



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA.

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LA DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS PM₁₀ EMITIDAS POR EROSIÓN EÓLICA EN EL VALLE DE MÉXICO.

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(FISICOQUÍMICA DE LA ATMÓSFERA)

P R E S E N T A

EMMANUEL DÍAZ NIGENDA

JURADO EXAMINADOR:

Dr. Arón Jazcilevich Diamant (Director de Tesis)
Dra. Irma Rosas Pérez (Presidente)
Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez (Vocal)
Dra. Christina Siebe Grabach (Suplente)
Dr. John Tatarko (Suplente)

COMITÉ TUTORAL:

Dr. Arón Jazcilevich Diamant
Dr. José Agustín García Reynoso
Dr. Ernesto Caetano Neto



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.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y al **Centro de Ciencias de la Atmósfera**, por darme el privilegio de ser un miembro más de esta gran comunidad universitaria.

Al **Posgrado en Ciencias de la Tierra**, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al **Dr. Arón Jazcilevich**, por todo el apoyo y amistad que me ha brindado a lo largo de estos años y sobre todo, gracias por depositar su confianza en mí.

Al **Dr. Agustín García** y al **Dr. Ernesto Caetano**, quienes me apoyaron a lo largo de todos mis estudios de posgrado. Gracias por todos sus comentarios, consejos y amistad brindados, los cuales me han sido de gran ayuda.

A la **Dra. Irma Rosas**, al **Dr. Luis Gerardo Ruíz** y a la **Dra. Christina Siebe**, 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. John Tatarko** del Depto. de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), por su gran apoyo y consejos realizados durante la realización del proyecto. Así también, por aceptar ser parte de mi Jurado de Examen.

Al **Ing. Manuel García** y al **Ing. Jorge Escalante** del Depto. de Instrumentación del CCA-UNAM, por el apoyo brindado durante la campaña de mediciones.

Al **Ing. Francisco Magallanes** del Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT), por el apoyo brindado durante la campaña de mediciones.

A la **Dra. Lourdes de la Isla** y al **Dr. Mario Martínez** del Colegio de Posgraduados, por los comentarios realizados para la realización de la campaña de mediciones.

A la **Dra. Norma Fernández**, por la información proporcionada sobre el ex lago de Texcoco y por los comentarios realizados.

Al **Engineering and Wind Erosion Research Unit (EWERU-USDA)** y al **Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología, UNAM**, por la ayuda proporcionada en el procesamiento de las muestras de suelo.

Al **Dr. Ricardo Torres**, al **Mtro. Williams Vázquez** y a la **Mtra. Bertha Mar**, por toda su ayuda, consejos y amistad que me han brindado todo este tiempo.

A todo ellos, G R A C I A S . . .

DEDICATORIAS

A mis padres *Wulfrano Díaz* y *Eugenia Nigenda*, por estar siempre ahí, a mi lado, aconsejándome e inculcándome el camino de la superación. Gracias por el simple hecho de ser mis padres. ¡LOS AMO!

A *DIOS*, por permitirme estar aquí redactando unas palabras. Por permitirme caer y volver a levantarme. Por permitirme ser yo y seguir adelante...

A ti, por abrirme nuevamente las puertas y dejarme entrar a tu corazón, por apoyarme y llenarme nuevamente de sueños e ilusiones. ¡TE AMO **ROSY!**

A todas aquellas personas que me tendieron la mano cuando más la necesitaba. Gracias **amigos...**

Hasta la victoria, siempre...

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.	3
HIPÓTESIS.	6
OBJETIVOS.....	6
3. ANTECEDENTES.	7
3.1. Descripción de la zona de estudio.....	7
3.2. Lago de Texcoco.....	10
3.2.1. <i>Desecación del Lago de Texcoco</i>	10
3.2.2. <i>Recuperación del Lago de Texcoco</i>	12
3.3. Erosión Eólica.	15
4. MÉTODOS.	21
4.1. Descripción de modelos.	21
4.1.1. <i>Multiscale Climate and Chemistry Model (MCCM)</i>	22
4.1.2. <i>Wind Erosion Prediction System (WEPS)</i>	27
4.2. Sistema MCCM-WEPS.....	32
4.3. Caracterización de los suelos en los sitios de estudios.	35
4.3.1. <i>Suelos agrícolas</i>	35
4.3.2. <i>Suelos agrícolas de Tenango del Aire</i>	38
4.3.3. <i>Vaso del antiguo Lago de Texcoco</i>	38

4.4. Selección de episodios de simulación.....	39
4.5. Procedimiento de simulación.	41
4.6. Evaluación de la meteorología.	42
5. RESULTADOS.....	45
5.1. Evaluación del desempeño del modelo meteorológico.....	45
5.2. Simulación numérica de las emisiones.	53
5.2.1. <i>Episodio 1: 19 de Marzo del 2006.</i>	53
5.2.2. <i>Episodio 2: 11 de Enero del 2008.</i>	56
5.2.3. <i>Episodio 3: 5 de Abril del 2008.</i>	60
5.2.4. <i>Episodio 4: 29 de Noviembre del 2008.</i>	65
5.3. Análisis Vertical.....	69
5.4. Normatividad Ambiental.....	75
6. CONCLUSIONES.....	77
APÉNDICE.	82
A. Boletines informativos sobre la calidad del aire en la Ciudad de México.....	82
BIBLIOGRAFÍA.	84

LISTA DE FIGURAS

2.1.	Composición de las partículas gruesas en la Ciudad de México durante el invierno de 1997.....	5
3.1.	Ubicación geográfica de la cuenca de México.....	7
3.2.	Condición sinóptica a 500mb para el día 22 de Febrero del 2006.....	9
3.3.	Situación del Lago de Texcoco en 1519.....	11
3.4.	Localización del vaso del antiguo Lago de Texcoco y situación actual de los suelos en esta región.....	12
3.5.	Movimiento de las partículas durante el proceso erosivo.....	18
4.1.	Diagrama de flujo del modelo MCCM.....	25
4.2.	Estructura del modelo WEPS.....	28
4.3.	Diagrama conceptual de los procesos físicos considerados por el modelo WEPS para el cálculo de las emisiones de partículas PM ₁₀	31
4.4.	Diagrama de flujo del sistema obtenido del acoplamiento de los modelos MCCM y WEPS.....	33
4.5.	Subregiones generadas en la zona del ex Lago de Texcoco.....	34
4.6.	Localización de los sitios de interés durante el proyecto.....	35
4.7.	Arreglo de los equipos de muestreo en el campo experimental.....	37
4.8.	Dominios anidados implementados durante la simulación en el sistema MCCM-WEPS.....	42
5.1.	Variación horaria de temperatura superficial entre los datos reportados por la estación Tacuba y los generados por el modelo durante los cuatro episodios.....	46
5.2.	Variación horaria de intensidades de vientos entre los datos reportados por la estación Chapingo y los generados por el modelo durante los cuatro episodios.....	47
5.3.	Variación horaria de direcciones de vientos entre los datos reportados por la estación Chapingo y los generados por el modelo durante los cuatro episodios.....	48

5.4.	Serie de tiempo de concentraciones de PM ₁₀ reportados por la estación San Agustín y los generados por el modelo durante el 19 de Marzo del 2006.....	54
5.5.	Campo de vientos y concentraciones generadas al sureste del Valle de México y sobre el ex Lago de Texcoco para el 19 de Marzo del 2006.....	55
5.6.	Serie de tiempo de concentraciones de PM ₁₀ reportadas por las estaciones San Agustín y Xalostoc y los generados por el modelo durante el 11 de Enero del 2008.....	57
5.7.	Campo de vientos y concentraciones generados sobre el ex Lago de Texcoco para el 11 de Enero del 2008.....	59
5.8.	Serie de tiempo de concentraciones de PM ₁₀ reportadas por algunas de las estaciones de monitoreo y los generados por el modelo durante el 5 de Abril del 2008.....	62
5.9.	Campo de vientos y concentraciones generados sobre el Valle de Chalco y la región del ex Lago de Texcoco para el 05 de Abril del 2008.....	64
5.10.	Serie de tiempo de concentraciones de PM ₁₀ reportadas por algunas de las estaciones de monitoreo y las generadas por el modelo durante el 29 de Noviembre del 2008.....	66
5.11.	Campo de vientos y concentraciones generados al sureste del Valle de México y sobre la región del ex Lago de Texcoco para el 29 de Noviembre del 2008...	68
5.12.	Localización de los puntos seleccionados para el análisis vertical.....	70
5.13.	Perfiles verticales de concentraciones de PM ₁₀ y Temperaturas Potenciales de las 14:00 y 15:00 LST durante el 29 de Noviembre del 2008.....	71
5.14.	Perfiles verticales de concentraciones de PM ₁₀ y Temperaturas Potenciales de las 16:00 y 17:00 LST durante el 29 de Noviembre del 2008.....	72
5.15.	Perfiles verticales de concentraciones de PM ₁₀ y Temperaturas Potenciales de las 18:00 y 19:00 LST durante el 29 de Noviembre del 2008.....	73
6.1.	Ubicación de las fuentes emisoras y áreas afectadas por altas concentraciones de PM ₁₀ identificadas mediante la aplicación de MCCM-WEPS.....	78
A.1.	Boletín informativo sobre calidad del aire para el 11 de Enero del 2008.....	82
A.2.	Boletín informativo sobre calidad del aire para el 5 de Abril del 2008.....	83
A.3.	Boletín informativo sobre calidad del aire para el 29 de Noviembre del 2008...	83

LISTA DE TABLAS

3.1.	Efectos físicos y económicos provocados por la erosión eólica.....	17
3.2.	Movimiento de las partículas en función de su tamaño.....	19
4.1.	Parámetros obtenidos de la campaña de mediciones utilizados por el sistema MCCM-WEPS para suelos agrícolas.....	37
4.2.	Parámetros aproximados para las zonas agrícolas de Tenango del Aire utilizados por el sistema MCCM-WEPS.....	38
4.3.	Parámetros obtenidos para la región del vaso del antiguo Lago de Texcoco utilizados por el sistema MCCM-WEPS.....	39
4.4.	Resolución y dimensiones de los dominios anidados utilizados en la simulación de los eventos seleccionados.....	41
5.1.	Índices de concordancia entre las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante los cuatro escenarios	49
5.2.	Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 19 de Marzo del 2006.....	50
5.3.	Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 11 de Enero del 2006.....	50
5.4.	Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 5 de Abril del 2008.....	51
5.5.	Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 29 de Noviembre del 2008.....	51
5.6.	Percentiles 98 de las estaciones de muestreo durante todos los episodios de seleccionados.....	75

RESUMEN

La contaminación del aire por partículas provenientes del suelo representa un grave problema en diversas comunidades y ciudades del mundo. En la Ciudad de México, las emisiones de partículas afectan considerablemente la calidad del aire y como consecuencia la salud de la población. Los modelos computacionales representan hoy en día, una herramienta para identificar y cuantificar las emisiones provenientes del suelo y de esta manera se puedan establecer políticas de control para reducir el impacto de dichas emisiones.

En este trabajo, se estudió el origen, comportamiento y transporte del fenómeno de la erosión eólica usando un modelo de erosión acoplado a uno de calidad del aire. Esto permitió estudiar la contaminación del aire por partículas PM_{10} emitidas por este fenómeno en la Ciudad de México. A la vez, se realizó una campaña de mediciones para obtener los parámetros de suelos agrícolas necesarios para el modelo. También se prepararon bases de datos con los parámetros característicos de la zona del vaso del antiguo Lago de Texcoco, con la finalidad de que el modelo de erosión pudiera reproducir el fenómeno en base a las condiciones de los suelos que rodean a la ciudad. Una vez teniendo los parámetros de suelos y el modelo acoplado se seleccionaron cuatro episodios de contaminación por partículas para identificar las fuentes de emisión y determinar las zonas mayormente impactadas.

De los resultados obtenidos, los suelos del ex Lago de Texcoco y zonas agrícolas al este y sureste de la Ciudad de México fueron identificados como las principales fuentes de emisión que afectan la calidad del aire. El origen y forma de las plumas de partículas

producidas por la erosión eólica y las implicaciones tanto locales como regionales generadas por este fenómeno fueron estudiadas, con lo cual, se identificó que las confluencias de vientos son un factor muy importante en la distribución vertical de estos contaminantes.

Mediante el desarrollo del modelo conjunto de erosión y de calidad del aire descrito en este documento, poseemos una herramienta computacional útil para estudiar el fenómeno de la erosión eólica, sus fuentes e impactos en regiones urbanas; así también se podrán generar casos de estudio para el establecimiento de políticas de control.

ABSTRACT

Air pollution by dust particles is a serious problem around the world. Natural dust emissions are an important factor in the air quality of Mexico City. The use of computational models allows identification and quantification of soil emissions and testing a priori of control policies to reduce their impacts.

In this work the origin, behavior and transport of the wind erosion phenomenon was studied. For this purpose an erosion and air quality models were coupled allowing to study PM₁₀ air pollution by Aeolian erosion in Mexico City. A field campaign was realized to obtain soil parameters of agricultural lands needed by the erosion model. Also soil parameter data bases were created for dry Lake of Texcoco. All this parameters were needed to simulate wind erosion phenomena by the model using soil characteristics around Mexico City. The important contribution of Aeolian erosion on urban air quality, its genesis, morphology, location and regional implications such as the role played by surface confluences, the dry Lake of Texcoco and agricultural lands to the East and South-East of Mexico City were established. Four episodes were selected to apply the coupled model to identify potential sources and to determine the most impacted areas.

The dry Lake of Texcoco and agricultural lands from the east and south-east of the basin of Mexico were the main sources affecting urban air quality. Origin and shape of dust particles plumes and its local and regional implications were studied. Wind confluences were identified as a main factor for particles vertical transport and distribution.

The erosion and air quality models described here provides a useful computational tool to study the Aeolian erosion phenomenon, its sources and impact on urban regions. As a result of this research we developed a system with the capability of modeling the phenomenon of air pollution by natural particles emitted by wind erosion and to generate case study scenarios useful to propose control policies.

1. INTRODUCCIÓN.

Considerando que la Ciudad de México cuenta con programas de monitoreo de la calidad del aire que no han sido diseñados para identificar fuentes potenciales de emisión de partículas de suelo a la atmósfera, es importante localizar y estimar la contribución de los suelos que favorecen la emisión de partículas que afectan considerablemente la calidad del aire.

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-Reynoso, 2002; Jazcilevich *et al.*, 2003; Jazcilevich *et al.*, 2005). Dentro de este tipo de modelos encontramos al “MCCM” (*Multiscale Climate and Chemistry Model*), el cual simula las condiciones meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica de la región de interés y permite predecir el comportamiento de los contaminantes emitidos a la atmósfera.

Por otro lado, existen modelos como “WEPS” (Wind Erosion Prediction System) que permiten predecir la pérdida de suelo dependiendo de la velocidad del viento y de las condiciones superficiales del suelo (erosión eólica). Los modelos WEPS y MCCM pueden ser acoplados para estudiar la dispersión de partículas emitidas por efecto de la erosión eólica de los suelos.

Considerando lo anterior, se desarrolló un sistema computacional a partir de la incorporación del modelo de erosión eólica WEPS al modelo de calidad del aire MCCM con la finalidad de estudiar y determinar la distribución espacial y temporal de partículas

PM₁₀ provenientes de suelos con escasa o nula cobertura vegetal, localizados en los alrededores de la Ciudad de México. El modelo MCCM-WEPS es de gran utilidad porque permitirá saber cuándo ocurre este fenómeno y dónde se localizan las zonas más impactadas por el mismo. Inclusive, se podrán predecir eventos severos de contaminación atmosférica generados por la presencia de partículas provenientes del suelo en el aire.

Este trabajo se compone principalmente de seis 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 la 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; así como la forma en la que ambos modelos fueron acoplados. Se describen también las actividades realizadas durante la campaña de mediciones, en la cual se obtuvieron los parámetros de suelos agrícolas utilizados para las simulaciones; la manera en la que fueron generados los datos de suelo para Tenango del Aire y para el antiguo Lago de Texcoco también es descrita en este capítulo. Finalmente, se menciona la forma en la que fueron seleccionados los episodios para la aplicación del sistema MCCM-WEPS, así como el procedimiento de simulación.

En el capítulo V, se presentan los resultados obtenidos por la aplicación del sistema desarrollado para el estudio del fenómeno de la dispersión de partículas sobre la región de la cuenca de México usando los escenarios seleccionados. Finalmente, en el capítulo VI se presentan las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados y las recomendaciones que podrán ayudar a mejorar esta investigación.

2. JUSTIFICACIÓN.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) (2010), establece que existen graves riesgos para la salud derivados de la exposición a partículas de los habitantes de numerosas ciudades de los países desarrollados y en vías de desarrollo. Además, es posible establecer una relación cuantitativa entre los niveles de contaminación y el aumento de la mortalidad y la morbilidad, ya que la exposición crónica a las partículas aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como de cáncer pulmonar (OMS, 2010).

En la Ciudad de México, las partículas representan uno de los principales contaminantes que afectan considerablemente la calidad del aire. La contaminación por partículas PM₁₀ (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 suelos propensos a la erosión eólica (de Icaza, 2003; López *et al.*, 2002).

Diversos estudios han demostrado la aportación de partículas provenientes del suelo sobre la calidad del aire de la Ciudad de México. Jáuregui (1971, 1983, 1989), explica la presencia de tolvaneras sobre esta región desde el año de 1920, a partir del estudio de la visibilidad en puntos estratégicos localizados sobre la ciudad. Así mismo, López *et al.* (2002), muestran que la cuenca de México experimenta periódicamente eventos de tolvaneras que provocan concentraciones de partículas PM₁₀ por arriba de la norma establecida (120µg/m³), por lo que el problema de contaminación no solamente se le

atribuye a fuentes antropogénicas¹, sino que también a zonas rurales o periurbanas desprovistas de cobertura vegetal propensas a la erosión eólica localizadas en los alrededores de la ciudad, como el área del ex lago de Texcoco. Como se demostrará más adelante, este último emite una gran cantidad de partículas primarias.

Chow (1995) señala que la masa de partículas PM₁₀ está constituida principalmente de seis componentes: 1) material geológico², 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. Por otro lado, Chow *et al.* (2002), realizaron un estudio sobre la composición de las partículas en la Ciudad de México durante el invierno de 1997. Las mediciones de las partículas PM_{2.5} y PM₁₀ fueron realizadas en intervalos de 24 horas en seis estaciones de monitoreo y obtuvieron resultados referentes a la composición 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 2.5µm pero menores o iguales a 10µm en diámetro aerodinámico. A partir del análisis de los resultados obtenidos, concluyeron que aproximadamente el 48% de la masa de partículas PM₁₀ recolectadas estaba constituida por material de origen geológico. En la Figura 2.1 se presenta la composición química de las partículas gruesas como resultado de este estudio. Vega *et al.* (2002) muestran que el ex lago de Texcoco es una de las principales fuentes de emisión de partículas que afecta los sitios de Cerro de la Estrella, Xalostoc y Netzahualcoyotl principalmente.

Díaz-Nigenda (2005), a partir de la aplicación de modelos matemáticos como los que aquí se describen, establece que el ex Lago de Texcoco, es una de las principales fuentes de emisión de partículas PM₁₀ provenientes del suelo que afectan considerablemente la calidad del aire de la Ciudad de México.

¹ Fuentes vehiculares e industriales.

² Los términos “material de origen geológico” y “material crustal”, serán aplicados para referirse al material superficial del suelo que puede ser transportado por acción del viento.

Otros estudios realizados recientemente, también confirman la presencia de material proveniente del suelo en el aire de la ciudad; tal es el caso de Querol *et al.* (2008), quienes reportan que durante la campaña Megacities Initiative: Local and Global Research Observations (MILAGRO)³ que se realizó durante Marzo del 2006 sobre la Ciudad de México, las partículas PM₁₀ estaban constituidas en un 30% de material crustal. Por otro lado, mediante el uso de modelos receptores, Múgica *et al.* (2009), reportan que durante esta misma campaña, el suelo fue una de las fuentes de partículas más importantes, emitiendo un 26% o más de las partículas finas en algunas áreas de la ciudad. Así mismo, Fast *et al.* (2007), establecieron que durante Marzo del 2006, se generaron tolvaneras sobre la región como resultado de vientos de gran intensidad asociados a frentes fríos.

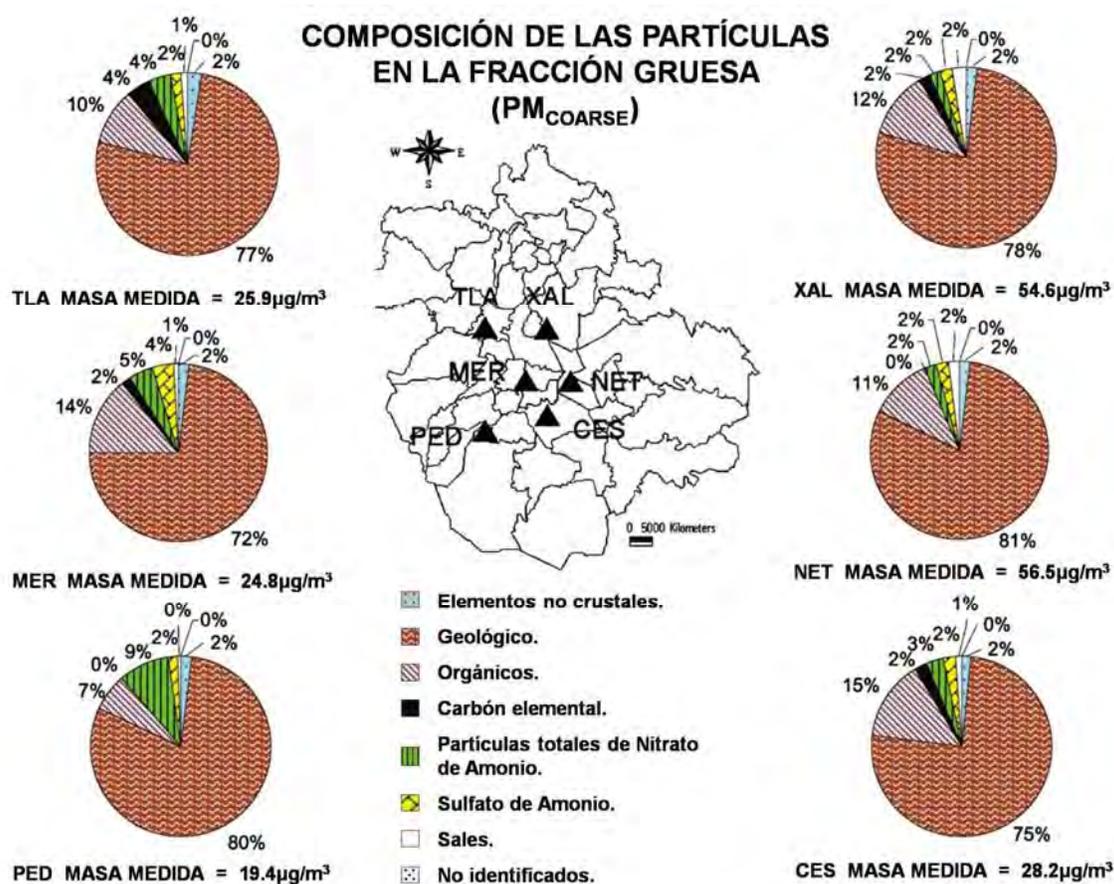


Figura 2.1. Composición de las partículas gruesas en la Ciudad de México durante el invierno de 1997 (Chow et al., 2002).

³ <http://mce2.org/fc06/fc06.html>

Todos estos estudios revelan la gran aportación que tienen los suelos desnudos localizados en los alrededores de la Ciudad de México por efecto de la erosión eólica, a la calidad del aire de la región. De aquí la importancia que tiene el desarrollar una herramienta capaz de estudiar este fenómeno para identificar las fuentes potenciales de emisión, localizar las áreas mayormente impactadas y proponer medidas de control.

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis a demostrar así como los objetivos generales establecidos para este proyecto de investigación.

HIPÓTESIS.

Las partículas de origen natural emitidas por erosión eólica contribuyen a la contaminación del aire en la región de la cuenca de México.

OBJETIVOS.

- Estudiar el fenómeno de la emisión y transporte de partículas PM_{10} emitidas por erosión eólica en la cuenca de México.
- Identificar las fuentes potenciales de partículas PM_{10} emitidas por erosión eólica.
- Estimar la distribución temporal y espacial de partículas PM_{10} de origen geológico.
- Determinar las zonas impactadas por las emisiones de partículas PM_{10} provenientes de los suelos desnudos o con escasa cobertura vegetal.
- Comparar los resultados obtenidos de la aplicación del sistema, con información reportada por la Red de Monitoreo local.
- Elaborar recomendaciones de políticas de control que puedan crear nuevos campos de investigación, además de que permitan mejorar la aplicación de este trabajo como una herramienta en la predicción de eventos de contaminación del aire.

3. ANTECEDENTES.

3.1. Descripción de la zona de estudio.

La Ciudad de México, se encuentra a $19^{\circ}20'$ de Latitud Norte y a $99^{\circ}05'$ de Longitud Oeste y se ubica dentro de la Cuenca de México⁴, la cual a su vez, se localiza en la región central del país (Figura 3.1). Esta cuenca tiene un área aproximada de $9,560 \text{ km}^2$ y sus áreas bajas tienen una elevación promedio de $2,240\text{m}$ sobre el nivel del mar (msnm).

