



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

***MODELACIÓN DE PARTÍCULAS  $PM_{10}$   
EMITIDAS POR EROSIÓN EÓLICA EN  
EL VALLE DE MÉXICO***

**T E S I S**

**Que para obtener el grado de**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**P R E S E N T A**

**EMMANUEL DÍAZ NIGENDA**

Director de Tesis: Dr. Arón Jazcilevich Diamant



**México, D.F.**

**2005**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

---

---

## *A G R A D E C I M I E N T O S*

Al *Dr. Arón Jazcilevich Diamant*, por la amistad brindada pero principalmente por su paciencia y tiempo dedicado en la dirección de este trabajo de investigación.

Al *M. en I. Vicente Fuentes Gea* y al *Dr. Rodolfo Sosa Echeverría*, quienes formaron parte de mi Comité Tutorial, gracias por las observaciones realizadas durante mis estudios, las cuales ayudaron a enriquecer esta investigación en cada una de las etapas.

A la *Dra. Mireya Moya Núñez*, por aceptar ser parte de mi Jurado de Evaluación y por sus valiosas observaciones las cuales fueron de gran ayuda para mejorar el trabajo de tesis.

Al *Dr. Armando Aguilar Márquez*, por aceptar ser parte de mi Jurado de Evaluación y por sus comentarios en el desarrollo de este trabajo.

Al *Dr. Agustín García Reynoso*, por su gran apoyo y valiosa contribución en el desarrollo del acoplamiento de los modelos. Gracias por tus consejos y la amistad brindada.

A la *M. en C. Norma Fernández Buces* del Instituto de Geología, por la información proporcionada sobre el ex lago de Texcoco y por los comentarios realizados.

Al *Dr. John Tatarko* del Depto. de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), por su gran apoyo en el manejo del modelo WEPS.

A la *Unidad de Investigación de la Erosión Eólica (WERU)* de los Estados Unidos, por el apoyo brindado durante mi estancia en ese lugar.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)*, por el apoyo económico otorgado para la realización de esta investigación durante los estudios de posgrado.

*A todos ellos, G R A C I A S . . .*

---

---

---

---

## DEDICATORIA

A mi esposa, *Susana*. Gracias por toda la paciencia, el apoyo y todo el amor que me has brindado en esta nueva etapa que acabamos de comenzar. Por eso y más, **TE AMO!!!**

A mis padres *Wulfrano y Eugenia*, a quienes les debo lo que ahora soy. Gracias por inculcarme el camino de la superación, espero nunca defraudarlos. **LOS AMO!!!**

A mis hermanos *Juan José, Luis Fernando y Susana*, de quienes nunca he dejado de aprender y en especial a mi hermano Juan José, por todo el apoyo que me ha brindado.

A los nuevos *amigos* que me encontré durante mi estancia en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, así como durante mis estudios de posgrado.

A *DIOS*, por darme el don de la vida y por permitirme vivirla con buenos y malos momentos, los cuales me han ayudado a seguir adelante para alcanzar esta meta anhelada.

*Hasta la victoria, siempre...*

---

---

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

**Página**

i. *Lista de Figuras.*

ii. *Lista de Tablas.*

### **RESUMEN.**

**I. INTRODUCCIÓN. 1**

**II. JUSTIFICACIÓN. 4**

META. 9

OBJETIVOS. 9

**III. ANTECEDENTES. 10**

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. 11

3.2. PARTÍCULAS. 13

3.2.1. *Definición.* 13

3.2.2. *Tamaño de partículas.* 13

3.2.3. *Fuentes generadoras de partículas.* 15

3.2.3.1. *Erosión eólica.* 17

3.2.3.2. *Proceso erosivo.* 19

3.2.4. *Transporte de partículas en el aire.* 22

3.2.5. *Efectos producidos por la presencia de partículas en el aire.* 24

3.2.6. *Normatividad Ambiental.* 26

**IV. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS. 27**

4.1. SISTEMA DE PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN EÓLICA (WIND EROSION PREDICTION SYSTEM). 29

4.1.1. *Región de simulación.* 31

4.1.2. *Espacio y tiempo.* 32

4.1.3. *Simulación de las condiciones climatológicas.* 32

4.1.4. *Simulación de condiciones de campo.* 33

4.1.5. *Simulación del proceso erosivo.* 34

4.1.5.1. *Datos de entrada.* 35

4.1.5.2. *Simulación del proceso.* 39

4.1.5.3. *Datos de salida.* 41

4.2. MODELO QUÍMICO Y CLIMÁTICO A MULTIESCALAS (MULTISCALE CLIMATE AND CHEMISTRY MODEL). 41

4.2.1. *Descripción del modelo.* 41

4.2.2. *Procesadores.* 44

4.2.3. *Resultados obtenidos de la ejecución del MCCM.* 47

---

---

---

<b>V. METODOLOGÍA.</b>	<b>49</b>
5.1. DATOS UTILIZADOS.	50
5.1.1. <i>Datos de suelo.</i>	50
5.1.2. <i>Datos de la RAMA.</i>	50
5.2. DESARROLLO DEL SISTEMA MCCM+WEPS.	52
<b>VI. RESULTADOS.</b>	<b>56</b>
6.1. SELECCIÓN DEL DÍA PARA LA MODELACIÓN.	57
6.2. EVALUACIÓN DE LA METEOROLOGÍA.	58
6.3. RESULTADOS.	61
6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	71
6.5. POTENCIALES FUENTES DE ERROR.	73
6.6. LIMITACIONES DEL SISTEMA MCCM+WEPS.	73
<b>VII. CONCLUSIONES.</b>	<b>75</b>
<b>VIII. RECOMENDACIONES.</b>	<b>78</b>
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>80</b>

---

---

---

## *i. Lista de Figuras.*

<i>No.</i>		<i>Página</i>
1	Sistema de alta presión sobre la región central de México.	6
2	Líneas de confluencia para partículas PM <sub>10</sub> .	7
3	Composición de las partículas gruesas en la Ciudad de México.	8
4	Localización del Valle de México.	11
5	Contaminación en el Valle de México.	12
6	Tamaño de partículas que pueden encontrarse suspendidas en el aire.	14
7	Fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera.	16
8	Movimiento de las partículas durante el proceso erosivo.	21
9	Estructura del modelo WEPS.	31
10	Geometrías de simulación.	32
11	Reducción de la velocidad de fricción sobre una superficie cubierta.	36
12	Archivo de entrada del submodelo de erosión para simular el proceso erosivo.	39
13	Comportamiento del material transportado.	41
14	Diagrama de flujo del modelo MCCM.	44
15	Interpolación de datos hacia la malla especificada.	44
16	Descripción de campos de los archivos generados por MCCM.	48
17	Campos obtenidos durante la ejecución del MCCM.	48
18	Topografía y ubicación de las estaciones de monitoreo seleccionadas para la comparación de resultados.	51
19	Interpolación de base de datos en la región del ex lago de Texcoco.	53
20	Diagrama de flujo del sistema desarrollado.	54
21	Preparación de dominios sobre la región de estudio.	55
22	Nube de contaminantes presente el día 5 de Diciembre del 2001 sobre la región del Valle de México.	57

---

---

---

23	Variación horaria de temperatura superficial (°C) entre los datos reportados por las estaciones de la RAMA y los generados por MCCM durante la simulación.	59
24	Serie de tiempo de magnitudes de vientos (m/s) reportados por las estaciones de la RAMA y las calculadas por MCCM durante la simulación.	60
25	Comparativo de concentraciones de PM <sub>10</sub> usando mediciones de las estaciones de la RAMA y concentraciones calculadas durante la aplicación del sistema (MCCM+WEPS).	62
26	Diagramas de dispersión de concentraciones de PM <sub>10</sub> usando mediciones de las estaciones de la RAMA y concentraciones calculadas durante la aplicación del sistema (MCCM+WEPS).	64
27	Comparación de series de tiempo de concentraciones de partículas considerando la emisión de partículas proveniente del ex lago de Texcoco y sin considerar.	65
28	Campo de vientos y concentraciones generadas durante el evento ocurrido sobre la región del ex lago de Texcoco de las 17:00 horas a las 18:00 horas tiempo local del 5 de Diciembre del 2001.	66
29	Campo de vientos y concentraciones generadas durante el evento ocurrido sobre la región del ex lago de Texcoco de las 19:00 horas a las 20:00 horas tiempo local del 5 de Diciembre del 2001.	67
30	Campo de vientos y concentraciones generadas durante el evento ocurrido sobre la región del ex lago de Texcoco de las 21:00 horas a las 22:00 horas tiempo local del 5 de Diciembre del 2001.	68
31	Dispersión de partículas sobre el Valle de México.	69
32	Comparativo de la imagen satelital con la imagen generada por el sistema MCCM+WEPS para visualizar la nube de polvo presente el día 5 de Diciembre del 2001.	71

---

---

---

## *ii. Lista de Cuadros.*

<i>No.</i>		<i>Página</i>
1	Estimados globales de partículas de origen natural de diámetro menor a 20 $\mu$ m emitidas a o formadas en la Atmósfera	16
2	Emisiones de partículas anuales estimadas en los Estados Unidos	17
3	Efectos físicos y económicos provocados por la erosión eólica.	19
4	Movimiento de las partículas en función de su tamaño.	21
5	Características de los dominios anidados	55
6	Índices de Concordancia entre las concentraciones de PM <sub>10</sub> observadas y calculadas en cada estación de monitoreo.	63
7	Promedios móviles de concentraciones de partículas PM <sub>10</sub> y concentraciones máximas para cada estación.	70

---

---



**RESUMEN.**



---

---

Considerando que la Ciudad de México cuenta con programas de monitoreo de la calidad del aire que no identifican las fuentes potenciales de emisión de partículas de suelo a la atmósfera, es de vital importancia su estimación a través del uso de modelos que permiten evaluar las fuentes naturales que contribuyen a la emisión de partículas a la atmósfera afectando considerablemente la calidad del aire.

Los modelos de calidad del aire han sido considerados como una herramienta indispensable para el estudio de la contaminación atmosférica y la planeación urbana e industrial, como el modelo “MCCM” (Multiscale Climate and Chemistry Model). Por otro lado, existen modelos que permiten predecir la pérdida de suelo dependiendo de la velocidad del viento entre otras variables, como el modelo “WEPS” (Wind Erosion Prediction System).

En la actualidad, son muy pocas las investigaciones realizadas sobre la afectación de la calidad del aire por la presencia de partículas naturales mediante la aplicación de modelos que puedan predecir la erosión eólica de los suelos. Considerando lo anterior, se desarrolló un sistema a partir del acoplamiento de los modelos WEPS y MCCM, para estudiar la dispersión de partículas cuyo origen son las fuentes naturales (suelos desprotegidos) localizadas en los alrededores del Valle de la Ciudad de México.

De los resultados obtenidos de la aplicación del sistema, se observó que la región del ex lago de Texcoco es una de las principales fuentes de emisión de partículas que afectan a la calidad del aire de la Ciudad de México, cuando las condiciones meteorológicas favorecen el transporte de los contaminantes hacia la ciudad. Además permitió localizar las zonas mayormente impactadas por la presencia de partículas naturales en el aire.

Como resultado de esta investigación, se tiene un sistema con la capacidad de reproducir la meteorología y el fenómeno de la contaminación del aire debido a la presencia de partículas emitidas por la erosión eólica. Esto permite generar escenarios para probar medidas de control para la recuperación de suelos, así como el estudio del fenómeno de la contaminación atmosférica, y así disminuir el impacto de las emisiones sobre la calidad del aire en determinada región.

---

---

---

# I. INTRODUCCIÓN.

---

Los efectos físicos y económicos de la erosión eólica han sido reportados ampliamente para terrenos agrícolas y praderas por Wilson (1980). Para áreas metropolitanas, Wark y Warner (1990) señalan que las partículas de suelo suspendidas a causa de la erosión eólica provocan daños a la salud humana, al tráfico aéreo y al terrestre, a los materiales y en general modifica algunos procesos naturales de los ecosistemas. Por esta razón, las principales metrópolis del mundo han iniciado programas de monitoreo de la calidad del aire, pero los cuales raramente identifican las fuentes potenciales de emisión de partículas de suelo a la atmósfera. La diversidad e interacción de estas partículas hacen difícil la identificación de las principales actividades humanas que contribuyen al incremento de la contaminación atmosférica. Por esta razón, la estimación a través del uso de modelos permite evaluar las fuentes naturales potenciales que contribuyen a la emisión de partículas a la atmósfera y pueden señalar aspectos sobre los mejores esquemas de manejo de recursos que contribuyan a eliminar o reducir notoriamente los niveles de contaminación ambiental (Návar, 1997).

El Valle de México, es una de las áreas metropolitanas más grandes del mundo. Alberga aproximadamente la quinta parte de la población nacional lo que equivale a más de 20 millones de habitantes (INEGI, 2000), esto se ve reflejado notablemente en la contaminación generada por el transporte y la industria. Actualmente, la Ciudad de México presenta altos índices de contaminación, debido al crecimiento de la población y del desarrollo industrial. La principal fuente de contaminación atmosférica es el sector del transporte que cuenta con aproximadamente 3.5 millones de vehículos privados y públicos (INEGI, 2000). Además, fuentes naturales como el ex lago de Texcoco, emiten una gran cantidad de partículas primarias cuyo diámetro es menor a 10 micras ( $PM_{10}$ ).

Los modelos de calidad del aire a nivel regional se han convertido en una herramienta indispensable para el estudio de la contaminación atmosférica y la planeación urbana e industrial (García, 2000; Jazcilevich, 2003; Jazcilevich, 2005). El modelo "MCCM" (*Multiscale Climate and Chemistry Model*), simula condiciones meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica de la región de interés y de este modo, permite predecir el comportamiento de los contaminantes emitidos a la atmósfera, los cuales son transportados sobre grandes extensiones y distancias en las que el movimiento del aire causa una dilución de ellos.

---

---

Por otro lado, existen modelos que permiten predecir la pérdida de suelo dependiendo de la velocidad del viento y contenido de humedad entre otras variables (erosión eólica), como el modelo “WEPS” (Wind Erosion Prediction System <sup>a,b</sup>). Los modelos WEPS y MCCM, pueden ser acoplados para estudiar la dispersión de partículas cuyo origen son las fuentes naturales localizadas en los alrededores del Valle de la Ciudad de México.

Este trabajo, se compone de ocho capítulos. En el capítulo siguiente, se presenta la justificación de esta investigación. En el tercer capítulo, se describen la zona de estudio y su relación con la emisión de partículas generadas por erosión eólica, así como una descripción del proceso erosivo en zonas propensas a este fenómeno. En el cuarto capítulo se describen los modelos WEPS y MCCM, los cuales son las herramientas fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

En el capítulo V, se describen las actividades realizadas para el acoplamiento de los modelos como parte de la metodología. Los resultados obtenidos de la aplicación del sistema desarrollado para el estudio del fenómeno de la dispersión de partículas sobre la región del Valle de México, así como también las limitaciones identificadas durante la aplicación del mismo son presentados en el capítulo VI. Las conclusiones son presentadas en el capítulo VII.

Finalmente, las recomendaciones que podrán ayudar a mejorar esta investigación se encuentran en el capítulo VIII.

---

## **II. JUSTIFICACIÓN.**

---

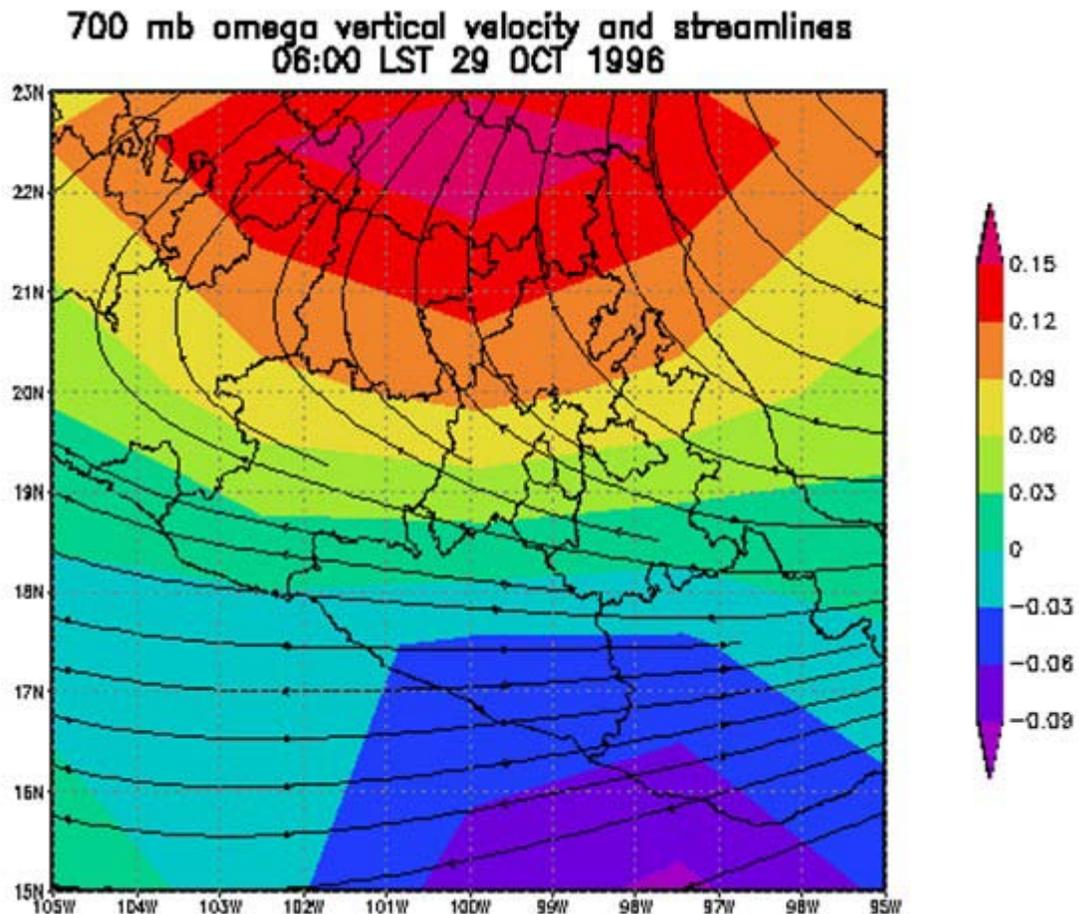
---

Estudios sobre exposición de personas a partículas (PM), indican incrementos en la mortalidad, en el riesgo de contraer enfermedades crónicas respiratorias y en el desarrollo de cáncer. También deteriora la visibilidad, la vegetación y los materiales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha estimado que en Europa y Estados Unidos, la contaminación del aire ha causado un gran número de muertes anuales. Aun en países que gozan de relativamente buena calidad del aire como Austria, Francia y Suiza, se estimó que el 6% de todas las muertes podrían estar asociadas a la exposición de la población a contaminación del aire por partículas, Künzli *et al.* (2000).

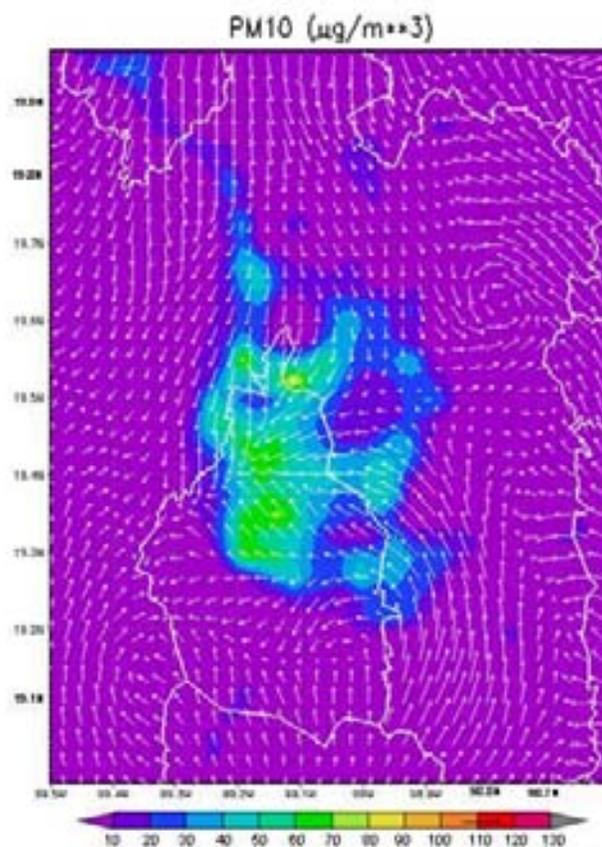
En la Cd. de México, la contaminación por partículas  $PM_{10}$  (partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a 10 micras) se ve incrementada en la zona norte, debido a que son regiones altamente industrializadas y además por la proximidad a fuentes naturales propensas a la erosión eólica (de Icaza, 2003; López *et al* 2002). Durante algunas temporadas del año los vientos dominantes sobre la región provienen del noreste, por lo que los contaminantes son transportados hacia la ciudad, la cual se ve ampliamente afectada por la contaminación provocada por la presencia de partículas naturales suspendidas en el aire. Las montañas que rodean la ciudad, impiden que se lleve a cabo una dispersión adecuada de los contaminantes atmosféricos, ya que éstos quedan atrapados en el interior del valle. Este tipo de terrenos complejos favorecen la presencia de líneas de confluencia, las cuales son formadas por la presencia de sistemas anticiclónicos de alta presión sobre la región central de México (como se muestra en la Figura 1), lo que favorece la existencia de escenarios típicos de altos índices de contaminación (Jazcilevich, 2005), por lo que el riesgo de afectación a la salud de la población se ve incrementado (de Icaza, 2003).

Como se observa en la Figura 2, las máximas concentraciones de contaminantes tienden a aumentar alrededor de la línea de confluencia formando gradientes de concentraciones que dependen de la fuente e intensidad de las emisiones. Como los contaminantes emigran siguiendo la línea de confluencia, se acumulan sobre las áreas densamente pobladas del Valle de México.



**Figura 1. Sistema de alta presión sobre la región central de México (Jazcilevich, 2005).**

Jáuregui (1971, 1983, 1989), explica la presencia de tolváneras sobre la Ciudad de México desde el año de 1920, a partir de la visibilidad en puntos estratégicos localizados sobre la ciudad. López *et al.* (2002), comentan que el Valle de México experimenta periódicamente eventos de tolváneras que provocan concentraciones de partículas  $PM_{10}$  mas severa que la norma establecida, por lo que el problema de contaminación por partículas en esta región no solamente se le atribuye a fuentes antropogénicas, sino que también a fuentes naturales que se localizan al norte y noreste del valle, como el área del ex-lago de Texcoco la cual emite una gran cantidad de partículas primarias.



**Figura 2.** Líneas de confluencia para partículas  $\text{PM}_{10}$ , donde se observa la acumulación de altas concentraciones (verde) del contaminante sobre la Cd. de México.

Chow (1995) señala que la masa de partículas  $\text{PM}_{10}$  está constituida principalmente de seis componentes: 1) material geológico, 2) carbón orgánico, 3) carbón elemental, 4) sulfato, 5) nitrato y 6) amonio; presentándose en mayor proporción el material de origen geológico, el cual representa el 50% de las partículas de este tamaño.

