### **Incendios Forestales y quemas agrícolas**

Este análisis consideró 7 puntos de salida de parcelas de humo y de acuerdo a los resultados obtenidos se encontró que las emisiones tenían trayectorias que incidieron en los estados de Texas y Miami. Destaca que los incendios se generaron en una época de gran sequía y al no haber control en las quemas agrícolas la concentración de contaminantes (humo) resultó clara en imágenes de satélite. Tal situación sin embargo, confirmó el esquema TRAJECT como una herramienta confiable en el análisis de trayectorias. Las grandes distancias recorridas por las parcelas sugieren que las emisiones alcanzan grandes alturas.

En términos de prevención, se tiene que el costo de los incendios forestales y por quemas agrícolas ha sido considerable. Se tuvieron que movilizar una importante cantidad de recursos humanos técnicos y equipos. No aparecieron sin embargo, grandes reclamos por el impacto transfronterizo de los incendios como ocurrió en el caso del Big Bend.

### **Conclusiones Generales**

El presente trabajo se fundamentó en que las parcelas de aire pueden ser “seguidas” y su trayectoria modelada usando relaciones físicas para fluidos. La descripción Lagrangiana de las parcelas requiere de información sobre los vientos y sus cambios (aceleraciones). Entre mejor sea esta información, mejor será la trayectoria diagnosticada o pronosticada. De forma simple la climatología promedio mensual de vientos (líneas de corriente) puede sugerir, en buena medida, las trayectorias probables de las parcelas.

El análisis de los componentes  $(u, -\omega)$  y  $(v, -\omega)$  indica que fenómenos como los estudiados, pueden alcanzar grandes alturas dependiendo de la altura efectiva de emisión. Si ésta supera las capas límite o de transición, en los vientos podrá permanecer por varios días en la atmósfera y viajar a grandes distancias. Aquellas emisiones que llevan implícito un fenómeno dinámico como puede ser la emisión de cenizas por la erupción de un volcán, grandes incendios, humo producido en grandes quemadores, o por otros medios, deben de ser analizadas considerando efectos como su peso, forma, etc.

Esta metodología no puede predecir la distancia final de una parcela, ya que esto depende de diversos factores físicos de composición de la parcela y de condiciones meteorológicas más precisas.

Las imágenes de satélites en diversas bandas de frecuencia permiten confirmar los diagnósticos aquí presentados. Conforme se utilicen imágenes de mayor resolución será más probable ubicar las zonas afectadas por emisiones y comprobar trayectorias.

Lo anterior implica que esta herramienta puede ser utilizada para predecir la posibilidad del impacto ambiental de una industria al determinar las trayectorias de sus emisiones; el riesgo que implican las cenizas de los múltiples volcanes que existen en México; la quema de pastizales y muchas más aplicaciones de las cuales los más beneficiados serán la población.

La concientización de los agricultores, sobre los métodos controlados de quema, deben de ser una obligación del gobierno federal y así poder evitar el gastar recursos en el control de incendios. También deberá de ser obligación del gobierno, implementar medidas preventivas en razón de presentarse fenómenos de sequía resultado del El Niño.

Por lo anterior:

Es necesario que se implemente a la brevedad, un sistema que utilice el pronóstico meteorológico, en particular los campos de vientos, para estar en condiciones de poder determinar trayectorias de parcelas de emisiones que representan riesgo para la población.

Es necesario que todo proyecto industrial o en su caso con posibilidad de emitir a la atmósfera algún contaminante, deba de presentar un estudio de trayectorias y así poder determinar, con toda oportunidad, la posible incidencia transfronteriza de las emisiones de fábricas o de plantas generadoras de electricidad.

Se debe de estudiar más a fondo la altura efectiva de las emisiones (H) que puede tener un incendio, una chimenea, etc., de manera que se tengan parámetros más reales para llevar a cabo simulaciones de trayectorias en la atmósfera.

Esta metodología podría implementarse para ser usada operativamente en el diagnóstico de la contaminación que se genera por fuentes fijas en la Ciudad de México.

---

## Bibliografía

---

1. Keith, R. W., *A climatological/air quality profile.*, American Meteorological Society 60<sup>th</sup> Annual Meeting, 1980
2. Matson, A. Robock, *Satellite detection of the 1982 El Chichon eruptions and stratospheric dust cloud.* *Geofísica Internacional*, Vol. 23, No. 2, abril 1984.
3. A. Robock; *Climate Model simulations of the effects of the El Chichón eruption.* *Geofísica Internacional*, Vol. 23-3, 1984.
4. Rampino, M.R., and Self, S., 1982. *Historic eruptions of Tambora (1815) Krakatau (1883) and Agung (1963), their stratospheric aerosols and climatic impact: Quaternary Research*, v. 18, p. 127-143.
5. CFE, *Prospectiva del Sector Eléctrico, 1996-2005.*, 1998.
6. *Petróleos Mexicanos, Indicadores Petroleros, Febrero de 1998.*
7. A. Rúa et al., *Aplicación de una modelización Lagrangiana a la contaminación atmosférica transfronteriza.* *Atmósfera*, 11 pag., 75-94, 1998.
8. *Instituto de Ingeniería, UNAM. Estimación de la emisión de contaminantes atmosféricos en el complejo Abkatun-A, Informe Final.*
9. *El Nacional, Llega humo de incendios a Dakota y Colorado*; 23 de mayo de 1998.
10. *Excélsior "Más ayuda de Washington contra los incendios forestales: Envían al Secretario de Agricultura"*, 3 de Junio de 1998
11. Levine, J.S. (1994); *Biomass Burning and the Production of Greenhouse Gases. Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change.* John Wiley and Sons.
12. M. Aguilera, *Programa de reforestación de áreas forestales afectadas por incendios, XXXIII sesión ordinaria del CONAF, junio 1998.*
13. Rampino, M.R., and Self, S., 1982, *Historic eruptions of Tambora (1815) Krakatau (1883) and Agung (1963), their stratospheric aerosols and climatic impact: Quaternary Research*, v. 18, p. 127-143.
14. Salby, M.L. *Fundamentals of atmospheric Physics*, Academic Press, p. 627, 1996..
15. Holton, J., *An introduction to dynamic Meteorology*, Ed. 3, Academic Press, N.Y. 1992.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

16. Gordon, A.H., 1962: *Elements of Dynamic Meteorology*. D. Van Nostrand Co. Inc., 217 p.
17. Nelson L. Seaman. *Program Traject. Documentation and user's guide*. Department of Meteorology. Pennsylvania State University, march 1987.
18. E. Kalnay et al. *The NCEP/NCAR 40 year Ranalysis Proyect*, *Bulletin of the American Metereological Society*, March 1996.
19. Krishnamurti, T.N. y L. Bounoua, *An introduction to numerical weather prediction technics*, CRS Pres, p. 293, 1995
20. González E.A., H. Delgado, 1997, "Los eventos laháricos de junio de 1997 en el volcán Popocatépetl: ¿eventos generados por jökulhlaups?", *Reunión Anual Unión de Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal., Méx., 03 al 07 de noviembre*.
21. . Post, M.J., C.J. Grund, A.M. Weickmann, K.R. Healy, and R.J. Willis. *A comparison of the Mt. Pinatubo and El Chichon volcanic events: Lidar observations at 10.6 and 0.69  $\mu\text{m}$* . *Journal of Geophysical Research*, 101(D2):3929-3940 (1996).
22. V. Magaña y J. Pérez, *Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosferica regional de Mexico*, *GeoUNAM*, Vol. 5, num.1 pags. 33-39, 1999.