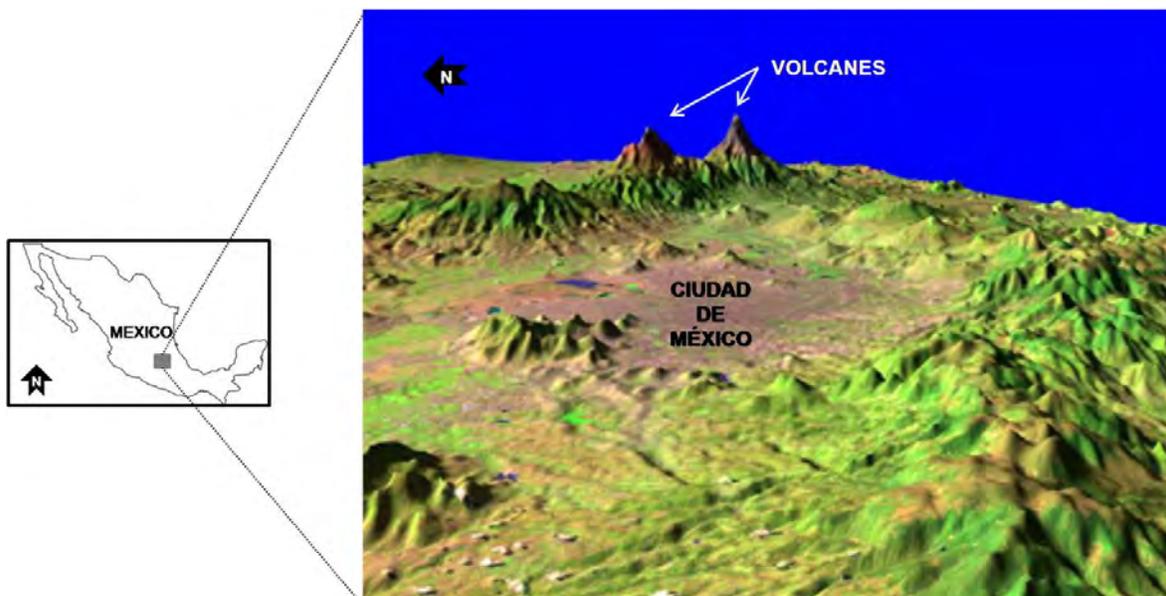


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la Cuenca de México. La Ciudad de México (derecha), se encuentra localizada en la parte más baja de esta zona geográfica, rodeada de un sistema orográfico complejo de aproximadamente $3,700\text{msnm}$.

⁴ Denominaremos como Cuenca de México a la región donde se localiza el Valle de México, siendo éste el lugar donde se llevan a cabo los fenómenos de erosión descritos en este trabajo.

En los alrededores de la Ciudad de México se encuentran áreas destinadas a usos agrícolas además del ex Lago de Texcoco, las cuales son regiones que se encuentran propensas a la erosión eólica debido a la escasa cobertura vegetal que presentan; ocurriendo este fenómeno principalmente durante los meses comprendidos en la temporada de estiaje. Las montañas que rodean a la ciudad forman una barrera física con una altura de aproximadamente 3,700 msnm, además de dos picos aislados localizados al este (los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl), los cuales alcanzan elevaciones cercanas a 5,450 y 5,250 msnm respectivamente (Figura 3.1). Durante los meses comprendidos en la temporada de invierno, existen sistemas anticiclónicos (sistemas de alta presión) estacionarios sobre esta región, los cuales son generados en el Golfo de México y el Océano Pacífico (Jazcilevich *et al.*, 2005). Un ejemplo de esta condición se muestra en la Figura 3.2. Estos sistemas producen las condiciones para una atmósfera estable, generando inversiones térmicas e induciendo a episodios severos de contaminación, por lo que el riesgo de afectación a la salud de la población se ve incrementado (de Icaza, 2003).

Esta región está considerada como una de las áreas metropolitanas más grandes del mundo ya que abarca al Distrito Federal casi en su totalidad, además de algunas partes del Estado de México y el sur del estado de Hidalgo; alberga aproximadamente la quinta parte de la población nacional lo que equivale a más de 20 millones de habitantes (INEGI, 2000). A nivel nacional, reúne el mayor número de fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica así como fuentes naturales y agrícolas sujetas a la erosión eólica. Entre las fuentes se pueden mencionar: áreas desnudas o con escasa cobertura vegetal, volcanes, tiraderos de basura, fábricas, termoeléctricas, industrias químicas, fundidoras, incineradores industriales y domésticos, más de cuatro millones de vehículos, etc.

De acuerdo con de Icaza (2003), 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 la superficie del suelo se enfría rápidamente, ocasionando que el aire adyacente a él, sea más denso. Este fenómeno natural causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera, por lo que los contaminantes no se dispersan adecuadamente.
- Debido a la altitud a la que se encuentra, existe gran incidencia de radiación solar, lo cual favorece a la formación de contaminantes fotoquímicos.
- Formación de líneas de confluencia (Jazcilevich *et al.*, 2005).
- La altitud a la que se ubica la Cuenca 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.

Intensidades de Vientos a 500mb 22 de Febrero del 2006

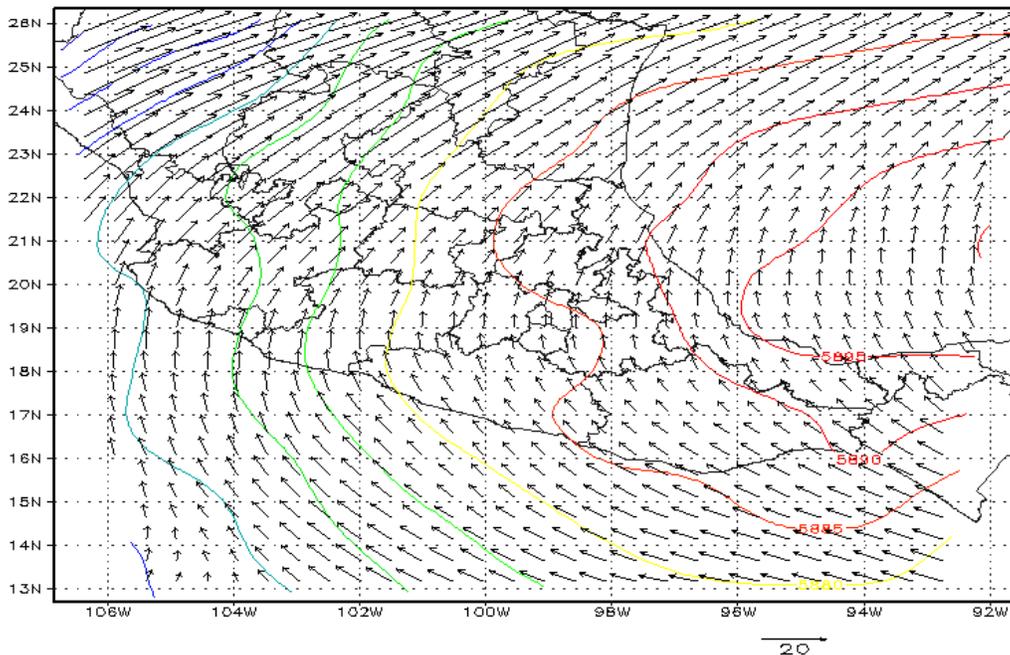


Figura 3.2. Condición sinóptica a 500mb para el día 22 de Febrero del 2006. Los vectores de vientos muestran un sistema anticiclónico sobre la región central del país (Vázquez-Morales, 2007).

En general, la Cuenca de México presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Chalco y Xochimilco como se muestra en la Figura 3.3. De estos lagos, todavía existe una pequeña porción del último de ellos. Los dos primeros, fueron sometidos a obras hidráulicas para desecarlos y dar paso al crecimiento urbano como se explicará en la

siguiente sección. Hoy en día, el área ocupada por el vaso del antiguo Lago de Texcoco constituye un área semidesnuda de aproximadamente 70km² propensa a la erosión eólica, la cual afecta la calidad del aire de la Ciudad de México (Jáuregui, 1971, 1983, 1989) y por consecuencia, a la salud de la población. En la Figura 3.4 se muestra la ubicación de esta región, así como ejemplos de la situación actual de sus suelos.

3.2. Lago de Texcoco.

En los siguientes apartados, se presenta una síntesis de los estudios realizados por Fernández-Buces (2006), Merlo (2009) y Lomelí *et al.* (2009), con respecto a las obras que fueron ejecutadas para la desecación del Lago de Texcoco. Posteriormente se explican las actividades que han sido realizadas para la recuperación parcial de esta región. Con esto, se explica la situación actual de los suelos en esta zona cercana a la Ciudad de México.

3.2.1. Desecación del Lago de Texcoco.

Después de la conquista de México comenzó la desecación del Lago de Texcoco (Figura 3.3), debido a las continuas inundaciones que aquejaban a la ciudad. Se realizaron obras de protección con el uso de técnicas e instrumentos prehispánicos para construir presas, canales y conductos de agua que tuvieron como resultado el drenado hacia el norte, tanto de aguas negras como del agua pluvial y de los manantiales del lugar, con la consecuente desecación de esa parte del lago. Con esto, los asentamientos y el crecimiento de la población se vieron favorecidos; el origen lacustre del suelo, permitió la realización de actividades humanas de subsistencia, como la agricultura y la ganadería.⁵

Las obras de drenado total del lago tardaron cuatro siglos. Se construyeron sistemas de drenaje artificial hacia el lado noreste de la cuenca como el Tajo de Nochistongo (1608-1822), el túnel de Tequixquiac (1630-1866), el Gran Canal de Desagüe (1879-1910), el túnel Nuevo de Tequixquiac (1937-1947) y el Emisor Poniente (1958-1964). Estas obras controlaron los problemas de inundación de la Ciudad de México, pero se acentuó el

⁵ Sistema Hidráulico del Valle de México. <http://www.bibliojuridica.org/libros/5/2492/4.pdf>

problema de abasto de agua, por lo que fue necesario perforar pozos profundos para abastecer la creciente población. Como consecuencia se hundió la ciudad por debajo de la zona de Texcoco y volvieron los problemas de inundación. Finalmente con las obras de Drenaje Profundo de la Ciudad de México (1967-1975) se eliminó totalmente el agua en la zona del lago, quedando al descubierto una extensa superficie con suelos que eventualmente fueron concentrando sales, hasta adquirir en la década de los 70's las condiciones de extrema afectación por sales y sodio, que persisten en la actualidad (Fernández-Buces, 2006). De esta manera, los lagos de Texcoco, Xaltocan, Zumpango, San Cristóbal, Chalco y parte del de Xochimilco fueron desecados (Lomelí *et al.*, 2009).



Figura 3.3. Situación del Lago de Texcoco a la llegada de los españoles en 1519 (CONABIO, 2003).

Todas estas obras, lograron desecar a tal grado la zona lacustre, que grandes áreas de suelo de la cuenca de México quedaron descubiertas a mitad del siglo pasado. La gran mayoría fueron utilizados para asentamientos humanos, mientras que otras para actividades agrícolas y ganaderas. Debido al suelo con alto contenido de sales que se tiene en la región ocupada por el vaso del Lago de Texcoco, no se había podido realizar ningún tipo de actividad, por lo que esta zona permaneció desnuda por muchos años, ocasionando graves problemas de tolvaneras que afectaban a la ciudad y a la salud de la población (véase Figura 3.4) (Jáuregui, 1971, 1983, 1989).

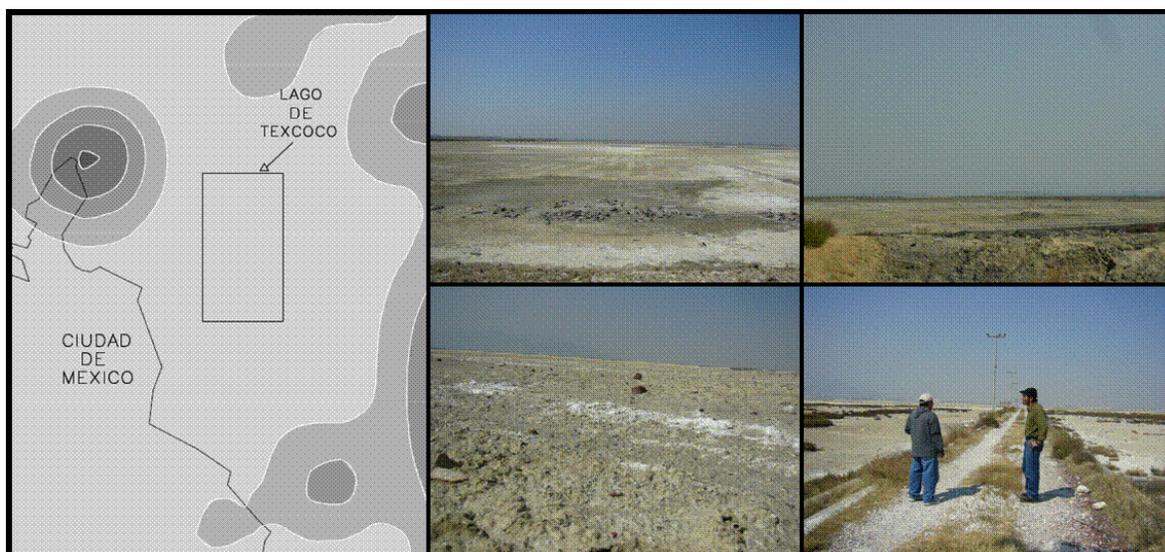


Figura 3.4. Localización del vaso del antiguo Lago de Texcoco (izquierda) y situación actual de los suelos de esta región (derecha).

A partir de entonces, diversas actividades han sido implementadas para tratar de recuperar la zona del vaso del antiguo Lago de Texcoco, para disminuir las emisiones de partículas y por ende, la afectación a la calidad del aire de la Ciudad de México. Estas medidas de mitigación, establecidas como el Plan Lago de Texcoco, se describen en la siguiente sección.

3.2.2. Recuperación del Lago de Texcoco.

Ante la desecación del Lago de Texcoco, en el año de 1965 el doctor Nabor Carrillo Flores planteó la necesidad y urgencia de recuperar el lago, con lo que entre otros objetivos, se rehidrataría las áreas baldías del lago para prevenir inundaciones y como consecuencia

se combatiría la contaminación producida por las tolvaneras. Para ello, se llevaron a cabo estudios sociales, económicos, ambientales, políticos, culturales y técnicos (Merlo, 2009).

El surgimiento del proyecto de rescate del Lago de Texcoco⁶ trata de dar alguna alternativa para la recuperación de esta zona. Como metas se propuso en 1971, realizar actividades en un área de aproximadamente 10,000 hectáreas en dos etapas, las cuales consistían en:

1ª etapa. Realizar tareas de infraestructura hidráulica y de cobertura vegetal en los suelos salitrosos.

2ª etapa. Reforzar las tareas anteriores haciendo propicia el área para el desarrollo de bosques y pastizales. También se propuso la construcción de lagos y estanques para actividades piscícolas, de cría de mosco (ahuetle) y de acocil, así como de albergues para aves migratorias (Lomelí *et al.*, 2009).

El éxito del proyecto no se hizo esperar, recuperándose parcialmente el ecosistema lacustre con la construcción del lago Nabor Carrillo. También se inició el proyecto de lavado de sales de los suelos y la reforestación del área. No obstante, para 1981, el problema de la salinidad y la falta de cobertura vegetal aún abarcaba la mayor parte de la superficie de ex Lago de Texcoco, teniéndose que el 82% de la superficie estaba conformada por suelos descubiertos y sólo el 18% restante tenía una cobertura vegetal (Fernández-Buces, 2006).

Finalmente en 1992 se dio inicio a la segunda etapa del proyecto, en la que se sembraron especies forestales del género *Tamarix* y el pasto salado (*Distichlils spicata*) en la parte sur y sureste del vaso del lago, alrededor del Lago Nabor Carrillo. El área restante, ha sido eventualmente cubierta tanto de forma natural como artificial, por diversas especies de halófitas, reduciéndose la superficie conformada por suelo descubierta al 43% en 1999 (Fernández-Buces, 2006).

⁶ Conocido en ese entonces como “Plan Lago de Texcoco” y actualmente llamado “Proyecto Lago de Texcoco” a cargo de la Comisión Nacional del Agua (Fernández-Buces, 2006).

El rescate de la zona está a cargo de la Comisión Nacional del Agua, a través del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y la Dirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, y uno de los indicadores del éxito de la recuperación ecológica es la avifauna que se ha establecido nuevamente (Merlo, 2009).

En síntesis, la contribución de este proyecto a la zona metropolitana de la Ciudad de México es indiscutible, ya que:

- Ha permitido reducir el impacto de las inundaciones.
- Ha permitido eliminar **casi en su totalidad**, la formación de tolveneras, con la consecuente mejoría en la salud de los habitantes y la reducción de eventos que afectan la visibilidad, que en otros tiempos impedía hasta la circulación de los vehículos.
- Recargar los acuíferos mediante el tratamiento de aguas residuales y la inyección de agua tratada al subsuelo, lo que contribuye a frenar el hundimiento de la ciudad.
- Ahorrar el gasto de agua, produciendo 1.5 m³/s de agua tratada para reuso en la agricultura y en la industria.
- Recuperar zonas que permitan mejorar las condiciones ambientales y frenar la desaparición de especies vegetales y animales.
- Mejorar las condiciones climáticas con la construcción de embalses y amplias zonas de bosques y arbustos (Lomelí *et al.*, 2009).

A pesar de que la implementación del “Plan Lago de Texcoco” ha permitido eliminar en forma importante la formación de tolveneras, la presencia de partículas en el aire por efecto de la erosión eólica provenientes de la región del ex Lago de Texcoco (Vega *et al.*, 2002; Díaz-Nigenda, 2005) y las zonas agrícolas aledañas, pueden considerarse como una de las principales fuentes de emisión de partículas del suelo que afectan considerablemente la calidad del aire de la Ciudad de México, lo cual será demostrado más adelante.

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.

Debido a que la región ocupada por el antiguo Lago de Texcoco fue desecada como consecuencia de las diversas obras hidráulicas que le fueron aplicadas en siglos anteriores, una gran extensión de terreno conocida como el vaso del lago quedó propensa al fenómeno de la erosión eólica, ocasionando la presencia de intensas tolvaneras que afectaban la calidad del aire de la Ciudad de México. Debido a esto, en esta sección se explica en qué consiste el proceso erosivo, así como la forma en la que se desencadena este fenómeno.

3.3. Erosión Eólica.

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; este fenómeno ocurre principalmente en suelos sin protección o parcialmente cubiertos por vegetación (Becerra, 1999).

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 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 cuando se presentan condiciones de baja precipitación y fuerte oscilación de temperaturas día-noche,

lo que ocasiona una acelerada pérdida de humedad que impide que se lleven a cabo los procesos químicos en el suelo que permiten su regeneración. A su vez, por lo que respecta al suelo y a las condiciones de sitio, este fenómeno es favorecido 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).

Los efectos físicos nocivos que puede causar la erosión del suelo sobre una región, tienen 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 3.1.

Aunque el proceso erosivo es el mismo (desprendimiento, transporte y depositación) 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.

Según Becerra (1999), 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. 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 y como consecuencia generar material de menor tamaño.

Tabla 3.1. Efectos físicos y económicos provocados por la erosión eólica. Fuente: Becerra, 1999.

Efectos Físicos	Consecuencias Económicas
Daños al Suelo	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Pérdida de material fino, incluyendo materia orgánica. 2. Deterioro de la estructura del suelo. 3. Distribución o pérdida de los fertilizantes y herbicidas. 	<ol style="list-style-type: none"> a) <i>Pérdidas a largo plazo de la fertilidad del terreno, con la consecuente disminución de la rentabilidad de la explotación.</i> b) <i>Pérdidas a largo plazo de la fertilidad del terreno, con la consecuente disminución de la rentabilidad de la explotación.</i> c) <i>Costos de reposición de los fertilizantes y herbicidas perdidos.</i>
Daños al Cultivo	
<ol style="list-style-type: none"> 4. El cultivo puede ser cubierto por el material depositado. 5. El impacto del material suelto puede cortar plantas o dañar follaje. 6. Las semillas y plántulas pueden ser arrancadas y depositadas en setos o en otros campos. 	<ol style="list-style-type: none"> d) <i>La baja productividad de la tierra da menores ganancias.</i> e) <i>Costos de reposición y baja producción por el desfase del período de crecimiento.</i> f) <i>La baja productividad de la tierra da menores ganancias.</i> g) <i>Costos de reposición y baja producción por el desfase del período de crecimiento.</i> h) <i>Costos mayores de herbicidas.</i>
Otros daños	
<ol style="list-style-type: none"> 7. El material fino se deposita en estructuras. 8. El trabajo agrícola puede suspenderse por las condiciones durante una tolvanera. 9. Daños a la salud. 	<ol style="list-style-type: none"> i) <i>Costos de limpieza y mantenimiento.</i> j) <i>Pérdida de horas de trabajo y por lo tanto menor productividad.</i> k) <i>Gastos en servicios médicos para el tratamiento de enfermedades respiratorias.</i>

En el movimiento de saltación, 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 (rodamiento). Los cuales se presentan en la Figura 3.5. 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).

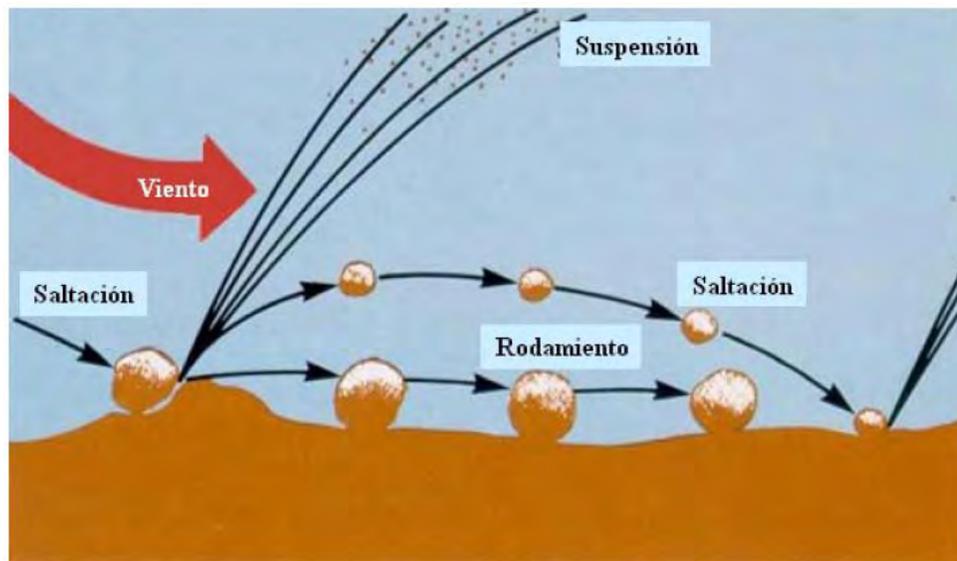


Figura 3.5. Movimiento de las partículas durante el proceso erosivo. Fuente: USDA-ARS-EWERU, 2003.

En la Tabla 3.2 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 3.2. 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
Movimiento							
Suspensión	← ●						
Saltación		● ——— ●					
Rodamiento					● ——— ●		

TRANSPORTE.

La cantidad de suelo removido por el viento depende de diversos factores, entre ellos se encuentran el tamaño de las partículas, la agregación del suelo y la 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).

DEPOSITACIÓN.

La depositación 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 depositación ocurre de manera proporcional al diámetro de partículas, cayendo primero las más gruesas (Becerra, 1999).

La depositación 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) Inicio de la temporada de lluvias.

Considerando que las partes bajas de la cuenca de México, presentan grandes extensiones de suelos (ex Lago de Texcoco y zonas agrícolas) propensos a la erosión eólica, es necesario desarrollar una herramienta que permita estudiar este fenómeno, con la capacidad de simular las emisiones de partículas así como su transporte a lo largo de la cuenca, lo cual es una parte fundamental de este trabajo de investigación. Es por ello, que en la siguiente sección se presentan las herramientas computacionales que fueron utilizados para este fin, así como la forma en que éstas fueron acopladas para trabajar en el estudio de la dispersión de partículas emitidas por erosión eólica.

4. MÉTODOS.

4.1. Descripción de modelos.

La modelación puede ser definida como el proceso de aplicación del conocimiento para simular matemática y numéricamente 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 de un sistema real, siempre y cuando se cuente con información de calidad requerida para dichos modelos (Nirmalakhandam, 2002).

El campo de conocimientos que estudia la afectación de la calidad del aire por la presencia de partículas provenientes del suelo mediante la aplicación de modelos es relativamente nuevo. Algunos autores como Park (2004) y Vautard (2005) entre otros, han realizado estudios sobre la contribución de las fuentes por erosión eólica a la concentración de partículas en Asia y Europa respectivamente, mediante el uso de modelos computacionales. En México, López (2002) realizó un estudio sobre el transporte y dispersión de partículas provenientes del suelo 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, a partir de los resultados concluye que el problema de la contaminación en la ciudad no solamente se le atribuye a fuentes antropogénicas, sino que también a los suelos desnudos que se encuentran en los alrededores de la ciudad.

En este trabajo los modelos Wind Erosion Prediction System (WEPS) y el Multiscale Climate and Chemistry Model (MCCM), fueron acoplados para trabajar sobre la dispersión de partículas provenientes de suelos desprotegidos o de escasa cobertura vegetal. El acoplamiento de estos modelos es de gran importancia, ya que el sistema obtenido podrá ser utilizado como una herramienta para estudiar y predecir eventos de contaminación generados por la presencia de partículas naturales en el aire provenientes de suelos afectados por el fenómeno de la erosión eólica.

A continuación, se presenta una breve descripción de los modelos MCCM y WEPS, los cuales son las herramientas fundamentales para los fines de este trabajo. También se presenta la manera en la que ambos fueron acoplados y la forma en la que fueron obtenidos los parámetros de suelo requeridos por el modelo de erosión. Finalmente se describen la forma en la que se seleccionaron los episodios de interés, así como el procedimiento de simulación aplicado y la forma en la que se lleva a cabo la evaluación del modelo.

4.1.1. Multiscale Climate and Chemistry Model (MCCM).

El modelo MCCM, desarrollado en el Institut für Meteorologie und Klimaforschung-Fraunhofer Institute (IMK-IFU) de Alemania (Grell et al., 2000) y ha sido implementado para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (García-Reynoso, 2002). Es utilizado para la realización de diversas investigaciones sobre calidad del aire.

El modelo incluye módulos para meteorología, fotólisis, emisiones biogénicas y antropogénicas, radiación y depositación entre otros. El MCCM versión 3, incluye el transporte de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Para la meteorología, se basa en el modelo MM5 desarrollado por Pennsylvania State University y el National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR) (Grell *et al*, 1994).

Algunas características del MCCM son:

- a) Acopla directamente los procesos meteorológicos, de transporte 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.
- e) Trabaja en arquitecturas computacionales en paralelo.

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.

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.