Chow *et al.* (2002), realizaron un estudio sobre la composición química de las partículas en la Ciudad de México durante el invierno de 1997. Las mediciones de las partículas  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  fueron realizadas en intervalos de 24 horas en seis estaciones de monitoreo y obtuvieron resultados referentes a la composición química de las partículas finas y gruesas recolectadas. Para este estudio en particular, los autores consideraron que la fracción gruesa comprende a las partículas mayores a  $2.5\mu\text{m}$  pero menores o iguales a  $10\mu\text{m}$  en diámetro aerodinámico. A partir

del análisis de los resultados obtenidos, concluyeron que aproximadamente el 48% de la cantidad de partículas  $PM_{10}$  recolectadas estaba constituida por material de origen geológico (natural). En la Figura 3 se representa la composición química de las partículas gruesas como resultado de este estudio. Vega *et al.* (2002) muestran que el polvo proveniente del ex lago de Texcoco es una de las principales fuentes de emisión de este tipo de partículas que afecta los sitios de Cerro de la Estrella, Xalostoc y Netzahualcoyotl.

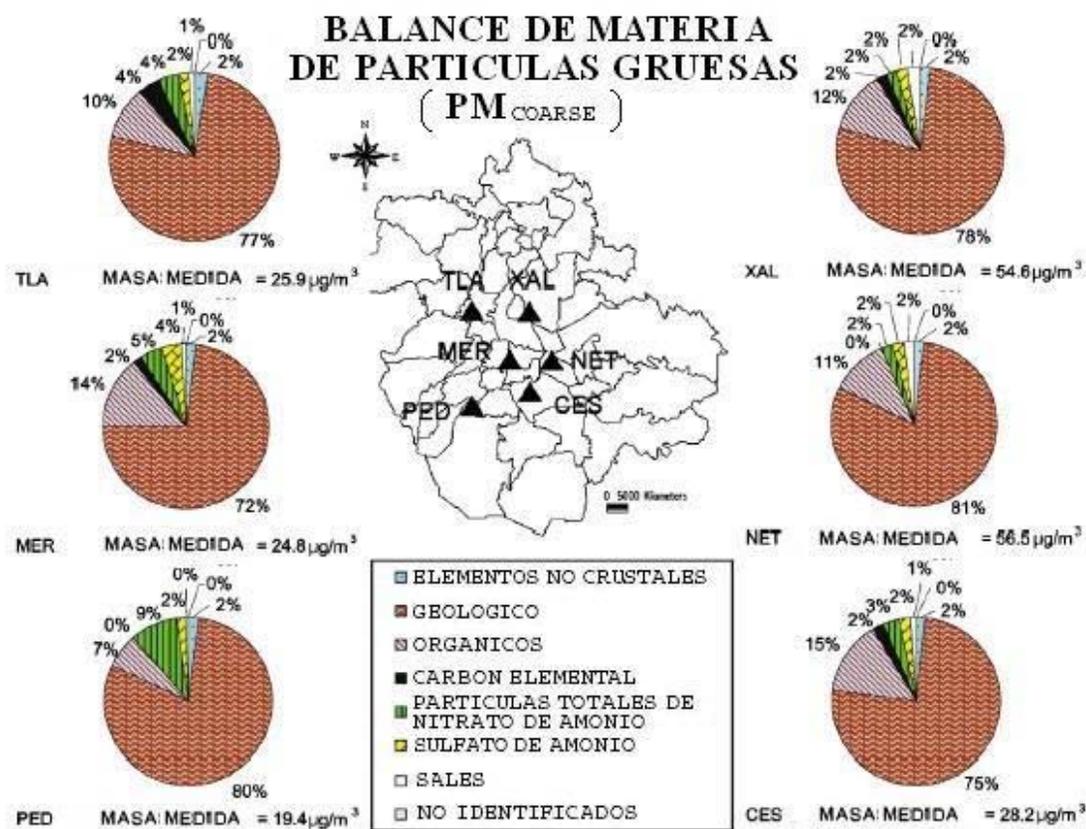


Figura 3. Composición de las partículas gruesas en la Cd. de México (Chow, 2002).

Considerando lo anterior, y sabiendo que la modelación de la calidad del aire es una herramienta esencial para los estudios de contaminación del aire, surge la necesidad de llevar a cabo la modelación de partículas emitidas por erosión eólica, por lo que se establecen los siguientes puntos:

---

---

### ***META.***

- Determinar la distribución espacial y temporal de concentraciones de partículas  $PM_{10}$  emitidas por erosión eólica en el Valle de México.

### ***OBJETIVOS.***

- Conocer el funcionamiento del modelo computacional de meteorología y calidad del aire (MCCM) y del modelo de erosión eólica (WEPS).
- Acoplar los modelos MCCM y WEPS para la simulación de partículas emitidas por erosión eólica.
- Estimar la distribución temporal y espacial de partículas  $PM_{10}$  emitidas por erosión eólica en el Valle de México mediante la aplicación del sistema obtenido del acoplamiento de los modelos.
- Localizar las zonas mayormente impactadas por la presencia de partículas emitidas por erosión eólica.
- Comparar los resultados obtenidos de la aplicación del sistema, con información reportada por la Red de Monitoreo local.
- Elaborar recomendaciones que puedan crear nuevos campos de investigación que permitan mejorar la aplicación de este trabajo como una herramienta en la predicción de eventos de contaminación del aire.

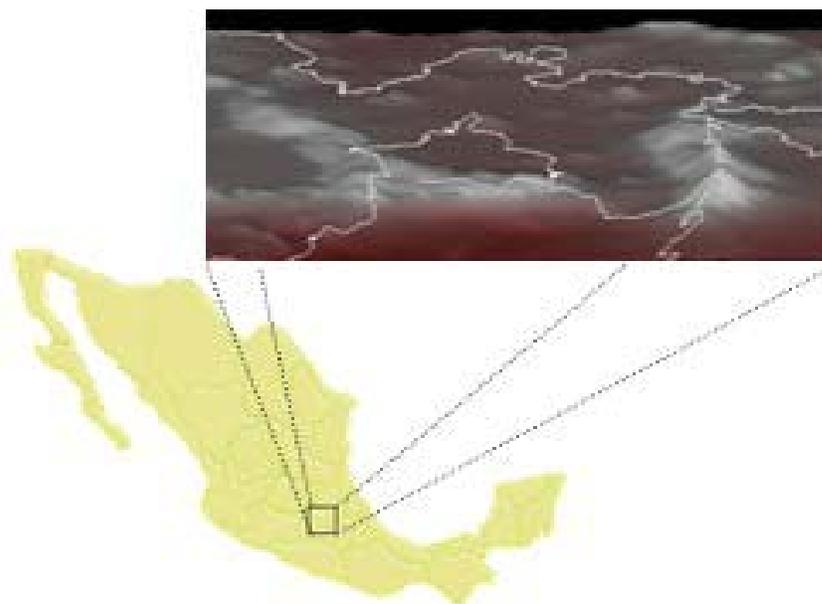
---

### **III. ANTECEDENTES.**

---

### **3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.**

El Valle de México tiene un área de aproximadamente 9,560 km<sup>2</sup> y tiene una elevación promedio de 2,240mts sobre el nivel del mar (msnm); presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Se encuentra naturalmente abierta hacia el norte, donde se ubican áreas propensas a la erosión eólica. Las montañas que rodean a la ciudad forman una barrera física con una altura de aproximadamente 3,700 msnm; dos picos aislados al este (los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl) que alcanzan elevaciones de aproximadamente 5,300mts. El valle se ubica en la región central de México como se muestra en la Figura 4, sobre los 19°20' de Latitud Norte y 99°05' de Longitud Oeste, por lo que está sujeta a sistemas anticiclónicos generados en el Golfo de México y el Océano Pacífico durante los meses comprendidos en la temporada de invierno. Estos sistemas producen las condiciones para una atmósfera estable, generando inversiones térmicas e induciendo a episodios severos de contaminación.



**Figura 4. Localización del Valle de México.**

Es una de las áreas metropolitanas más grandes del mundo Abarca al Distrito Federal en su totalidad además de algunas partes del Estado de México, el sur del estado de Hidalgo y el

---

sureste del estado de Tlaxcala; alberga aproximadamente la quinta parte de la población nacional, más de 20 millones de habitantes (INEGI, 2000). Esto se ve reflejado notablemente en la contaminación generada por el transporte y la industria como se observa en la Figura 5. En el aspecto ambiental, la ciudad está afectada por su geografía y por una combinación de factores político-sociales y



**Figura 5. Contaminación en el Valle de México.**

demográficos que no solamente afectan a la población sino además a sus alrededores naturales. A nivel nacional, reúne la mayor cantidad de fuentes naturales y antropogénicas de contaminación atmosférica; áreas erosionadas, basura, fábricas, termoeléctricas, industrias químicas, fundidoras, incineradores industriales y domésticos.

Algunos de los factores que afectan la concentración de contaminantes del aire en esta región son los siguientes:

- Estancamiento del aire debido al entorno montañoso que constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes.
- Atmósfera muy estable.
- Ocurrencia de inversiones térmicas, especialmente durante el invierno cuando el suelo se encuentra frío, son un fenómeno natural que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera.
- Abundante radiación solar, lo cual favorece a la formación de contaminantes fotoquímicos.
- Formación de líneas de confluencia sobre la Ciudad de México.
- La altitud a la que se ubica el Valle de México, determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar, lo cual tiende a hacer menos eficientes los procesos de combustión.

---

## **3.2. PARTÍCULAS.**

### *3.2.1. Definición.*

Una partícula es cualquier material disperso, sólido o líquido, que existe en la atmósfera bajo condiciones normales cuyo tamaño puede ser microscópico o submicroscópico. Pueden clasificarse en dos tipos (Chow, 1995; Seinfeld, 1998):

- Fracción Fina. Comprende partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a  $2.5\mu\text{m}$ .
- Fracción Gruesa. Comprende partículas cuyos diámetros aerodinámicos son mayores a  $2.5\mu\text{m}$ .

Existe otra clasificación que puede dársele a las partículas ó a cualquier otro contaminante del aire, ésta es: primarios y secundarios. Las partículas primarias son aquellas que son emitidas directamente de la fuente a la atmósfera, mientras que las secundarias son aquellas partículas producidas o formadas en la atmósfera.

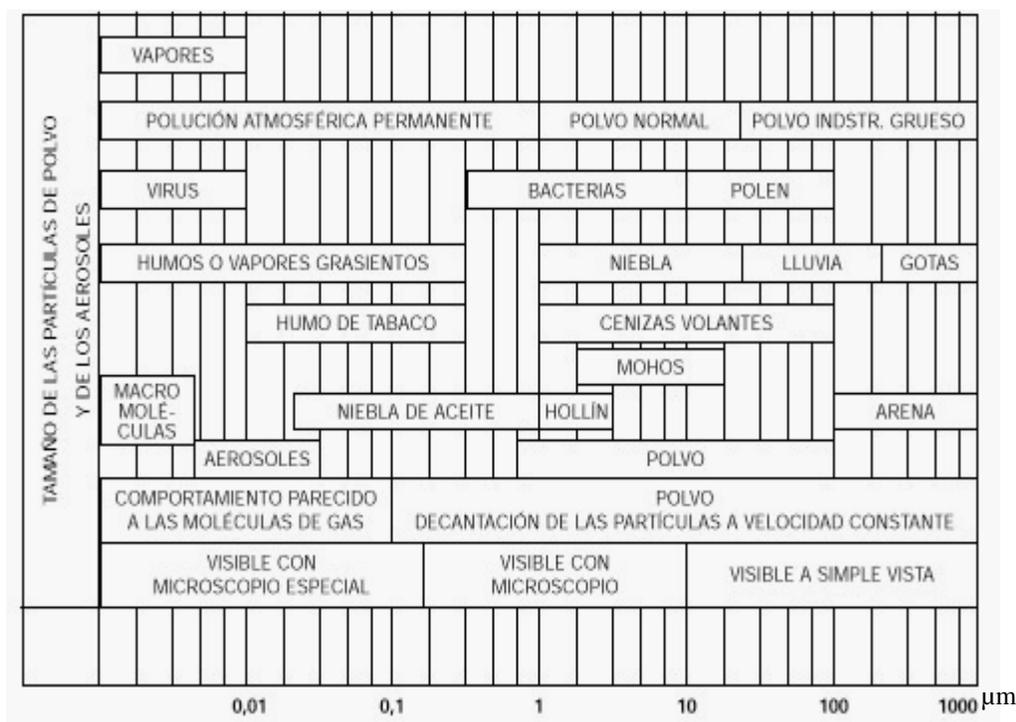
El transporte de partículas por el aire no solamente resulta de las emisiones directas, sino también, de las emisiones de ciertos gases que pueden condensarse directamente a partículas (líquidas) o indirectamente bajo transformaciones químicas para generar especies condensables.

Aunque la composición de las partículas varía en función de su origen y tamaño, están constituidas principalmente por metales, compuestos orgánicos, material de origen natural y biológico, iones, gases reactivos y la estructura misma de la partícula, normalmente formada por carbón elemental. La fracción fina está formada por una estructura básica de carbono, metales diversos, hidrocarburos y partículas secundarias °.

### *3.2.2. Tamaño de partículas.*

El tamaño de las partículas es el parámetro más importante en términos de su comportamiento y, por lo tanto, de su distribución en la atmósfera. Pueden estar constituidas de un gran número de componentes, las de origen natural, que representan aproximadamente 65% en peso, se componen de suelos y, de manera ocasional, de elementos biológicos. Por su parte, las partículas provenientes de la combustión y de diversos procesos industriales son menores en masa pero, en general, tienen efectos tóxicos más significativos (Jiménez, 2001). Algunos ejemplos del tamaño de las partículas pueden observarse en la Figura 6.

Las partículas finas tienen períodos de vida media en la atmósfera de días a semanas, viajan distancias de 100km o más, y tienden a ser espacialmente homogéneas en áreas urbanas, por lo que sufren transformaciones, que normalmente ocurren durante el transporte a largas distancias. Por otro lado, las partículas gruesas generalmente se depositan más rápidamente, con una vida media en la atmósfera de sólo minutos u horas y, por ende, presenta mayor variabilidad espacial dentro de una misma región (INE, 2003).



**Figura 6. Tamaño de partículas que pueden encontrarse suspendidas en el aire.<sup>i</sup>**

El tamaño de las partículas usualmente es expresado en términos de diámetros equivalentes. Las partículas no esféricas frecuentemente son caracterizadas en términos de esferas equivalentes, es decir, en base a la igualdad de volúmenes, de masa ó de igual velocidad de sedimentación; dicho lo anterior, puede definirse el término de diámetro aerodinámico el cual, es de uso común para definir el diámetro de partículas.

---

---

Diámetro aerodinámico es el diámetro de una esfera de densidad unitaria ( $\rho=1\text{gr/cm}^3$ ) que alcanza a números de Reynolds bajos en aire en condiciones neutras, la misma velocidad de sedimentación ( $V_s$ ) que la partícula en consideración (Hesketh, 1986).

El tamaño de partículas se ve influenciado por diferentes factores, tales como la condensación, coagulación, sedimentación, tipo de fuente entre otros. Las partículas finas pueden dividirse en dos formas: núcleos y acumulados. Los núcleos comprenden las partículas cuyo tamaño se encuentra entre 0.005 y 0.1 $\mu\text{m}$  de diámetro; éstas son formadas por la condensación de vapores durante los procesos de combustión. Los acumulados, comprenden a las partículas cuyo tamaño se encuentra entre 0.1 y 1 $\mu\text{m}$  de diámetro. Las partículas acumuladas son generadas por la coagulación de las partículas en forma de núcleos y por la condensación de vapores sobre partículas ya existentes, causando un crecimiento en el tamaño de dichas partículas. Las partículas gruesas, son formadas por procesos mecánicos y usualmente consisten en partículas naturales o antropogénicas.

### *3.2.3. Fuentes generadoras de partículas.*

Como se mencionó anteriormente, las fuentes generadoras de partículas a la atmósfera pueden clasificarse en naturales y antropogénicas, las cuales se muestran en la Figura 7 en la que se presentan algunos ejemplos de estos tipos de fuentes.

Entre las fuentes naturales de mayor significancia se encuentran las erupciones volcánicas, las tormentas de arena en los desiertos, las tolvaneras en lugares propensos a la erosión, los incendios, las reacciones entre emisiones de gases naturales que favorecen la formación de contaminantes secundarios, entre otras. La Tabla 1 presenta emisiones estimadas de partículas menores a 20 $\mu\text{m}$  de diámetro generadas por fuentes naturales.



Figura 7. Fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera.

Tabla 1. Estimados globales de partículas de origen natural de diámetro menor a  $20\mu\text{m}$  emitidas o formadas en la Atmósfera (Seinfeld, 1986).

Fuente	Emisiones estimadas (Tg/año)
Polvos	50 - 250
Incendios Forestales	1 - 50
Sal marina	300
Emisiones volcánicas	25 - 150
Partículas formadas de emisiones gaseosas ( $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{NH}_3$ , $\text{NO}_x$ y HC)	345 - 1100
Total	721 - 1850

Las emisiones de partículas que se atribuyen a las actividades humanas o fuentes antropogénicas se presentan en cuatro categorías: combustión de combustibles y procesos industriales, emisiones de partículas fugitivas de procesos industriales, fuentes fugitivas no industriales (polvos provenientes de calles pavimentadas y sin pavimentar, erosión eólica de áreas agrícolas, etc.) y fuentes móviles (autos, camiones, etc.) (Seinfeld, 1986). Emisiones estimadas para éstas categorías se presentan en la Tabla 2.

---

---

**Tabla 2. Emisiones de partículas anuales estimadas en los Estados Unidos (Seinfeld, 1986).**

<b>Fuente</b>	<b>Emisiones estimadas (Tg/año)</b>
Combustión de combustibles y procesos industriales.	10
Emisiones de partículas fugitivas de procesos industriales.	3.3
Fuentes fugitivas no industriales.	110 – 370
Fuentes móviles.	1.3
<b>Total</b>	<b>125 – 385</b>

De las tablas anteriores puede observarse que la emisión de partículas naturales a la atmósfera, representa un grave problema para la calidad del aire de regiones en donde se localicen sitios propensos a la erosión por acción del viento.

Para este caso de estudio en particular, se tratarán únicamente las partículas de origen natural cuyo diámetro aerodinámico es menor a  $10\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), generadas por fuentes como el ex lago de Texcoco y zonas agrícolas y de pastizales por efecto del desgaste del suelo producido por la erosión eólica.

### *3.2.3.1. Erosión eólica.*

La carencia de restricciones en el uso de los recursos naturales, junto con una tecnología de alta capacidad de transformación, a menudo inadecuada, o el abuso de prácticas agrícolas, como la labranza del suelo en ambientes inestables, provocan una degradación generalizada en diversos ecosistemas agrícolas, que en forma global podría calificarse como desertificación. Entre los procesos que contribuyen a este fenómeno pueden citarse la erosión, la salinización, la acidificación y el deterioro físico de los suelos. De estos procesos, la erosión del suelo, es quizás el más importante de todos, dado que es irreversible y generalmente de gran magnitud.

La erosión que se presenta bajo condiciones naturales, es decir, cuando la superficie de la tierra y la cubierta vegetal natural no han sido alteradas por las actividades humanas, se llama erosión geológica o natural. Por otra parte, cuando los bosques se talan o las praderas se abren al cultivo, se aceleran los procesos de erosión y se ocasiona una erosión artificial del suelo. Siempre

---

---

que la erosión sea acelerada, como resultado de las actividades humanas que eliminen toda o parte de la superficie del suelo, a este proceso se le llamará erosión del suelo (Millar, 1975).

La erosión eólica es el proceso por el cual el viento recoge y transporta el material superficial del suelo, y las partículas por él llevadas desgastan la superficie del terreno, ocurre en suelos sin protección o parcialmente cubiertos por vegetación. Cabe señalar que el viento causará erosión sólo si el suelo está ya suelto o si lleva partículas en suspensión, pero difícilmente lo hará sin estas condiciones.

La erosión del suelo generada por los vientos se inicia cuando la velocidad del viento excede la velocidad umbral para las condiciones del suelo dadas. *Beasley* (1972), indica que la velocidad mínima de viento requerida para iniciar el movimiento de las partículas del suelo más susceptibles ( $\approx 0.1\text{mm}$ ), es cerca de 16.5 km/hr a una altura de 30cm sobre la superficie del suelo. Una vez iniciado, la duración y severidad del evento de erosión depende de la velocidad del viento y de la evolución de las condiciones superficiales.

La erosión eólica es una función principalmente del clima, el suelo y la vegetación. En relación con el clima, además de que se requieren vientos suficientemente fuertes para mover las partículas del suelo, este factor influye propiciando la erosión eólica cuando se presentan condiciones de baja precipitación y fuerte oscilación de temperaturas día-noche.

A su vez, por lo que respecta al suelo y a las condiciones de sitio, la erosión eólica es favorecida cuando se tienen áreas extensas de terrenos planos, con suelo seco, suelto y finamente dividido. Finalmente por lo que respecta a la vegetación, el proceso será más grave si la cubierta vegetal es escasa o nula (Becerra, 1999).

Son muchos los efectos físicos nocivos que puede causar la erosión eólica sobre una región, los cuales tendrán repercusiones económicas cuando éstos ya están presentes o bien para realizar su prevención y control. Un resumen de los mismos es presentado por Becerra (1999), el cual se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3. Efectos físicos y económicos provocados por la erosión eólica. Fuente: Becerra, 1999.**

Efectos Físicos	Consecuencias Económicas
<b>Daños al suelo</b>	
1. Pérdida de material fino, incluyendo materia orgánica.	a) Pérdidas a largo plazo de la fertilidad del terreno, con la consecuente disminución de la rentabilidad de la explotación.
2. La estructura del suelo puede deteriorarse.	
3. Los fertilizantes y herbicidas pueden perderse o redistribuirse.	a) Pérdidas a largo plazo de la fertilidad del terreno, con la consecuente disminución de la rentabilidad de la explotación. b) Costos de reposición de los fertilizantes y herbicidas perdidos.
<b>Daños al cultivo</b>	
1. El cultivo puede ser cubierto por el material depositado.	a) La baja productividad de la tierra da menores ganancias. b) Costos de reposición y baja producción por el desfase del período de crecimiento.
2. El impacto de la arena puede cortar plantas o dañar follaje.	
3. Las semillas y plántulas pueden ser arrancadas y depositadas en setos o en otros campos.	a) La baja productividad de la tierra da menores ganancias. b) Costos de reposición y baja producción por el desfase del período de crecimiento. c) Costos mayores de herbicidas.
<b>Otros daños.</b>	
1. El material fino se deposita en estructuras.	a) Costos de limpieza y mantenimiento.
2. <i>El trabajo agrícola puede suspenderse por las condiciones desagradables durante alguna tolvana.</i>	a) Pérdida de horas de trabajo y por lo tanto menor productividad.

### 3.2.3.2. Proceso erosivo.

Aunque el proceso erosivo es el mismo (desprendimiento, transporte y deposición de las partículas del suelo), independientemente del agente activo, en el caso del viento la energía cinética es función básicamente de la velocidad del fluido. Por ello la magnitud de la erosión eólica, depende en gran medida de la velocidad del viento y del tamaño de las partículas. A continuación se describen las etapas que componen a este proceso.