El MCCM 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 (RADM2 y RACM) detallados con 39 y 47 especies químicas respectivamente y partículas (PM₁₀) 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.

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 4.1; éstos son descritos a continuación.

TERRAIN. En el módulo TERRAIN se especifican los dominios de simulación 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.

REGRID. 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*. *Pregrid* lee los archivos con análisis meteorológicos a gran escala en niveles de presión y guarda los archivos de salida con un formato simple, los cuales serán leídos posteriormente por *regridder*, el cual interpola cada archivo generado por *pregrid* en la malla horizontal especificada en el módulo *TERRAIN*.

RAWINS/LITTLE_R. El propósito del análisis objetivo, el cual es realizado en cualquiera de estos módulos, 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. 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.

INTERPF. El procesador *INTERPF* interpola las salidas de *REGRIDDER*, *RAWINS* o *LITTLE_R* de los niveles de presión a los niveles σ 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, las condiciones de frontera dependientes del tiempo de las variables meteorológicas y las condiciones de la frontera inferior.

MCCM. Es la parte del sistema de modelación donde a partir de la información que es procesada tanto por los preprocesadores como por el postprocesador (NESTDOWN), 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, depositación y transformaciones químicas (Figura 4.1).

NESTDOWN. El procesador NESTDOWN prepara los datos de entrada 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.

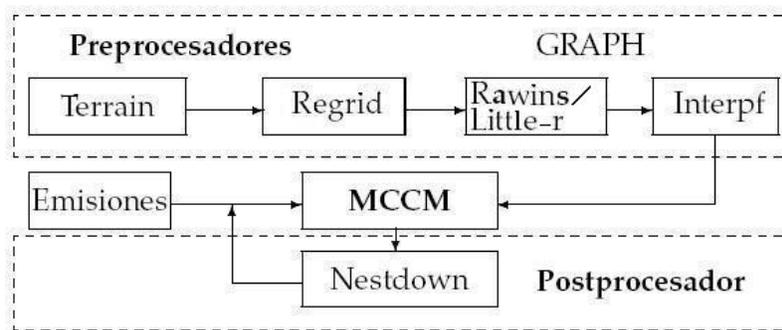


Figura 4.1. Diagrama de flujo del modelo MCCM. En la parte de preprocesadores se prepara la información sobre la topografía y meteorología en la zona de menor resolución. El postprocesador genera los datos para el dominio de mayor resolución en el que se llevará a cabo la simulación de la meteorología, química y transporte.

Para simular el transporte de contaminantes, el modelo MCCM emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p^*C) = -m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(p^* \frac{u}{m} C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(p^* \frac{v}{m} C \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} (p^* \dot{\sigma} C) \\ + Cm^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} p^* \frac{u}{m} + \frac{\partial}{\partial y} p^* \frac{v}{m} + \frac{\partial}{\partial \sigma} p^* \frac{\dot{\sigma}}{m^2} \right] + p^* Q$$

donde u , v y σ son las componentes del viento, $p^* = p_s - p_r$, $C = \rho_c / \rho$ donde ρ_c puede ser la densidad de una especie química, hielo, agua de lluvia, nieve o agua de nube. El factor de escala m (factor de mapa) que proviene de la transformación de coordenadas horizontales y ρQ es el término de producción volumétrica que no se encuentra relacionada a la advección.

La velocidad vertical en coordenadas σ , σ , está dada por

$$\sigma = \frac{\rho_0 g}{p^*} w + \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u + \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v$$

mientras que la densidad de referencia del aire ρ_0 , y ρ , la densidad del aire, se relacionan mediante (Grell *et al.*, 1994, 2000):

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t)$$

Para el caso del transporte turbulento en la capa límite, en MM5 existen diferentes parametrizaciones. Debido a que el esfuerzo humano para acoplar la química con cada una de éstas sería enorme sólo se integra a la parametrización de segundo orden, de nivel 3 (Burk y Thompson, 1989). Este esquema requiere del cálculo de cuatro variables de pronóstico adicionales. Éstas son la energía cinética turbulenta q^2 , la varianza de la temperatura potencial del agua líquida $\overline{\theta_1'^2}$, la varianza de la humedad total $\overline{q_w'^2}$ y la covarianza de la temperatura potencial del agua líquida sobre la humedad total $\overline{\theta_1'^2 q_w'}$.

En el transporte de contaminantes se sigue la parametrización (teoría K) para el transporte turbulento de calor y humedad empleando (Grell *et al.*, 1994, 2000; García-Reynoso, 2002):

$$-\overline{w' C'} = K_h \frac{\partial C}{\partial z}$$

donde K_h está dada por la formulación establecida por Yamada y Mellor (1975).

Durante el transporte turbulento se tiene una complicación adicional, el cual ocurre cuando las reacciones químicas poseen una escala de tiempo de reacción menor que la

escala de tiempo del transporte de los contaminantes. Durante el día en la capa superficial, la escala de tiempo del transporte turbulento es suficientemente pequeña para despreciar este efecto, pero puede ser importante en la capa convectiva arriba de la capa superficial (Hamba, 1993).

4.1.2. Wind Erosion Prediction System (WEPS).

El modelo WEPS fue desarrollado por el Engineering and Wind Erosion Research Unit (EWERU) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Hagen, 1995, 2001, 2004; van Donk, 2003), 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.

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 4.2. 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 depositación 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 efectos de la erosión eólica.

El submodelo de erosión es la parte del modelo WEPS utilizado en la realización de este proyecto. Este puede ser operado como un solo modelo para simular la erosión de un evento en una resolución de tiempo menor a un día; en este caso se utilizó en una escala de tiempo de una hora.



Figura 4.2. Estructura del modelo WEPS. En el recuadro verde se muestra el submodelo que es utilizado para la realización de este proyecto.

El submodelo de erosión (Hagen, 1995) determina en qué momento la velocidad de fricción del viento sobrepasa la velocidad umbral para el movimiento de las partículas evaluando los parámetros que describen las condiciones superficiales del suelo, tales como la rugosidad (orientada y aleatoria), la presencia de biomasa, la distribución de tamaño de agregados, la corteza o cubierta rocosa, la presencia de material erosionable sobre la corteza y la humedad del suelo. Si los vientos son lo suficientemente fuertes, estos parámetros determinan si la erosión eólica puede ocurrir durante la simulación. Si la erosión eólica ocurre, entonces el submodelo simula el proceso de movimiento de material del suelo (Hagen, 2001, 2004).

El submodelo de erosión ejecuta las siguientes funciones:

- 1) Cálculo de las velocidades de fricción basándose en la rugosidad aerodinámica de la superficie.
- 2) Cálculo de las velocidades de fricción umbrales.
- 3) Procesamiento de la pérdida/depositación de material del suelo en cada celda.
- 4) Actualización de las variables superficiales del suelo para reflejar los cambios en las condiciones del suelo causadas por la erosión.

El submodelo de erosión de WEPS calcula la pérdida total de suelo (kg/m^2) así como la fracción de suelo en suspensión (partículas con $\varnothing < 0.1\text{mm}$) y las fracciones de saltación/rodamiento (partículas con \varnothing 's entre 0.1 y 2.0 mm). Las emisiones de PM_{10} son calculadas como una fracción del componente en suspensión.

Para el cálculo de las emisiones de PM_{10} , se plantean las ecuaciones de conservación de masa como una fracción de la componente en suspensión sin considerar ningún tipo de captura de material en la superficie del suelo (Hagen, 1995). Ésta está dada por:

$$\frac{\partial(C_{10}H_{10})}{\partial t} = -\frac{\partial(q_{10})_x}{\partial x} - \frac{\partial(q_{10})_y}{\partial y} + G_{10_{em}} + G_{10_{un}} + G_{10_{ss}}$$

donde

q_{10} = Descarga de PM_{10} (kg/ms).

C_{10} = Concentración media de partículas PM_{10} (Mg/m^3).

H_{10} = Altura de la región de PM_{10} sobre la región de simulación (m).

$G_{10_{em}}$ = Flujo vertical neto de PM_{10} proveniente de material perdido ($\text{kg/m}^2\text{s}$).

$G_{10_{un}}$ = Flujo vertical neto de PM_{10} proveniente de la abrasión de terrones y corteza ($\text{kg/m}^2\text{s}$).

$G_{10_{ss}}$ = Flujo vertical neto de PM_{10} producidas a partir del rompimiento de las fracciones en saltación y rodamiento ($\text{kg/m}^2\text{s}$).

El flujo de emisiones es

$$G_{10_{em}} = SF_{10_{em}} SF_{ss_{em}} C_{em} (q_{em} - q)$$

donde

$SF_{10_{em}}$ = Fracción PM_{10} en el suelo suspendido que fue emitido desde la superficie.

$SF_{ss_{em}}$ = Fracción de suelo con partículas de \varnothing 's $< 0.1\text{mm}$ en el material emitido.

C_{em} = Coeficiente de emisión calculado en función de la complejidad de la superficie del suelo.

q_{em} = Capacidad de transporte de la emisión calculada utilizando la

velocidad de fricción dinámica umbral (kg/ms).

q = Descarga de fracciones en saltación y rodamiento que entran al volumen de control (kg/ms).

La fracción de PM_{10} en las partículas en suspensión emitidas directamente desde la superficie está dado por:

$$SF_{10_{em}} = \frac{SF_1}{SF_{10}}$$

donde

SF_1 = Fracción de suelo superficial menor a 0.1mm de diámetro.

SF_{10} = Fracción de suelo superficial menor a 10mm de diámetro.

El flujo de partículas generadas por la abrasión de la superficie del suelo es

$$G_{10_{em}} = SF_{10_{em}} SF_{SS_{em}} \sum_{i=1}^m (F_{ant} C_{ant}) q$$

donde

$SF_{10_{em}}$ = Fracción PM_{10} en el suelo suspendido que fue producido por la abrasión del suelo.

$SF_{SS_{em}}$ = Fracción de suelo con partículas de $\phi < 0.1mm$ generadas por abrasión.

F_{ant} = Fracción de saltación que desgasta la superficie con el coeficiente de abrasión i .

C_{ant} = Coeficiente de abrasión de la superficie i (1/m).

q = Descarga de fracciones saltación y rodamiento que entran al volumen de control (kg/ms).

La fracción de PM_{10} en las partículas en suspensión generadas por la abrasión del suelo está dada por:

$$SF_{10_{em}} = 0.67 SF_{clay}, \quad SF_{10_{em}} < 0.35$$

donde

SF_{clay} = Fracción de arcillas en la superficie del suelo

El flujo de material a partir del rompimiento de las fracciones de saltación y rodamiento está dado por:

$$G_{10_{st}} = SF_{10_{bk}} C_{bk} q$$

donde

$SF_{10_{bk}}$ = Fracción PM_{10} en el suelo suspendido que fue producido por el rompimiento de las fracciones de saltación y rodamiento.

C_{bk} = Coeficiente de rompimiento (1/m).

q = Descarga de fracciones saltación y rodamiento que entran al volumen de control (kg/ms).

en la cual,

$$SF_{10_{bk}} = 0.0015 + 0.023 SF_{st}^2$$

donde

SF_{st} = Fracción de limos en la superficie del suelo.

Las ecuaciones previamente descritas para el cálculo de las emisiones de PM_{10} utilizadas por el modelo WEPS, pueden resumirse en el diagrama que se presenta en la Figura 4.3. A partir de un volumen de control, en este esquema se observan los procesos físicos que participan en la generación de las emisiones de interés una vez iniciado el proceso erosivo por acción del viento.

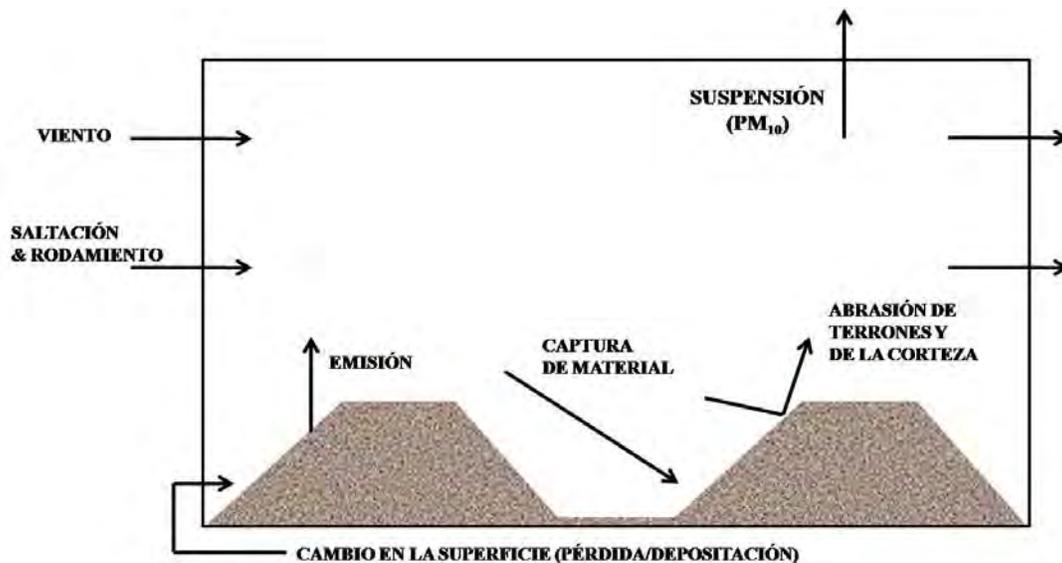


Figura 4.3. Diagrama conceptual de los procesos físicos considerados por el modelo WEPS para el cálculo de las emisiones de partículas PM_{10} .

De esta manera el modelo de erosión calcula la emisión de las partículas PM_{10} , considerando los diferentes parámetros de suelo que se le son suministrados. Una vez calculada la emisión, ésta es enviada al modelo de calidad del aire, en donde las ecuaciones de transporte son consideradas. En la siguiente sección, se explica la manera en la que el modelo WEPS fue acoplado directamente al modelo MCCM para realizar la modelación de la emisión y el transporte de las partículas emitidas por efecto de la erosión eólica.

4.2. Sistema MCCM-WEPS.

Para incorporar el modelo de erosión al modelo de calidad del aire, se realizaron modificaciones a los códigos fuente en lenguaje Fortran de cada uno de ellos. Las variables meteorológicas que el modelo WEPS necesita del modelo MCCM son la intensidad y dirección del viento. Debido a esto, se realizaron cambios en las subrutinas para que estas variables sean calculadas e incorporadas al programa de erosión para que éste calcule las emisiones de partículas PM_{10} a partir de los parámetros de suelo y las condiciones meteorológicas en los sitios de interés. Una vez que las emisiones han sido calculadas, éstas son reincorporadas al modelo MCCM para llevar a cabo el transporte de las mismas.

Como se menciona en el párrafo anterior, las modificaciones básicas realizadas a las subrutinas del MCCM fueron para procesar las componentes del viento (u, v, w) y la dirección del mismo. Una vez calculada la intensidad y dirección, el modelo MCCM llama al modelo de erosión como una de sus subrutinas. Dos diferentes subrutinas de erosión fueron creadas, una de ellas en función del tipo de uso de suelo (suelos agrícolas) y otra para la región del ex lago de Texcoco. Cada subrutina integra sus respectivos parámetros de suelo, para que, cuando las variables meteorológicas sean incorporadas a cada paso de tiempo, el modelo evalúe todo el conjunto de variables y decida si el proceso erosivo puede desencadenarse en cada uno de los sitios de interés. El diagrama de flujo del sistema obtenido del acoplamiento en línea del modelo MCCM y el modelo WEPS puede observarse en la Figura 4.4.

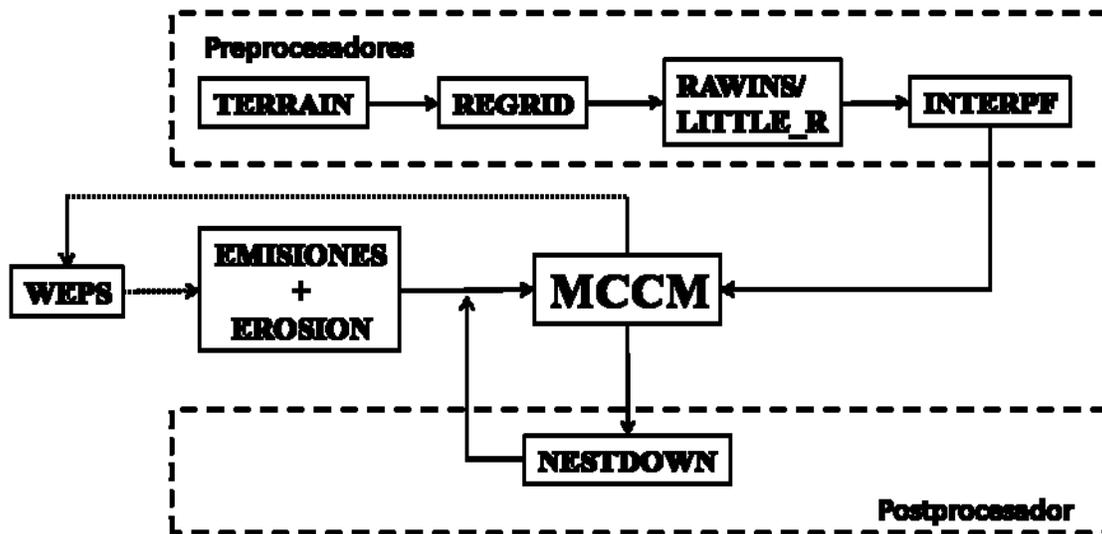


Figura 4.4. Diagrama de flujo del sistema MCCM-WEPS. A diferencia del diagrama original del modelo de calidad del aire (Figura 4.1), el modelo tiene la capacidad de simular el transporte de partículas antropogénicas y las emitidas por erosión eólica a cada paso de tiempo.

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 subregiones; el modelo tiene la capacidad de interpolar cada una de las subregiones con sus respectivos parámetros de suelo considerando sus coordenadas geográficas para ubicarlos en la celda correspondiente (véase Figura 4.5).

Una vez que el modelo de erosión cuenta con todos los parámetros de interés, correspondientes a meteorología y condiciones superficiales, los evalúa para determinar si la erosión eólica se presenta sobre la región y así mismo, llevar a cabo la cuantificación de la emisión. El modelo de erosión fue acoplado de manera tal, que las emisiones de partículas PM_{10} son adicionadas directamente al módulo de partículas de MCCM, y de este modo, la modelación de la distribución temporal y espacial de dichos contaminantes es realizado en el mismo paso de tiempo.

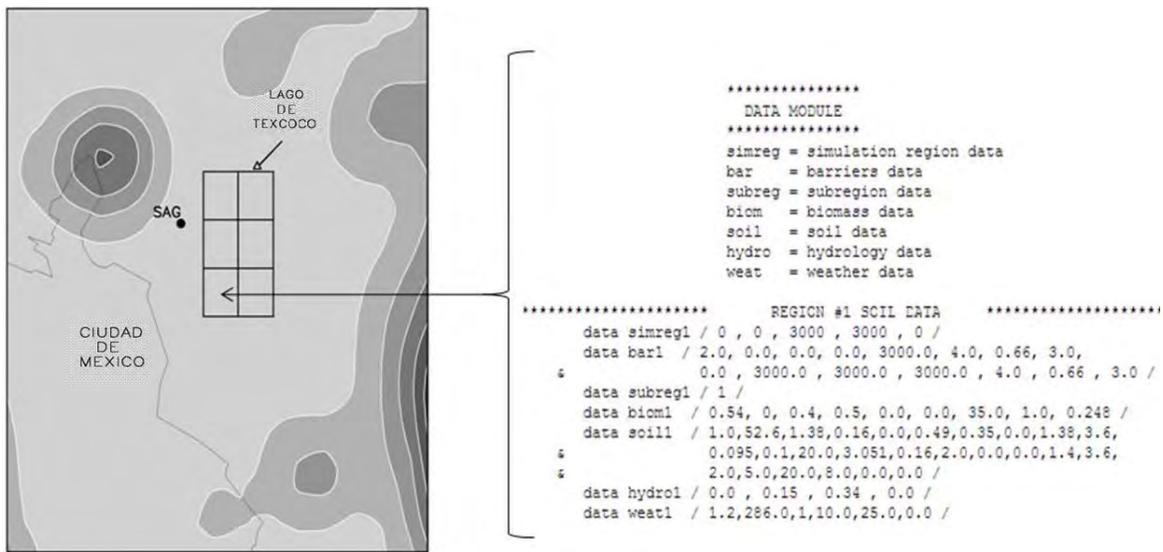


Figura 4.5. Subregiones generadas en la zona del ex Lago de Texcoco (izq.) y conjunto de parámetros de suelo que describen las condiciones superficiales de uno de los sitios (der.). SAG se refiere a la estación de la Red de Monitoreo Local.

La incorporación de las partículas emitidas por erosión eólica al módulo de partículas de MCCM, permite mejorar la información del inventario de emisiones utilizado por este modelo de calidad del aire.

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) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)⁷ de la Ciudad de México durante los días de interés.

Algunas de las estaciones de la RAMA seleccionadas para la comparación de resultados se presentan en la Figura 4.6, así como también algunas regiones agrícolas y la ubicación del ex Lago de Texcoco. El sitio CIMMYT, es el sitio elegido para realizar una campaña de mediciones, la cual será descrita en el siguiente apartado.

⁷ Los datos de la RAMA fueron descargados de <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/>

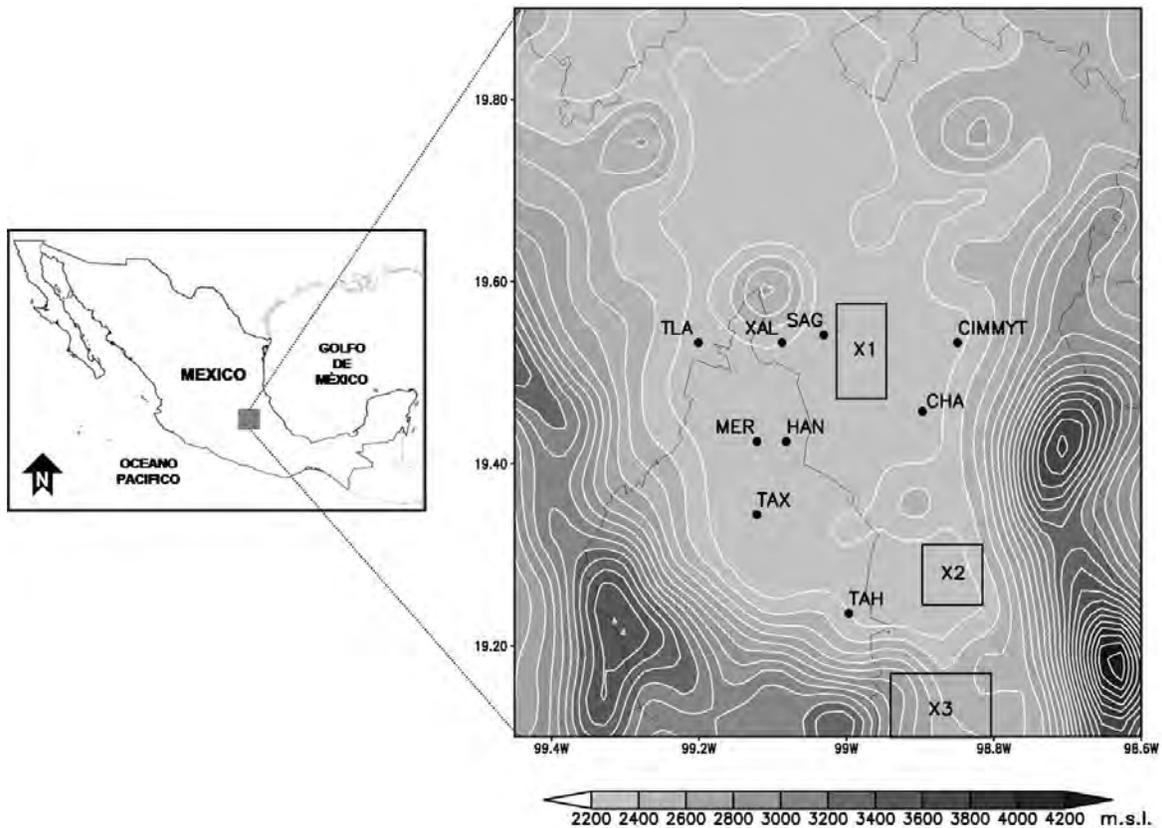


Figura 4.6. Localización de los sitios de interés. Las estaciones de la RAMA son Chapingo (CHA), Hangares (HAN), Merced (MER), San Agustín (SAG), Tlahuac (TAH), Taxqueña (TAX), Tlanepantla (TLA) and Xalostoc (XAL). También se observa el área del ex Lago de Texcoco (X1) y las zonas agrícolas de Chalco (X2) y Tenango del Aire (X3). CIMMYT representa el sitio donde la campaña de mediciones fue realizada. Las líneas blancas representan isolíneas de nivel en m.s.n.m.

4.3. Caracterización de los suelos en los sitios de estudios.

4.3.1. Suelos agrícolas.

Durante Marzo y Abril del 2007, se realizó una campaña de mediciones para la que se seleccionó un lote representativo de zonas agrícolas que rodean a la Ciudad de México. Dicho lote se encuentra dentro de las instalaciones del Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT), ubicado al noreste de la ciudad. El lote experimental de aproximadamente 110x125m, se localiza a 19° 31' 53" de latitud norte y 98° 50' 48.5" de longitud oeste (Figura 4.6). La campaña fue realizada con dos objetivos:

- Obtener los parámetros de suelos agrícolas requeridos por el modelo de erosión

- A partir de los datos obtenidos de los equipos de muestreo implementados, validar los resultados obtenidos de la aplicación del modelo MCCM-WEPS durante el período en el que se realizó la campaña de mediciones.

Debido a que durante el período en que los equipos estuvieron en operación no se reportó la presencia de ningún evento de emisión, el objetivo principal de esta campaña fue obtener parámetros de suelo representativos de las condiciones de los suelos agrícolas localizados en los alrededores de la ciudad, para lo cual, se obtuvieron muestras de suelos para su posterior análisis.

Los equipos utilizados durante la campaña de muestreo fueron los siguientes:

- 10 torres con 6 muestreadores de polvos BSNE (Fryrear *et al*, 1991).
- 2 Sensits modelo H11B (2006).
- 1 Minivol Portable Sampler Airmetrics SN: 3603.
- 1 Estación meteorológica Davis.

En la Figura 4.7 se observa la manera en la que los equipos fueron colocados sobre el lote experimental durante la campaña de mediciones.

Las muestras de suelo fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM, así como también, en los laboratorios pertenecientes a EWERU-USDA. Información sobre la textura del suelo, rugosidad y estabilidad de agregados, fueron algunos de los resultados obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio, los cuales se muestran en la Tabla 4.1.

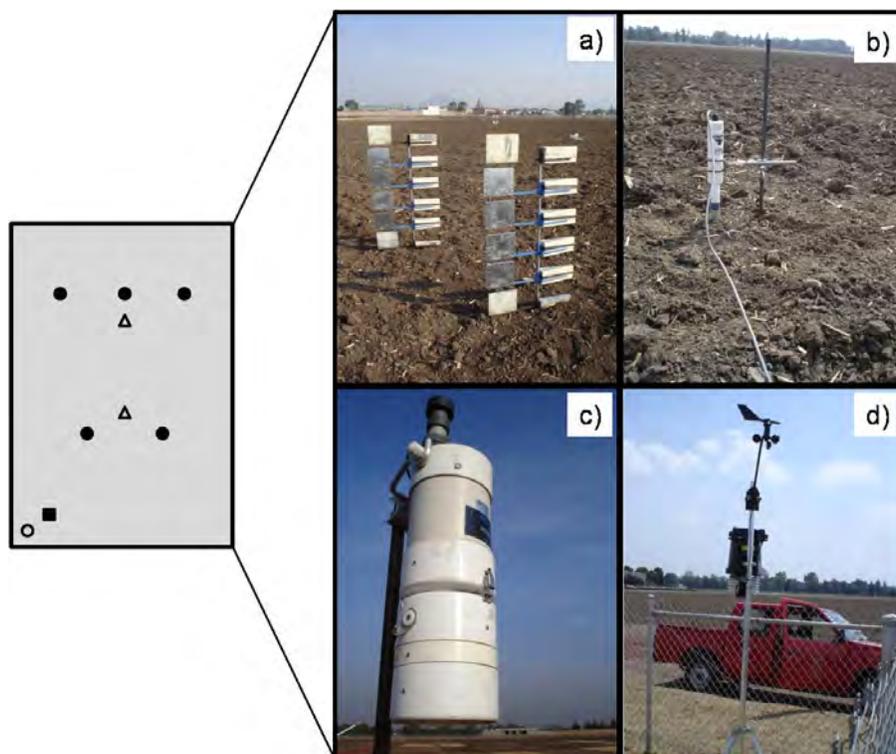


Figura 4.7. Arreglo de los equipos de muestreo en el campo experimental (izquierda). a) Captadores de polvos BSNE's (●). b) Sensits (Δ). c) Minivol (■). d) Estación meteorológica (○).

Tabla 4.1. Parámetros obtenidos de la campaña de mediciones y actualmente utilizados por el sistema MCCM-WEPS para suelos agrícolas.

PARAMETRO	VALOR OBTENIDO
Cobertura de biomasa (%)	6.4
Altura de surcos (mm)	0.0
Espacio entre surcos (mm)	0.0
Ancho de surcos (mm)	0.0
Contenido de arenas (%)	63.58
Contenido de arenas finas (%)	45.30
Contenido de limos (%)	14.07
Contenido de arcillas (%)	22.35
Estabilidad de agregados (ln(J/kg))	3.15
Rugosidad aleatoria de Allmaras (mm)	16.2 en promedio
Diámetro medio geométrico de la capa de suelo (mm)	7.22 en promedio
Desviación estándar geométrico de la capa de suelo (mm)	17.5 en promedio

4.3.2. Suelos agrícolas de Tenango del Aire.

Para el caso de las zonas agrícolas localizadas en las cercanías de Tenango del Aire, se modificaron los parámetros obtenidos durante la campaña de mediciones (Tabla 4.1). Las modificaciones fueron realizadas a tal modo de que el suelo fuera menos estable, es decir, que presentara una mayor susceptibilidad al fenómeno de la erosión eólica.

Considerando lo anterior, los parámetros utilizados en esta región se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 4.2. Parámetros aproximados para las zonas agrícolas de Tenango del Aire y actualmente utilizados por el sistema MCCM-WEPS.

PARAMETRO	VALOR OBTENIDO
Cobertura de biomasa (%)	6.4
Altura de surcos (mm)	0.0
Espacio entre surcos (mm)	0.0
Ancho de surcos (mm)	0.0
Contenido de arenas (%)	45.00
Contenido de arenas finas (%)	0.0
Contenido de limos (%)	28.0
Contenido de arcillas (%)	27.0
Estabilidad de agregados (ln(J/kg))	3.45
Rugosidad aleatoria de Allmaras (mm)	2.0
Diámetro medio geométrico de la capa de suelo (mm)	0.9
Desviación estándar geométrico de la capa de suelo (mm)	2.74

4.3.3. Vaso del antiguo Lago de Texcoco.

En el caso de los parámetros de suelo que describen las condiciones del ex Lago de Texcoco, éstos fueron obtenidos a partir de diferentes bases de datos generadas durante un proyecto realizado sobre esta región (Fernández-Buces, 2006), en el que se llevaron a cabo diversos estudios de campo y de laboratorio, los cuales se encontraban sujetos a un proceso de control de calidad interno establecido en el Laboratorio de Edafología Ambiental

(Instituto de Geología, UNAM) 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.

Algunos de los parámetros de suelo obtenidos para esta región, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.3. Parámetros obtenidos para la región del vaso del antiguo Lago de Texcoco y actualmente utilizados por el sistema MCCM-WEPS.

PARAMETRO	VALOR OBTENIDO
Cobertura de biomasa (%)	16.0
Altura de surcos (mm)	0.0
Espacio entre surcos (mm)	0.0
Ancho de surcos (mm)	0.0
Contenido de arenas (%)	25.0
Contenido de arenas finas (%)	0.0
Contenido de limos (%)	28.0
Contenido de arcillas (%)	47.0
Estabilidad de agregados (ln(J/kg))	2.95
Rugosidad aleatoria de Allmaras (mm)	2.0
Diámetro medio geométrico de la capa de suelo (mm)	0.9
Desviación estándar geométrico de la capa de suelo (mm)	2.74

4.4. Selección de episodios de simulación.

Durante la temporada de secas, fría (noviembre-enero) y caliente (febrero-abril), las actividades agrícolas inician en espera de las primeras precipitaciones pluviales. Estas acciones consisten en quitar toda la cobertura vegetal del suelo para el barbecho⁸ de los terrenos. Una vez que el suelo ya no cuenta con protección, la incidencia de vientos muy

⁸ *Período de transición en que el suelo permanece improductivo durante uno o varios ciclos vegetativos, con el propósito de recuperar y almacenar nutrientes y humedad.*

intensos provoca que estas áreas sean propensas al fenómeno de la erosión eólica al encontrarse las condiciones favorables para desencadenar el proceso erosivo sobre la superficie del suelo.

Debido a la cantidad de partículas que son emitidas de los suelos agrícolas durante esta temporada, altos niveles de concentración de PM_{10} se reportan en la Ciudad de México sobre todo cuando la velocidad media del viento es cercana a 8m/s. Otra de las áreas que impactan la calidad del aire de la ciudad es el vaso del antiguo Lago de Texcoco (Vega *et al.*, 2002; Díaz-Nigenda, 2005), el cual posee un área de 70km² de la cual el 43% está desprovista de vegetación (Fernández-Buces, 2006). La ubicación de esta región así como las condiciones actuales del suelo se muestran en la Figura 3.4. Tan solo para el período de Enero-Abril del 2006, la RAMA reportó 44 *eventos extraordinarios*⁹ horarios en la ciudad y en quince de ellos la concentración excedió los 500 μ g/m³ en al menos una hora al día entre las 12:00hrs y las 23:00hrs LST. Mientras que para el mismo período en el 2008, se reportaron 38 eventos y la concentración era superior a los 500 μ g/m³ en seis de ellos.

Cuatro episodios de este tipo fueron seleccionados para aplicar el sistema MCCM-WEPS sobre la cuenca de México. Para su selección se tomaron en consideración los siguientes aspectos:

- Eventos extraordinarios reportados por la RAMA.
- Vientos intensos del noreste, este y sureste observados en las estaciones San Agustín (SAG) y Xalostoc (XAL).

Considerando lo anterior, los episodios seleccionados para la aplicación del sistema son (véase Apéndice A):

- Episodio 1: 19 de Marzo del 2006 (secas-caliente).
- Episodio 2: 11 de Enero del 2008 (secas-fría).
- Episodio 3: 05 de Abril del 2008 (secas-caliente).
- Episodio 4: 29 de Noviembre del 2008 (secas-fría).

⁹ Aquel en el que por lo menos una estación de la Red Monitoreo reporta concentraciones de PM_{10} superiores a 300 μ g/m³.

4.5. Procedimiento de simulación.

El modelo MCCM fue implementado utilizando tres dominios anidados. El primero de ellos incluye la mayor parte de la República Mexicana además del Océano Pacífico y el Golfo de México con una resolución de 27km en cada una de sus celdas; el segundo dominio abarca la región central del país con resolución de 9km. El tercer dominio se enfoca a la región de la cuenca de México (Tabla 4.4 y Figura 4.8). Este dominio posee una resolución espacial de 3km.

Los dominios de simulación se muestran usando el formato del Índice Normalizado de la Diferencia de Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés) establecidos por Tucker *et al.* (2004) y Pinzón *et al.* (2005). Como puede observarse en esta figura, la existencia de diversas áreas de baja cobertura vegetal, representa fuentes potenciales de emisión de partículas a la atmósfera de la Ciudad de México.

Tabla 4.4. Resolución y dimensiones de los dominios anidados utilizados en la simulación de los eventos seleccionados.

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

Para la predicción de la meteorología se utilizaron datos del “North American Regional Reanalysis” (NARR)¹⁰ provenientes del “National Centers for Environmental Prediction” (NCEP) y del “National Center for Atmospheric Research” (NCAR). Estos datos presentan una resolución espacial de 32km y una temporal de seis horas (Mesinger *et al.*, 2006).

Para el caso del escenario del 5 de Abril del 2008, se utilizaron datos de análisis final¹¹ de NCEP y NCAR con una resolución espacial de 1.0°x1.0° y una temporal de seis horas (Kalnay *et al.*, 1996).

¹⁰ Disponibles en <http://dss.ucar.edu/pub/narr/>

¹¹ Disponibles en <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>

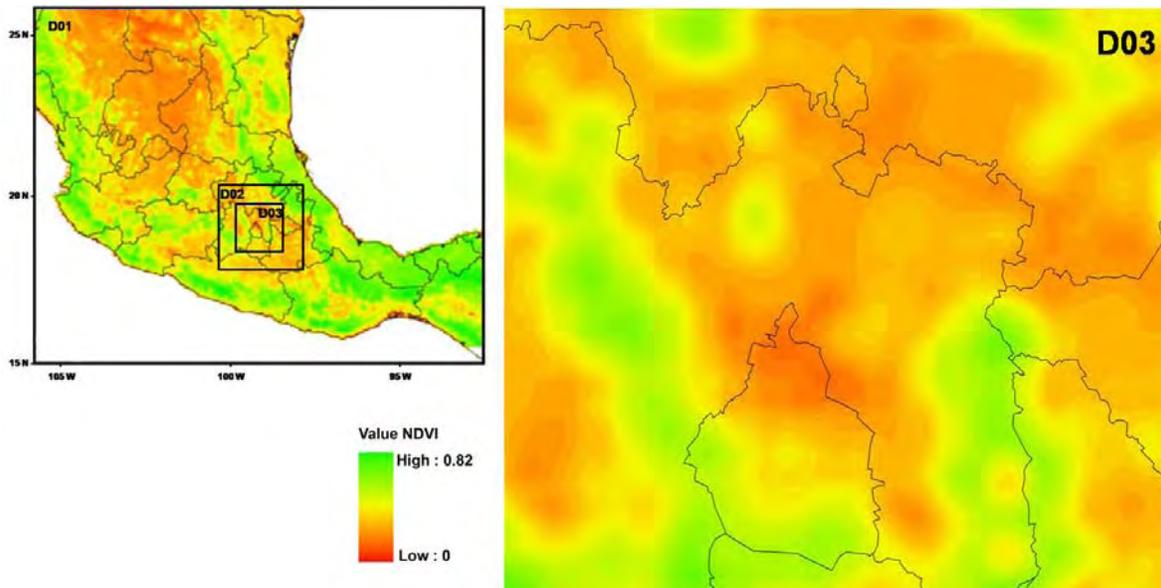


Figura 4.8. Dominios anidados implementados durante la simulación en el sistema MCCM-WEPS. NDVI \approx 1 representan áreas con coberturas de vegetación muy altas. NDVI \approx 0 representan áreas con altos índices de urbanización (Tucker et al., 2004, 2005; Pinzón et al., 2005)

Así mismo, mediante la aplicación de LITTLE_R, la técnica de análisis objetivo (asimilación de datos) fue utilizada durante la simulación de los diferentes escenarios, esto mediante la incorporación de variables observadas por las estaciones de la RAMA para mejorar el análisis meteorológico en la malla del modelo. Las variables que fueron incorporadas son la intensidad y dirección del viento, temperatura superficial y humedad relativa. Dicha técnica fue aplicada solamente en el segundo y tercer dominio.

En el siguiente apartado, se presenta la forma en la que se llevará a cabo la evaluación del desempeño de la parte meteorológica del modelo durante la simulación de los episodios que fueron seleccionados.

4.6. Evaluación de la meteorología.

Para evaluar el desempeño de la parte meteorológica del modelo MCCM, se realiza una evaluación cualitativa mediante el empleo de gráficas, así como una evaluación cuantitativa mediante la aplicación de estadísticos establecidos por Willmott (1981). En ambos casos, se comparan los resultados del modelo contra los valores observados por las estaciones de la RAMA.

Los estadísticos aplicados fueron los siguientes:

- Índice de Concordancia (I_c).
- Desviación normal de los datos observados (σ_o).
- Desviación normal de los datos pronosticados (σ_p).
- Raíz de la desviación cuadrática media (RDMS).
- Índice de semejanza (I_s).

El I_c , indica qué tanta coincidencia existe entre los datos pronosticados por el modelo y las observaciones reportadas por las estaciones de monitoreo. Matemáticamente se define como:

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

donde I_c es el índice de concordancia, P_i es el valor pronosticado por el modelo al tiempo i , O_i es el valor medido al tiempo i , \bar{P} y \bar{O} son los valores medios para las n observaciones (Willmott, 1981). El I_c tiene valores entre 0 y 1, el valor de 1 es para la concordancia perfecta mientras que el valor de 0 indica que los datos no tienen concordancia alguna.

Las desviaciones normales de las observaciones (σ_o), así como de los valores pronosticados (σ_p), indican qué tan alejados se encuentran los datos del promedio. Estos parámetros se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma_o = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{n} \right]^{1/2}$$

$$\sigma_p = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n} \right]^{1/2}$$

donde \bar{O} y \bar{P} son los promedios de los datos observados por las estaciones y los datos pronosticados por el modelo respectivamente y n es el número de observaciones. Mientras que la raíz de la desviación cuadrática media (RMSD) está dada por:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{t=1}^n (O_t - F_t)^2}{n} \right]^{1/2}$$

Para el uso de estos parámetros, el nivel de predicción del modelo se considera alto si $\sigma_o \approx \sigma_p$, $RMSE \leq \sigma_o$.

Finalmente, para el caso de las direcciones de viento se aplicó el Índice de Semejanza (I_S), el cual da una medida de qué tan similares en dirección y qué tan paralelos se encuentran dos vectores (García-Reynoso, 2002). Es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$I_S = \frac{1 + \cos(\alpha - \beta)}{2}$$

donde α es el ángulo del vector 1 y β es el ángulo del vector 2. Ambos ángulos deberán ser evaluados en radianes. Al igual que el I_C , los valores de I_S van de 0 a 1, donde 1 indica que los vectores (vientos simulados y observados) son paralelos y van en la misma dirección, 0.5 que son perpendiculares y 0 que son paralelos pero en dirección contraria.

5. RESULTADOS.

Una vez incorporado el modelo WEPS al modelo MCCM, se llevó a cabo la simulación de los episodios seleccionados considerando los parámetros de suelo previamente señalados para cada una de las regiones de interés. En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir de la evaluación del modelo meteorológico así como los generados por el sistema MCCM-WEPS.

5.1. Evaluación del desempeño del modelo meteorológico.

En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se comparan las temperaturas, intensidades y direcciones del viento medidas en dos estaciones de la RAMA y las pronosticadas por MCCM. Ambos sitios fueron los que presentaron el mejor comportamiento para cada una de las variables. En la Figura 5.1, puede observarse que las temperaturas reportadas por Tacuba (TAC) y los resultados generados por el modelo muestran una buena correlación entre los datos para cada uno de los episodios seleccionados.

Series de tiempo correspondientes a intensidades de vientos para cada uno de los episodios, pueden ser observadas en la Figura 5.2 para Chapingo (CHA). Para este caso, los resultados también muestran una buena aproximación a los datos reportados por la estación de monitoreo, esto se hace más evidente para los episodios 2 y 4 en donde los resultados del modelo son casi idénticos a las mediciones.

En la Figura 5.3 se muestran series de tiempo de las direcciones de viento para los cuatro episodios, se comparan los datos observados en la estación Chapingo (CHA) y los resultados del modelo. Como se observa, los resultados del modelo presentan diferencias

significativas a los datos reportados por CHA durante las primeras horas de la mañana en los cuatro episodios, sin embargo, existe una notable mejoría conforme avanzan las horas del día.

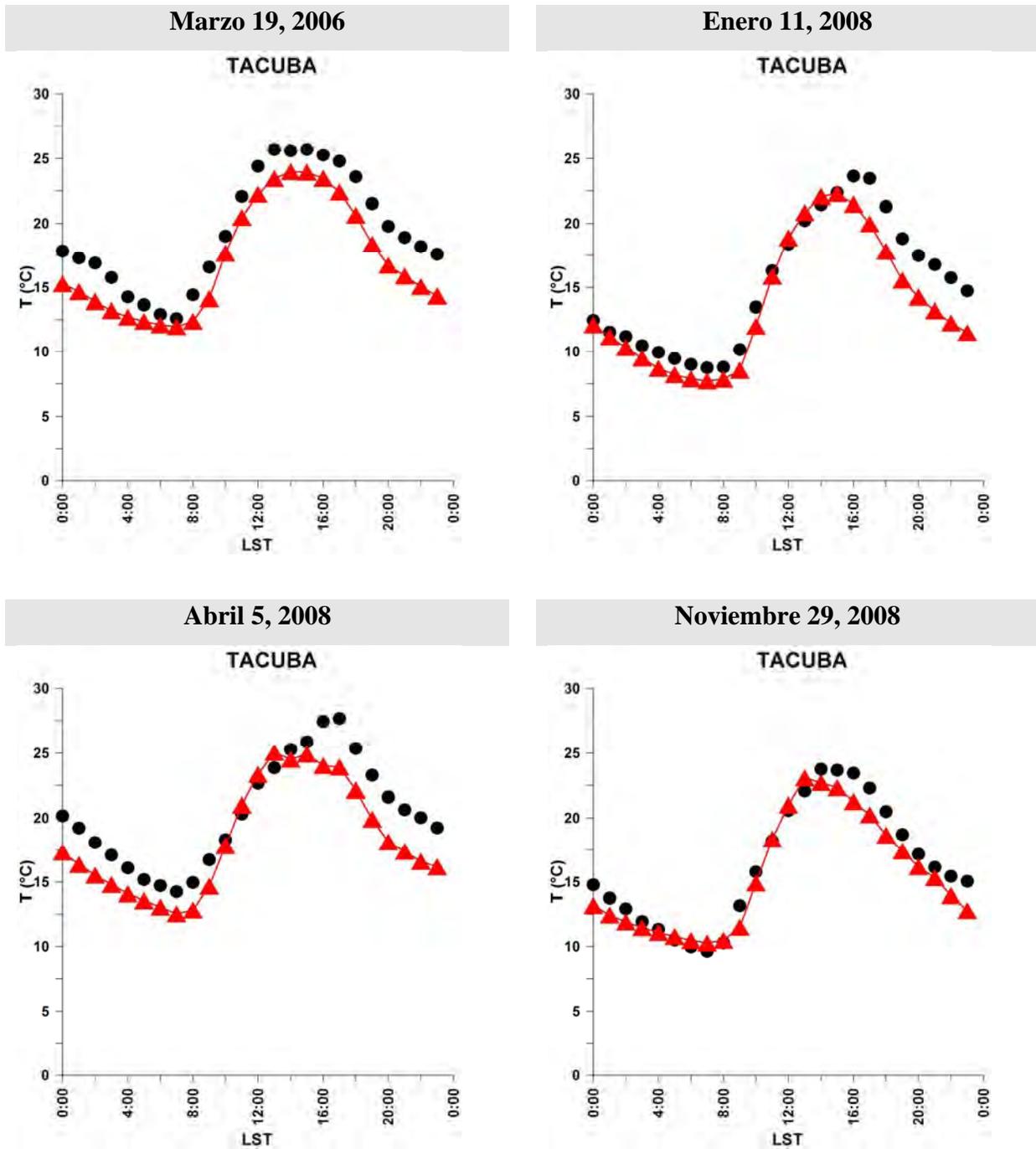
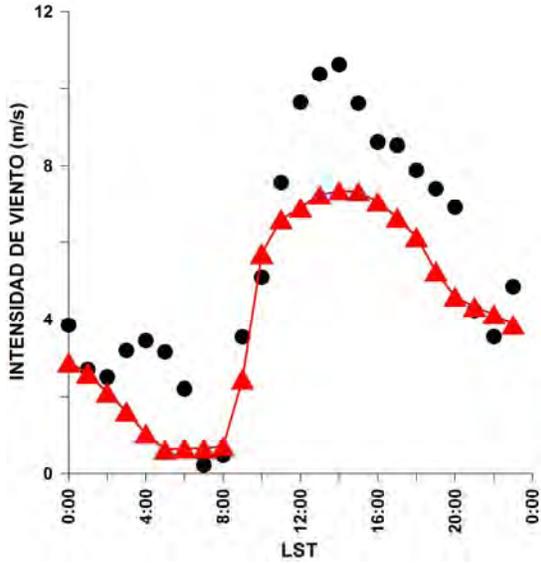


Figura 5.1. Variación horaria de temperatura superficial (°C) entre los datos reportados por la estación Tacuba (●) y los generados por el modelo (▲) durante la simulación de los cuatro episodios.

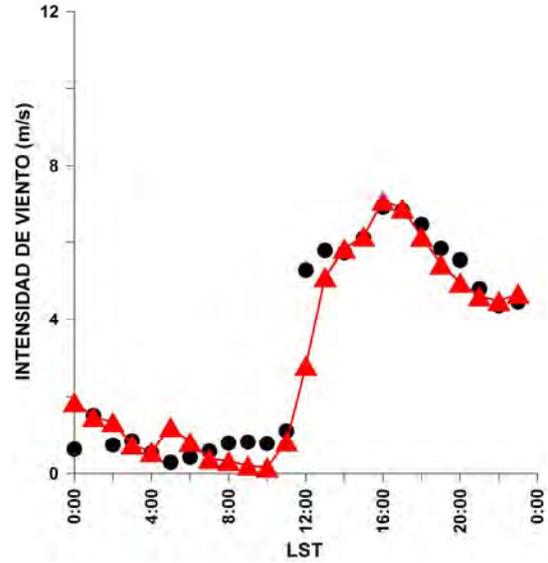
Marzo 19, 2006

CHAPINGO



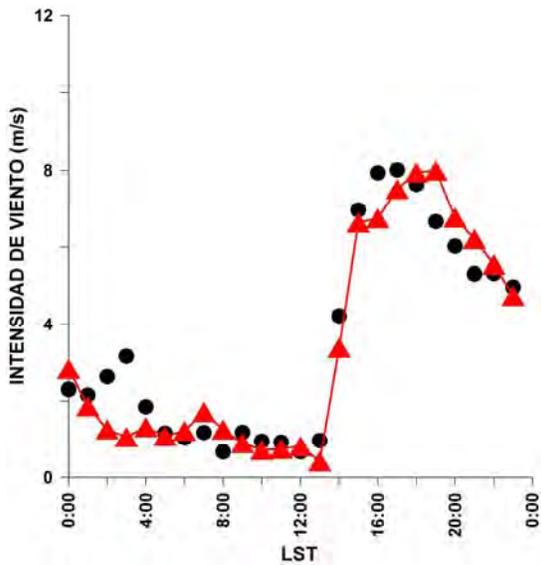
Enero 11, 2008

CHAPINGO



Abril 5, 2008

CHAPINGO



Noviembre 29, 2008

CHAPINGO

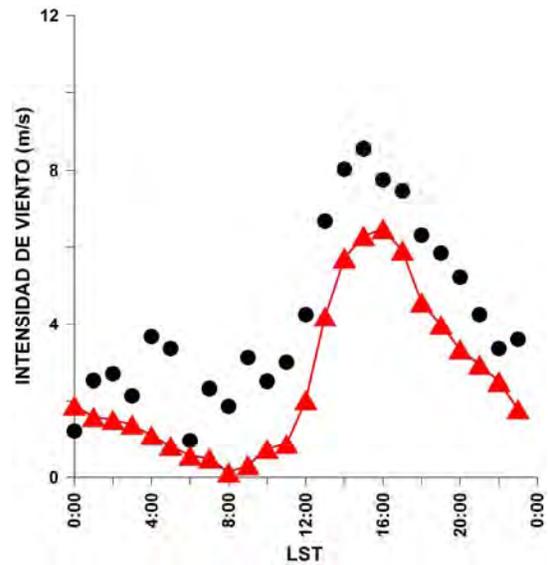
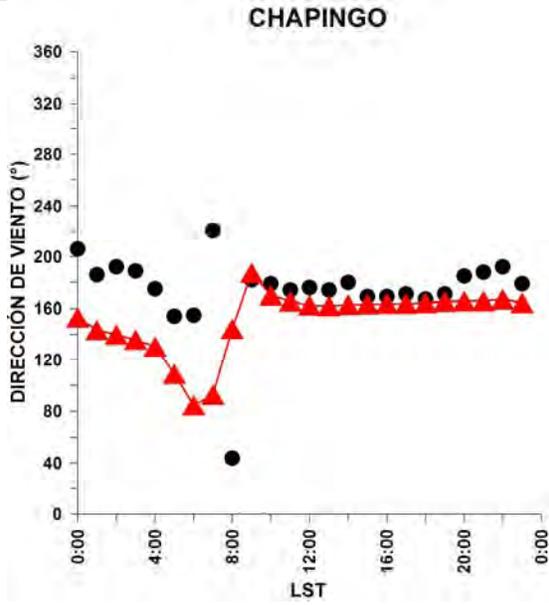
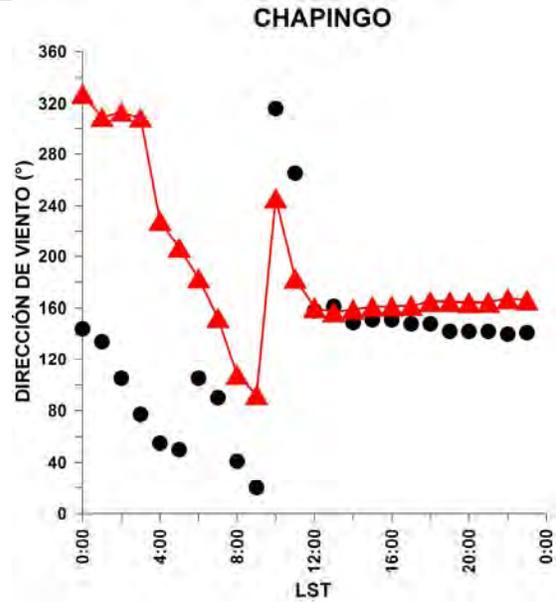


Figura 5.2. Variación horaria de intensidades de vientos (m/s) entre los datos reportados por la estación Chapingo (●) y los generados por el modelo (▲) durante la simulación de los cuatro episodios.