---

---

### *Desprendimiento.*

Las partículas de suelo se mueven en tres formas durante la erosión eólica. Cuando una partícula golpea el suelo por efecto del viento, su cantidad de movimiento puede dispersarse en varias formas. Por ejemplo, al chocar, la partícula puede rebotar hacia la corriente de aire dando un salto, este movimiento se conoce como saltación. Por otro lado, el impacto de una partícula puede poner en movimiento a otras, ya sea también por saltación o bien por rodamiento superficial si las partículas son grandes. Las partículas relativamente grandes son muy pesadas para ser levantadas por la acción del viento, pero ruedan o son empujadas sobre la superficie. Finalmente, el impacto de la partícula puede también romper los agregados del suelo.

En este movimiento, los saltos de las partículas sobre la superficie del terreno pueden alcanzar hasta 40cm de altura, y recorrer hasta 200cm de distancia. La saltación es considerada como el movimiento más importante en la erosión eólica, tanto por ser el que desencadena el proceso como por ser el responsable de remover la mayor parte del suelo.

En el caso de partículas muy pequeñas (menores de 0.1mm de diámetro), aunque también inicien su movimiento por saltación, si la fuerza de la velocidad terminal de caída por efecto de la gravedad es menor que las corrientes medias de remolinos hacia arriba en la corriente de aire, las partículas quedan suspendidas en el viento durante un tiempo considerable, siendo transportadas a grandes distancias. A este movimiento se le llama suspensión, y las fracciones del suelo movidas por él constituyen una pérdida definitiva para el área en un solo evento (Becerra, 1999).

De acuerdo con lo anterior, para el estudio de la erosión eólica se distinguen tres tipos de movimiento de las partículas: saltación, suspensión y arrastre. Los cuales se presentan en la Figura 8. De los hechos anteriores, resulta evidente que la erosión eólica se debe principalmente al efecto del viento sobre las partículas de un tamaño apropiado para moverse en saltación (Foth, 1984; Millar, 1975).

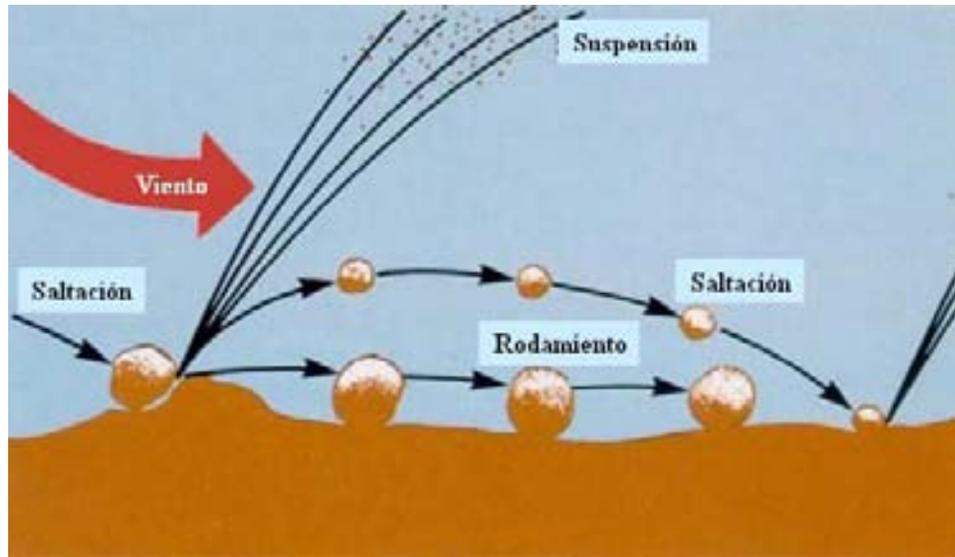


Figura 8. Movimiento de las partículas durante el proceso erosivo tomado de Wind Erosion Research Unit, 2003.

En la Tabla 4 se muestran los tamaños de partículas afectados por cada uno de los tipos de movimientos que han sido previamente descritos, los cuales van a generar el desprendimiento del material del suelo como inicio del proceso de erosión.

Tabla 4. Movimiento de las partículas en función de su tamaño (Becerra,1999).

Diámetro (mm)	<0.05	0.05	0.1	0.15	0.5	1.0	2.0
Suspensión	← ●						
Saltación	← ●						
Rodamiento					●	●	●

*Transporte.*

La cantidad de suelo removido por el viento depende de diversos factores, entre ellos:

- a) Tamaño de las partículas.
- b) Agregación del suelo.
- c) Velocidad del viento.

---

---

El material que se encuentra suspendido es transportado por el viento y la distancia de transporte depende de la distribución de velocidad de éste. El cambio de velocidad del viento es una función del terreno (turbulencia mecánica) y de la hora del día (turbulencia térmica).

#### *Deposición.*

La deposición de las partículas transportadas por el viento ocurrirá al disminuir la velocidad de éste, sea por cambios en las condiciones atmosféricas o bien por algún obstáculo físico; entonces se inicia la caída de las partículas por efecto de la gravedad. La deposición ocurre de manera proporcional al diámetro de partículas, cayendo primero las más gruesas (Becerra, 1999).

La deposición de todo o parte del material durante el transporte se dará si ocurre alguno de los siguientes factores:

- a) El flujo atmosférico disminuye, reduciendo su capacidad de transporte.
- b) La velocidad del viento disminuye por obstrucciones.
- c) La superficie queda estabilizada por el inicio de lluvias.

#### *3.2.4. Transporte de partículas en el aire.*

El movimiento de una partícula se debe a la acción de una fuerza externa que actúa sobre ella, tal como la gravedad. La fuerza de arrastre surge tan pronto como haya una diferencia entre la velocidad de la partícula y la del fluido. Para describir el comportamiento de una partícula en un fluido se utilizan las ecuaciones de movimiento. Para derivar la ecuación de movimiento para una partícula de masa  $m_p$ , es necesario plantear el balance de fuerzas que actúan sobre ella, la cual se expresa en forma vectorial de la siguiente manera:

$$m_p \frac{dv}{dt} = \sum_i F_i \quad a$$

donde  $\mathbf{v}$  es la velocidad de la partícula y  $\mathbf{F}_i$  es la pésima fuerza que actúa sobre la misma.

Para una partícula cayendo en un fluido, existen dos fuerzas que actúan sobre ella, la fuerza gravitacional  $m_p \mathbf{g}$  y la fuerza de arrastre  $\mathbf{F}_{\text{arrastre}}$ . Por lo tanto, para números de Reynold bajos ( $Re < 0.1$ ), la ecuación de movimiento se convierte en

$$m_p \frac{dv}{dt} = m_p g + \frac{3\pi\mu D_p}{C_C} (u - v) \quad \text{b}$$

donde el segundo término de la ecuación (b) es la fuerza de arrastre corregida de Stokes sobre una partícula que se mueve a una velocidad  $v$  en un fluido con velocidad  $u$ ,  $D_p$  es el diámetro de la partícula y  $C_C$  es el factor de corrección. La ecuación (b) asume que aunque el movimiento de la partícula no sea uniforme, esta aceleración es lo suficientemente lenta, por lo que la ley de Stokes se aplica en cualquier momento. Esta ecuación también puede escribirse

$$\tau \frac{dv}{dt} = \tau g + u - v \quad \text{c}$$

donde

$$\tau = \frac{m_p C_C}{3\pi\mu D_p} \quad \text{d}$$

es el tiempo de relajación característico de la partícula (Seinfeld, 1998).

Un método básico para remover las partículas consiste simplemente en el asentamiento por gravedad. Esta técnica se utiliza tanto por la naturaleza como por los diseñadores de equipos industriales. Hay un parámetro importante que determina su utilidad; se trata de la velocidad terminal o de asentamiento de una partícula ( $v_t$ ). se define como la velocidad descendente constante que alcanza la partícula en una dirección paralela al campo gravitacional terrestre, según sobrepase las fuerzas debidas a la flotación y la resistencia de fricción (Wark, 1994). Considerando el caso de una partícula en un fluido en reposo ( $u = 0$ ), comenzando con una velocidad cero y tomando al eje  $z$  como un descenso positivo; la ecuación de movimiento es

$$\tau \frac{dv_z}{dt} = \tau g - v_z \quad v_z(0) = 0 \quad \text{e}$$

y su solución es

$$v_z(t) = \tau g \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad \text{f}$$

Cuando  $t \gg \tau$ , la partícula alcanza la velocidad terminal  $v_t = \tau g$ , o bien

$$v_t = \frac{m_p C_C g}{3\pi\mu D_p} \quad \text{g}$$

---

Para una partícula esférica de densidad  $\rho_p$  en un fluido de densidad  $\rho$ ,  $m_p = (\pi/6)D_p^3(\rho_p - \rho)$ , donde el factor  $(\rho_p - \rho)$  es necesario para considerar la gravedad y la flotabilidad. Sin embargo, debido a que generalmente  $\rho_p \gg \rho$ ,  $m_p = (\pi/6)D_p^3\rho_p$  por lo que la ecuación (g) puede escribirse de la siguiente forma (Seinfeld, 1998):

$$v_t = \frac{1}{18} \frac{D_p^2 \rho_p g C_c}{\mu} \quad \text{h}$$

Esta expresión se conoce como la ley de Stokes. Hablando en términos generales, esta ecuación es muy exacta para partículas esféricas con diámetros menores de 50 $\mu\text{m}$  y se usa frecuentemente con poco error para tamaños de partículas de hasta 100  $\mu\text{m}$  o algo menor (Wark, 1994). Este intervalo de aproximadamente de 1 a 100  $\mu\text{m}$  es un intervalo importante de tamaños para los polvos emitidos por la erosión eólica.

### 3.2.5. Efectos producidos por la presencia de partículas en el aire.

Algunos de los efectos provocados por la presencia de partículas en la atmósfera se describen a continuación.

#### *Visibilidad.*

Las partículas muy finas de polvo, así como los aerosoles que flotan en el aire de las ciudades, son los contaminantes más persistentes debido a su estabilidad y a su velocidad de sedimentación casi despreciable. Es sabido que estas partículas finas en suspensión producen (junto con otros gases) la bruma urbana, reduciendo la transparencia del aire (Jáuregui, 1983).

Se entiende por visibilidad atmosférica la distancia más lejana a la cual un objeto puede ser percibido contra el cielo como horizonte sin efectuar una distinción exacta de los detalles del mismo. Las partículas que se encuentran suspendidas en el aire reducen la visibilidad al dispersar y absorber la luz que viene de un objeto y de su fondo, aminorando el contraste de ambos.

#### *Salud.*

Las partículas menores a 10 $\mu\text{m}$  pasan hasta lo más profundo del sistema respiratorio, alojándose en las regiones traqueobronquiales y alveolares de los pulmones. Muchas

---

investigaciones científicas han relacionado la inhalación de partículas con problemas en la salud humana, entre las cuales encontramos el agravamiento del asma, incremento en síntomas respiratorios como la dificultad para respirar, bronquitis crónica, mal funcionamiento pulmonar, entre otros<sup>c</sup>. En realidad, el efecto causado por la inhalación de partículas será determinado por su grado de penetración al sistema respiratorio, y éste a su vez, será función del tamaño de partícula y de su composición.

#### *Clima.*

Las partículas reflejan y absorben parte de la radiación solar y terrestre, por lo que afectan el balance de calor de la tierra (Perkins) y tiene como consecuencia un decremento de la temperatura de la misma. Además actúan como núcleos de condensación de nubes (Jiménez, 2001).

#### *Vegetación.*

Falcón (1992) menciona que las partículas gruesas, depositadas directamente en la superficie de las hojas, pueden reducir el intercambio gaseoso, incrementar la temperatura de la superficie de la hoja, reducir la actividad fotosintética y el crecimiento, y finalmente, provocar la necrosis (muerte) de las hojas (Comisión Nacional de Derechos Humanos, 1992).

#### *Materiales.*

Una vez que los contaminantes son descargados a la atmósfera, éstos pueden reaccionar entre ellos para dar lugar a la formación de especies secundarias. Los contaminantes gaseosos o líquidos pueden absorberse o adsorberse en las partículas alterando su composición química.

El proceso mediante el cual las partículas se depositan por medio de la lluvia sobre las superficies de los materiales se llama depositación húmeda. Sin embargo, también ocurre la depositación seca. En la depositación seca, las partículas se depositan o se adsorben sobre las superficies de los materiales y dependiendo de su composición química, pueden o no reaccionar con los compuestos inorgánicos de dichos materiales propiciando su destrucción.

---

En cuanto a la depositación húmeda, esta se presenta cuando algunos compuestos, sobre todo los contaminantes sulfurados y nitrogenados al entrar en contacto con el agua, dan lugar a los ácidos sulfúrico y nítrico, respectivamente. Éstos ácidos disminuyen el pH de la lluvia dando lugar a la lluvia ácida. Todos los materiales expuestos a cielo abierto son susceptibles a deteriorarse por efecto de la lluvia ácida (Bravo, 2003).

### *3.2.6. Normatividad Ambiental.*

La Norma Oficial Mexicana **NOM-025-SSA1-1993** referente al criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micras ( $PM_{10}$ ), establece que “la concentración de partículas menores de 10 micras, como contaminantes atmosféricos, no deben rebasar el límite permisible de **150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 24 horas una vez al año y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en una media aritmética anual**, para protección a la salud de la población susceptible.”

Hoy día, el conocimiento de las causas y efectos de los fenómenos naturales no es suficiente. Sin embargo, para describir el comportamiento de estos acontecimientos durante su ocurrencia o para predecirlos existen herramientas como los modelos matemáticos, que simulan las condiciones de campo que se aproximan a las condiciones reales de dichos eventos (Zanetti, 1990; Ford, 1999).

En el siguiente capítulo, se presenta una breve descripción de los modelos que serán las herramientas fundamentales para la finalidad de este trabajo.

---

## **IV. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS.**

---

---

La modelación puede ser definida como el proceso de aplicación del conocimiento para simular la representación de un sistema real, con la finalidad de describir su comportamiento, causas y efectos.

Los avances tecnológicos de los últimos años han permitido desarrollar modelos de muy alta confiabilidad, lo cual representa la obtención de resultados cercanos a los que ocurren dentro del sistema real (Nirmalakhandam, 2002), siempre y cuando se cuente con la información que es requerida por dichos modelos.

En la actualidad, son muy pocas las investigaciones realizadas sobre la afectación de la calidad del aire por la presencia de partículas naturales mediante la aplicación de modelos que puedan predecir la erosión eólica de los suelos. Park (2004) realizó la parametrización del polvo asiático para el uso de modelos de emisión en Korea; Vautard (2005) realizó un estudio sobre la contribución de las fuentes eólicas naturales sobre la concentración de partículas en Europa mediante el uso de un modelo químico y de transporte. En México, López (2002) realizó un estudio sobre el transporte y dispersión de polvo en la Ciudad de México, para lo cual utilizó la ecuación de predicción de la erosión eólica para el cálculo de las emisiones y los modelos CALMET/CALPUFF para el transporte de los contaminantes.

Dentro del campo del estudio de suelos, existen modelos que permiten predecir la pérdida de suelo dependiendo de la velocidad del viento y contenido de humedad entre otras variables (erosión eólica). Tal es el caso del modelo “WEPS” (*Wind Erosion Prediction System*).

En el estudio del aire se pueden mencionar a los modelos de calidad del aire como el modelo “MCCM” (*Multiscale Climate and Chemistry Model*), los cuales consisten de un grupo de ecuaciones matemáticas las cuales ayudan a predecir el comportamiento de los contaminantes emitidos a la atmósfera y que se transportan a largas distancias. El movimiento del aire causa una dilución de los contaminantes, por lo que resulta de gran interés conocer cuánta dilución se lleva a cabo como una función de la meteorología o de las condiciones atmosféricas. Estos modelos incluyen las diferentes condiciones meteorológicas, incluidos los factores relacionados con la temperatura, la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica y la topografía.

---

---

Los modelos WEPS y MCCM, pueden ser acoplados para trabajar sobre la dispersión de partículas cuyo origen son fuentes naturales, para lo cual es de gran importancia conocer cada una de las partes que los conforman. Cabe señalar, que no se ha reportado ninguna investigación en la que ambos modelos trabajen en forma simultánea para predecir la contaminación del aire por partículas de origen natural emitidas por erosión eólica. Es de gran importancia el acoplamiento de estos modelos ya que el sistema obtenido, podrá ser utilizado como una herramienta para predecir eventos de contaminación generados por la presencia de partículas naturales en el aire.

A continuación, se presenta una breve descripción del modelo WEPS y del modelo de calidad del aire MCCM, los cuales serán las herramientas fundamentales para la finalidad de este trabajo.

#### ***4.1. Sistema de Predicción de la Erosión Eólica (Wind Erosion Prediction System).***

La erosión eólica es un serio problema que se presenta sobre las tierras agrícolas alrededor del mundo. La predicción de la pérdida de suelo es de gran importancia para los planes de conservación, inventarios de fuentes naturales y para la reducción de la contaminación del aire por la presencia de partículas emitidas por efectos del viento sobre áreas desprotegidas.

El Sistema de Predicción de la Erosión Eólica “Wind Erosion Prediction System” (WEPS), fue desarrollado por la Unidad de Investigación de la Erosión Eólica (WERU) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), con la finalidad de obtener un sistema que manejara los últimos avances en la ciencia de la erosión eólica y la tecnología computacional, y de este modo, generar lo que representaría un avance significativo en la tecnología de la predicción de la erosión eólica.

Este modelo de erosión ha sido utilizado en diferentes investigaciones realizadas principalmente sobre regiones de los Estados Unidos. Van Donk (2003) cuantificó la erosión eólica a condiciones típicas en instalaciones militares localizadas en el Desierto Mojave, California, USA, ya que las actividades militares en esos sitios han hecho que el suelo se vuelva

---

más vulnerable a la erosión; así mismo, Van Donk (2003) aplicó el modelo WEPS para simular la erosión eólica sobre campos agrícolas en la región de Burlington, Colorado, USA. Hagen (2004) utilizó mediciones de pérdida de suelo de 46 eventos de tormentas sobre campos erosionables de seis estados de la unión americana para comparar las predicciones del submodelo de erosión del modelo WEPS. Finalmente Zalf (2002) realizó una comparación entre mediciones y simulaciones de la pérdida de suelo en Alemania mediante la aplicación del mismo modelo.

Como se mencionó anteriormente, la erosión del suelo provocada por el viento inicia cuando la velocidad del viento excede la velocidad umbral de saltación para las condiciones de suelo y biomasa dadas. Después de la iniciación, la duración y severidad del evento depende de la velocidad del viento y de la evolución de las condiciones de la superficie. Debido a que WEPS es un modelo continuo, no sólo simula el proceso básico de erosión eólica, sino también los procesos que modifican la susceptibilidad del suelo al estar expuesta a las corrientes de aire.

Los propósitos de WEPS son mejorar la tecnología para evaluar la pérdida de suelo por el viento de los campos agrícolas y para proporcionar nuevas capacidades, tales como la evaluación del daño generado a las plantas, el cálculo de pérdidas por suspensión y la estimación de las emisiones de  $PM_{10}$  provenientes del campo.

La estructura de WEPS es modular y consiste de una interfase del usuario, una rutina principal (MAIN), siete submodelos y cuatro bases de datos, como se muestra en la Figura 9. Tiene la capacidad de simular la variabilidad espacial y temporal de los componentes del suelo, de la cosecha y los residuos, además de la pérdida y deposición del suelo dentro del campo. Las fracciones del material erosionado correspondientes a saltación/rodamiento, suspensión y  $PM_{10}$  son reportados durante la simulación del evento. Dichos componentes desprendidos del suelo resultan de gran utilidad para la estimación de impactos en áreas cercanas a la zona en estudio por erosión eólica.

El funcionamiento del modelo y sus submodelos, puede resumirse en cinco etapas fundamentales, las cuales son descritas a continuación.

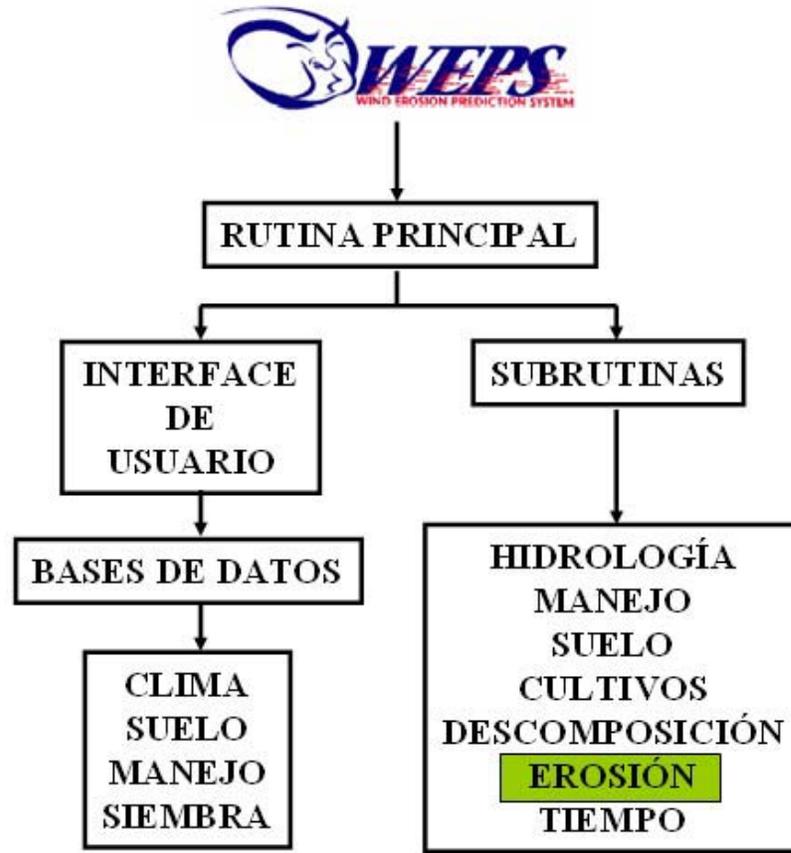


Figura 9. Estructura del modelo WEPS.

#### 4.1.1. Región de simulación.

La región es un campo ó en su mayoría, un conjunto de campos adyacentes. Los usuarios deben ingresar la geometría de la región y de cualquier subregión que presente diferencias en el tipo de suelo, en su manejo ó en las condiciones de la siembra o cosecha. También deben especificarse las condiciones iniciales del suelo superficial e información sobre la pérdida y deposición del suelo para los intervalos de tiempo y regiones que han sido seleccionados por el usuario sobre la región de simulación.

Para describir la región, las dimensiones de campo deben ser especificadas en las direcciones de X e Y. Para orientar la dirección del campo, simplemente se especifica el ángulo en grados de desviación teniendo como referencia el lado norte. El campo solamente rotará en un rango de  $\pm 45$  grados (Figura 10). Mediante la rotación y el ajuste de la longitud y ancho del campo, el usuario puede obtener la orientación y tamaño de campo deseado.