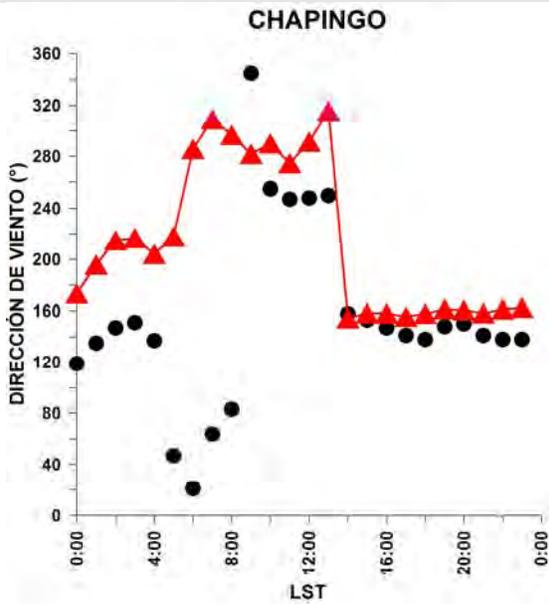
Marzo 19, 2006



Enero 11, 2008



Abril 5, 2008



Noviembre 29, 2008

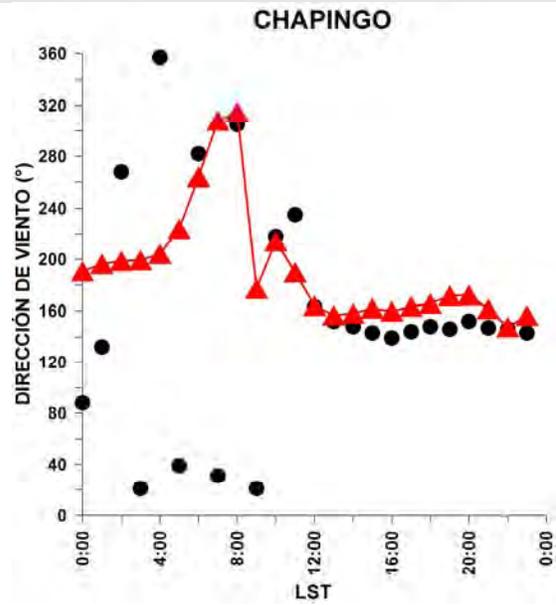


Figura 5.3. Variación horaria de direcciones de vientos (°) entre los datos reportados por la estación Chapingo (●) y los generados por el modelo (▲) durante la simulación de los cuatro episodios.

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de los Índices de Concordancia calculado para cada una de las estaciones de la red de monitoreo durante los cuatro escenarios.

Tabla 5.1. Índices de concordancia entre las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante los cuatro escenarios.

ESTACIÓN	INDICE DE CONCORDANCIA											
	Marzo 19, 2006			Enero 11, 2008			Abril 5, 2008			Noviembre 29, 2008		
	T	VV	DV	T	VV	DV	T	VV	DV	T	VV	DV
TACUBA	0.94	0.91	0.70	0.95	0.73	0.53	0.93	0.75	0.53	0.98	0.48	0.61
ENEP-ACATLÁN	0.94	0.97	0.73	0.96	0.75	0.47	0.96	0.71	0.50	0.94	**	**
SAN AGUSTÍN	0.98	**	**	0.88	0.92	0.67	0.81	0.85	0.66	0.89	0.82	0.66
TLALNEPANTLA	0.93	0.87	0.79	0.95	0.71	0.41	0.96	0.92	0.57	0.99	0.74	0.53
XALOSTOC	0.74	0.81	0.80	0.91	0.87	0.69	0.88	0.82	0.70	0.95	0.75	0.63
MERCED	0.93	0.75	0.95	0.95	0.69	0.53	0.90	0.82	0.44	0.98	0.74	0.83
PEDREGAL	0.90	0.73	0.54	0.96	0.56	0.39	0.97	0.71	0.48	0.98	0.75	0.55
C. ESTRELLA	0.92	0.74	0.95	0.96	0.73	0.53	0.92	0.73	0.57	0.97	0.72	0.67
PLATEROS	0.82	0.80	0.59	**	0.79	0.44	0.98	0.72	0.42	0.99	0.66	0.61
HANGARES	0.94	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
CUAJIMALPA	0.89	0.78	0.82	0.94	0.64	0.58	0.94	0.66	0.51	**	0.65	0.70
TLALPAN	0.91	0.64	0.52	0.94	0.78	0.73	0.95	0.86	0.49	0.92	0.76	0.70
CHAPINGO	0.79	0.86	0.88	0.90	0.97	0.68	0.91	0.97	0.78	0.90	0.78	0.76
TLAHUAC	0.87	0.75	0.80	0.96	0.80	0.51	0.90	0.84	0.76	0.94	0.84	0.69

Nota: T= Temperatura. VV= Intensidad de Viento. DV= Dirección de Viento. **=No hay reporte de datos por la estación.

En las tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran los resultados de los estadísticos σ_o , σ_p , RMSD e I_s aplicados a temperaturas, intensidad y dirección de viento de cada uno de los episodios en todas las estaciones de la red de monitoreo.

Tabla 5.2. Estadísticos obtenidos para las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 19 de Marzo del 2006.

ESTACION	TEMPERATURA			VELOCIDAD DE VIENTO			DIRECCIÓN DE VIENTO
	σ_O	σ_P	RMSD	σ_O	σ_P	RMSD	I_S
TACUBA	4.26	4.19	2.38	1.68	2.01	1.06	0.70
ENEP-ACATLAN	5.08	3.94	2.43	1.14	2.98	3.25	0.73
SAN AGUSTÍN	4.24	3.40	1.33	**	2.20	**	**
TLALNEPANTLA	4.40	4.09	2.41	1.73	2.12	1.43	0.79
XALOSTOC	4.71	2.61	4.65	1.88	2.44	1.79	0.80
MERCED	4.53	3.39	2.36	1.54	2.91	2.21	0.95
PEDREGAL	7.07	3.65	3.63	1.12	1.36	1.61	0.54
C. ESTRELLA	4.41	2.92	2.49	1.73	1.82	2.06	0.95
PLATEROS	5.03	2.56	3.75	1.55	1.74	1.53	0.59
HANGARES	3.90	3.43	2.05	**	2.39	**	**
CUAJIMALPA	3.14	2.99	2.37	1.89	2.32	1.76	0.82
TLALPAN	3.73	2.72	2.30	2.13	1.63	2.75	0.52
CHAPINGO	3.89	3.29	3.95	3.02	2.38	1.75	0.88
TLAHUAC	4.32	2.78	2.99	2.73	1.22	1.86	0.80

Tabla 5.3. Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 11 de Enero del 2008.

ESTACION	TEMPERATURA			VELOCIDAD DE VIENTO			DIRECCIÓN DE VIENTO
	σ_O	σ_P	RMSD	σ_O	σ_P	RMSD	I_S
TACUBA	4.88	4.85	2.08	0.81	1.56	1.77	0.53
ENEP-ACATLAN	6.19	4.67	2.21	0.77	1.76	1.90	0.47
SAN AGUSTÍN	4.78	4.23	3.25	1.48	2.10	1.63	0.67
TLALNEPANTLA	4.90	4.87	2.19	0.73	1.12	1.66	0.41
XALOSTOC	4.63	4.28	2.68	1.35	2.09	1.92	0.69
MERCED	4.80	4.77	2.05	0.85	1.87	2.04	0.53
PEDREGAL	5.48	4.43	1.99	0.78	1.27	1.79	0.39
C. ESTRELLA	5.24	4.47	1.97	0.96	2.01	2.18	0.53
PLATEROS	**	4.73	**	0.77	1.00	1.66	0.44
HANGARES	**	4.66	**	**	2.24	**	**
CUAJIMALPA	3.37	3.54	1.67	1.14	2.32	1.94	0.58
TLALPAN	5.40	3.57	2.24	1.11	2.62	2.44	0.73
CHAPINGO	6.32	3.74	3.26	2.51	2.40	0.68	0.68
TLAHUAC	5.23	4.26	1.82	1.71	1.33	1.46	0.51

** = No hay reporte de datos por la estación.

Tabla 5.4. Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 5 de Abril del 2008.

ESTACION	TEMPERATURA			VELOCIDAD DE VIENTO			DIRECCIÓN DE VIENTO
	σ_O	σ_P	RMSD	σ_O	σ_P	RMSD	I_S
TACUBA	3.97	4.13	2.46	0.73	2.74	3.28	0.53
ENEP-ACATLAN	4.24	4.10	2.05	1.14	2.62	2.70	0.50
SAN AGUSTÍN	3.52	4.13	4.18	1.78	2.23	1.55	0.66
TLALNEPANTLA	3.98	4.28	1.98	0.96	2.43	2.36	0.57
XALOSTOC	3.61	4.27	3.37	1.23	2.07	1.74	0.70
MERCED	3.66	4.39	2.88	0.66	1.91	1.98	0.44
PEDREGAL	4.72	3.94	1.87	1.54	2.02	2.21	0.48
C. ESTRELLA	4.47	3.97	2.69	1.57	2.39	2.25	0.57
PLATEROS	4.23	4.15	1.36	0.82	2.54	3.22	0.42
HANGARES	**	4.18	**	**	2.68	**	**
CUAJIMALPA	3.31	3.15	1.86	1.44	2.46	2.39	0.51
TLALPAN	5.33	3.41	2.25	2.10	2.21	1.40	0.49
CHAPINGO	4.46	3.88	2.99	2.53	2.66	0.75	0.78
TLAHUAC	4.26	3.46	2.94	2.70	1.39	2.00	0.76

Tabla 5.5. Estadísticos obtenidos de las variables meteorológicas observadas y pronosticadas por el modelo para cada una de las estaciones de monitoreo durante el 29 de Noviembre del 2008.

ESTACION	TEMPERATURA			VELOCIDAD DE VIENTO			DIRECCIÓN DE VIENTO
	σ_O	σ_P	RMSD	σ_O	σ_P	RMSD	I_S
TACUBA	4.52	4.31	1.27	0.55	0.93	1.82	0.61
ENEP-ACATLAN	5.70	4.20	2.34	**	0.96	**	**
SAN AGUSTÍN	4.45	4.24	2.98	1.14	1.38	1.43	0.66
TLALNEPANTLA	4.57	4.44	1.08	0.97	0.88	1.56	0.53
XALOSTOC	4.43	4.45	1.92	1.10	1.35	1.33	0.63
MERCED	4.43	4.32	1.06	1.00	1.11	1.24	0.83
PEDREGAL	4.52	3.97	1.05	0.97	0.91	1.44	0.55
C. ESTRELLA	5.01	3.90	1.45	1.31	1.55	1.47	0.67
PLATEROS	4.92	4.25	1.09	0.88	0.74	1.50	0.61
HANGARES	**	4.41	**	**	1.30	**	**
CUAJIMALPA	**	3.03	**	1.21	2.03	2.14	0.70
TLALPAN	4.60	3.19	2.21	1.03	1.43	2.30	0.70
CHAPINGO	5.80	3.57	2.71	2.17	1.98	1.83	0.76
TLAHUAC	4.54	3.35	2.07	2.53	1.79	1.60	0.69

** = No hay reporte de datos por la estación.

Al considerar los I_C , σ_O , σ_P , RMSD para la evaluación del desempeño de la parte meteorológica del modelo, éstos nos indican una buena correlación de las temperaturas durante los cuatro escenarios. Lo mismo ocurre para el caso de las intensidades de vientos pronosticados.

En el caso de las direcciones de viento, el modelo presentó mejores resultados durante el primer y cuarto episodio, esto considerando los valores de I_C e I_S . En estos casos Merced y Chapingo presentaron los valores más altos de I_C , mientras que los más bajos fueron Pedregal, Plateros y Tlalpan para el primer episodio y Tlalnepantla y Pedregal para el cuarto. En el caso del I_S para el primer episodio, Merced, Cerro de la Estrella y Chapingo fueron las que presentaron resultados muy aproximados a los datos observados, con valores de 0.95 para las dos primeras y 0.88 para la última. El I_S más bajo fue obtenido en Tlalpan, cuyo valor es de 0.52. Para el cuarto episodio Merced y Chapingo presentaron los mejores resultados con I_S de 0.83 y 0.76 respectivamente, mientras que los valores más bajos fueron para San Agustín y Pedregal con 0.53 y 0.55. Para el segundo episodio, el I_C e I_S más altos se encuentran en Tlalpan con 0.73 para ambos parámetros así como los valores más bajos están en Pedregal con 0.39. Chapingo presentó los mejores I_C e I_S en el tercer episodio con un valor 0.78 para ambos parámetros, caso contrario con Plateros que presentó los índices más bajos con 0.42. A partir de estos resultados, aunque el modelo es capaz de reproducir las direcciones del viento reportadas por las estaciones durante todas las simulaciones, en algunas horas el modelo presenta resultados que difieren considerablemente a los datos observados, lo cual, representa un factor importante en los resultados que se presentan más adelante, ya que incluso pequeñas variaciones en las direcciones de viento, impiden que el modelo pueda reproducir los picos de concentraciones en los puntos donde se localizan las estaciones de monitoreo.

A continuación se presentan los resultados de los cuatro episodios que fueron analizados mediante la aplicación del sistema MCCM-WEPS. Como se mencionó anteriormente, todos ellos corresponden a eventos donde se reportaron altas concentraciones de PM_{10} en estaciones de la RAMA (véase Apéndice A).

5.2. Simulación numérica de las emisiones.

5.2.1. Episodio 1: 19 de Marzo del 2006.

Este evento se presentó durante la campaña MILAGRO. La RAMA reportó altas concentraciones de PM₁₀ sobre San Agustín (SAG), Cerro de la Estrella (CES) y Tláhuac (TAH). A partir de la aplicación del sistema MCCM-WEPS, pudo observarse que las emisiones provenían de tres diferentes áreas. La primera de ellas corresponde a las regiones agrícolas localizadas al sureste de la Ciudad de México (Tenango del Aire) (Figura 5.5a), la segunda de la región del vaso del antiguo Lago de Texcoco (Figura 5.5b) y la última de los suelos agrícolas localizados al norte del mismo (Figura 5.5c).

Debido a las condiciones meteorológicas simuladas, solamente se pudieron reproducir altas concentraciones de PM₁₀ para SAG de las 13:00hrs a las 20:00hrs LST del 19 de Marzo. Como se muestra en la Figura 5.4 para esta estación, las concentraciones más altas provienen del sureste, donde se localizan la parte sur del vaso del antiguo lago además de zonas agrícolas en la parte este y sureste de la ciudad. SAG reporta 1261µg/m³ a las 17:00hrs como concentración máxima mientras que el modelo pronostica 1262µg/m³ con una hora de anticipación. Considerando el límite máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 (120µg/m³), se observa que se obtuvieron concentraciones mayores a ésta durante más de 5 horas, además que la concentración máxima del evento es diez veces el valor de lo permitido, lo cual representa un grave factor en términos de salud pública.

El comportamiento de la pluma de contaminantes se muestra en la Figura 5.5. Se observa que las altas concentraciones de partículas sobre SAG para este episodio es provocada principalmente por las emisiones generadas en el ex Lago de Texcoco cuando los vientos alcanzan una intensidad aproximada de 10m/s aunada a la contribución de partículas provenientes de la región de Tenango del Aire.

Las emisiones generadas sobre Tenango del Aire, son causadas cuando se presentan vientos con intensidades cercanas a 6m/s sobre esta región. Debido a que las condiciones meteorológicas simuladas (dirección de viento) sobre TAH y CES varían con los datos

observados, las concentraciones de PM_{10} muestran un desfase en los picos de altas concentraciones. Por esta razón en la Figura 5.4 se muestran los resultados solamente para SAG. Al analizar las direcciones de vientos reportadas por las estaciones TAH y CES durante la presencia del evento, pudo observarse que éstas reportan vientos provenientes del sureste, lo cual explica que las partículas que afectaron a estas zonas, fueron causadas por las emisiones provenientes de los suelos agrícolas localizados al sureste de la ciudad (Tenango del Aire).

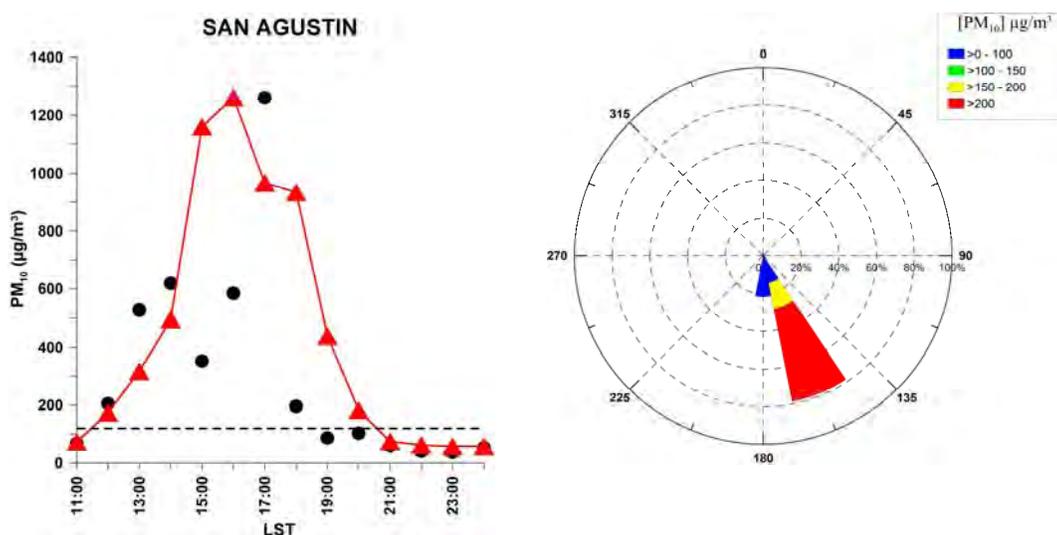
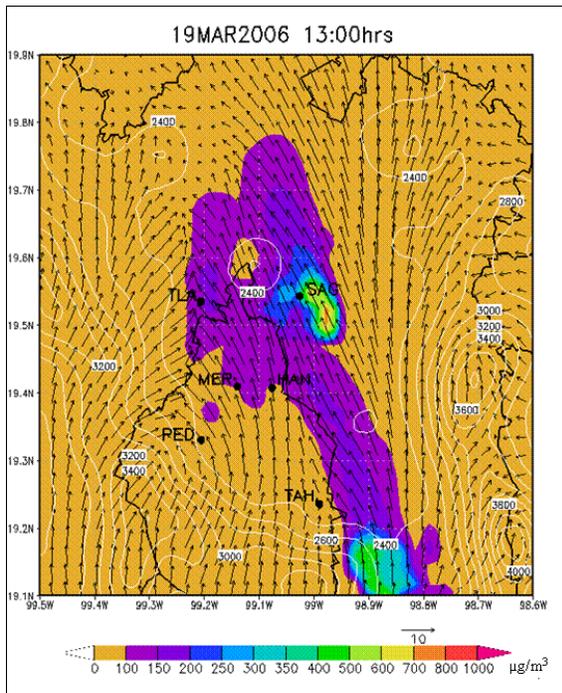


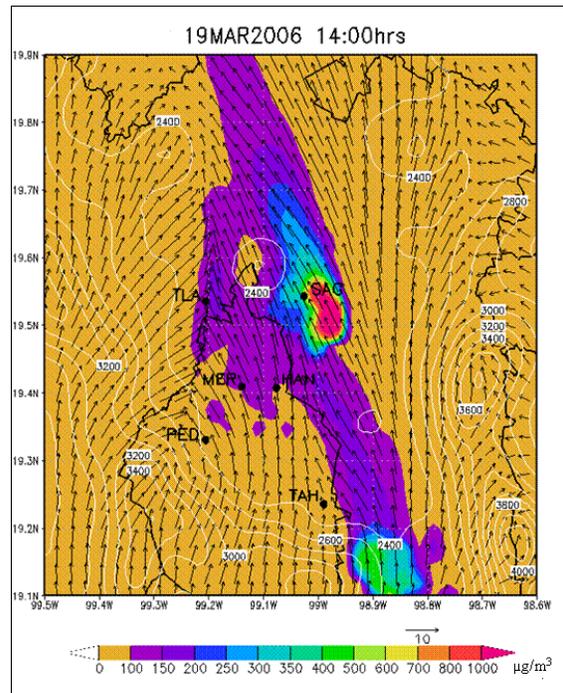
Figura 5.4. 19 de Marzo del 2008. Izquierda: Comparación de concentraciones horarias de PM_{10} observadas (●) y simuladas por MCCM-WEPS (▲). La línea punteada indica el límite máximo permisible de PM_{10} . ($120\mu g/m^3$). Derecha: Rosa de concentraciones simuladas para la estación.

Las zonas afectadas por este evento también se muestran en la Figura 5.5. En ella se observa la manera en la que las emisiones provenientes del sureste de la cuenca afectan considerablemente la parte este de la Ciudad de México. Debido a las condiciones meteorológicas presentes sobre la región, la pluma de contaminantes no afecta la parte central de la ciudad. Las partículas son transportadas hasta la parte noreste de la ciudad donde se adicionan a las emisiones generadas sobre la zona del ex Lago de Texcoco.

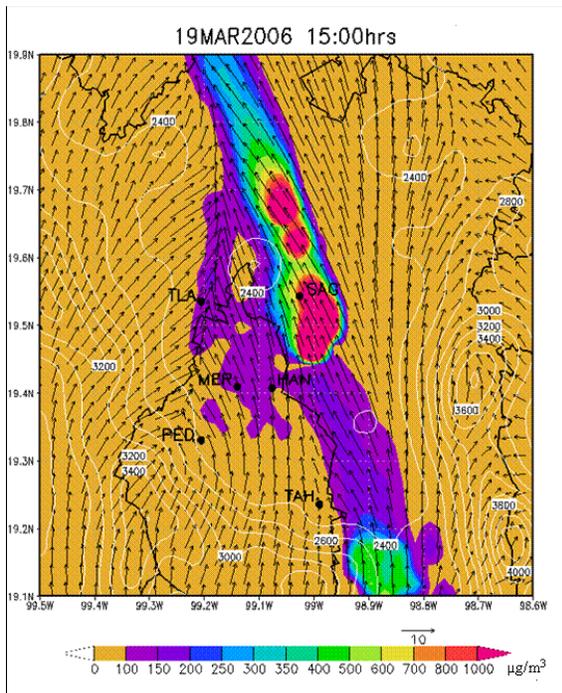
Los contaminantes son transportados hasta la parte norte de la ciudad y la formación de líneas de confluencia provoca que el sur del estado de Hidalgo sea afectado (Figuras 5.5c y 5.5d). Como se verá más adelante, la presencia de confluencia de vientos, es un factor muy importante para la distribución vertical de las partículas.



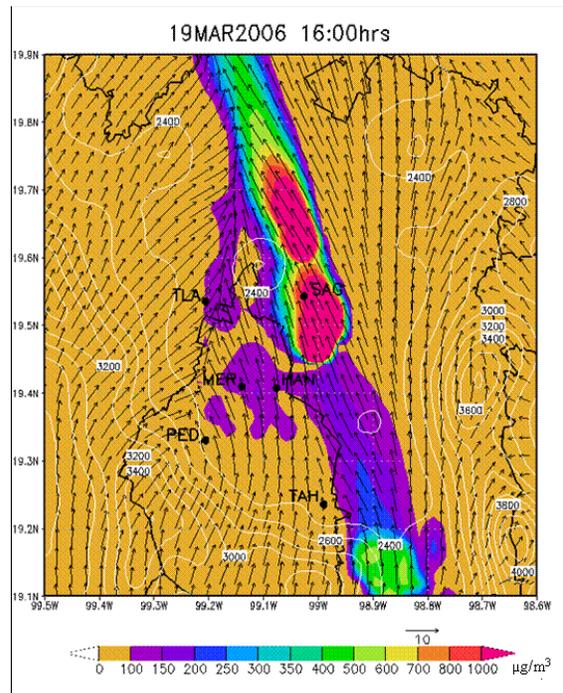
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.5. Campo de vientos y concentraciones generadas al sureste de la Ciudad de México y sobre el ex Lago de Texcoco para el 19 de Marzo del 2006. Líneas blancas representan isólinas de nivel en m.s.n.m.