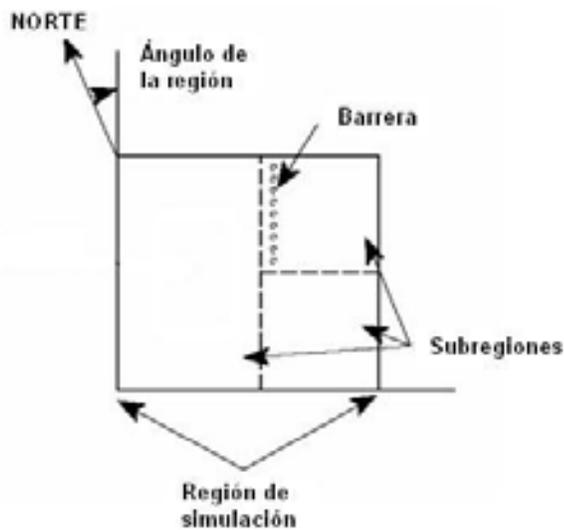


Figura 10. Geometrías de simulación.

#### 4.1.2. Espacio y tiempo.

El intervalo es controlado por el programa principal (MAIN). Para reducir el tiempo de simulación, WEPS utiliza un intervalo de tiempo por día, con excepción de subrutinas seleccionadas en los submodelos de hidrología (HIDROLOGY) y erosión (EROSION), los cuales utilizan intervalos de horas y unidades derivadas. Los submodelos son llamados por MAIN, en el orden en que se muestra en la Figura 9. Cada uno de los submodelos controla su propia secuencia de cálculos por sí solo. Sin embargo, en el submodelo de manejo (MANAGEMENT), las operaciones de campo son simuladas secuencialmente de acuerdo al orden en el cual aparecen en el plan de manejo.

Los planes de manejo usualmente cubren al menos un solo año y llegando a cubrir varios años, pueden iniciar en un día dado del año, típicamente cuando no hay siembra en el campo.

#### 4.1.3. Simulación de las condiciones climatológicas.

WEPS requiere información sobre velocidad y dirección del viento para simular la erosión eólica del suelo. Éstos y otras variables de tiempo son necesarios para manejar cambios temporales en la hidrología, erosionabilidad del suelo, crecimiento de las siembras y

---

descomposición de residuos. El generador de las condiciones climatológicas consiste de dos programas, WINDGEN y CLIGEN.

WINDGEN simula la velocidad y dirección del viento, además de sus velocidades máximas y mínimas. También provee la hora a la cual la velocidad del viento máxima ocurre para cada día basándose en datos históricos.

CLIGEN es el generador de tiempo. Se utiliza para generar una temperatura del aire promedio anual así como la precipitación diaria, temperaturas máximas y mínimas, radiación solar y la temperatura de punto de rocío.

#### *4.1.4. Simulación de condiciones de campo.*

El submodelo de hidrología (HIDROLOGY) estima la humedad de la superficie del suelo, además, considera los cambios en la temperatura del mismo y mantiene un balance suelo-agua basado en cantidades de derretimiento de nieve diarias, infiltración, percolación profunda, evaporación del suelo y transpiración de las plantas.

La agregación del suelo y el estado de la superficie pueden dramáticamente afectar la susceptibilidad a la erosión eólica. Por ello, los cambios en el suelo y en las propiedades de superficie temporales son simulados por el submodelo de suelo (SOIL), en respuesta a los varios procesos temporales como hidratación/secado, congelamiento/secado, congelamiento/derretimiento, volumen e intensidad de precipitación y tiempo. Las propiedades de la capa de suelo tales como densidad, distribución del tamaño de agregación y densidad del agregado seco, se mantienen sobre una base diaria. Las propiedades de superficie, tales como la rugosidad aleatoria, generación de corteza, fracción de cobertura, densidad, estabilidad, espesor y material erosionable suelto sobre corteza superficial también son tomadas por el submodelo SOIL.

La presencia de biomasa viva sobre la superficie del suelo influye en la cantidad de suelo que puede ser removida por la erosión eólica. Por lo tanto, el submodelo de siembra (CROP)

---

---

simula el crecimiento de las plantas en cosechas. Algunos de los factores que afectan la erosión eólica son la flexibilidad y el arreglo de las plantas, distribución de las plantas por altura y el número de plantas por unidad de área, además de la cantidad de raíces y tallos.

El submodelo de descomposición (DECOMPOSITION), simula la disminución en la biomasa de la cosecha residual originada por la actividad microbiana. El proceso de descomposición se modela como una reacción de primer orden, considerando como variables independientes a la temperatura y humedad.

Es de esperarse que en el modelo WEPS se reflejen los efectos de varias prácticas de manejo de suelo sobre la erosión eólica, y eso es hecho por el submodelo MANAGEMENT. La mayoría de las clases de operaciones de manejo se representan como cultivos primarios y secundarios, plantación/siembra, cosecha, irrigación, fertilización, quema y pastoreo. Cada operación es simulada por dicho submodelo como una serie de procesos físicos. Tales procesos incluyen:

- 1) Manipulación de la masa del suelo (cambios en la distribución del tamaño de agregación, porosidad del suelo y residuos entre capas de suelo).
- 2) Modificación de superficie (creación y destrucción de montículos y/o barreras que forman la rugosidad superficial, cambios en la rugosidad superficial y destrucción de corteza superficial).
- 3) Manipulación de biomasa (intercambio de material entre capas, corte y/o aplanamiento de residuos y remoción de biomasa).
- 4) Remediación de suelos (fertilización, irrigación y plantación).

#### *4.1.5. Simulación del proceso erosivo.*

El submodelo de erosión (EROSION) decide si el proceso de erosión puede ocurrir basándose en información actual como rugosidad superficial (orientada y aleatoria), biomasa, distribución del tamaño de agregación, cobertura y cubierta rocosa, material erosionable suelto sobre la cubierta y humedad en la superficie del suelo. La simulación en el submodelo EROSION ejecuta las siguientes funciones:

- 
- 1) Calcula las velocidades de fricción basándose en la rugosidad aerodinámica de la superficie.
  - 2) Calcula las velocidades de fricción estática umbral.
  - 3) Procesa la pérdida/deposición del suelo.

Es de gran importancia resaltar que el propósito de WEPS es simular los cambios en las condiciones del campo como resultado de su manejo y de los factores temporales para estimar la erosión eólica. Para llevar a cabo la simulación del proceso erosivo, el uso del submodelo de erosión es suficiente, ya que no es necesario manejar todas las subrutinas o submodelos que componen al modelo WEPS en su totalidad.

El objetivo del submodelo de erosión es simular el material del suelo que se pierde y se deposita sobre un campo rectangular en respuesta a la velocidad y dirección del viento, orientación del campo y a las condiciones superficiales. Cuando hay la existencia de barreras, la velocidad del viento es reducida (viento arriba y viento debajo de las barreras) en un área protegida. El submodelo determina la velocidad umbral de fricción en la cual, el proceso de erosión puede iniciarse dependiendo de las condiciones de superficie. Cuando la velocidad del viento excede el umbral, el submodelo calcula la pérdida/deposición sobre series de celdas que representan el campo. La pérdida y deposición del suelo se divide en los componentes saltación/arrastre y suspensión, debido a que cada componente presenta diferentes modos de transporte. Finalmente, la superficie del campo es periódicamente actualizada para simular los cambios ocasionados por el proceso de erosión.

#### *4.1.5.1. Datos de entrada.*

La rugosidad superficial es representada por dos partes, la rugosidad aleatoria y la rugosidad orientada. Los parámetros utilizados son la desviación estándar de las elevaciones de la superficie para la rugosidad aleatoria y la altura y espaciamiento de los montículos para la rugosidad orientada.

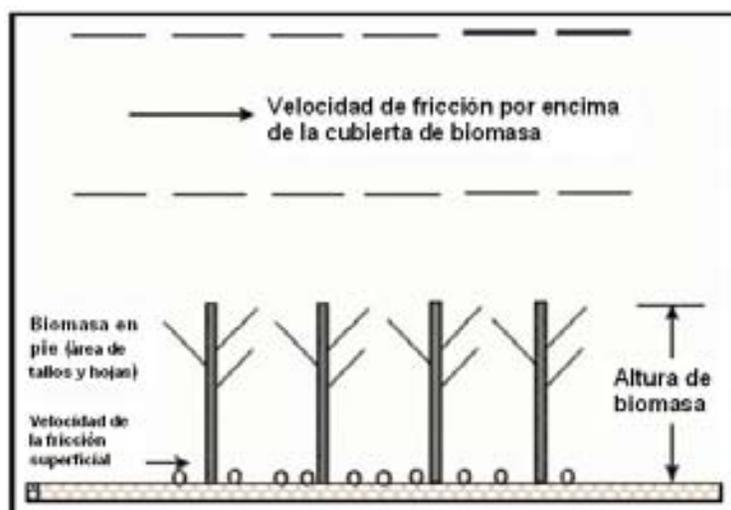
La cubierta superficial se representa en tres niveles, en el primer nivel, la superficie rocosa, agregados y la corteza comprende el 100% de la cubierta. En el segundo nivel, el

---

parámetro es la fracción de superficie cubierta con material suelto erosionable. Cuando no hay corteza, este parámetro es siempre cero. En el tercer nivel, el parámetro es la fracción de superficie total cubierta por biomasa.

La densidad de agregados y distribución de tamaños son parámetros de entrada que indican la movilidad del suelo. La estabilidad mecánica seca de terrones/corteza son parámetros de entrada que indican su resistencia a la abrasión de los impactos por la erosión del suelo. La humedad de la superficie es también una entrada y se utiliza para incrementar la velocidad umbral de fricción a la cual, la erosión comienza.

Uniformemente distribuida, la biomasa que se encuentra de pie sobre la superficie del suelo, es de cinco a diez veces más efectiva en el control de la erosión eólica que la que se encuentra tirada sobre la superficie, por lo que se tratan por separado. La velocidad de fricción del viento sobre la biomasa que se encuentra de pie, es afectada por las hojas y tallos para obtener la velocidad de fricción superficial sobre la superficie, la cual es utilizada para controlar la erosión (Figura 11). Las hojas y tallos se representan mediante índices, de área de hojas y de área de tallos en los parámetros de entrada respectivamente.



**Figura 11. Reducción de la velocidad de fricción sobre una superficie cubierta.**

Toda la información antes mencionada, se le es suministrada al submodelo de erosión en forma de un archivo de entrada en donde se encuentran los valores de cada uno de los parámetros

---

antes mencionados. Dicho archivo, será ejecutado por el submodelo para llevar a cabo la simulación del proceso erosivo. En la Figura 12 se observa un ejemplo del archivo de entrada que es ejecutado por el submodelo de erosión.

---

```
# +++ PURPOSE +++
# Input file which is read by subroutine erodin.for
# +++ SIMULATION REGION +++
# Simulation region diagonal coordinates (meters)
# specify in this form: x1,y1 x2,y2
  0.0, 0.0 276, 276
# Simulation region orientation angle (degrees from North)
  0.0
# Number of accounting regions (must be 1)
  1
# +++ ACCOUNTING REGIONS +++
# Accounting region diagonal coordinates (meters)
# specify in this form: x1,y1 x2,y2
  0.0, 0.0 276.0, 276.0
#
# +++ BARRIERS +++
# Number of barriers (0-5)
  4
# Barrier diagonal coordinates (meters)
# specify in this form: x1,y1 x2,y2
  0.0, 0.0 0.0, 276
# Barrier height (meters), porosity (m2/m2), width (meters)
  0.2, 0.50, 2.0
# Repeat the above two input lines for each barrier
  0.0, 276.0 276.0 276.0
  0.2 0.5 276.0
  0.0, 0.0 276.0 0
  0.1 0.3 276.0
  276.0, 0.0 276.0 276.0
  0.3 0.4 276.0
#
# +++ SUBREGION REGIONS +++
# Number of subregions (must be 1)
  1
# Subregion diagonal coordinates (meters)
# specify in this form: x1,y1 x2,y2
  0.0, 0.0 276.0, 276.0
#
# +++ BIOMASS +++
# Height of standing biomass (meters)
  1.0
# Stem area index (m2/m2), leaf area index (m2/m2)
# both refer to STANDING biomass only
  0.0 0.0
# Crop row spacing (meters), 0.0=broadcast; plant location (0=furrow,1=ridge)
  0.0, 0
# Flat biomass cover (m2/m2)
```

---

```

0.04
#
# +++ SOIL +++
# Number of soil layers (3-10)
3
# The following soil inputs are repeated for each layer
# layer thickness (mm)
250.0000 690.0000 710.0000
# bulk density (g/cm3)
1.05 1.05 1.05
# sand content, 0.05-2.0 mm (kg/kg)
0.217 0.217 0.217
# very fine sand, 0.05-0.1 mm (kg/kg)
0.139 0.139 0.139
# silt content (kg/kg)
0.808 0.708 0.708
# clay content (kg/kg)
0.075 0.075 0.075
# rock volume (m3/m3)
0.0 0.0 0.0
# aggregate density (g/cm3)
1.873 2.000 2.001
# aggregate stability (ln[J/kg])
0.00074 1.874 1.874
# The next 4 parameters define the aggregate size distribution for each layer
# aggregate geometric mean diameter (mm)
0.341 7.681 1.000
# minimum aggregate size (mm)
0.00001 0.010 0.010
# maximum aggregate size (mm)
0.0729 4.788 7.960
# aggregate geometric standard deviation (mm/mm)
15.125 16.175 9.981
# The next six variables are surface crust variables
# for each layer.
# fraction of soil surface that is crusted (m2/m2)
# crust (consolidated zone) thickness (mm)
# fraction of crusted surface covered by loose material (m2/m2)
# mass of loose material on crusted surface (kg/m2)
# crust density (g/cm3)
# crust stability (ln[J/kg])
0.0 0.0 0.0 0.0 1.873 1.87
# Allmaras random roughness (mm)
10.5
# The next four variables are ridge variables for each layer.
# Ridge height (mm)
# Ridge spacing (mm)
# Ridge width (mm)
# Ridge orientation (degrees from North)
0.0 0.0 0.0 0.0
# Dike spacing (mm)
0.0
#
# +++ HIDROLOGY +++
# Snow depth (mm)
0.0

```

---

---

```

#
# +++ SOIL WATER +++
#
# Soil layer wilting point water content (kg/kg)
0.053 0.048 0.045
# Soil layer water content (kg/kg)
0.0157 0.0157 0.0157
#
# HOURLY soil water content at soil surface (kg/kg)
# two lines, with 12 values on each line
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
#
# +++ WEATHER +++
# Air density (g/cm3)
1.2
# Wind direction (deg)
286.0
# Number of intervals/day, maximum = 96
48
#
# Information about the anemometer
# anemometer height (meters)
# aerodynamic roughness at anemometer site (mm)
# anemometer location flag (0 - away from field, 1 - on field)
2.0 25.0 1
#
# Wind/Weibull flag (0 -use Weibull parameters, 1 -use wind speeds)
1
# Wind speeds (m/s). The wind data are used only when the Wind/Weibull flag = 1
# Must have as many wind speeds as number of intervals/day.
# Must have 6 values per line.
# Wind data should be AVERAGES for the period.
# Hourly averages will likely underestimate wind erosion somewhat.
# 30-min averages or shorter is more suitable (As is done here).
7.84
#

```

---

**Figura 12. Archivo de entrada del submodelo de erosión para simular el proceso erosivo.**

#### 4.1.5.2. Simulación del proceso.

Durante la erosión eólica, el transporte de agregados del suelo ocurre de tres formas (véase Figura 8):

- Arrastre o rodamiento. Cuyo diámetro de partículas varía de 0.84 a 2.0 mm, las cuales se mueven a lo largo de la superficie.
- Saltación. Cuyo diámetro de partículas varía de 0.10 a 0.84 mm, las cuales saltan sobre la superficie.

- 
- Suspensión. Cuyo diámetro de las partículas es menor a 0.10mm, las cuales se mueven sobre la superficie en el flujo turbulento del aire.

En la Tabla 4 (pág. 21), se muestra el movimiento que siguen las partículas en función de su tamaño por efecto de la erosión eólica.

La cantidad de material en movimiento para cada una de las formas anteriores, dependerá de las variaciones en la velocidad de fricción, de la densidad de agregados y de la carga de sedimentos. Los movimientos de arrastre y saltación, son simuladas de manera conjunta, debido a que presentan una capacidad de transporte limitado que depende de la velocidad de fricción y de la rugosidad de la superficie. El material en suspensión es simulado con límites no superiores sobre su capacidad de transporte en la escala de campo; una porción de dicho material se simula como partículas  $PM_{10}$ .

Múltiples procesos físicos de erosión son simulados en el submodelo. Las dos fuentes de erosión del suelo son la emisión de tierra suelta y la entrada de suelo desgastado proveniente de los terrones y corteza. Estas fuentes son distribuidas entre componentes de saltación/arrastre y suspensión en base al proceso y las características del suelo. Tres procesos influyen sobre el movimiento de los componentes de saltación/arrastre; entre éstos se encuentra la captura de material en las depresiones de la superficie, la intercepción por las hojas y tallos de las plantas y, el desgaste de las partículas para disminuir su tamaño y formar parte del material en suspensión.

La simulación de la reestructuración de la superficie, se lleva a cabo al realizarse las emisiones para disminuir el material suelto y proteger la superficie en el área viento arriba. Por otro lado, los procesos como el desgaste de los agregados proyectados y captura de éstos en las depresiones existentes, dominan en las áreas viento abajo y conducen a la compactación de la superficie, además de un aumento del material suelto de saltación/arrastre. Un aumento en las cantidades de este material ocurre a menudo, debido a que la capacidad de transporte puede satisfacerse, además el desgaste de terrones y de la corteza continúa generando material suelto para el movimiento arrastre/saltación.

En la Figura 13 se muestra el comportamiento simulado de la descarga de suelo viento abajo, en esta puede apreciarse un comportamiento lineal con respecto a la distancia de los componentes en suspensión. La cantidad de componentes en suspensión incrementa proporcionalmente a la distancia, mientras que el material de arrastre/saltación alcanza su capacidad de transporte; esto se debe a que las

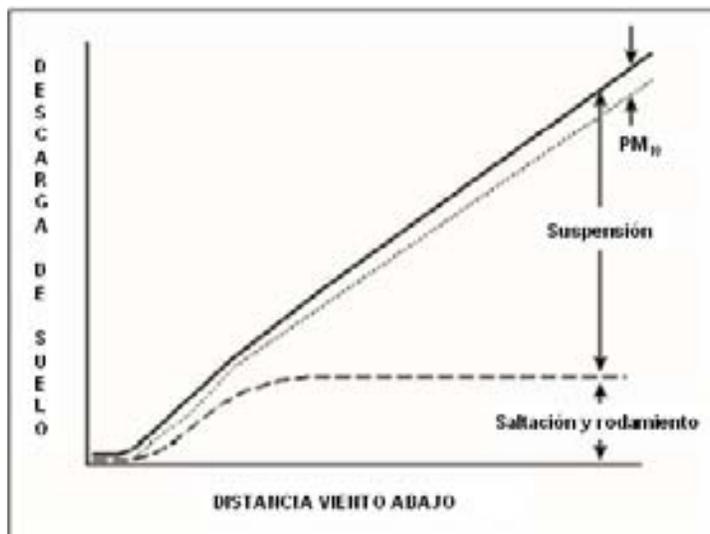


Figura 13. Comportamiento del material transportado.

fuentes de material en suspensión se encuentran activas a lo largo de todo el campo. Estas fuentes incluyen emisiones generadas por los impactos entre material suelto que se encuentra en la superficie, desgaste de la corteza y de agregados de mayor tamaño.

#### 4.1.5.3. Datos de salida.

El submodelo de erosión, calcula la cantidad de material del suelo perdido y las reporta en diferentes fracciones - total, saltación/rodamiento, suspensión y partículas PM<sub>10</sub> - (Hagen, 1995; Wind Erosion Research Unit, 2003) en respuesta a la acción de la velocidad del viento sobre la superficie del suelo.

## 4.2. Modelo Químico y Climático a Multiescalas (Multiscale Climate and Chemistry Model).

### 4.2.1. Descripción del modelo.

La predicción y comprensión de los problemas ambientales generados por la contaminación del aire es uno de los temas de mayor importancia hoy día. Los procesos físicos y químicos de mayor relevancia en la atmósfera son muy complejos, no-lineales y acoplados. La calidad del aire regional se determina por efectos a gran escala, así como también por procesos a escalas más pequeñas; por lo que para modelar la calidad del aire de forma regional se requiere

---

---

de un modelo a escalas múltiples. Tiene sentido resolver áreas a gran escala con celdas grandes, pero con resolución fina en las áreas de interés con el objeto de obtener una buena descripción en la región de estudio. Esto requiere de la capacidad de anidamientos múltiples para identificar problemas locales con resoluciones menores a 8 km.

Los modelos de calidad del aire a nivel regional se han convertido en una herramienta indispensable para el estudio de la contaminación atmosférica y la planeación urbana e industrial (García, 2002), surgen ante la necesidad de establecer una relación entre las emisiones de una fuente y los impactos resultantes sobre un receptor alejado a una distancia dada.

El Modelo Químico y Climático a Multiescalas (MCCM), fue desarrollado en el Instituto Fraunhofer de Alemania. Este modelo ha sido implementado para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y ha sido utilizado para la realización de diversas investigaciones. García (2002) utilizó el MCCM para la evaluación de los efectos de la calidad del aire en la ZMVM bajo diferentes escenarios tales como la regeneración del ex-lago de Texcoco y la eliminación de emisiones provenientes del sector energético. De los resultados obtenidos concluye que la regeneración parcial del ex-lago tiene un efecto benéfico a nivel local y que además las emisiones de industrias del sector energético generan un impacto en la calidad del aire del Valle de México. Jazcilevich (2003, 2005) ha utilizado este modelo para la evaluación de los efectos de las condiciones meteorológicas sobre la contaminación del aire en el Valle de México. Cortés (2005) utilizó el modelo MCCM para realizar la simulación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos para apreciar el comportamiento de la contingencia ambiental que se presentó en diciembre del 2003 en la ciudad de Chihuahua, México.

En la actualidad, el modelo MCCM se ha convertido en una herramienta útil y flexible con la que es posible estudiar el fenómeno de la contaminación atmosférica a nivel regional.

El MCCM es un modelo que:

- a) Acopla directamente los procesos meteorológicos y químicos.
- b) Incluye química de la fase gaseosa, depositación, emisiones antropogénicas y biogénicas.
- c) Provee descripciones explícitas de nubes y procesos de precipitación.

---

d) Incorpora capacidad de anidamientos múltiples, como se muestra en la Figura 18.

Debido a la complejidad de los procesos no lineales involucrados en la contaminación fotoquímica del aire, especialmente en regiones con terrenos complejos, es útil que el transporte de la contaminación pueda reaccionar directamente sobre cambios pequeños de las condiciones meteorológicas, lo cual solamente es posible con un modelo acoplado como el MCCM. Además, definiendo las variables correspondientes, pueden llevarse a cabo modelaciones de partículas emitidas por fuentes naturales.

Considerando la capacidad intrínseca de predicción del clima regional y su acoplamiento con procesos químicos, el MCCM puede ser aplicado en el pronóstico regional y urbano de la calidad del aire a tiempo real.