Considerando que este evento se presentó durante la campaña MILAGRO, los resultados validan la presencia de material crustal en la composición de las partículas en la parte norte de la Ciudad de México, lo cual coincide con resultados reportados por Querol *et al.* (2008) y Múgica *et al.* (2009), quienes explican la contribución que tienen los suelos en la afectación de la calidad del aire de la ciudad. Así mismo, los resultados coinciden con Fast *et al.* (2007), quien señala que durante Marzo del 2006, los intensos vientos del sureste generaron grandes levantamientos de partículas en las partes bajas de la cuenca de México.

5.2.2. Episodio 2: 11 de Enero del 2008.

Un evento de contaminación por altas concentraciones de PM_{10} se presentó la tarde del 11 de Enero del 2008 en la zona noreste de la Ciudad de México, el cual, fue reportado por las estaciones San Agustín (SAG) y Xalostoc (XAL). El evento tuvo lugar de las 15:00hrs a 21:00hrs LST. El sistema MCCM-WEPS pudo reproducir el evento en tiempo y concentración, ya que el modelo pronosticó una concentración máxima de PM_{10} ($543\mu\text{g}/\text{m}^3$) muy aproximada al reportado por la estación SAG a las 17:00hrs, lo cual se observa en la Figura 5.6. Para este caso los vientos provenientes del sureste, alcanzaron intensidades cercanas a 10m/s sobre la región del vaso del antiguo Lago de Texcoco, generando el fenómeno de la erosión eólica en esta zona, tal y como se muestra en la Figura 5.7. Las emisiones de partículas generaron una nube de contaminantes que fue transportada hacia el noroeste del ex Lago donde se localizan SAG y XAL.

Como se muestra en las rosas de vientos simuladas de la Figura 5.6, las concentraciones más altas provienen del sureste para XAL y SAG, lo cual indica que la pluma de contaminantes se originó sobre la región del vaso del antiguo lago de Texcoco.

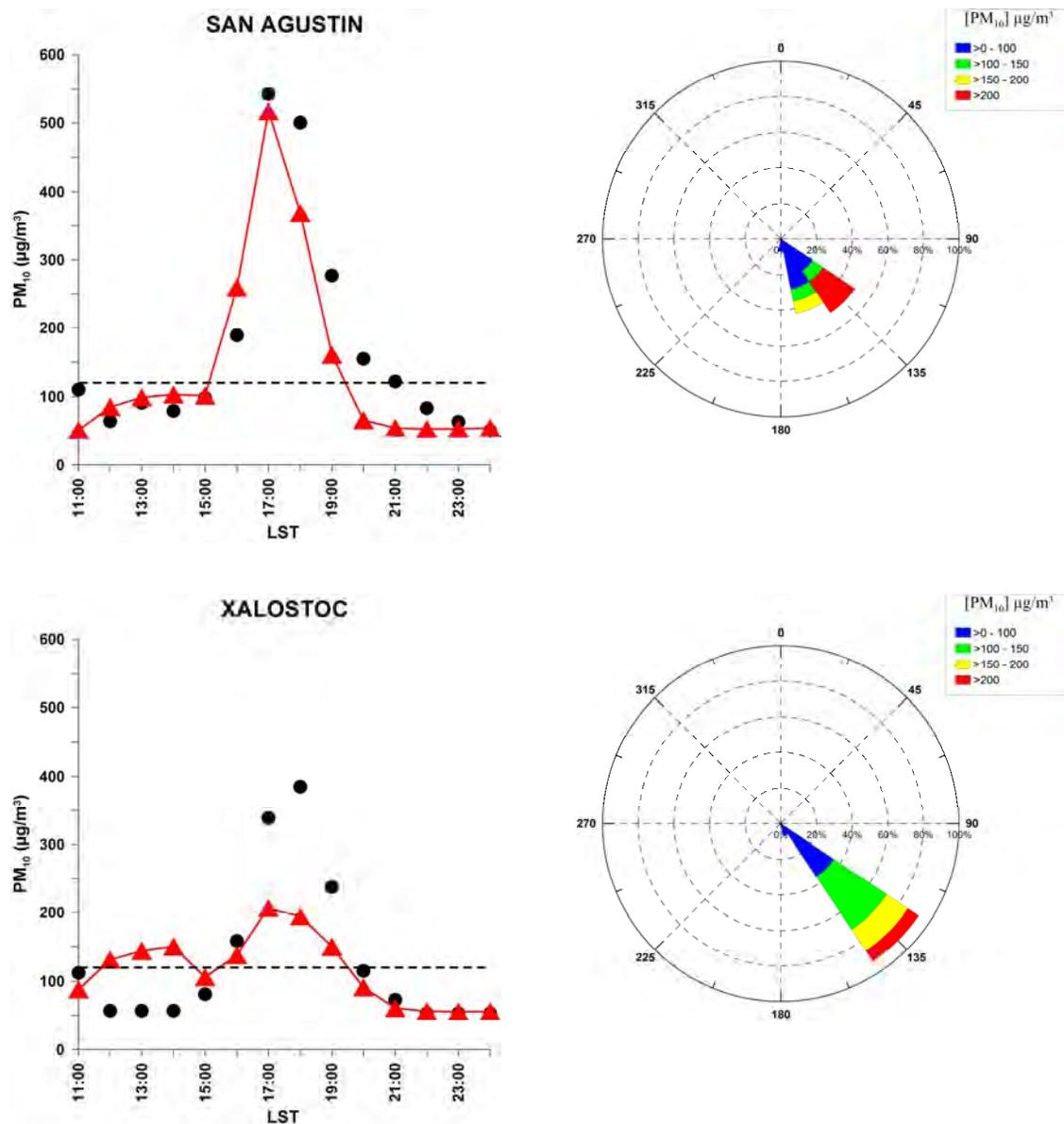


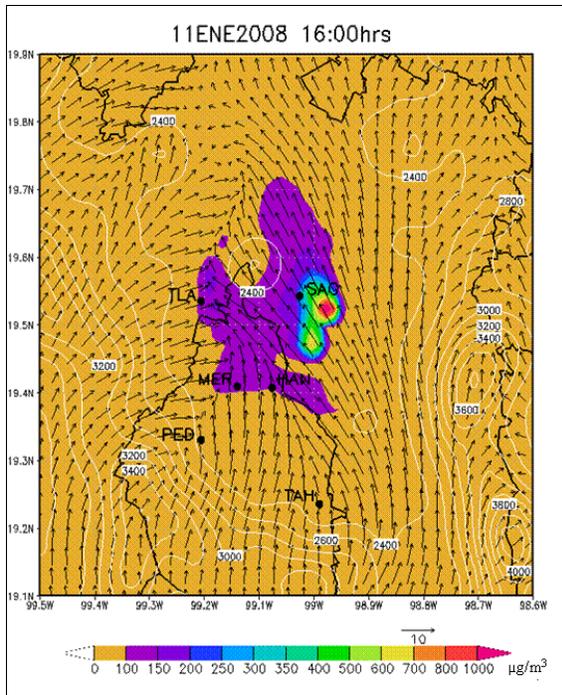
Figura 5.6. 11 de Enero del 2008. Izquierda: Comparación de concentraciones horarias de PM_{10} observadas (●) y simuladas por MCCM-WEPS (▲). La línea punteada indica el límite máximo permisible de PM_{10} ($120\mu\text{g}/\text{m}^3$). Derecha: Rosa de vientos de concentraciones simuladas para la estación.

A pesar de que el sistema pudo reproducir el evento y las altas concentraciones para SAG, los resultados se encuentran subestimados para XAL como se muestra en la Figura 5.6. Mientras XAL reporta $385\mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración máxima a las 18:00hrs LST, el modelo pronostica $193\mu\text{g}/\text{m}^3$ a la misma hora. Esta diferencia entre los datos, fue debida a las condiciones meteorológicas (dirección del viento) que fueron simuladas sobre la región

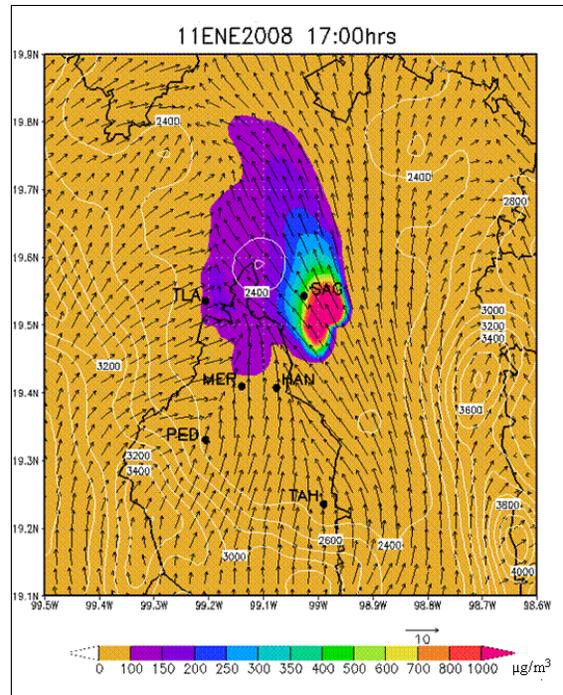
de XAL, la cual muestra una pequeña diferencia entre los datos simulados y los observados provocando que la pluma de contaminantes modelada pasara cerca de XAL, pero no sobre ella.

En términos de normatividad, tanto los datos observados así como los simulados en XAL y SAG, presentan concentraciones por arriba del límite establecido (Figura 5.6). SAG es la estación en la que se tienen las concentraciones más altas, superando por más de tres veces el valor de la norma ($120\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante la duración del evento en consideración, lo cual representa un factor muy importante en términos de riesgo a la población. Algo similar ocurre para el caso de XAL, en el que las concentraciones máximas son más del doble de lo permitido durante el mismo período de tiempo; considerando las concentraciones simuladas, a pesar de que se encuentran subestimadas, éstas están por arriba del máximo permisible.

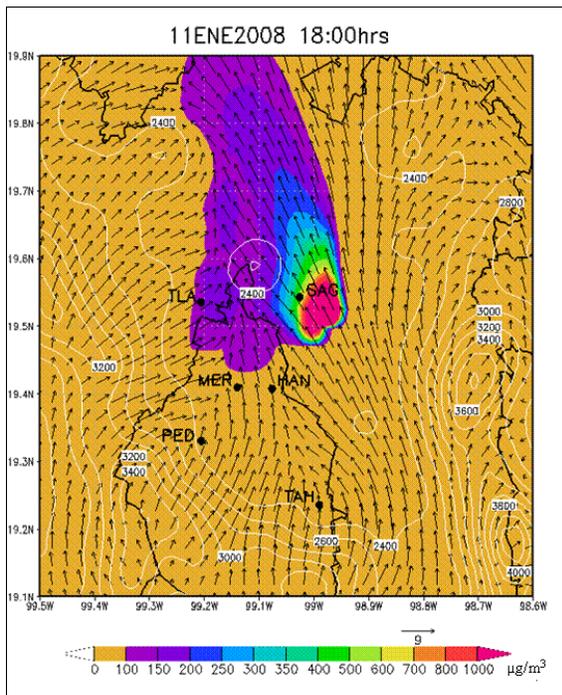
En la Figura 5.7 pueden observarse las áreas afectadas. Tal y como ocurre en el caso del 19 de Marzo del 2006, debido a los intensos vientos provenientes del sureste, las zonas norte y noreste de la Ciudad de México son las mayormente afectadas por las emisiones de partículas provenientes del ex Lago, el cual, una vez más, es la principal fuente de contaminación por partículas provenientes del suelo. Al aplicar las herramientas computacionales del MCCM para visualizar los resultados, se pudo observar que en este caso, el transporte de los contaminantes ocurre mayormente en un plano horizontal; a pesar de la presencia de confluencia de vientos durante el evento, ésta no fue un factor considerable para la distribución vertical de las partículas como en el caso anterior.



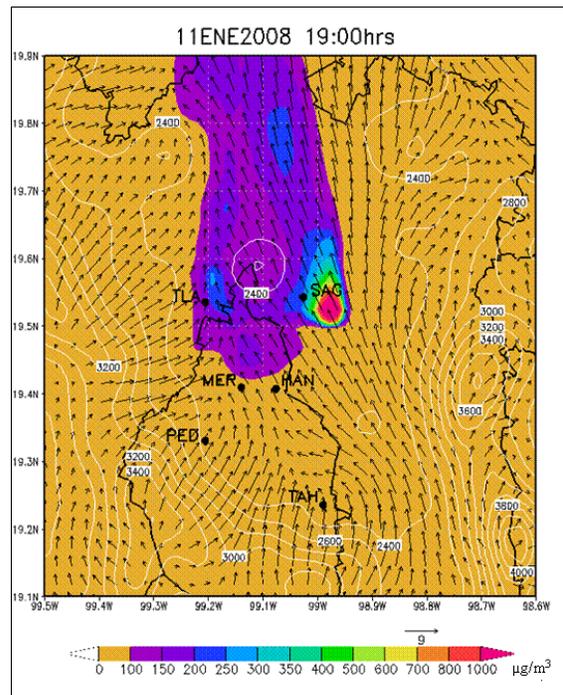
(a)



(b)



(c)



(d)

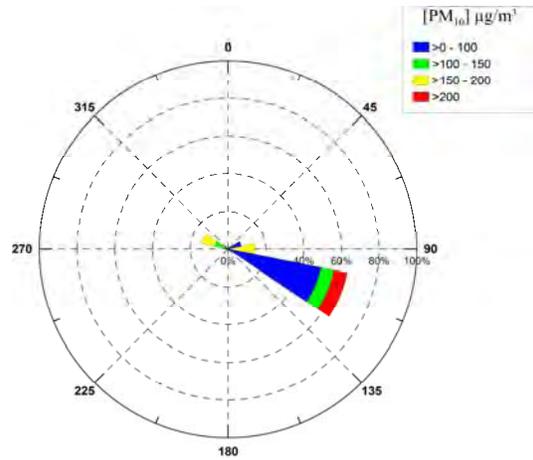
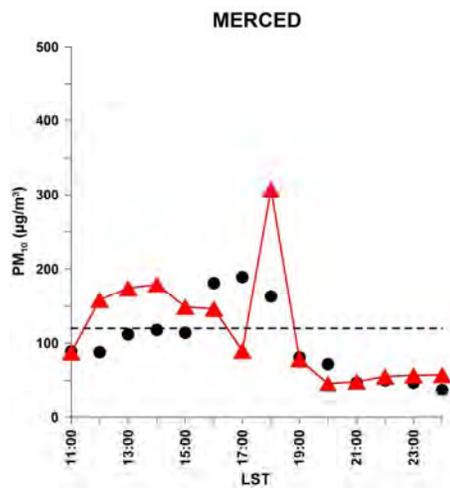
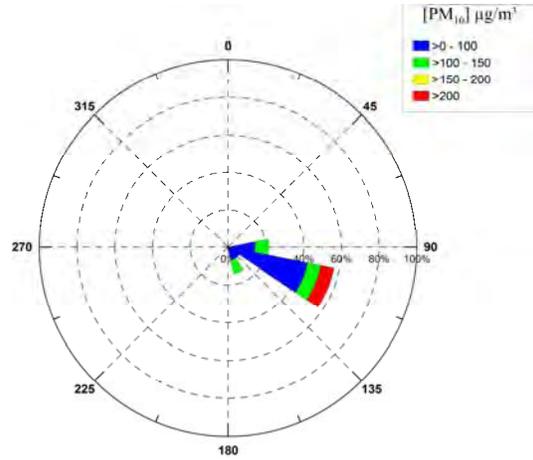
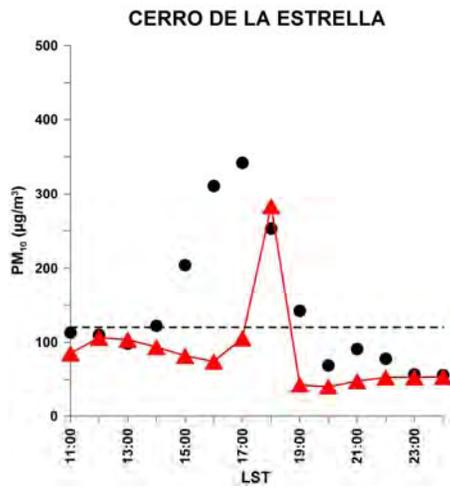
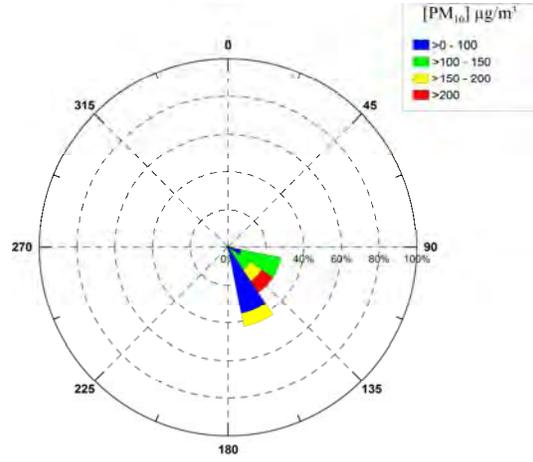
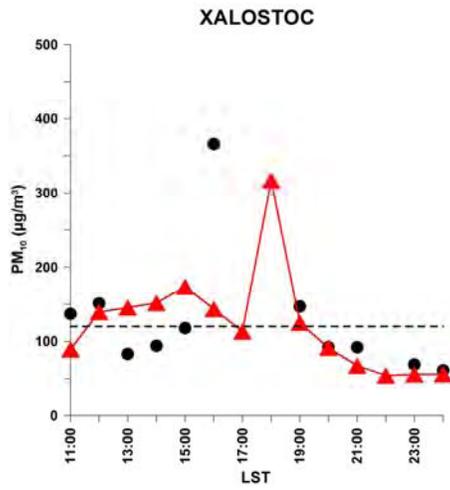
Figura 5.7. Campo de vientos y concentraciones generados sobre el ex Lago de Texcoco para el 11 de Enero del 2008. Líneas blancas representan isolíneas de nivel en m.s.n.m. En (a) se observa el inicio de la emisión sobre el ex Lago de Texcoco y la formación de confluencias en la zona norte de la ciudad. (b), (c) y (d) muestran la evolución de la nube de contaminantes y las áreas afectadas por ésta.

5.2.3. Episodio 3: 5 de Abril del 2008.

La aplicación del sistema MCCM-WEPS, muestra un evento de emisión de partículas presente desde las 15:00hrs del 5 de Abril hasta las 02:00hrs del 6 de Abril del 2008, como resultado de fuertes vientos del sureste con intensidades cercanas a 10m/s sobre la parte este de la cuenca de México. Dos fuentes considerables de emisión fueron identificadas durante este evento: suelos agrícolas localizados al este de la ciudad, además de la región del ex Lago de Texcoco (véase Figura 5.9b).

Los sitios de monitoreo que reportan altas concentraciones de PM_{10} durante este evento son Xalostoc (XAL), Cerro de la Estrella (CES), Merced (MER), Taxqueña (TAX) y Tláhuac (TAH). En la Figura 5.8 se muestran comparaciones entre las concentraciones de PM_{10} reportadas por las estaciones y los resultados obtenidos de la aplicación del sistema. En las gráficas puede observarse que todas las estaciones reportaron altas concentraciones de partículas entre las 15:00hrs y las 19:00hrs, a excepción de TAH que las reporta de las 13:00hrs a las 19:00hrs. El modelo no pudo reproducir el evento en los rangos de tiempo e intensidad de concentraciones, sin embargo, sí fue capaz de mostrar las áreas que fueron fuertemente afectadas por las emisiones de partículas.

En la Figura 5.9 se muestran las fuentes de emisión y la ubicación horaria de la pluma de contaminantes. Una vez más, se observa que el ex Lago es una fuente considerable de partículas; sin embargo se observa que la fuente principal es el área de suelos agrícolas localizados en las cercanías del Valle de Chalco. Las rosas de vientos de la Figura 5.8 muestran que las concentraciones más altas provienen del sureste, lo que nos indica que CES, MER y TAH están influenciadas por las emisiones provenientes de las zonas agrícolas localizadas al este de la Ciudad de México. Para el caso de XAL, esta presenta una influencia de las emisiones del ex Lago de Texcoco. TAX es la única que reporta altas concentraciones provenientes del noreste. Debido a su ubicación (al sur de MER), se observa que esta estación se encuentra altamente influenciada por la confluencia formada sobre la zona centro de la ciudad (Figuras 5.9a y 5.9b), lo cual provoca que los vientos del sureste se desvíen sobre TAX, por esta razón esta estación reporta vientos provenientes del noreste con altas concentraciones de partículas.



Continúa en la siguiente página...

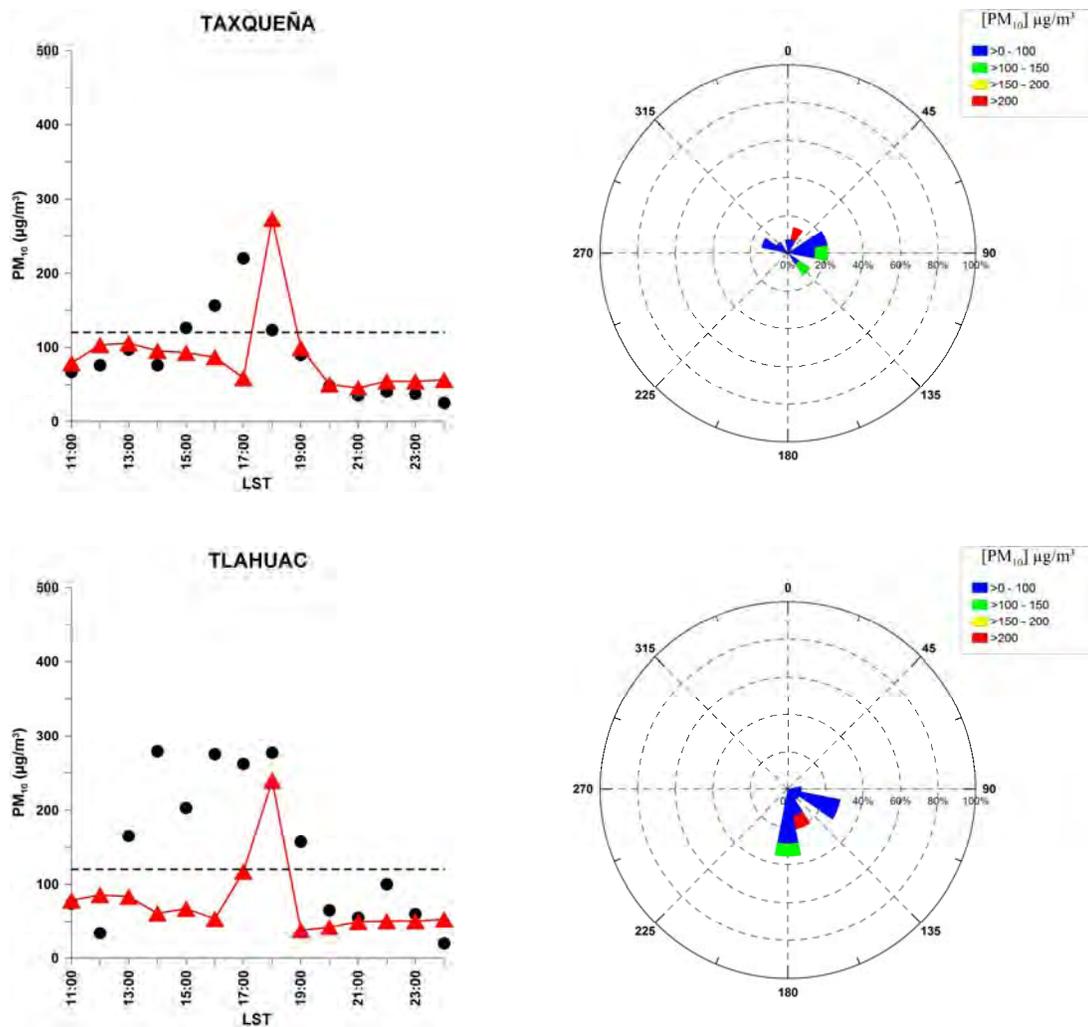


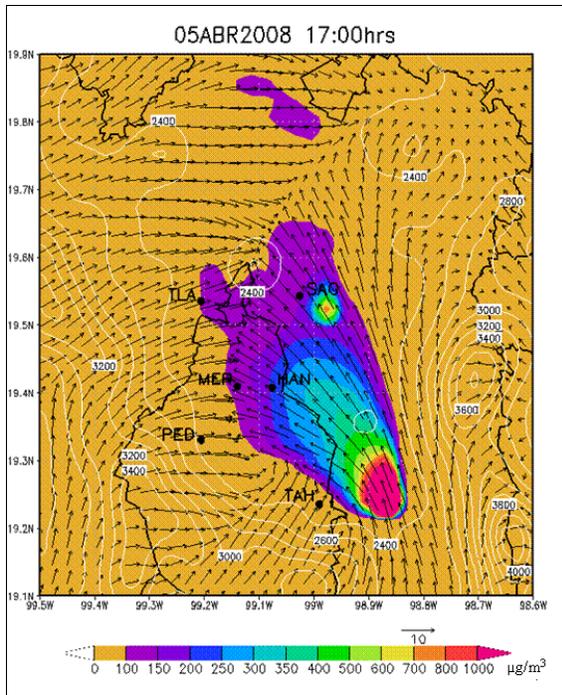
Figura 5.8. 5 de Abril del 2008. Izquierda: Comparación de concentraciones horarias de PM₁₀ observadas (●) y simuladas por MCCM-WEPS (▲). La línea punteada indica el límite máximo permisible de PM₁₀ (120µg/m³). Derecha: Rosa de vientos de concentraciones simuladas

Como se menciona en el párrafo anterior, las partículas provenientes de la región del Valle de Chalco afectaron considerablemente el centro (MER), sur (CES y TAX) y sureste (TAH) de la Ciudad de México; mientras que las emisiones provenientes del ex Lago afectaron la parte norte y noreste (XAL) como se muestra en la Figura 5.9. La estación San Agustín no realizó mediciones para estos días. A partir de los resultados de la modelación, es posible que ésta hubiese reportado concentraciones de partículas más elevadas que las reportadas por Xalostoc.

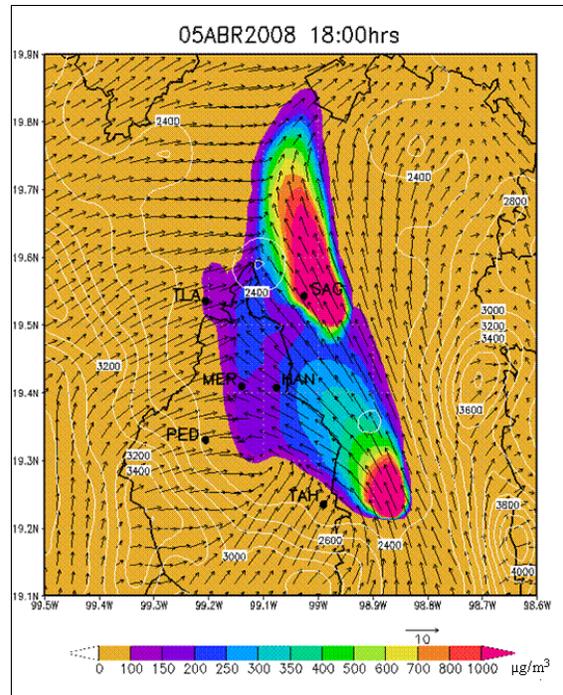
Las diferencias de concentraciones entre los datos observados y los simulados, se debieron a diferencias entre los resultados correspondientes a direcciones de vientos, ya que durante este escenario se presentaron los índices (I_C e I_S) más bajos (Tablas 5.1 y 5.4). Esto provoca que las concentraciones de partículas pronosticadas por el sistema sobre las áreas de las estaciones de la RAMA, no presenten la misma durabilidad o no fueran reportadas a la misma hora en que lo hacen las estaciones. Como se muestra en las Tablas 5.1 y 5.4, XAL fue la estación que mejores resultados arrojó para esta variable meteorológica, lo cual se ve reflejado en la Figura 5.8 al presentar concentraciones de partículas muy aproximadas a las observadas.

Así mismo, se observa que CES y TAH mostraron mayor durabilidad del evento (Figura 5.8) en lo que a datos observados se refiere. Además, dichas estaciones presentan concentraciones por arriba del máximo permisible durante más de cuatro horas, lo cual como se mostrará más adelante, afectaría considerablemente el promedio de 24hrs. XAL es la estación que reporta el pico más alto de concentraciones, reportando aproximadamente $350\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00hrs LST, a pesar de ello el modelo genera $320\mu\text{g}/\text{m}^3$ dos horas después. De todos los eventos seleccionados, este es el que presenta las concentraciones más bajas, más sin embargo, fue el que más extensión presentó al ser captado en cinco estaciones.

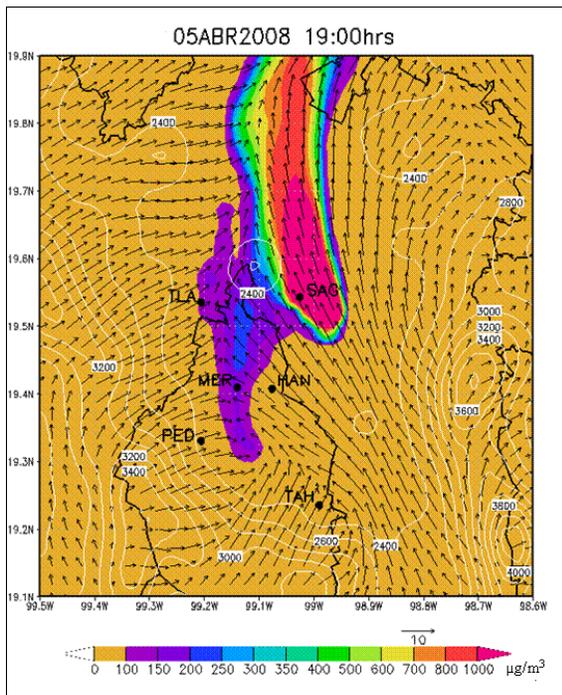
En las Figuras 5.9a, 5.9b y 5.9c, puede observarse la presencia de confluencias de vientos en la parte norte y centro de la Ciudad de México, las cuales afectan la forma en la que las partículas son transportadas. Mediante el uso de los visualizadores gráficos propios del MCCM, se observó que estas confluencias afectan el transporte horizontal (superficial) de los contaminantes, dando lugar al transporte vertical de los mismos.



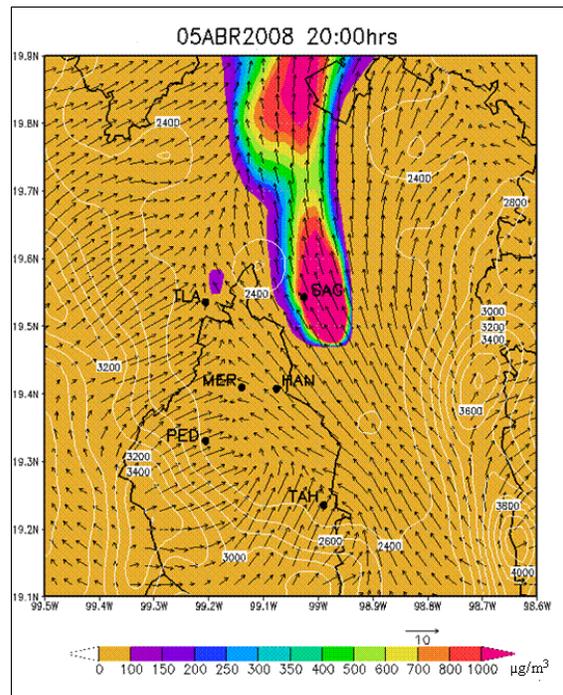
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.9. Campo de vientos y concentraciones generados sobre la Cuenca de México para el 05 de Abril del 2008. En (a) y (b) se observa la confluencia formada sobre la ciudad, la cual acelera el transporte de las partículas emitidas en el Valle de Chalco y posteriormente en el ex Lago de Texcoco. Los contaminantes son concentrados en la zona norte por efecto de la confluencia (c) y posteriormente transportados al sur del estado de Hidalgo (d). Isolíneas de nivel en m.s.n.m. (líneas blancas).

5.2.4. Episodio 4: 29 de Noviembre del 2008.

RAMA reporta un evento presente el 29 de Noviembre de las 14:00hrs a las 18:00hrs, teniendo como concentración máxima $642\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00hrs en San Agustín (SAG) (Figura 5.10). Según reportes de la estación, los vientos provenían del sur y sureste, los cuales presentaban intensidades cercanas a 7m/s sobre áreas rurales y semiurbanas. Debido a su ubicación geográfica, Tláhuac (TAH) también reporta el mismo evento una hora antes que SAG (13:00hrs-15:00hrs), lo cual puede observarse en la Figura 5.10. Al igual que SAG, TAH también reportaba vientos del sureste.

Como se observa en la Figura 5.10, el sistema MCCM-WEPS pudo reproducir el evento reportado por las estaciones. Para el caso de SAG, el modelo pronostica una concentración máxima de $677\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00hrs, la cual coincide con la reportada por la estación. El segundo pico de concentraciones observado en la estación ($400\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17:00hrs) no pudo ser reproducido por el sistema debido a una diferencia de 30° entre la dirección del viento observada y la simulada, lo cual se refleja en el I_C e I_S mostrados en las Tablas 5.1 y 5.5, cuyos valores son iguales a 0.66. A pesar de ello, en la rosa de vientos de concentraciones simulada de la Figura 5.10 para esta estación, se observa que las concentraciones más altas provenían del sureste, así como también del suroeste.

En el caso de TAH, el modelo pudo representar la presencia de contaminantes sobre esta región pero no su intensidad y durabilidad. TAH reporta una concentración máxima de $248\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:00hrs, mientras que el modelo genera $169\mu\text{g}/\text{m}^3$ una hora después debido a las diferencias presentes entre las direcciones de viento simuladas y las observadas; dicha variable meteorológica presenta índices (I_S e I_C) con valores de 0.69, similar a lo que ocurre en SAG (Tablas 5.1 y 5.5). Para Cerro de la Estrella (CES), la pluma resultante de la simulación es captada ligeramente, de ahí que en esta estación, las concentraciones pronosticadas por el sistema no presenten la misma magnitud que las observadas (Figura 5.10).

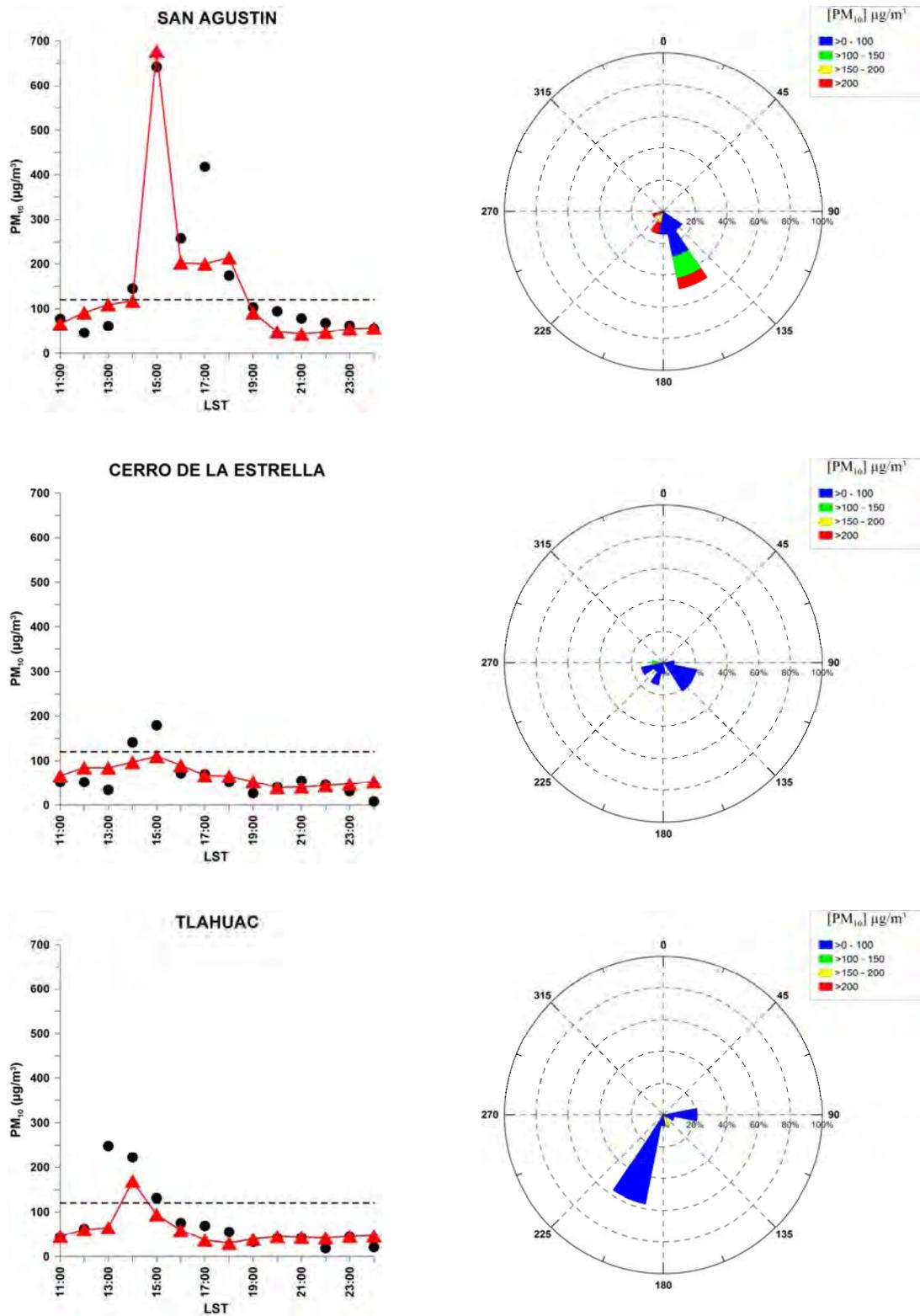


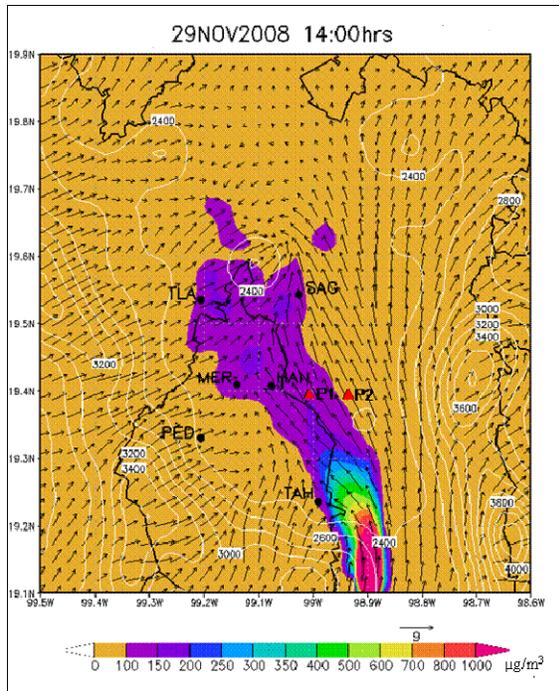
Figura 5.10. Serie de tiempo de concentraciones de PM₁₀ reportadas por algunas de las estaciones de monitoreo (●) y las generadas por el modelo (▲) durante el 29 de Noviembre del 2008.

El sistema muestra que la emisión de partículas fue generada principalmente en dos zonas. La primera en los suelos agrícolas localizados al sureste de la Ciudad de México (Tenango del Aire) y la segunda en la región del ex Lago de Texcoco (Figura 5.11). Las partículas emitidas en Tenango, son transportadas afectando una parte del centro y el este de la ciudad, llegando a afectar también la zona norte donde son adicionadas a las emisiones del ex Lago de Texcoco.

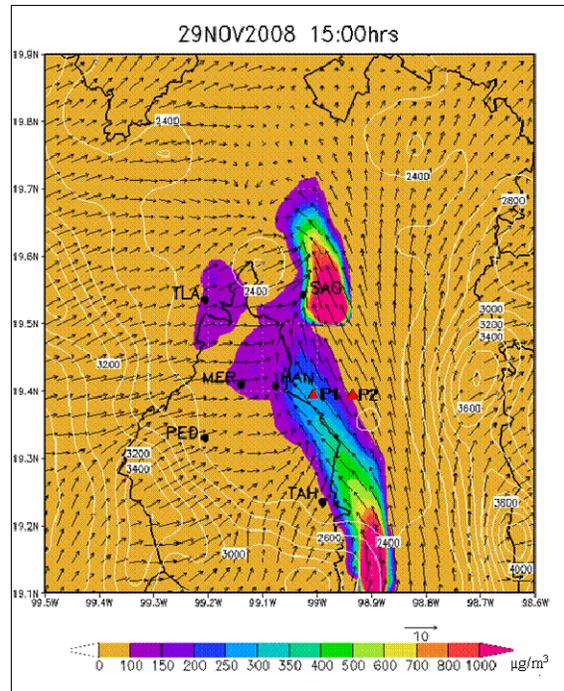
Las partículas emitidas sobre la región del vaso del antiguo Lago de Texcoco y parte de las que fueron emitidas en Tenango, son transportadas hasta la parte norte de la ciudad donde llegan a formarse confluencias de vientos (Figuras 5.11b, 5.11c y 5.11d). Como en casos anteriores, las confluencias detienen el transporte horizontal de los contaminantes y como consecuencia, dan paso al transporte vertical de éstos, provocando que las concentraciones de partículas a nivel de superficie disminuyan. Mediante la aplicación de los visualizadores gráficos del modelo, pudo observarse que las partículas son transportadas hasta la altura de la capa de mezcla al ser afectadas por las líneas de confluencia. Una vez que se encuentran en esta capa, estos contaminantes son transportados fuera de la cuenca afectando otras regiones del país.

A partir de las Figuras 5.11a, 5.11b y 5.11c, se observa que SAG está fuertemente influenciado por la confluencia formada sobre la ciudad, la cual genera que los contaminantes se concentren sobre esta región. Considerando lo anterior y la rosa de concentraciones para esta estación (Figura 5.10), se puede determinar que las altas concentraciones provenientes del suroeste y sureste provienen de la región de Tenango del Aire y del ex Lago de Texcoco respectivamente.

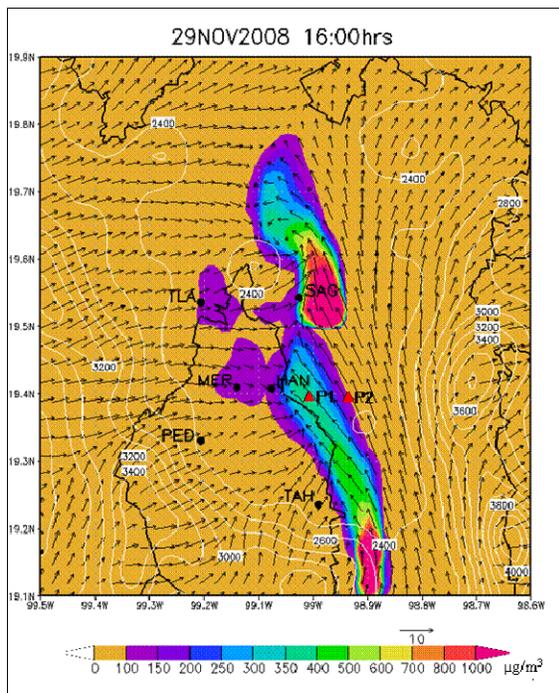
Finalmente se observa que SAG es la zona más impactada durante este evento al sobrepasar el valor máximo permisible durante cinco horas, siendo el caso más severo a las 15:00 LST (Figura 5.10) en el que el valor reportado por la estación equivale a cinco veces el valor normado. TAH y CES no presentaron concentraciones tan elevadas, sin embargo también presentan valores por arriba a lo establecido en la NOM-025-SSA1-1993 ($120\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante dos horas.



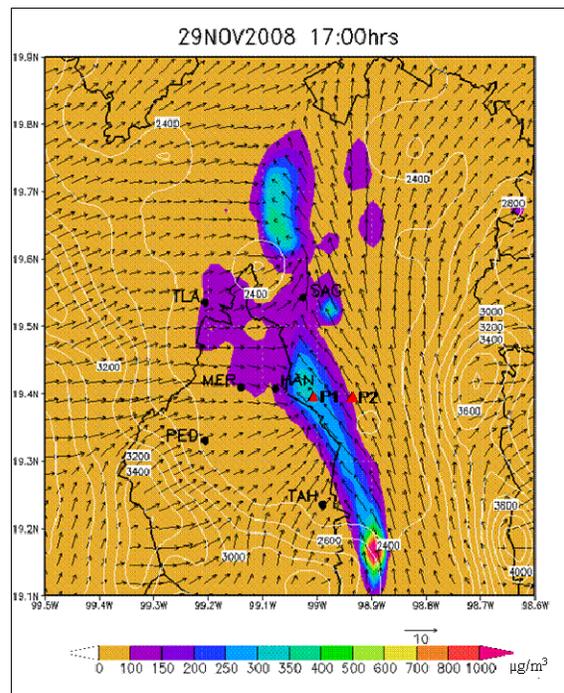
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.11. Campo de vientos y concentraciones generados sobre la Cuenca de México para el 29 de Noviembre del 2008. En (a) se observa la emisión proveniente de Tenango del Aire. (b) muestra la formación de la confluencia y la emisión generada en el ex Lago de Texcoco. En (c) se observa como las plumas de contaminantes se ven afectadas por las confluencias mientras que en (d) puede observarse la forma en la que las altas concentraciones de partículas sobre la superficie desaparecen. P1 y P2 representan los puntos utilizados para el análisis vertical. Isolíneas de nivel en m.s.n.m. (líneas blancas).

5.3. Análisis Vertical.

Ahora se hace un análisis del perfil vertical de los eventos analizados. El evento ocurrido el 29 de Noviembre del 2008 fue seleccionado para realizar el análisis vertical de las concentraciones de partículas PM_{10} , para de este modo entender el comportamiento de la distribución vertical de estos contaminantes. Con este fin, dos puntos fueron seleccionados (P1 y P2) sobre la Ciudad de México, como se muestra en las Figuras 5.11 y 5.12.

Los perfiles verticales de las concentraciones de PM_{10} , así como de las temperaturas potenciales (θ) y las velocidades y direcciones de viento en los puntos P1 y P2 de las 14:00hrs a las 19:00hrs, se muestran en las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15. Como se muestra en la Figura 5.13a una cortina de partículas provenientes del suelo llega a P1 a las 14:00hrs (véase Figura 5.11a para la distribución superficial correspondiente). Entre la capa superficial y 800m, se presentan vientos del sureste con intensidades aproximadas a 5m/s bajo condiciones inestables cerca de la superficie, mientras que condiciones neutras y estables se presentan en las capas superiores. Para el caso de P2, a pesar de que los contaminantes no se encuentran sobre este punto, las condiciones meteorológicas son muy similares a las presentes en P1 (Figura 5.13a'). Las concentraciones máximas fueron obtenidas cerca de la superficie en P1 ($120\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Un incremento en las concentraciones y un cambio en las condiciones verticales pueden observarse en P1 y P2 en la Figura 5.13b y Figura 5.13b' respectivamente. Como se mostró anteriormente en la Figura 5.11b a las 15:00hrs, confluencias de vientos se han formado cerca del punto P1. Este fenómeno produce un levantamiento de la nube de partículas por lo que, las concentraciones de PM_{10} se ven incrementadas en las capas superiores donde también se observa un cambio en la dirección del viento (Figura 5.13b). Al mismo tiempo, un pico de concentraciones de $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $\approx 1\text{km}$ de altura (capa de mezcla) en P2 puede observarse en la Figura 5.13b'. Esto como resultado del transporte de partículas de P1 a P2.

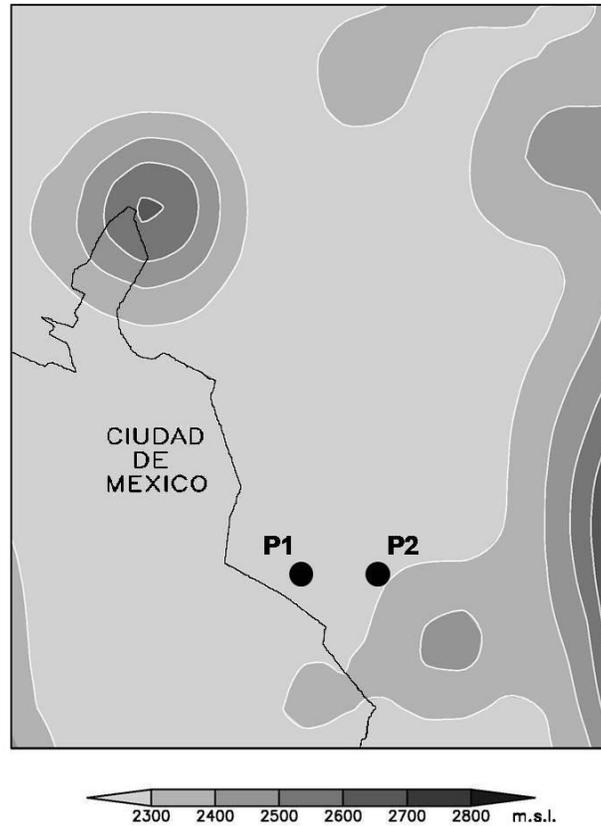
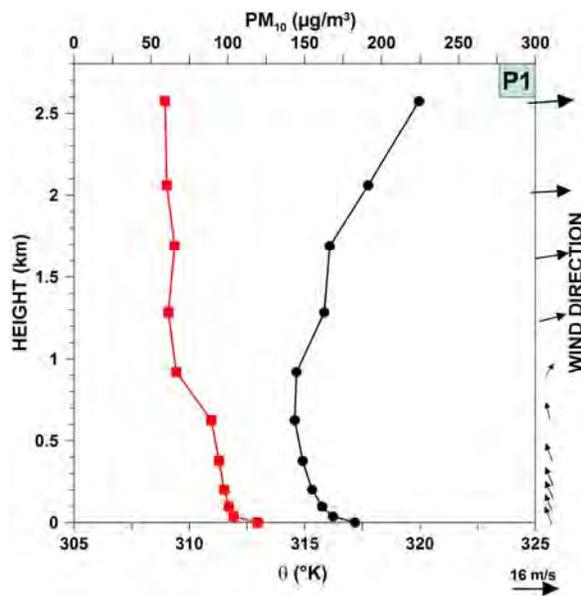
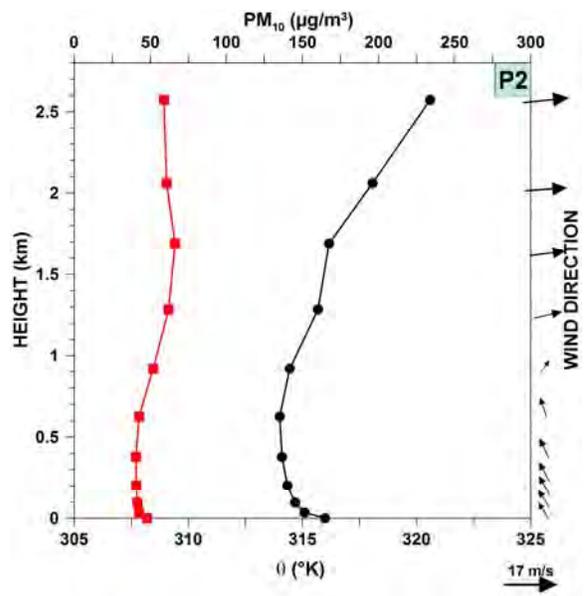


Figura 5.12. Localización de los puntos seleccionados para el análisis vertical.