Este modelo incluye una capacidad de anidamiento a multi-escala, dinámica no hidrostática y capacidad de asimilación de datos en cuatro dimensiones para modelar procesos micro-físicos. Además incluye dos mecanismos químicos de fase gaseosa detallados con 39 y 47 especies químicas respectivamente y partículas ( $PM_{10}$ ) como indicadores pasivos. Las emisiones biogénicas son calculadas a partir de la información del uso del suelo, temperatura de superficie y radiación. Este modelo, procesa de manera simultánea, los cambios meteorológicos y cambios en la química del aire sobre el dominio y provee distribuciones tri-dimensionales dependientes del tiempo de todas las especies orgánicas e inorgánicas de mayor relevancia para la formación de oxidantes.

Cabe señalar que para este caso de estudio, simplemente se utiliza la parte de partículas ( $PM_{10}$ ) emitidas por erosión eólica, por lo que no se considera ningún tipo de reacción química.

El modelo MCCM, está conformado por varios procesadores tales como: TERRAIN, REGRID, RAWINS/LITTLE\_R, INTERPF, MCCM y NESTDOWN, los cuales se muestran en la Figura 14; éstos son descritos a continuación.

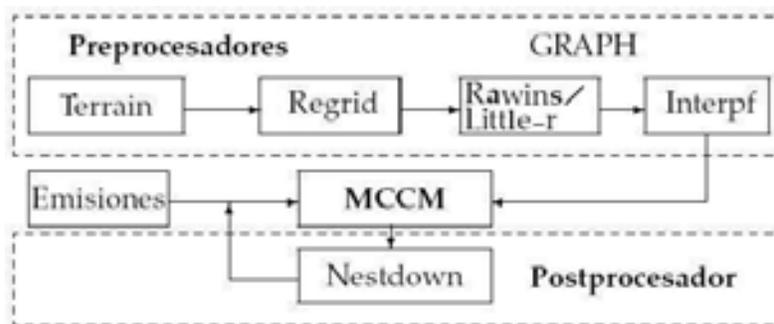


Figura 14. Diagrama de flujo del modelo MCCM.

#### 4.2.2. Procesadores.

##### *TERRAIN.*

En el módulo *TERRAIN* se especifican los dominios (Figura 21) y la posición de los mismos. Prepara la topografía y la información de uso de suelo mediante la interpolación por longitud-latitud de los datos propios a la elevación del terreno, al uso de suelo y a la cobertura vegetal a una malla rectangular de MCCM como se muestra en la Figura 15, los cuales representan la información de entrada al módulo de *TERRAIN*.

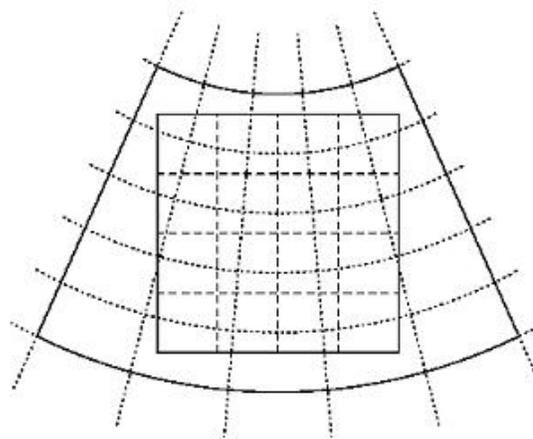


Figura 15. Interpolación de datos hacia la malla especificada.

Los archivos de salida una vez que la información ha sido procesada son: *TERRAIN\_DOMAIN1*, *TERRAIN\_DOMAIN2*,...,*TERRAIN\_DOMAINn*; donde n representa el número de dominios especificados.

*TERRAIN* realiza esencialmente dos actividades:

- Define los dominios a mesoescala: rejas gruesas y rejas finas;
- Produce información de campo para todos los dominios, los cuales serán utilizados por *REGRID*, después por *MM5* y *NESTDOWN*. El programa también calcula ciertos parámetros de campo requeridos por el sistema de modelación: la latitud y longitud, factores de escala y el parámetro de Coriolis.

---

---

### *REGRID.*

REGRID es el segundo paso en el diagrama de flujo del sistema MCCM (Figura 13). Espera información de entrada generada por TERRAIN y crea archivos listos para RAWINS, LITTLE\_R o INTERPF. Estos archivos son utilizados generalmente como una primera aproximación para un análisis objetivo (RAWINS o LITTLE\_R).

El propósito de *REGRID* es leer análisis meteorológicos archivados o salidas de modelos a gran escala en niveles de presión, e interpolarlos de una malla horizontal a la malla especificada en *TERRAIN*. *REGRID* consiste de dos componentes, *pregrid* y *regridder*.

El programa *pregrid* lee diferentes formatos de archivos de entrada y guarda los archivos de salida con un formato simple, los cuales serán leídos posteriormente por *regridder*. Los datos de entrada de *pregrid* son los archivos con los análisis meteorológicos, mientras que la información de salida son varios archivos con datos meteorológicos tridimensionales, temperatura superficial de mar (SST) y nieve, un archivo por cada intervalo de tiempo dentro del análisis.

El programa *regridder* interpola cada archivo de *pregrid* en la malla horizontal de MCCM especificada en el archivo *TERRAIN\_DOMAIN1*. La salida es un archivo con el nombre de *REGRID\_DOMAIN1*. Es decir, la información de entrada requerida por *regridder* son los archivos de *TERRAIN* y los archivos de *pregrid*, a partir de éstos se obtiene la información de salida de *regridder*, los cuales son los archivos *REGRID\_DOMAINn*, donde *n* es el número del dominio correspondiente. Aquí, las variables todavía se encuentran en niveles de presión.

### *RAWINS/LITTLE\_R.*

El propósito del análisis objetivo, el cual es realizado por *RAWINS* y *LITTLE\_R*, es mejorar la primera aproximación de los datos de entrada meteorológicos sobre la malla mediante la incorporación de información de observaciones. Éstas pueden ser tanto de superficie como de radiosondeos. Se puede emplear tanto *RAWINS* como *LITTLE\_R*. El empleo de *RAWINS* o *LITTLE\_R* depende de la disponibilidad de los datos de radiosondeos. Si hay falta de datos en el ascenso del radiosondeo durante el período en consideración solamente podrá usarse *LITTLE\_R*,

---

mientras que *RAWINS* sólo puede utilizarse cuando existe toda la información correspondiente al período en evaluación.

Los datos de entrada en ambos programas es la salida propia de *regridder*. Por ejemplo: *REGRID\_DOMAIN1* con los datos de observaciones en el formato apropiado, tiene como salidaa al archivo *LITTLE\_R\_DOMAIN1* o *RAWINS\_DOMAIN1*.  
*INTERPF*.

El procesador *INTERPF* interpola las salidas de *REGRIDDER*, *RAWINS* o *LITTLE\_R* de los niveles de presión a los niveles  $\sigma$  de MCCM de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P - P_T}{P_S - P_T}$$

donde P es la presión,  $P_T$  es la presión en la última capa vertical y  $P_S$  es la presión en la superficie.

La información de salida de *INTERPF* son las condiciones iniciales meteorológicas que se encuentran en el archivo *MMINPUT\_DOMAINn*, las condiciones de frontera dependientes del tiempo de las variables meteorológicas (archivo *BDYOUT\_DOMAINn*) y las condiciones de la frontera inferior (*LOWBDY\_DOMAINn*).

#### *MCCM*.

Es la parte del sistema de modelación donde se lleva a cabo la predicción de la meteorología, el transporte de contaminantes y la transformación química. Consiste de una parte meteorológica (MM5) y una parte química directamente acoplada, la cual incluye advección, intercambio turbulento, emisiones biogénicas y antropogénicas, deposición y transformaciones químicas. Además de la estimación de las especies químicas en la fase gaseosa, el modelo incluye la predicción de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , que toma en consideración la advección, el transporte turbulento, la emisión y la deposición.

---

---

MCCM puede ser utilizado para un gran número de estudios teóricos y de tiempo real, incluyendo las aplicaciones de simulación predictiva y la asimilación de datos en cuatro dimensiones para huracanes y ciclones.

#### *NESTDOWN.*

El procesador NESTDOWN prepara los datos de entrada (p. ej. condiciones iniciales de frontera de todas las variables meteorológicas y en caso de que el dominio madre incluya la química) para una corrida anidada.

Si este procesador está siendo utilizado para producir una modelación con una resolución más alta a partir de las celdas gruesas, hay varias ventajas: 1) el modelo tiene condiciones de frontera que utilizan física consistente con el modelo de celdas gruesas; 2) las condiciones de frontera están disponibles en una frecuencia temporal relativamente alta; 3) la estructura vertical de la atmósfera no se modifica significativamente a través de la interpolación vertical.

#### *4.2.3. Resultados obtenidos de la ejecución del MCCM.*

En el archivo de salida generado durante la ejecución del MCCM hay un título (header), el cual se encuentra al inicio del archivo. Dicho título contiene información sobre las opciones de los preprocesadores, características de los dominios y su localización. Además incorpora los sub-header, los cuales consisten de una descripción de cada campo. Esta descripción incluye información sobre el nombre, dimensiones, orden del índice, rango de índices, tamaño y tiempo del siguiente campo.

Lo que se encuentra impreso en la lista de campos en los archivos generados es lo siguiente: nombre del campo; dimensiones (bi-, di- o tridimensional), primer (y), segunda (x) y tercer (presión) dimensión del campo, cuarta dimensión del campo; si el campo es una cruz (C) o un punto (D); cómo está ordenado el campo (por ejemplo: YXS); un valor del campo (a la mitad del dominio) y las respectivas unidades son mostrados en la Figura 16.

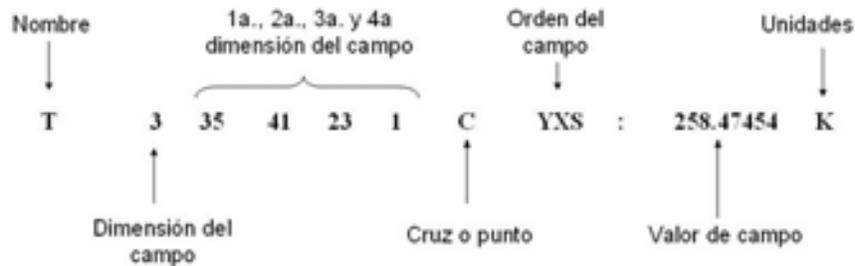


Figura 16. Descripción de campos de los archivos generados por MCCM.

En la Figura 17 pueden observarse los campos obtenidos por el MCCM durante la modelación de los eventos deseados. Para este trabajo en particular, los campos de interés generados durante la ejecución de MCCM, son las componentes horizontales del viento (u, v), las cuales se observan en la figura junto con otras variables.

1993-03-13_00:00:00.0000					0.00000 Hours				
U	3	35	41	23	1 D	YXS :	13.80757618	m/s	
V	3	35	41	23	1 D	YXS :	14.90762901	m/s	
T	3	35	41	23	1 C	YXS :	259.52917480	K	
Q	3	35	41	23	1 C	YXS :	0.00224648	kg/kg	
CLW	3	35	41	23	1 C	YXS :	0.00000000	kg/kg	
RNW	3	35	41	23	1 C	YXS :	0.00000000	kg/kg	
RAD TEND	3	35	41	23	1 C	YXS :	0.00000000	K/DAY	
W	3	35	41	24	1 C	YXW :	0.04734292	m/s	
PP	3	35	41	23	1 C	YXS :	1911.64025879	Pa	
PSTARCRS	2	35	41	1	1 C	YX :	84232.07031250	Pa	
GROUND T	2	35	41	1	1 C	YX :	273.84320068	K	
RAIN CON	2	35	41	1	1 C	YX :	0.00000000	cm	

Figura 17. Campos obtenidos durante la ejecución del MCCM.

Una vez descritas las partes que conforman ambos modelos (WEPS y MCCM), se realiza el acoplamiento de éstos para llevar a cabo el estudio de la dispersión de partículas generadas por la erosión eólica, el cual es el tema central de este trabajo y será tratado en el siguiente capítulo en donde se expone la metodología considerada para elaborar el sistema obtenido de la unión de los modelos.

---

## **V. METODOLOGÍA.**

---

## **5.1. DATOS UTILIZADOS.**

### *5.1.1. Datos de suelo.*

Como primera etapa, se trabajó sobre una base de datos desarrollada por Norma Fernández Buces (comunicación personal), con la finalidad de crear archivos con los parámetros de suelo requeridos por el modelo de erosión característicos para cada una de las áreas consideradas como las principales fuentes de emisión de partículas en el Valle de México, las cuales se encuentran localizadas dentro de la región de estudio (ex-lago de Texcoco y zonas agrícolas y de pastizales aledañas).

La información contenida en la base de datos antes mencionada, son datos obtenidos a partir de estudios de campo y de laboratorio, los cuales se encuentran sujetos a un proceso de control de calidad interno establecido en el Laboratorio de Edafología Ambiental (Instituto de Geología) con base en Procedimientos Estandarizados de Operación para la realización de los análisis, el uso de muestras patrón interna y participación en programas de intercalibración con otras instituciones en el extranjero.

### *5.1.2. Datos de la RAMA.*

Las comparaciones entre los resultados de la modelación y los datos observados, se efectuaron mediante el empleo de observaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) disponibles en la página electrónica del SIMAT<sup>g</sup>. La RAMA cuenta con 36 estaciones, de las cuales en 14 se miden las variables meteorológicas y en 11 las concentraciones de PM<sub>10</sub>.

En el caso de las estaciones de la RAMA que registran la información horaria en forma automática, es factible que se presenten valores inválidos como consecuencia de fallas en la operación de los instrumentos o en la transmisión de la información, cortes en la energía eléctrica o mantenimiento de los equipos; antes de utilizar las bases de datos se depuran todos aquellos registros fuera del rango que se etiquetaron como datos faltantes, valores negativos o fuera de rango. Para el caso de partículas PM<sub>10</sub> el criterio de depuración utilizado es obtener el promedio

---

diario si se cuenta al menos con el 75% de los registros de un día (es decir si se cuenta al menos con 18 de 24 horas con datos).<sup>8</sup>

Para comparar los resultados obtenidos de la aplicación del sistema, se utilizaron las siguientes estaciones de la RAMA: Chapingo (CHA), Cuajimalpa (CUA), Hangares (HAN), Merced (MER), San Agustín (SAG), Taxqueña (TAX), Tláhuac (TAH), Tlalnepantla (TLA), Xalostoc (XAL). En estos sitios se pudo detectar la presencia de las nubes de partículas naturales generadas por el sistema y como consecuencia, las concentraciones más altas de  $PM_{10}$  emitidas por efecto de la erosión eólica durante la simulación. En la Figura 18 se muestra la localización de las estaciones empleadas para realizar las comparaciones con los resultados. Las variables meteorológicas empleadas para las comparaciones fueron temperatura y magnitud del viento.

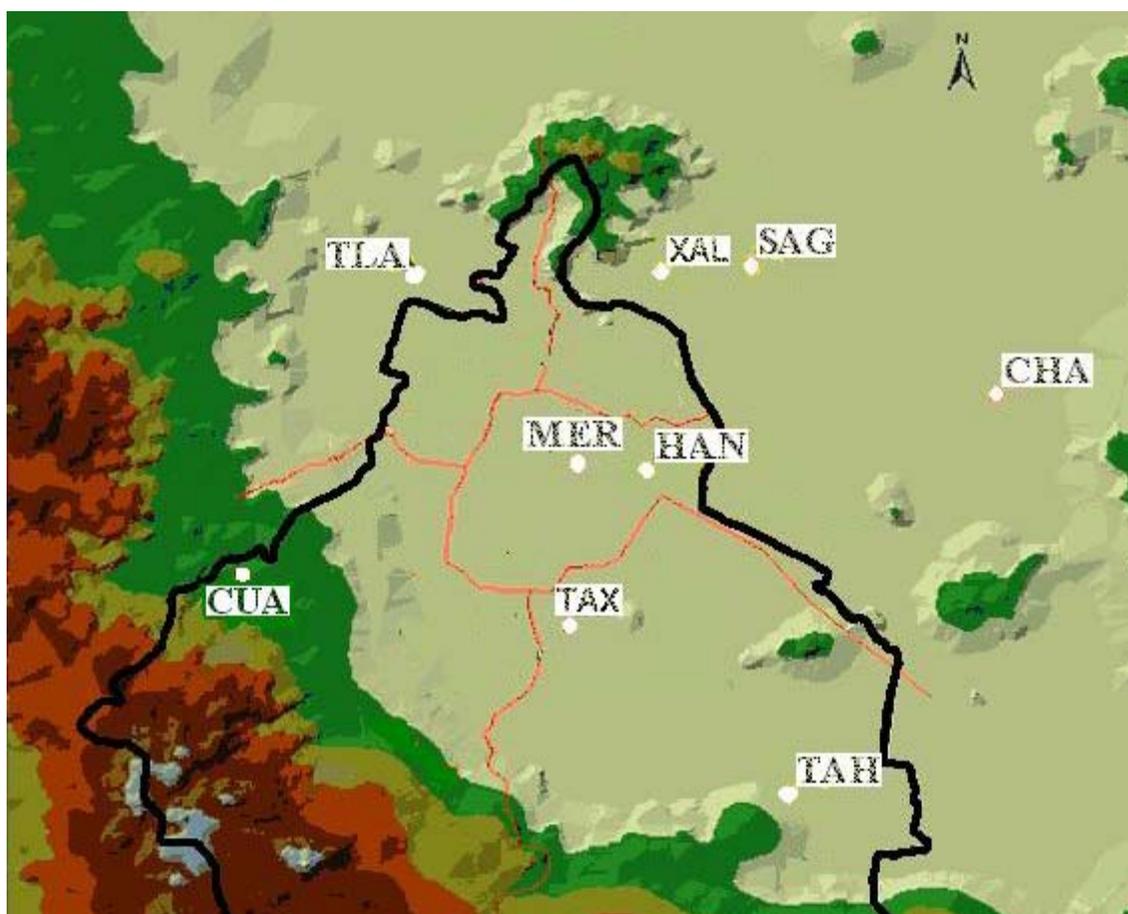


Figura 18. Topografía y ubicación de las estaciones de monitoreo seleccionadas para la comparación de resultados (SIMAT, 2005).

---

## **5.2. DESARROLLO DEL SISTEMA MCCM+WEPS.**

Para acoplar el modelo de erosión (WEPS) al modelo de calidad del aire (MCCM), se desarrolló un sistema que consta de programas escritos en lenguaje Fortran. Cabe señalar que ambos modelos se encuentran desarrollados bajo este mismo lenguaje computacional.

Un primer programa denominado *MM5HEADER.F90*, fue desarrollado con la finalidad de leer las salidas meteorológicas generadas por el modelo MCCM durante la primera simulación, la cual fue realizada sin considerar emisión alguna de contaminantes. Este programa obtiene las componentes horizontales del viento (u, v) para procesarlas, calcular su magnitud y después guardarlas en el archivo de entrada que más adelante será ejecutado por el modelo WEPS. Por otro lado, el programa lee los archivos de parámetros de suelo de la región previamente generados y los guarda en el archivo de entrada antes mencionado. El archivo generado con los parámetros de suelo y magnitudes de vientos se encuentra en un formato que ahora ya puede ser ejecutado por el modelo de erosión. Finalmente, una vez que el archivo de entrada ha sido obtenido, el programa ejecuta el modelo WEPS para obtener las emisiones de partículas sobre la región de estudio y la guarda en el archivo denominado PM10, el cual, es el punto de inicio para la siguiente etapa del sistema acoplado.

Para el caso del ex-lago de Texcoco en particular, debido a las características no homogéneas presentes en el suelo de esta región, esta zona fue dividida en seis sub-regiones; el programa tiene la capacidad de interpolar cada uno de los archivos con parámetros de suelo considerando sus coordenadas geográficas para ubicarlos en la celda correspondiente tal y como se muestra en la Figura 19, y de este modo, obtener un archivo con los parámetros propios al área contemplada dentro de cada celda que se encuentra localizada sobre la región del ex lago.

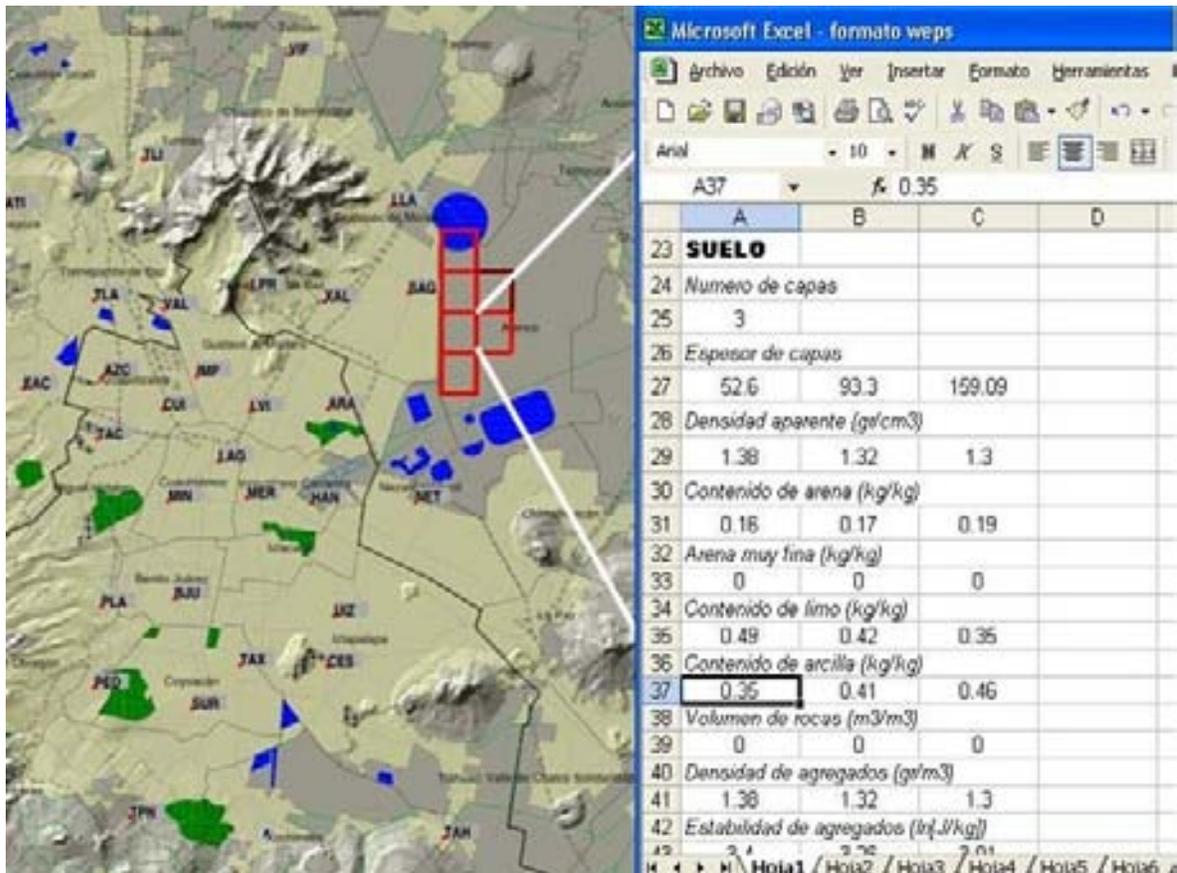


Figura 19. Interpolación de base de datos en la región del ex lago de Texcoco. A la derecha se observan algunos de los parámetros de suelo contenidos en la base de datos, las cuales serán interpoladas en la celda respectiva ubicada sobre el exlago en función a sus coordenadas geográficas.

El siguiente programa desarrollado (*AREAEMIS-PM10.F90*), lee el inventario de emisiones utilizadas por el modelo MCCM. Una vez que este programa ha leído dicho inventario, tiene la capacidad de abrir el archivo PM10 previamente obtenido por el programa MM5HEADER.F90 con la finalidad de leer las emisiones de partículas generadas por el modelo de erosión. El objetivo principal de *AREAEMIS-PM10.F90*, es adicionar las emisiones de partículas PM<sub>10</sub> emitidas por erosión eólica, al inventario de emisiones de MCCM. Finalmente se obtiene un inventario en el que se encuentran incluidos tanto emisiones antropogénicas como naturales.

Para llevar a cabo la modelación de la distribución temporal y espacial de dichos contaminantes, el modelo de calidad del aire es ejecutado para realizar una nueva simulación, en

la que el inventario de emisiones (en el que ya se encuentran incluidas las emisiones de partículas naturales generadas por el modelo WEPS), es considerado.

El proceso realizado por el sistema obtenido (MCCM+WEPS), puede resumirse mediante el diagrama de flujo mostrado en la Figura 20, en donde se muestran las etapas efectuadas por los programas desarrollados para acoplar los modelos.

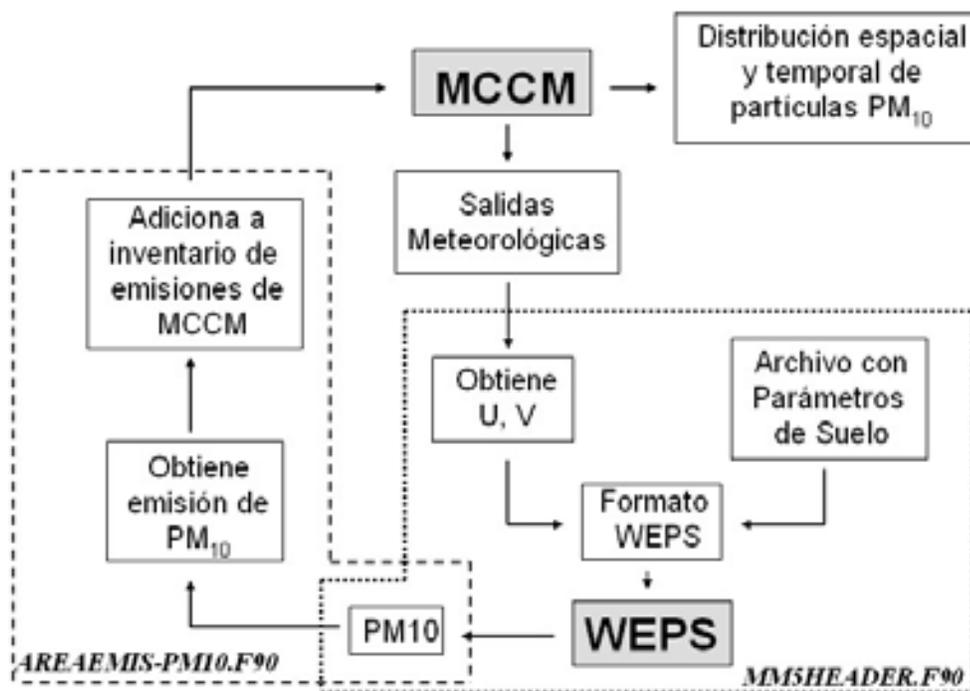
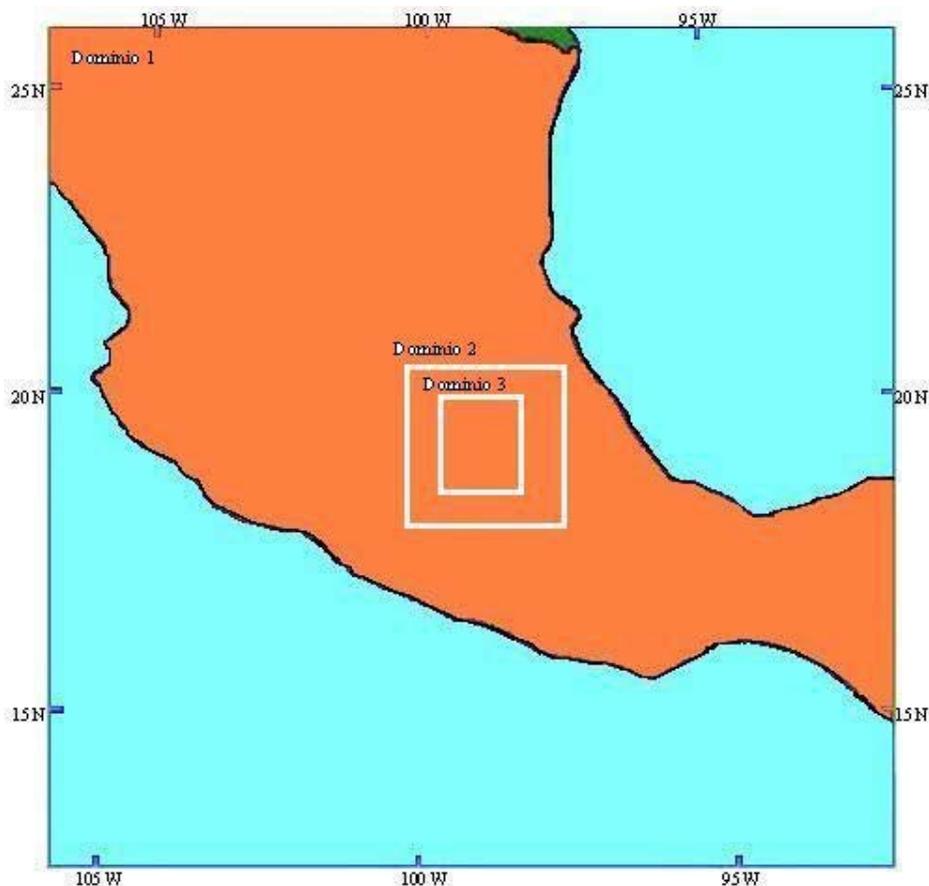


Figura 20. Diagrama de flujo del sistema desarrollado para la modelación de partículas emitidas por erosión eólica.

Finalmente, otro programa es utilizado para comparar los resultados obtenidos de la modelación con la información reportada por cada una de las estaciones de muestreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) durante los días de interés.

La meteorología se obtiene al escoger los dominios anidados como se muestra en la Figura 21. El dominio en el interior consiste de una malla de 61x52 celdas que incluyen el Valle de México y tiene una resolución de 3km. La descripción de cada dominio se muestra en la Tabla 5. Una vez obtenidos los dominios, se ejecuta el modelo sin considerar emisión alguna de

contaminantes, con la finalidad de generar las variables meteorológicas de interés que se encuentran presentes en la región de estudio.



**Figura 21. Preparación de dominios sobre la región de estudio.**

Una vez obtenidas las condiciones meteorológicas en la región de estudio, el sistema (MCCM+WEPS) se ejecuta para obtener la emisión y el transporte de partículas emitidas por efecto de la erosión eólica sobre la región del Valle de México.

**Tabla 5. Características de los dominios anidados.**

<i>Dominio</i>	<i>Resolución (km)</i>	<i>Dimensiones</i>
1	27	60 x 60
2	9	34 x 34
3	3	61 x 52

---

## **VI. RESULTADOS.**

---

### **6.1. SELECCIÓN DEL DÍA PARA LA MODELACIÓN.**

El día seleccionado para la modelación fue el 5 de Diciembre del 2001, ya que con la ayuda de la imagen satelital mostrada en la Figura 22, se observó la presencia de un evento de contaminación en la región del Valle de México. Posteriormente, esta imagen será utilizada para comparar los resultados de la modelación.



**Figura 22. Nube de contaminantes presente el día 5 de Diciembre del 2001 sobre la región del Valle de México. En el cuadro rojo se ubica el área del Valle (NASA, 2005)<sup>h</sup>.**

Para tratar de mostrar la evolución y presencia del evento de emisión de partículas naturales, se decidió realizar la simulación a partir del día 4 hasta el día 6 de diciembre. A partir de la modelación de los días y del escenario seleccionado, se obtuvieron emisiones de partículas

---

en las regiones de interés, pudiéndose observar la manera en la que las nubes de partículas formadas, eran transportadas a través de la región del Valle de México.

## ***6.2. EVALUACIÓN DE LA METEOROLOGÍA.***

La modelación se efectuó en intervalos de 1 hora, durante un total de 76 horas de modelación. Se consideraron las primeras 11 horas de modelación como la etapa de inicialización del sistema por lo que son descartadas, y la discusión de resultados se llevará a cabo a partir de la hora 12.

Para evaluar el desempeño de la parte meteorológica del modelo MCCM, se realiza una evaluación cualitativa mediante el empleo de gráficas, en las cuales se comparan los resultados del modelo contra los valores observados por las estaciones de la RAMA.

La Figura 23 muestra una serie de tiempo de temperaturas superficiales (°C) medidas y calculadas para las estaciones de Cuajimalpa, Chapingo, Hangares, San Agustín, Tláhuac y Xalostoc. La Figura 24 muestra otra serie de tiempo de magnitudes de vientos (m/s) medidos y calculados para las mismas estaciones.

Para el caso de la Figura 23, nótese que los resultados arrojados por el modelo se aproximan adecuadamente a los datos observados, mientras que en la Figura 24 puede observarse que en algunas horas los resultados calculados por el modelo para cada una de las estaciones se aproximaron a los datos medidos aunque para algunas horas las magnitudes del viento del modelo son mayores. Con esta información, se pretende mostrar el desempeño del modelo MCCM durante la modelación de los días seleccionados.

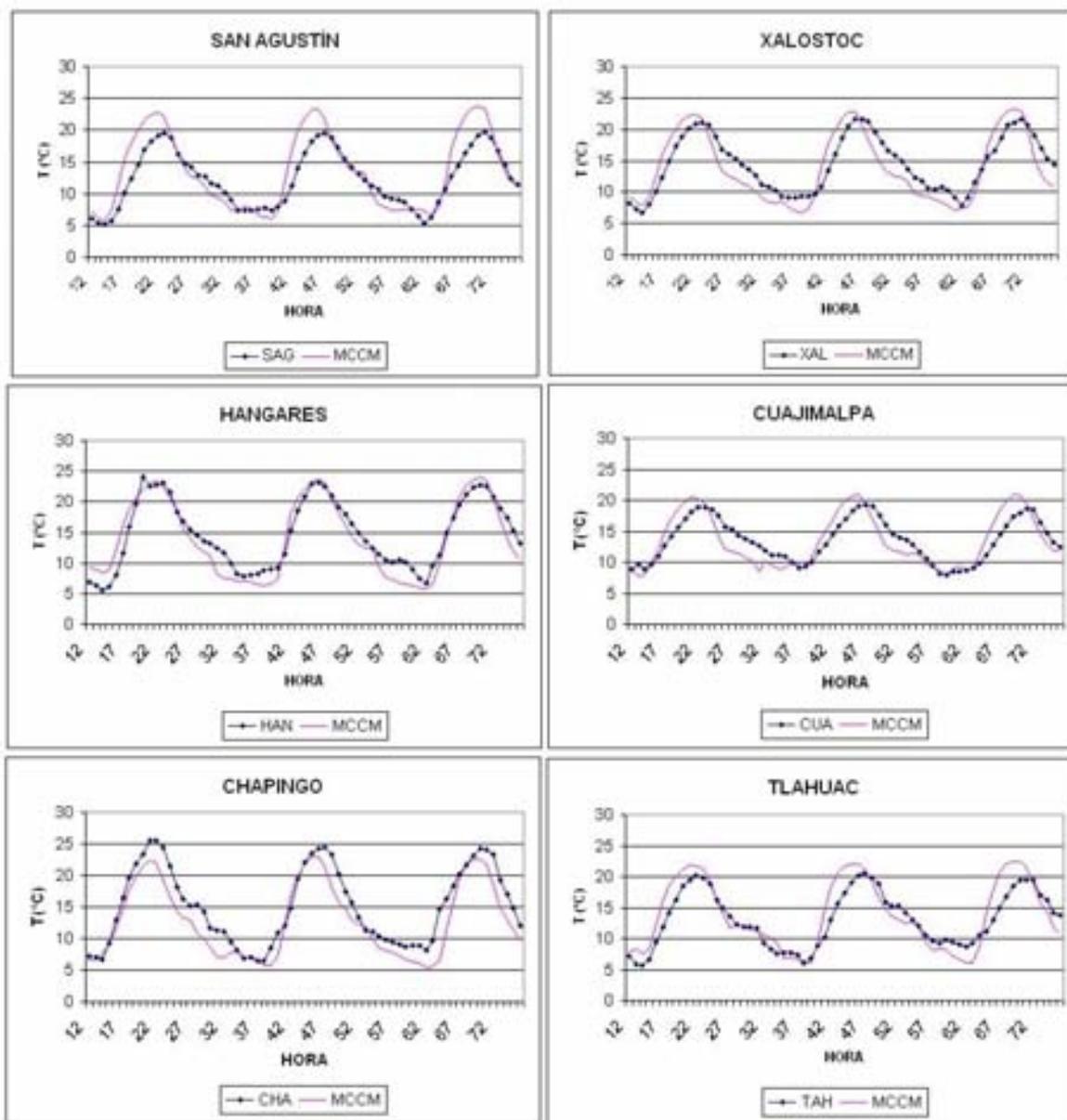


Figura 23. Variación horaria de temperatura superficial (°C) entre los datos reportados por las estaciones de la RAMA y los generados por MCM durante la simulación.

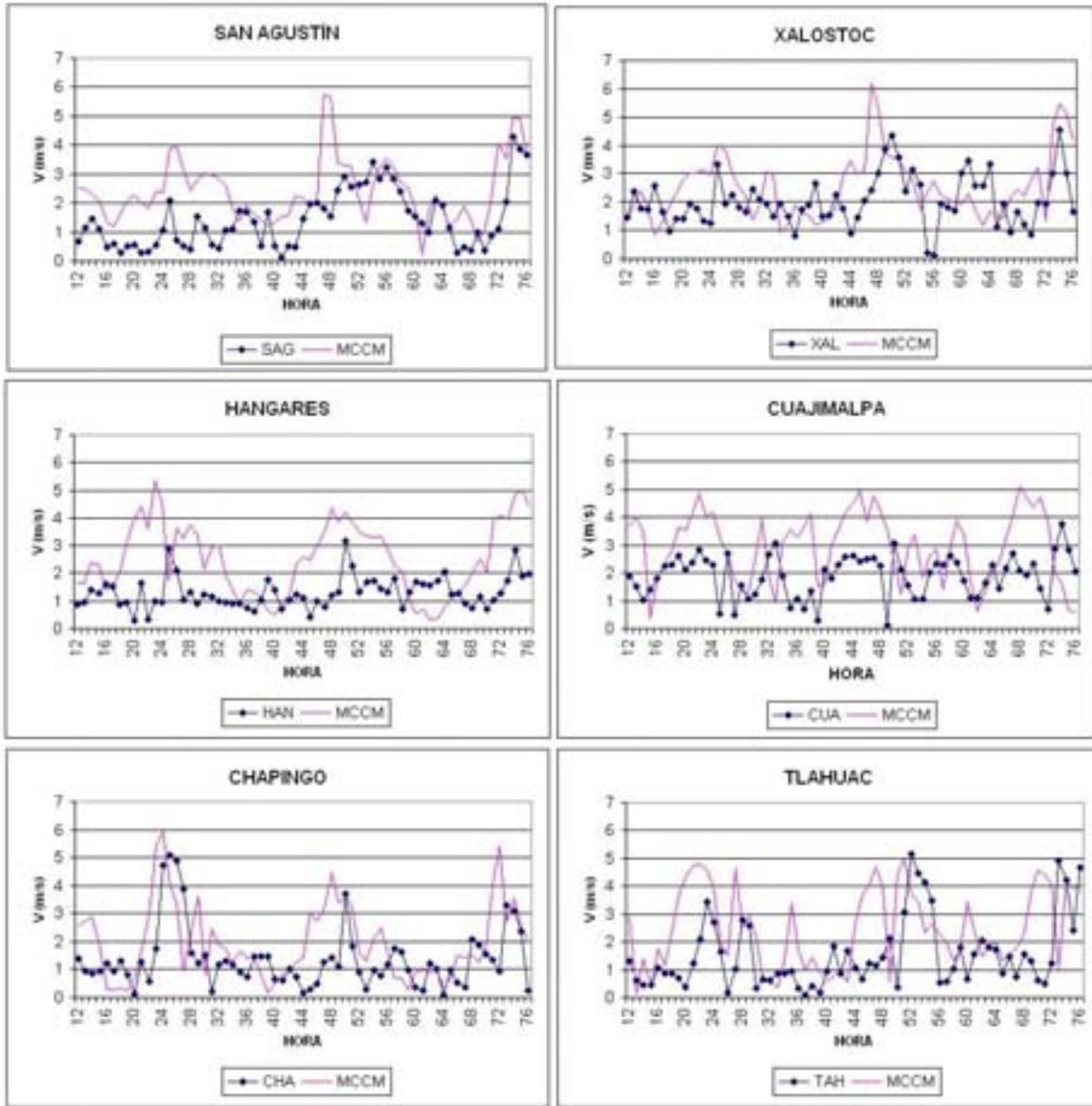


Figura 24. Serie de tiempo de magnitudes de vientos (m/s) reportados por las estaciones de la RAMA y las calculadas por MCCM durante la simulación.

---

---

### 6.3. RESULTADOS.

Una vez adicionadas las emisiones de partículas emitidas por efecto de la erosión eólica al inventario de emisiones de MCCM, se llevó a cabo la simulación del escenario seleccionado. Las concentraciones de partículas obtenidas de la modelación contemplan tanto las emisiones antropogénicas como las naturales.

En la Figura 25 se muestran series de tiempo de concentraciones de PM<sub>10</sub> observadas y calculadas en algunas de las estaciones de la RAMA seleccionadas para la comparación de resultados. En éstos resultados puede observarse que la estación San Agustín fue la única que pudo captar considerablemente la emisión de partículas provenientes del ex lago (presente de la hora 48 a la 53), esto debido a su cercanía a la fuente de emisión.

Se aplicó el Índice de Concordancia (Ic) entre los valores medidos por la RAMA y los calculados por el sistema como una prueba estadística (Willmott, 1981). Este índice, indica qué tanta coincidencia existe entre las predicciones y las observaciones, y matemáticamente se define como:

$$I_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad i$$

donde Ic es el índice de concordancia,  $P_i$  es el valor predicho por el modelo al tiempo  $i$ ,  $O_i$  es el valor medido,  $\bar{P}$  y  $\bar{O}$  son los valores medios para las  $n$  observaciones.

El valor de 1 es para la concordancia perfecta y el valor de 0 indica que no tienen concordancia los valores estudiados (Willmott, 1981; García, 2002).

En la Tabla 6 se presentan los Índices de Concordancia (Ic) de PM<sub>10</sub> obtenidos para cada una de las estaciones de la RAMA.

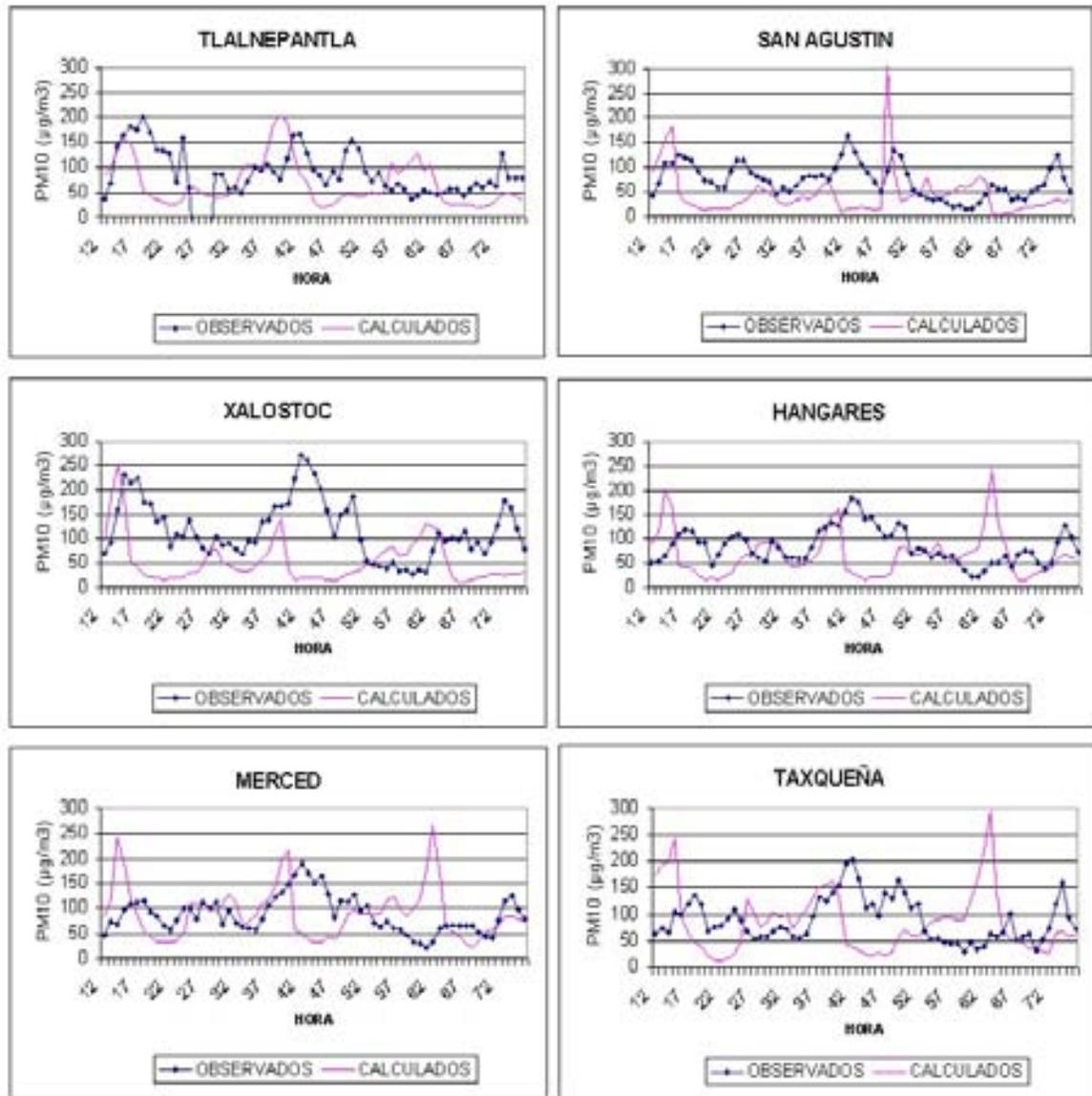


Figura 25. Comparativo de concentraciones de PM<sub>10</sub> usando mediciones de las estaciones de la RAMA y concentraciones calculadas durante la aplicación del sistema (MCCM+WEPS). Las discontinuidades indican ausencia de mediciones por las estaciones.

---

---

**Tabla 6. Índices de Concordancia entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> observadas y calculadas.**

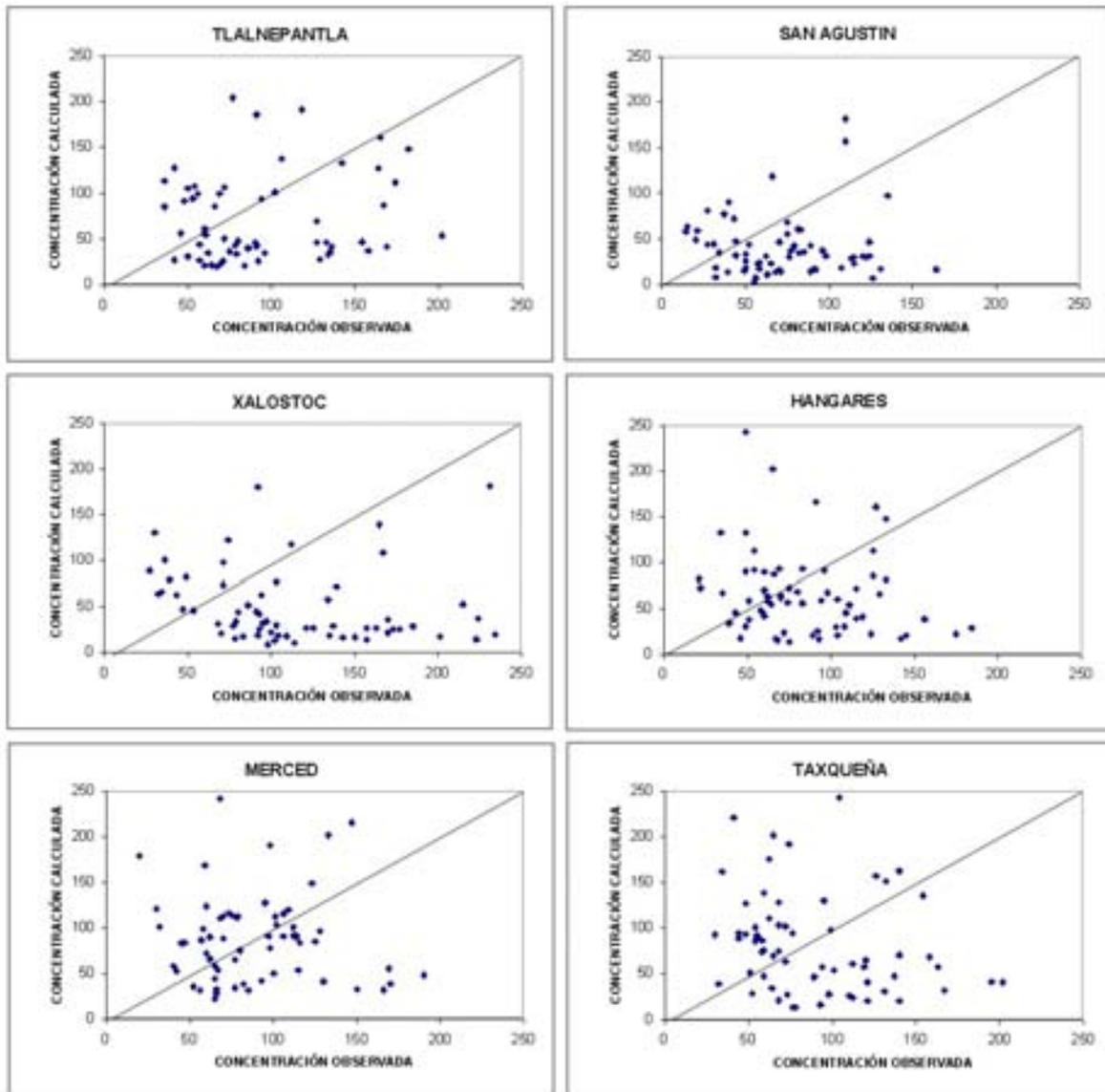
<b>Estación</b>	<b>Ic</b>
Tlalnepantla	0.48
San Agustín	0.39
Xalostoc	0.37
Hangares	0.30
Merced	0.31
Taxqueña	0.23

De los resultados mostrados en la Tabla 6, puede observarse que los Ic's son bajos y que Tlalnepantla es la estación que presenta el valor más alto, caso contrario el de Taxqueña que es la estación con el valor más bajo. Éstos índices pueden incrementarse al mejorar el inventario de emisiones de partículas PM<sub>10</sub> empleado por MCCM.

En la Figura 26 se muestran los diagramas de dispersión de concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> obtenidos de la comparación de los valores calculados y de las observaciones de la RAMA. Esta figura muestra que las estaciones Tlalnepantla y Hangares presentan las mejores concordancias y además, que la estación Taxqueña es la que presenta el Ic más bajo.

Es importante señalar que esta comparación incluye las PM<sub>10</sub> generadas por efecto de la erosión eólica y las antropogénicas. Estas últimas no son parte de este estudio.

Durante la simulación pudo captarse la presencia de un evento de emisión de gran magnitud de partículas naturales proveniente de la región del ex lago de Texcoco y de las zonas agrícolas aledañas, el cual se presentó a partir de la hora 48 de simulación (17:00hrs tiempo local del día 5 de diciembre). La evolución del evento y el registro de las concentraciones fueron resultado del cambio en la velocidad y dirección del viento, por lo que la nube de contaminantes es detectada por las estaciones a diferentes horas debido a su localización. La nube de polvo generada desapareció a la hora 53 (22:00hrs tiempo local del día 5 de diciembre). Otros eventos de menor magnitud se presentaron sobre las regiones agrícolas del norte y del noreste del Valle, debido a su intensidad éstos no afectaron a la Ciudad, por lo que fueron descartados.



**Figura 26. Diagramas de dispersión de concentraciones de  $PM_{10}$  usando mediciones de las estaciones de la RAMA y concentraciones calculadas durante la aplicación del sistema (MCCM+WEPS).**

En la Figura 27, se muestran series de tiempo de concentraciones de partículas para las estaciones San Agustín (SAG), Hangares (HAN) y Taxqueña (TAX). Del lado izquierdo de la figura se muestran las concentraciones obtenidas incluyendo las que fueron generadas por la presencia del evento de la hora 48 a la 53 de modelación, mientras que del lado derecho se muestran las concentraciones calculadas sin contemplar dicho evento; este comparativo se realiza con la finalidad de observar el efecto de las emisiones de partículas provenientes del ex lago de Texcoco sobre la calidad del aire de la Ciudad de México.

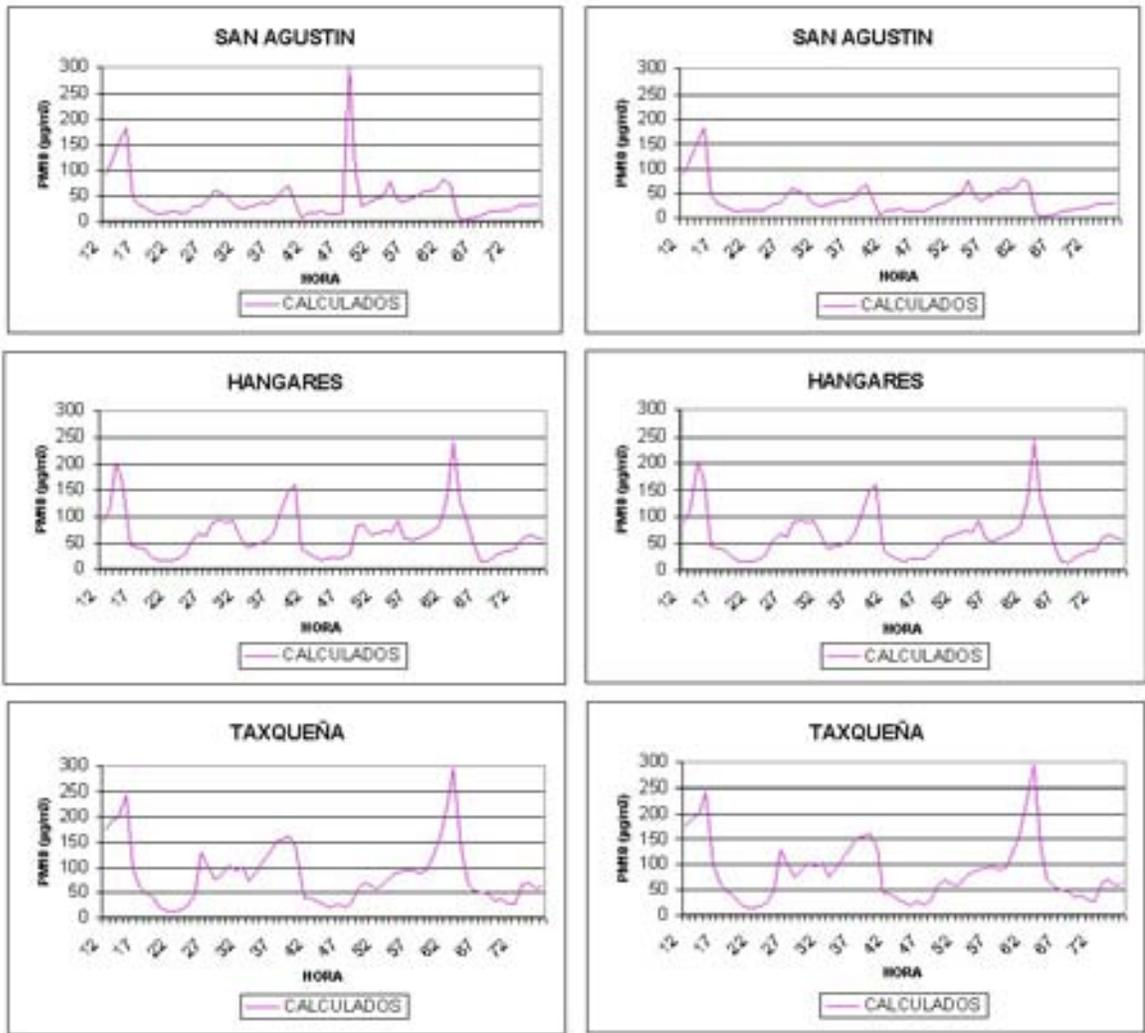
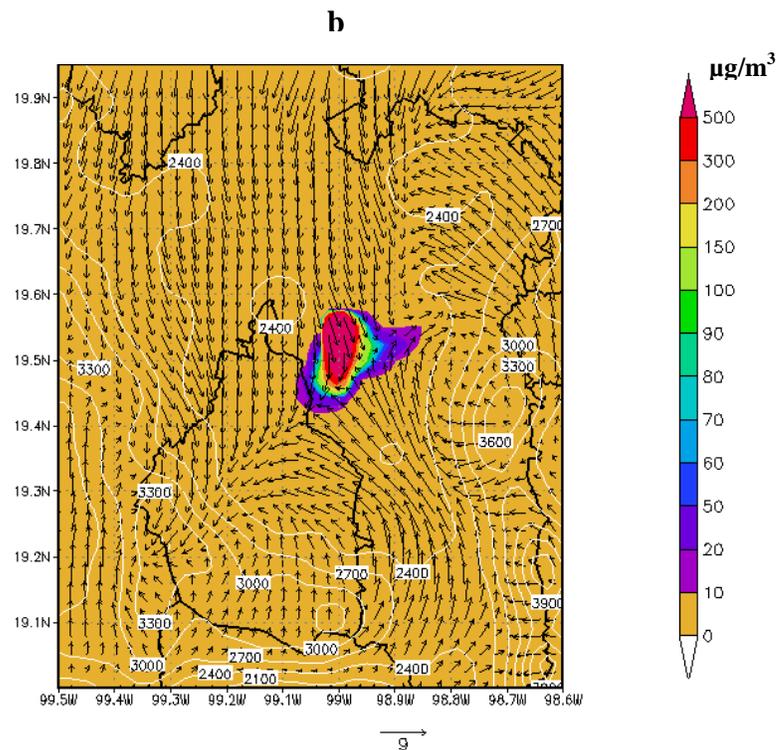
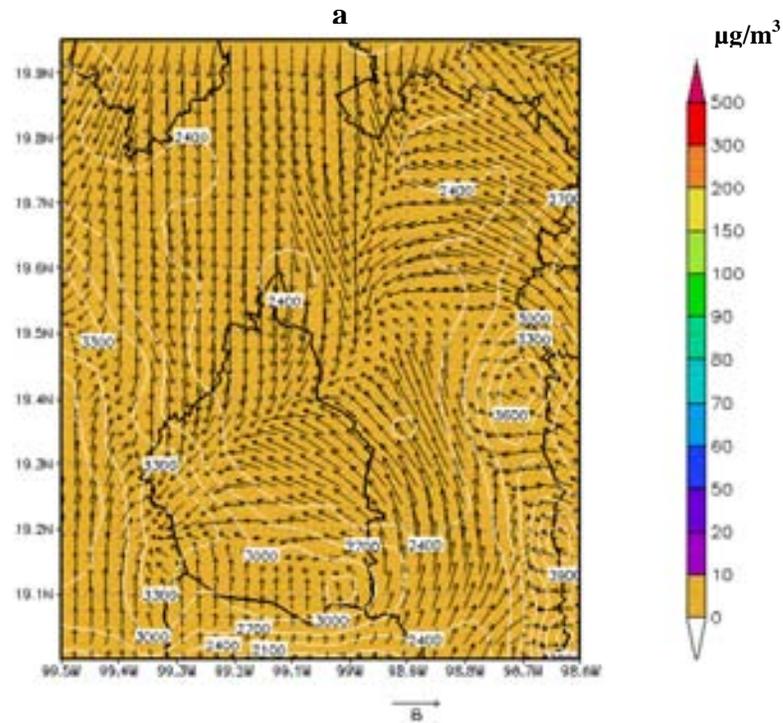


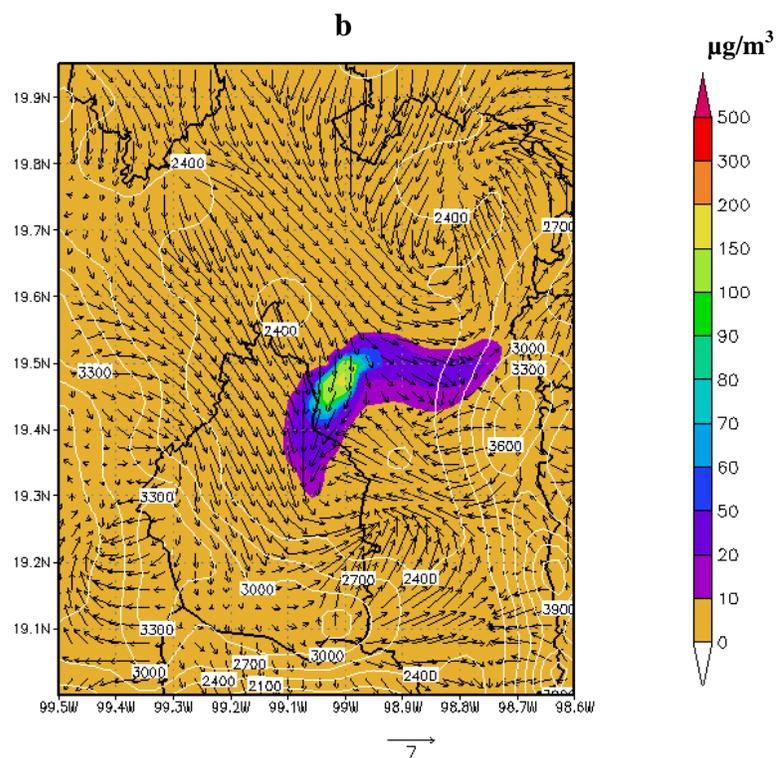
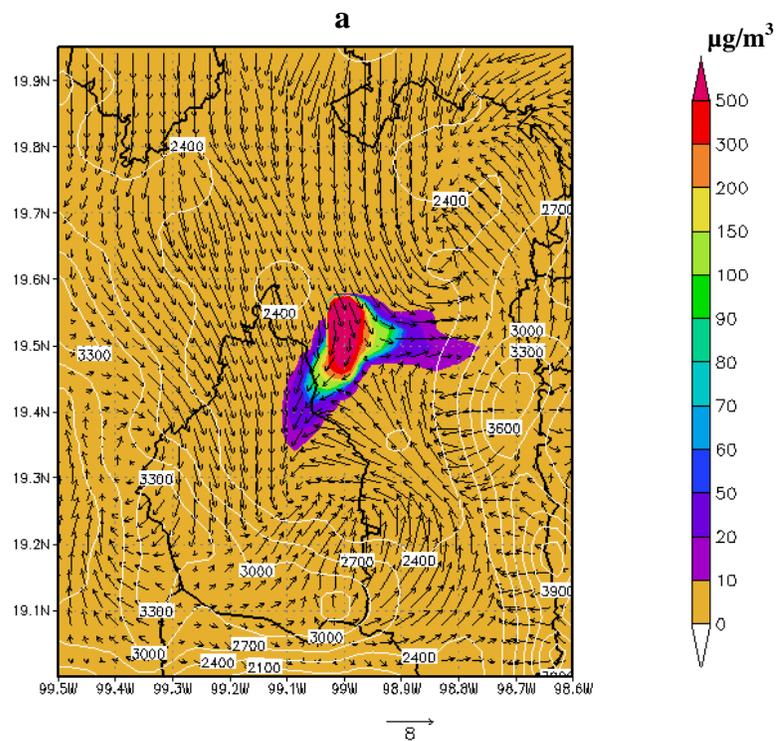
Figura 27. Comparación de series de tiempo de concentraciones de partículas considerando la emisión de partículas proveniente del ex lago de Texcoco (izquierda) y sin considerar (derecha).

Con la aplicación del visualizador en tres dimensiones (vis5d) se observó la durabilidad y transporte de la nube de polvo emitida como resultado de la variación en la intensidad y dirección del viento durante dicho evento. Las estaciones de monitoreo que detectaron la presencia del evento fueron San Agustín y Hangares principalmente y como consecuencia presentaron variaciones en las concentraciones de partículas (Figura 27).

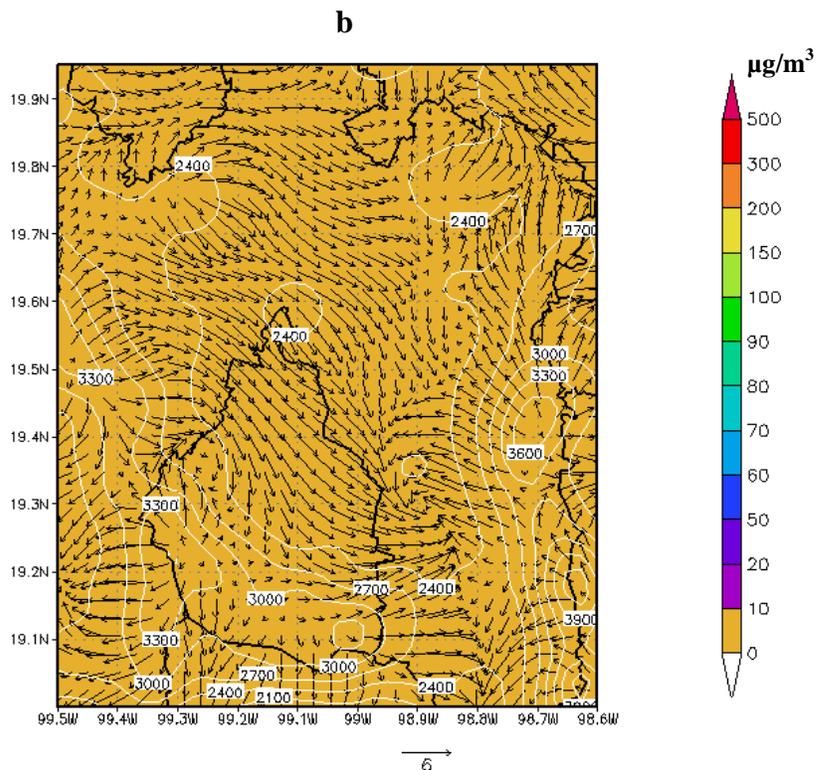
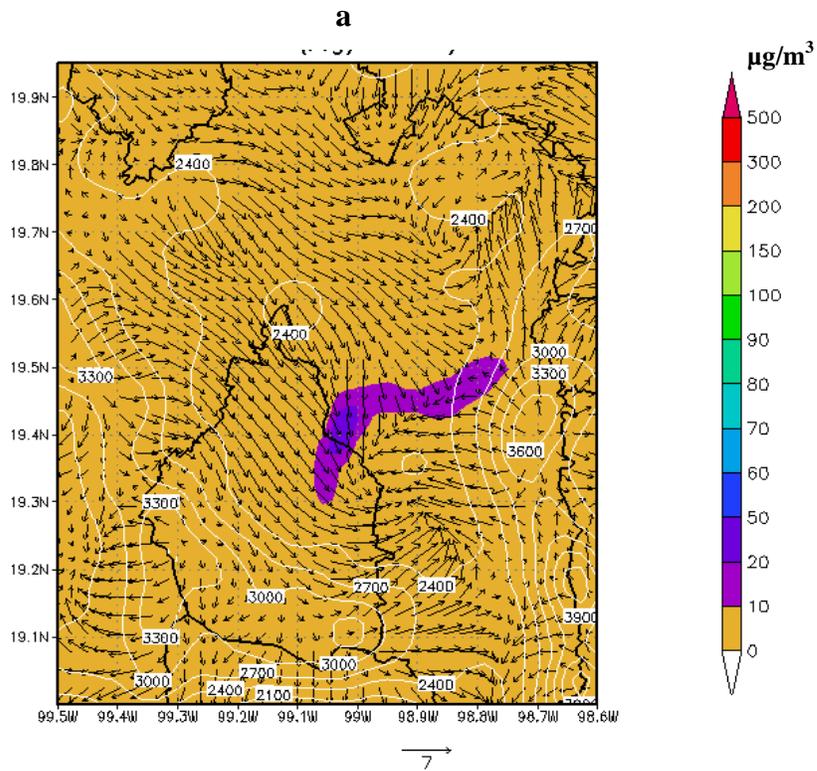
En las Figuras 28, 29 y 30, se muestra la generación de la nube de polvo emitida por acción del viento en la región del ex lago de Texcoco y el transporte de la misma sobre la región del Valle de México durante la hora 48 a la hora 53 de modelación.



**Figura 28.** Campo de vientos y concentraciones generadas durante el evento ocurrido sobre la región del ex lago de Texcoco. a) 17:00 horas tiempo local del 5 de diciembre (hora 48 de modelación). b) 18:00 horas tiempo local del 5 de diciembre (hora 49 de modelación). Líneas blancas representan isólinas de nivel en msn.



**Figura 29.** Campo de vientos y concentraciones generadas durante el evento ocurrido sobre la región del ex lago de Texcoco. a) 19:00 horas tiempo local del 5 de diciembre (hora 50 de modelación). b) 20:00 horas tiempo local del 5 de diciembre (hora 51 de modelación). Líneas blancas representan isolíneas de nivel en msn.

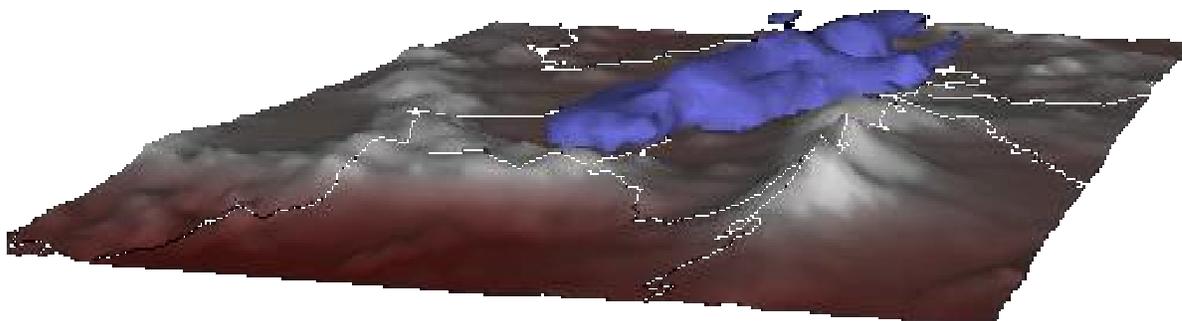


**Figura 30.** Campo de vientos y concentraciones generadas durante el evento ocurrido sobre la región del ex lago de Texcoco. a) 21:00 horas tiempo local del 5 de diciembre (hora 52 de modelación). b) 22:00 horas tiempo local del 5 de diciembre (hora 53 de modelación). Líneas blancas representan isolíneas de nivel en msn.

---

En las Figuras 28, 29 y 30, se muestra la evolución del evento que se presentó durante la simulación. La emisión de partículas del ex lago, se presentó cuando se obtuvo una velocidad promedio que sobrepasaba los 8 m/s sobre esta zona, tal y como se observa en la Figura 28b. La región más afectada fue el noreste de la Ciudad de México, por lo que las mayores concentraciones fueron captadas por la estación San Agustín y en mínimas cantidades por Hangares y Taxqueña, tal y como se mostró en la Figura 27.

La Figura 31 muestra la forma en la que una nube de partículas emitidas en la región del ex lago de Texcoco y zonas agrícolas aledañas, generada por WEPS y transportada por MCCM a través del Valle de México, pudiéndose observar las zonas de mayor impacto por la presencia de los contaminantes en el aire.



**Figura 31. Dispersión de partículas sobre el Valle de México. En color azul, la nube de polvo generada por el sistema.**

Para la evaluación de las concentraciones con respecto a la normatividad ambiental, se calcularon los promedios móviles de 24 horas de concentraciones de partículas  $PM_{10}$  obtenidas en cada una de las estaciones, dichos promedios fueron obtenidos a partir de la hora 12 de modelación. Los promedios móviles así como las concentraciones máximas obtenidas pueden observarse en la Tabla 7.

**Tabla 7. Promedios móviles de concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> y concentraciones máximas para cada estación.**

ESTACIÓN	[PM <sub>10</sub> ] µg/m <sup>3</sup>							
	Día 1				Día 2			
	CONC <sub>o</sub>	CONC <sub>c</sub>	MÁX <sub>o</sub>	MÁX <sub>c</sub>	CONC <sub>o</sub>	CONC <sub>c</sub>	MÁX <sub>o</sub>	MÁX <sub>c</sub>
Tlalnepantla	111.28	69.92	202	160.34	96	81.99	167	204.31
Xalostoc	121.5	59.78	231	253.62	130.7	48.99	272	139.13
San Agustín	81.62	48.16	124	181.52	77	50.29	164	300
Hangares	79.29	65.69	119	202.63	106	63.68	184	160.88
Merced	84	92.49	115	242.21	108.7	91.97	190	215.92
Taxqueña	80.25	90.23	137	242.93	112	76.73	202	162.12

*Día 1 = Hora 12 (11:00 horas del 4 de Diciembre tiempo local) a la hora 35 de modelación (10:00 horas del 5 de Diciembre tiempo local).*

*Día 2 = Hora 36 (11:00 horas del 5 de Diciembre tiempo local) a la hora 59 de modelación (10:00 horas del 6 de Diciembre tiempo local).*

*CONC<sub>o</sub> = Concentración Promedio Observada.*

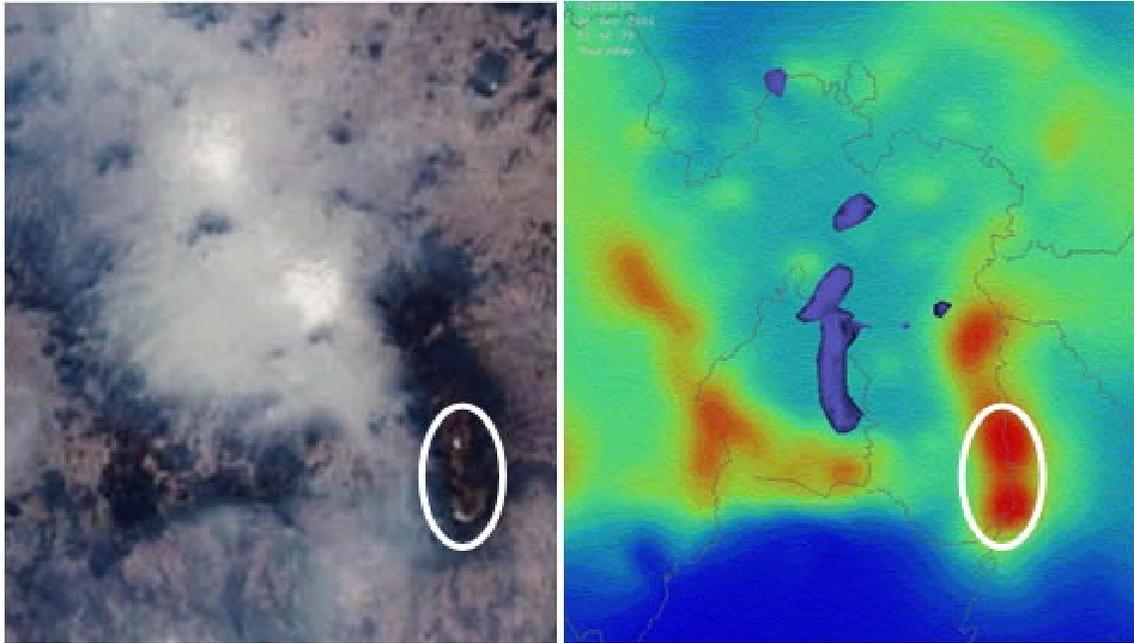
*CONC<sub>c</sub> = Concentración Promedio Calculada.*

*MAX<sub>o</sub> = Máxima Observada.*

*MAX<sub>c</sub> = Máxima Calculada.*

Una vez más se hace la observación que esta comparación incluye las PM<sub>10</sub> generadas por efecto de la erosión eólica y las antropogénicas.

En la Figura 32, se muestra un comparativo visual de la imagen satelital y una imagen generada por el sistema durante la modelación. A partir de la observación de ambas figuras, puede verse que en esta nube de contaminantes presente el día 5 de diciembre hubo un aporte de partículas naturales generadas por la erosión eólica provenientes de la región del ex lago de Texcoco.



**Figura 32** Comparativo de la imagen satelital con la imagen generada por el sistema MCCM+WEPS para visualizar la nube de polvo presente el día 5 de Diciembre del 2001. En el círculo blanco se observan los volcanes.

#### **6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

De los resultados obtenidos se puede decir lo siguiente:

- Cualitativamente, el desempeño de la parte meteorológica del modelo MCCM fue aceptable.
- Las temperaturas superficiales generadas por el modelo MCCM se aproximaron notablemente a las medidas por las estaciones de la RAMA.
- Para algunas estaciones de monitoreo, las intensidades de los vientos generadas por el modelo MCCM se aproximaron a las medidas por dichas estaciones, principalmente aquellas localizadas en las afueras de la zona altamente urbanizada.
- Considerando las características del suelo en la región del ex lago de Texcoco, la emisión de partículas de origen natural se presentó cuando la velocidad del viento era superior a los 8 m/s.
- La distribución temporal y espacial de los contaminantes en el aire depende de la magnitud de la emisión y de la dirección y magnitud del viento.
- En cada una de las estaciones de muestreo, el contenido de material de origen natural en las partículas depende de las condiciones meteorológicas (dirección del viento), la temporada del año y además, de su proximidad a las fuentes de emisión.

- 
- 
- Las fuentes de emisión de partículas  $PM_{10}$  de origen natural de mayor importancia fueron el ex lago de Texcoco (noreste) y las zonas agrícolas localizadas al norte y noreste del Valle de México.
  - Las estaciones que captaron la presencia de la nube de partículas provenientes de la región del ex lago fueron San Agustín y Hangares; las concentraciones más altas de partículas  $PM_{10}$  naturales fueron captadas por San Agustín donde se obtuvo la concentración más alta de este contaminante ( $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) cuando la dirección del viento proveniente del noreste favorecía el transporte de los contaminantes emitidos por esta región.
  - La estación que presenta partículas con un mayor porcentaje en el contenido de material de origen natural como resultado de la presencia del evento de emisión de partículas provenientes del ex lago es San Agustín.
  - La zonas más impactadas por la presencia de partículas naturales en el aire es la región este y noreste de la Ciudad de México.
  - De la Figura 25 se observa que existe una diferencia considerable entre las concentraciones observadas y las del inventario de MCCM; sin embargo, en algunas estaciones el comportamiento entre éstas es similar.
  - Existe una muy baja concordancia entre las concentraciones observadas y las concentraciones calculadas, las estaciones Tlalnepantla y San Agustín presentan una mejor correlación entre estas concentraciones, caso contrario al de Taxqueña.
  - Los Índices de Concordancia para las concentraciones de partículas pueden incrementarse al mejorar el inventario de emisiones de MCCM.
  - En cuanto a las concentraciones promedio (observadas y calculadas), se observa que no se rebasa la concentración máxima permisible ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en ninguna estación; sin embargo, las concentraciones máximas (observadas y calculadas) en cada estación sobrepasan en su mayoría el límite establecido.
  - De la Figura 32 se puede decir, que hay una indicación de correspondencia entre los resultados de la simulación y los observados.

---

---

## **6.5. POTENCIALES FUENTES DE ERROR.**

Se observa una considerable diferencia entre los resultados calculados por el sistema y los observados por las estaciones de monitoreo; estas variaciones significativas son generadas por la influencia de diferentes factores. Dentro de las fuentes de error identificadas durante la elaboración de este trabajo, se encuentran:

- La falta de información del Estado de México dentro del inventario de emisiones del MCCM, por lo que es conveniente mejorar dicho inventario.
- Ausencia de valores de parámetros de suelo requeridos por el modelo WEPS, los cuales fueron supuestos con la ayuda de personas especializadas en el tema.

## **6.6. LIMITACIONES DEL SISTEMA MCCM+WEPS.**

El sistema desarrollado es una buena herramienta que podrá ser utilizado como un instrumento para predecir eventos severos de contaminación generados por la presencia de partículas naturales en el aire, y determinar su intensidad y extensión. Además, se podrá utilizar en diferentes regiones del país en donde la emisión de partículas naturales representa un problema severo de contaminación del aire. Sin embargo, se identifican los siguientes puntos que pueden limitar los alcances del sistema MCCM+WEPS.

- Debido a que las intensidades de los vientos generados eran sobreestimados cuando la resolución de la malla era de 2km, se optó por trabajar con una resolución de 3km, lo que favoreció a que las intensidades generadas se aproximaran a las medidas por las estaciones de monitoreo. Por otro lado la resolución del dominio, impide un estudio más detallado en las áreas de interés lo que ayudaría a obtener una buena descripción de la zona en estudio.
- Se observó una sobreestimación en las intensidades de los vientos en los sitios de monitoreo localizados dentro de la ciudad (Figura 24), mientras que en las estaciones localizadas en las afueras de la misma pudo observarse que las intensidades calculadas por el sistema se aproximaban considerablemente a las medidas.
- Debido a que el modelo WEPS reporta emisiones de  $\text{kg/m}^2$  día, las emisiones de partículas calculadas son reportadas en intervalos de una hora al obtener un promedio entre 24hrs.

- 
- La obtención de resultados tuvo grandes requerimientos de tiempo debido a que el acoplamiento de los modelos WEPS y MCCM se realizó fuera de línea, el cual no permite tomar en cuenta adecuadamente procesos físicos que afectan la meteorología local, como la radiación en superficie debido a la presencia de nubes de partículas.
  - Al estar MCCM y WEPS fuera de línea, el factor de radiación permanece constante durante el tiempo de modelación, lo cual impide una variación en las condiciones meteorológicas del sitio de estudio que afectaría notablemente a las intensidades y direcciones del viento.

---

## **VII. CONCLUSIONES.**

---

---

WEPS y MCCM fueron acoplados para el desarrollo de un sistema, con la finalidad de modelar el transporte de partículas cuyo origen son las fuentes naturales, específicamente los suelos desprotegidos propensos a la erosión eólica.

Actualmente se tiene un sistema capaz de reproducir la meteorología y el fenómeno de la contaminación atmosférica por efectos de la emisión de partículas provenientes del suelo. Esto permite generar escenarios para probar medidas y políticas de control para la regeneración de suelos, y así disminuir el impacto de las emisiones sobre la calidad del aire.

El sistema obtenido aplicado al Valle de la Ciudad de México, permitió conocer las principales fuentes de emisión de partículas naturales y además, saber dónde y cuándo se localizan las zonas mayormente impactadas durante la ocurrencia de eventos de contaminación por este tipo de contaminantes. Las fuentes que se detectaron, fueron las regiones agrícolas localizadas al norte del Valle de México y la región del ex lago de Texcoco.

Debido a las condiciones meteorológicas presentes sobre la región de estudio durante los días de modelación, el ex lago de Texcoco resultó ser la principal fuente de partículas emitidas por erosión eólica que afectan considerablemente la calidad del aire de la ciudad; tal y como se muestra en la Figura 27 donde se comparan los escenarios considerando las emisiones provenientes del ex lago y sin considerar.

De la comparación de los resultados obtenidos de la aplicación del sistema con los datos reportados por la RAMA (Figura 25), se observa que a pesar de la existencia de una diferencia considerable entre las concentraciones observadas y las calculadas, existe una similitud en el comportamiento de las concentraciones en algunas estaciones, lo cual muestra un buen funcionamiento del sistema desarrollado, sin embargo se recomienda mejorar el inventario de emisiones de MCCM lo que ayudará considerablemente a optimizar el desempeño del sistema.

El sistema obtenido, puede ser utilizado como herramienta para predecir eventos severos de contaminación generados por la presencia de partículas naturales en el aire, y determinar su

---

---

intensidad y extensión. Además, se podrá utilizar en diferentes regiones del país en donde la emisión de partículas naturales representa un problema severo de contaminación del aire.

Finalmente se concluye, que la problemática de la contaminación del aire en la región del Valle de México, no solamente es causada por las emisiones de partículas por fuentes antropogénicas, sino que además, está ampliamente influenciada por emisiones de partículas naturales provenientes de zonas propensas al fenómeno de la erosión eólica localizadas en los alrededores del Valle, siempre y cuando las condiciones meteorológicas favorezcan el transporte de los contaminantes hacia la ciudad.

---

## **VIII. RECOMENDACIONES.**

---

---

Es necesario realizar estudios de caracterización de suelos en la región del ex lago de Texcoco y de caracterización de las partículas en el ambiente de la Ciudad de México. La información que se desprenda de estos estudios será utilizada para estimar la aportación de las partículas provenientes del ex lago sobre la calidad del aire de la Ciudad.

Debe planearse una campaña de muestreo que permita validar los resultados obtenidos por la aplicación del sistema, tanto del modelo WEPS como del modelo MCCM.

Es conveniente acoplar los modelos en línea, lo que permitiría llevar a cabo la simulación de la dispersión de partículas naturales en un solo paso de tiempo considerando además los procesos físicos; lo que permitirá mejorar el desempeño del sistema.

Es recomendable la aplicación de un modelo meteorológico para ambientes urbanos (MM5-urbano), ya que los resultados en la meteorología (véase Figura 24) nos indican que el modelo meteorológico MM5 (el cual forma parte del modelo de calidad del aire MCCM), es una herramienta muy útil para ambientes no urbanos, ya que las intensidades de viento calculadas para las estaciones localizadas en las afueras de la ciudad se aproximaban considerablemente a las medidas por las estaciones de la RAMA. Sin embargo para las estaciones ubicadas dentro de la ciudad, se pudo observar una sobreestimación en las intensidades calculadas.

Finalmente, es necesario mejorar el inventario de emisiones utilizado por el modelo MCCM, principalmente en la región norte de donde se tiene poca información del Estado de México.

---

## **IX. BIBLIOGRAFÍA.**

- 
- **Beasley**, R.P. 1972. *Erosion and Sediment Pollution Control*. Iowa University.
  - **Becerra**, Antonio. 1999. *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. Universidad Autónoma Chapingo.
  - **Bravo**, H. *et al.* 2003. Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. *INGENIERÍA, Investigación y Tecnología IV*. 4: 195-205.
  - **Comisión Nacional de Derechos Humanos**. 1992. *La contaminación atmosférica en México: sus causas y efectos en la salud*.
  - **Cortés**, P.L. (2005). *Simulación de dispersión de contaminantes atmosféricos en la Ciudad de Chihuahua mediante el modelo MCCM*. V Simposio de Contaminación Atmosférica, Libro de Resúmenes. 273-280.
  - **Chow**, J.C. *et al.* 2002. *Chemical Composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City during winter 1997*. *The Science of the Total Environment*. 287: 177-201.
  - **Chow**, J.C. *et al.* 1995. *Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standards for Suspended Particles*. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 45: 320-382.
  - **de Icaza**, Gabriel. 2003. *Formation and transformation mechanisms of particulate matter under ten micrometers (PM<sub>10</sub>) and ozone (O<sub>3</sub>) in the Mexico City Metropolitan Area and the Greater Manchester Area*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
  - **Ford**, Andrew. 1999. *Modeling the Environment. An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental System*. Island Press. Estados Unidos.
  - **Foth**, Henry D. 1984. *Fundamentals of soil science*. 6a. Edición. Edit. John Wiley and sons.
  - **García-Reynoso**, Agustín. 2002. *Evaluación de Escenarios Utilizando el Modelo Regional de Calidad del Aire Multiscale Climate Chemistry Model*. Tesis de Doctorado. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 111 pp.
  - **Hagen**, L.J. 1995. *WEPS technical documentation: erosion submodel*. SWCS WEPP/WEPS Symposium. Ankeny, IA.
  - **Hagen**, L.J. 2004. *Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields*. *Environmental Modelling & Software*. 19: 171-176.

- 
- **Hesketh**, Howard. 1986. *Fine particles in Gaseous Media*. 2a. edición. Lewis Publishers.
  - **INEGI**: 2000, *Censo Estadístico de Población y Vivienda 2000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
  - **Jacobson**, Mark Z. 1999. *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press.
  - **Jáuregui**, Ernesto. 1971. *La erosión eólica en los suelos vecinos al lago de Texcoco*. Ingeniería Hidráulica en México. XXV-2: 103-117.
  - **Jáuregui**, Ernesto. 1983. *Variaciones de largo periodo de la visibilidad en la Ciudad de Mexico*. Geofísica Internacional. 1983. 22-3: 251-275.
  - **Jáuregui**, Ernesto. 1997. *Urban-rural humidity contrasts in Mexico City*. International Journal of Climatology. 17: 187-196.
  - **Jazcilevich** D. A., A. Garcia, L. Gerardo Ruiz-Suarez: 2003, *A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico*, Atmospheric Environment, 37, pp. 183/193.
  - **Jazcilevich** D. A., A. Garcia, Caetano, E.: 2005, *Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the Valley of Mexico*, Atmospheric Environment, presentado a publicación.
  - **Jazcilevich**, D. A., A. García, E. Caetano. 2005. *Meteorology and pollution modeling in the Valley of Mexico*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
  - **Jiménez**, Blanca. 2001. *La Contaminación Ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
  - **López**, M.T. et al. 2002. *Transport and dispersion of blowing dust in the Mexico Basin*. In: Lee, Jeffrey A. and Zobeck, Ted M., 2002, Proceedings of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, International. Center of Arid and Semiarid Lands Studies, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA. 2002. Publication 02-2: 330-339.
  - **Millar**, C.E. et al. 1975. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. C.E.C.S.A.
  - **Návar**, José. 1998. Estimación del tonelaje de partículas de suelo que potencialmente contribuyen a la contaminación del aire en el área metropolitana de Monterrey, México. Terra, 16: 21-31.
  - **Nirmalakhdam**, N. 2002. *Modeling Tools for Environmental Engineers and Scientist*. CRC Press.

- 
- **Perkins**, Henry C. 1974. *Air Pollution*. México, Mc Graw Hill.
  - **Seinfeld**, John H. *et al.* 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley Interscience.
  - **Soon-Ung**, Park. 2004. *Parameterization of Asian dust (Hwangsá) particle-size distributions for use in dust emission models*. *Atmospheric Environment*. 38: 2155-2162.
  - **Van Donk**, Simon J. *et al.* 2003. *Wind erosion from military training lands in the Mojave Desert, California, U.S.A.* *Journal of Arid Envorinments*. 54: 687-703.
  - **Van Donk**, Simon J. *et al.* 2003. *Measurement and simulation of wind erosion, roughness degradation and residue decomposition on an agricultural field*. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 1243-1258.
  - **Vautard**, Robert. 2005. *On the contribution of natural Aeolian sources to particulate matter concentrations in Europe: Testing hypotheses with a modeling approach*. *Atmospheric Environment*, 39: 3291-3303.
  - **Vega**, E. *et al.* 2002. *Basic statistics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the atmosphere of Mexico City*. *The Science of the Total Environment*, 287: 167-176.
  - **Wark**, Kenneth, *et al.* 1994. *Contaminación del aire; origen y control*. México, Limusa.
  - **Wellens-Purnal**, Ann D. 1993. *Análisis matemático de la dispersión atmosférica en la Ciudad de México*. Tesis de Maestría, DEPI-UNAM.
  - **Willmott**, Cort J. 1981. *On the validation of models*. *Physical Geography*. 2: 184-194.
  - **Wind Erosion Research Unit**. 2003. *The Wind Erosion and Prediction System, user manual*.
  - **Zalf**, R. Funk *et al.* 2002. *Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS*. In: Lee, Jeffrey A. and Zobeck, Ted M., 2002, *Proceedings of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, International*. Center of Arid and Semiarid Lands Studies, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA. 2002. Publication 02-2: 330-339.
  - **Zanetti**, Paolo. 1990. *Air pollution modeling. Theories, computacional methods and available software*.

---

Páginas Web recomendadas.

- a) <http://www.weru.ksu.edu>
- b) <http://www.weru.ksu.edu/weps>
- c) <http://www.epa.gov>
- d) <http://inegi.gob.mx>
- e) <http://www.ine.gob.mx>
- f) <http://www.sma.df.gob/simat/mapoteca.htm>
- g) <http://www.sma.df.gob/simat>
- h) <http://visibleearth.nasa.gov/search.php?q=Mexico+city>
- i) <http://todoventilacion.com/Ffitxa25.html>