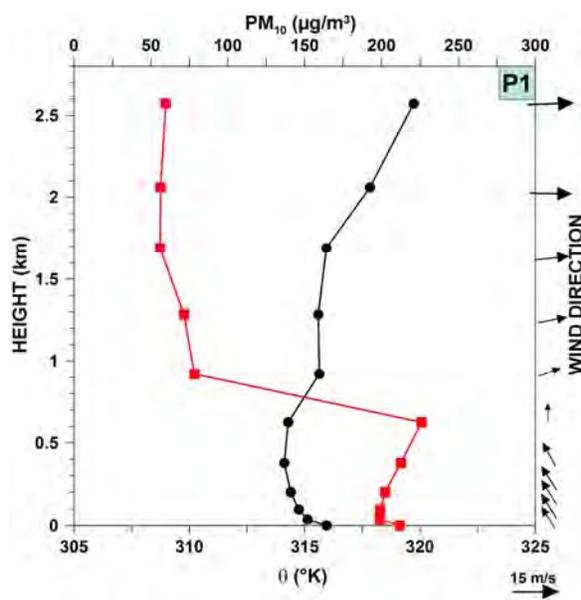
A las 16:00hrs, la pluma asciende aún más conforme la confluencia se vuelve más intensa cerca de P1, como se muestra en la Figura 5.14a y su distribución horizontal correspondiente en Figura 5.11c. Las partículas se elevan hasta ≈ 2.1 km donde se forma una inversión térmica por lo que éstas quedan atrapadas en la capa de mezcla. Las altas concentraciones superficiales están presentes debido al continuo transporte de partículas provenientes de la fuente (Tenango del Aire) hacia el punto P1. En cambio, en P2 el transporte ocurre principalmente en las capas superiores, mientras que cerca de la superficie las concentraciones son relativamente bajas debido a que dicho punto no se encuentra dentro de la trayectoria de la pluma de contaminantes como se muestra en la Figura 5.11c y Figura 5.14a’.



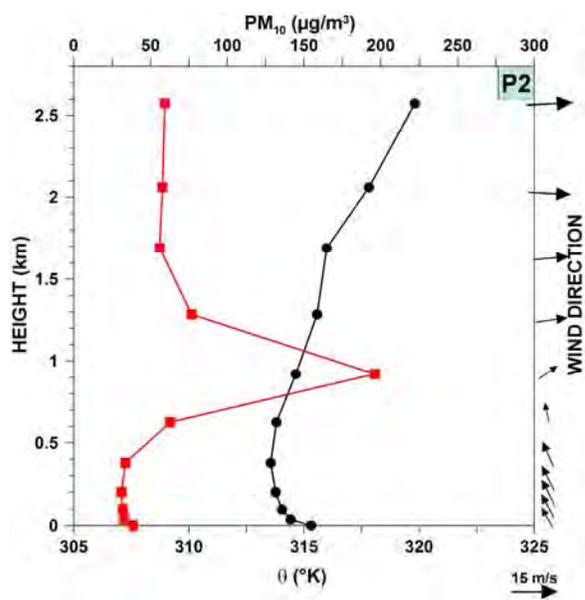
(a)



(a')

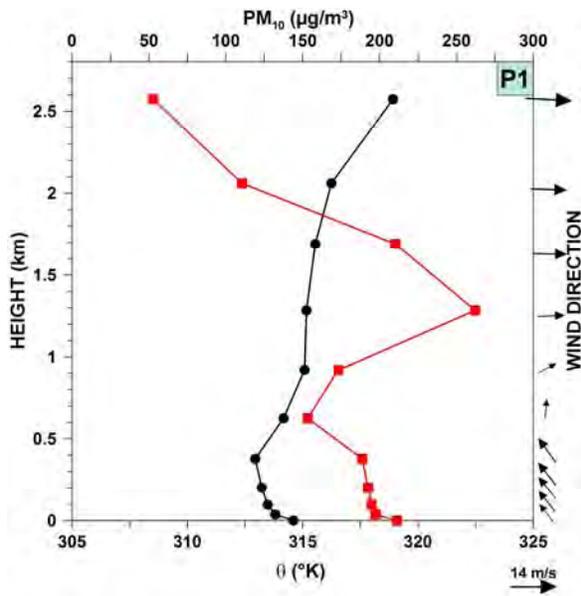


(b)

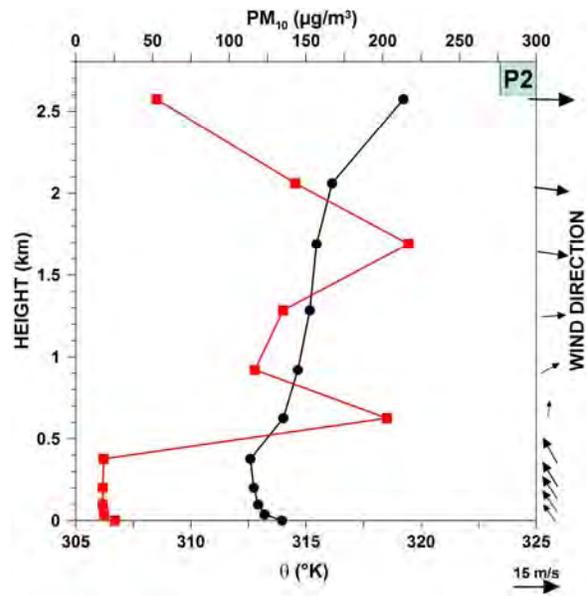


(b')

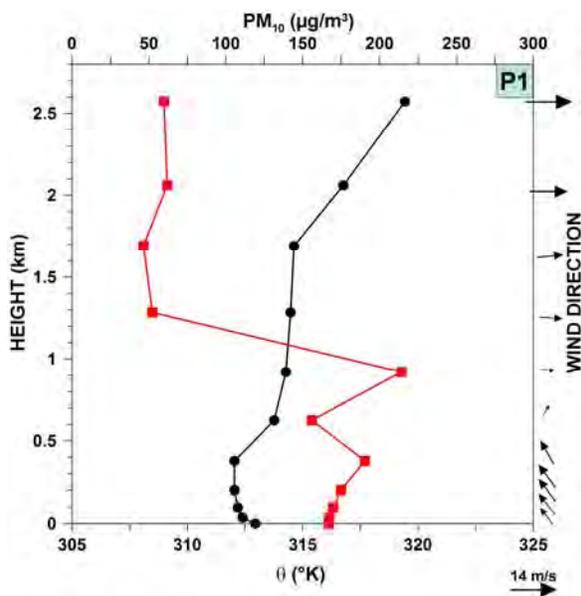
Figura 5.13. Perfiles verticales de concentraciones de PM_{10} (■) y Temperaturas Potenciales (●) en P1 (izq.) y P2 (der.) de las 14:00 (a, a') y 15:00 (b, b') LST durante el 29 de Noviembre del 2008. Velocidades y direcciones de vientos horizontales a diferentes alturas se muestran al lado derecho de cada gráfica. El tamaño de las flechas indica la escala de velocidades de los vientos.



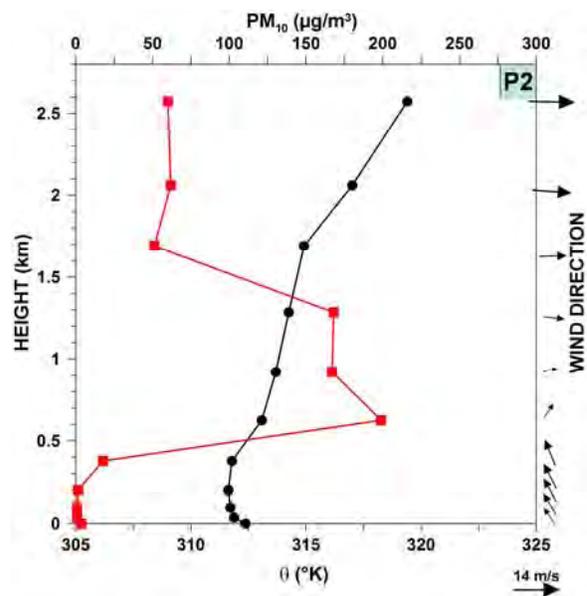
(a)



(a')

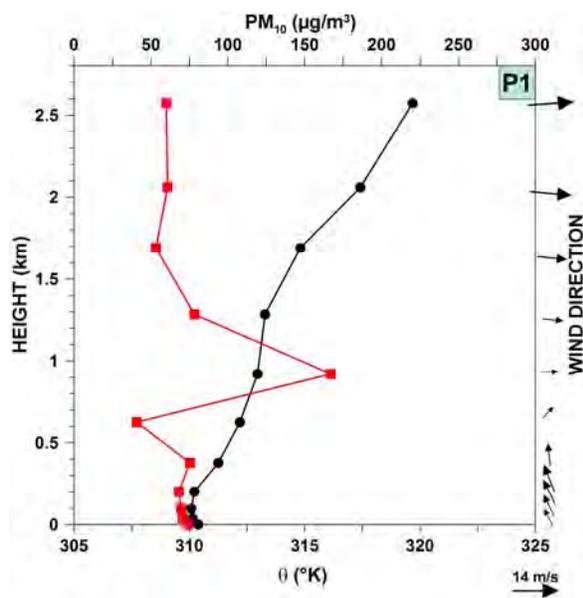


(b)

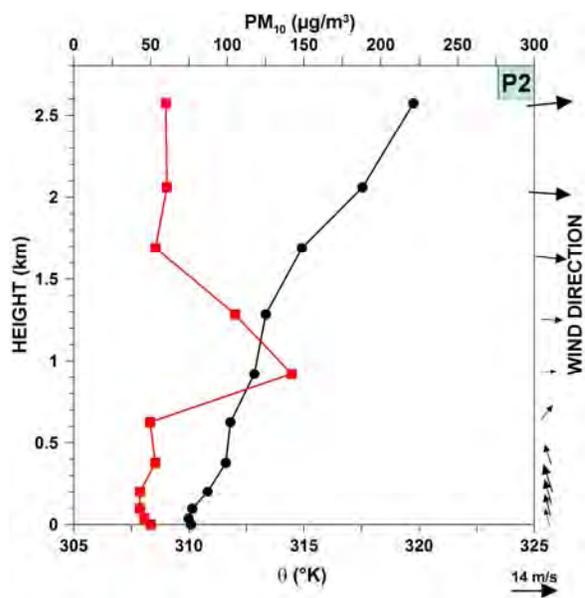


(b')

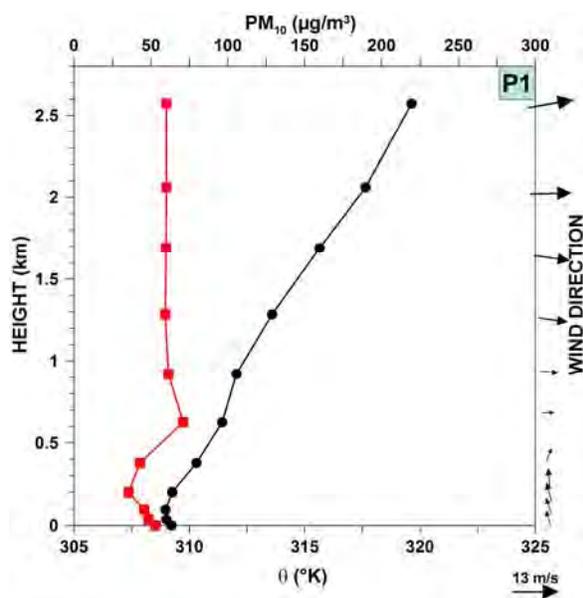
Figura 5.14. Perfiles verticales de concentraciones de PM_{10} (■) y Temperaturas Potenciales (●) en P1 (izq.) y P2 (der.) de las 16:00 (a, a') y 17:00 (b, b') LST durante el 29 de Noviembre del 2008. Velocidades y direcciones de vientos horizontales a diferentes alturas se muestran al lado derecho de cada gráfica. El tamaño de las flechas indica la escala de velocidades de los vientos.



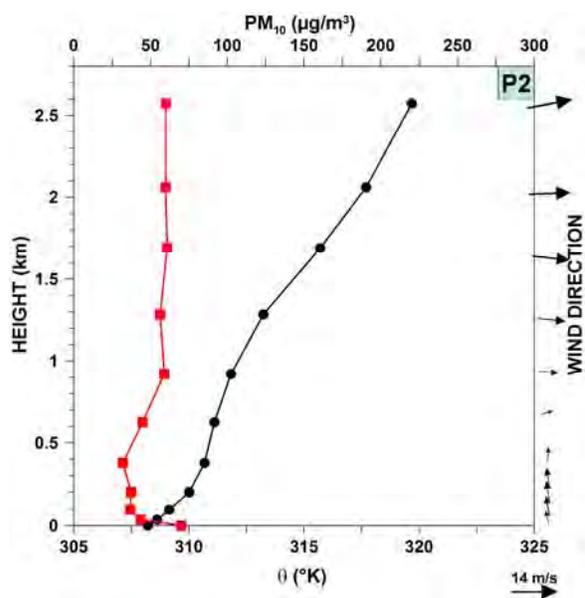
(a)



(a')



(b)



(b')

Figura 5.15. Perfiles verticales de concentraciones de PM_{10} (■) y Temperaturas Potenciales (●) en P1 (izq.) y P2 (der.) de las 18:00 (a, a') y 19:00 (b, b') LST durante el 29 de Noviembre del 2008. Velocidades y direcciones de vientos horizontales a diferentes alturas se muestran al lado derecho de cada gráfica. El tamaño de las flechas indica la escala de velocidades de los vientos.

Como se muestra en la Figura 5.11d, cuando las emisiones disminuyen debido a la presencia de vientos con bajas intensidades sobre la fuente de emisión, las concentraciones también presentan el mismo comportamiento en P1 y P2. Esto se presenta en la Figura 5.14b y Figura 5.14b'. La pluma alcanza ≈ 1 km de altura en P1 mientras que en P2 esta se encuentra a ≈ 1.3 km. Una vez que las emisiones desaparecen, concentraciones residuales de PM_{10} se encuentra a aproximadamente ≈ 1 km sobre la superficie, como se muestra en la Figura 5.15a y Figura 5.15a'. En las Figuras 5.15b y 5.15b', las concentraciones superficiales son principalmente provocadas por fuentes antropogénicas y a la sedimentación de las partículas.

Las Figuras 5.11, 5.13, 5.14 y 5.15, muestran que la distribución vertical de las partículas PM_{10} provenientes del suelo, está altamente influenciada por la formación de líneas de confluencias, las cuales a su vez, interrumpen el transporte horizontal de estos contaminantes. Las confluencias de vientos, son un factor muy importante para que las partículas provenientes del suelo, sean transportadas fuera de la cuenca de México.

De los resultados presentados se observa que MCCM-WEPS pudo aproximar la intensidad de las emisiones que generaron las altas concentraciones superficiales de PM_{10} durante los episodios analizados. Así mismo, el modelo tuvo la capacidad de reproducir los eventos reportados por las estaciones de monitoreo. Los casos en que los datos modelados y los observados por la estación difieren, son explicados a partir de la variación de las direcciones de viento simuladas. Esta variación provoca que la pluma de contaminantes modelada sufra una desviación por la cual, el punto en donde se localiza la estación de monitoreo no logre captarla.

Por otro lado, se observa que las líneas de confluencia son un factor muy importante en la distribución vertical de las partículas en la atmósfera de la cuenca de México, favoreciendo de este modo, que los contaminantes sean transportados fuera de la misma.

5.4. Normatividad Ambiental.

Para efectos de protección a la salud de la población más susceptible, la modificación de 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 como valor de concentración máxima:

$$120\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ promedio de 24hrs.}$$

y para determinar si un sitio cumple con el valor normado de 24hrs para PM_{10} , especifica lo siguiente: “Un sitio cumple con la norma de PM_{10} para el promedio de 24 horas cuando el valor del percentil 98, es menor o igual a $120\mu\text{g}/\text{m}^3$.”

Considerando lo anterior, los valores Percentiles 98 ($P_{0.98}$) de los datos observados y de los simulados, para las estaciones afectadas durante cada uno de los eventos se presentan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Percentiles 98 de las estaciones de muestreo durante todos los episodios seleccionados.

EPISODIO	ESTACIÓN	$P_{0.98}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		OBSERVADO	SIMULADO
MARZO 19, 2006	SAN AGUSTÍN	966	1215
ENERO 11, 2008	SAN AGUSTÍN	523	449
	XALOSTOC	364	201
ABRIL 5, 2008	C. DE LA ESTRELLA	328	202
	MERCED	185	249
	TAXQUEÑA	191	196
	TLAHUAC	278	183
	XALOSTOC	269	251
NOVIEMBRE 29, 2008	C. DE LA ESTRELLA	162	104
	SAN AGUSTÍN	539	464
	TLAHUAC	236	135

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior, se observa que todas las estaciones no cumplen con el valor máximo permisible establecido. Con respecto a los resultados arrojados por el modelo, Cerro de la Estrella es el sitio en el que se subestimaron las concentraciones de partículas durante el episodio ocurrido el 29 de Noviembre del 2008.

San Agustín (SAG) es la estación que reporta las concentraciones más altas durante los episodios de Marzo '06, Enero '08 y Noviembre '08, esto considerando tanto los datos observados así como los simulados. De estos tres eventos, el primero de ellos fue el más severo al presentar un valor de $P_{0.98}$ ocho veces mayor al establecido en la norma. Como se mencionó anteriormente, la estación SAG no realizó mediciones para el caso de Abril '08, sin embargo a partir de los resultados mostrados en el Subcapítulo 5.2.3 y los mostrados en la Tabla 5.6, no se descartaría que también durante este evento la estación presentara valores de $P_{0.98}$ que sobrepasaran el valor normado.

Los $P_{0.98}$ con valores más bajos, se obtienen para el episodio ocurrido en Abril '08, sin embargo, éstos aún se encuentran muy por arriba de la norma.

De todas las estaciones presentadas en la Tabla 5.6, Cerro de la Estrella es la que presenta el valor más bajo durante el episodio ocurrido en Noviembre '08. A pesar de ello, las concentraciones observadas sobrepasan el máximo permisible. Para el caso de los datos simulados para esta estación, el valor no logra sobrepasar la norma al presentar un $P_{0.98}$ con valor de $104\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar los percentiles de las observaciones y de los datos simulados, la estación que mejor resultado arroja es Taxqueña (TAX) durante el 5 de Abril del 2008.

Para todos los episodios seleccionados, se sobrepasó el máximo permisible en todas las estaciones. Caso similar ocurre en la mayoría de los resultados de la simulación. La sobrestimación o subestimación de los Percentiles obtenidos para los datos simulados se debe -como se ha venido discutiendo en párrafos anteriores-, a las variaciones en las direcciones de viento pronosticadas por el modelo (Tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5).

A continuación serán expresadas las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados derivados de la aplicación de MCCM-WEPS, así como las recomendaciones que ayudarán a mejorar el desempeño de este sistema.

6. CONCLUSIONES.

Tres zonas geográficas fueron identificadas como fuentes emisoras de partículas PM_{10} por erosión eólica mediante la aplicación del sistema MCCM-WEPS a los cuatro diferentes episodios aquí estudiados. Éstas son: la región del vaso del ex Lago de Texcoco y las zonas agrícolas localizadas al sureste (Tenango del Aire) y al este (Valle de Chalco) de la Ciudad de México. Éstas pueden observarse en la Figura 6.1.

La intensidad de las emisiones generadas por MCCM-WEPS, aproximaron adecuadamente los episodios de altas concentraciones superficiales de PM_{10} . En la mayoría de las estaciones de la RAMA, los eventos reportados por las estaciones de monitoreo son reproducidos por el modelo. Para las horas en las que los resultados del modelo difieren notablemente de las mediciones, se encontró que esto se debía a una desviación de $\approx 30^\circ$ en las direcciones de viento pronosticadas con respecto a las observaciones, lo que ocasionaba una desviación de la pluma de contaminantes y como consecuencia, que las concentraciones modeladas no fueran captadas en el punto donde se localiza la estación correspondiente.

Durante el evento extraordinario presente en Marzo del 2006, se presentó la concentración más alta en comparación con los otros episodios. La concentración reportada de PM_{10} fue superior a $1,000\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17:00hrs LST (Figuras 5.4 y 5.5). Mediante la aplicación del modelo MCCM-WEPS, se observó la evolución de dicho evento, lográndose reproducir altas concentraciones sobre la estación San Agustín (SAG) durante el mismo intervalo de tiempo en el que el sitio de monitoreo reporta altos índices de contaminación. Este evento coincidió con la campaña MILAGRO. Los resultados de la simulación

coinciden con aquellos reportados por Fast *et al.* (2007), Querol *et al.* (2008) y Múgica *et al.* (2009), quienes reportan emisiones de partículas provenientes del suelo en la cuenca de México y además, un alto contenido de material crustal en la composición de las partículas de la Ciudad de México durante el período de esta campaña.

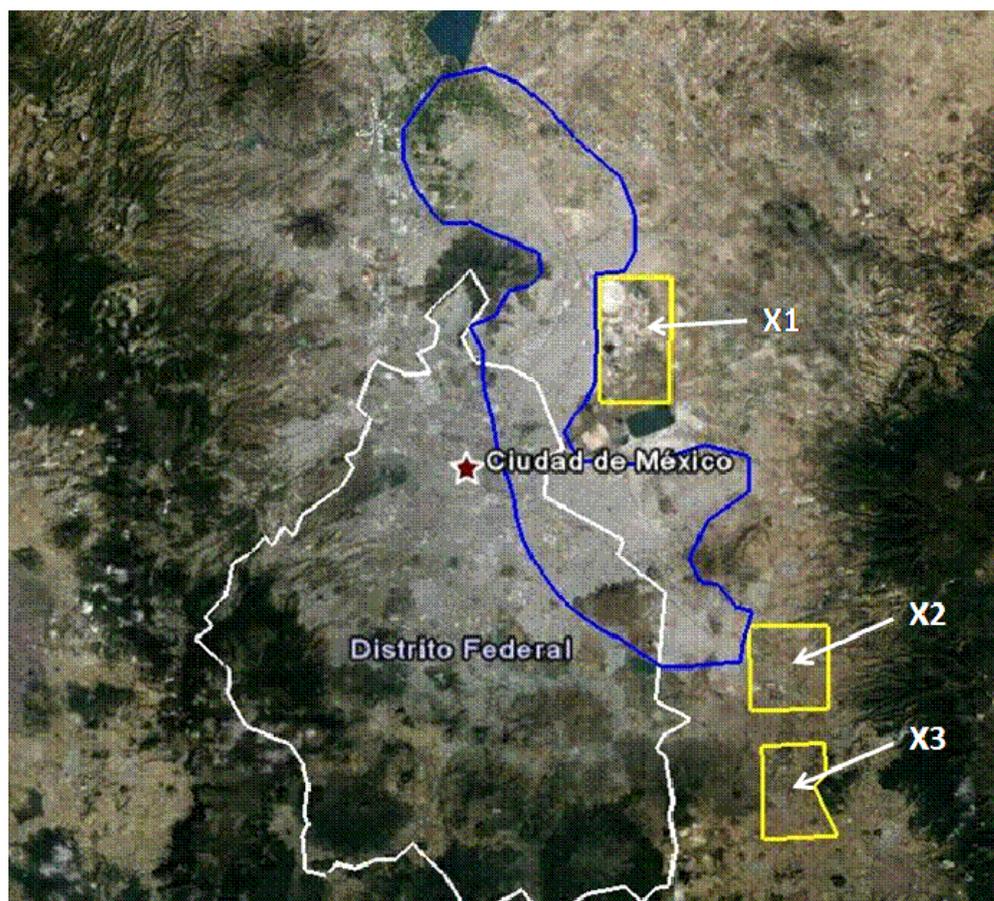


Figura 6.1. Ubicación geográfica de las fuentes emisoras de partículas identificadas mediante la aplicación de MCCM-WEPS. X1= Ex Lago de Texcoco. X2= Valle de Chalco. X3= Tenango del Aire. La línea azul delimita el área afectada por altas concentraciones de PM_{10} mientras que la línea blanca al Distrito Federal.

Como se muestra en la Tabla 5.6, las altas concentraciones de partículas (observadas y simuladas) en las estaciones de monitoreo seleccionadas para la comparación de resultados, generan valores de $P_{0.98}$ muy por arriba del promedio de 24hrs establecido en la norma oficial, por lo que durante los episodios estudiados, las emisiones provenientes del vaso del antiguo Lago de Texcoco y de las zonas agrícolas previamente señaladas,

ocasionaron que diversas áreas de la Ciudad de México no cumplieran con la norma de PM_{10} .

El análisis tridimensional de los resultados de la modelación, muestra que el transporte de las partículas PM_{10} es afectado horizontalmente cuando se forman líneas de confluencia cercanas a la pluma de contaminantes, favoreciendo de este modo el transporte vertical de las partículas (véanse Figuras 5.11, 5.13, 5.14 y 5.15). Las líneas de confluencia son el principal factor para la distribución vertical de estos contaminantes. Para el caso del evento ocurrido en Noviembre del 2008, las partículas fueron transportadas hasta la altura de la capa de mezcla debido a la presencia de confluencias, para después ser transportadas fuera de la cuenca de México.

Mediante la incorporación del modelo WEPS al modelo MCCM, fue posible determinar la forma de la pluma producida por la erosión de los suelos y observar cómo las partículas PM_{10} eran transportadas y distribuidas (horizontal y verticalmente) a lo largo del de la cuenca de México por efectos de la meteorología local. También se pudieron identificar las principales fuentes y las zonas mayormente impactadas por altas concentraciones de estos contaminantes.

Las políticas ambientales aplicadas para reducir las emisiones de partículas provenientes del vaso del antiguo del Lago de Texcoco fueron implementadas a partir de 1960 (Fernández-Buces, 2006; Moreno Sánchez, 2007; Lomelí *et al.*, 2009), las cuales consistían en la recuperación parcial del ex lago mediante la construcción del Lago Nabor Carrillo además de la plantación de vegetación nativa de la región, con la capacidad de adaptarse a las condiciones del suelo y climáticas. Estas actividades lograron reducir las emisiones de partículas, pero como se ha demostrado en los resultados aquí presentados, el material del suelo proveniente de esta región aún se transporta significativamente a la Ciudad de México, afectando potencialmente la salud de los habitantes. Además del ex Lago de Texcoco, fueron identificadas otras fuentes adicionales de partículas emitidas por efecto de la erosión eólica; las zonas agrícolas al sureste y al este de la cuenca de México que afectan la calidad del aire de la ciudad (Figura 6.1). Como se muestra en las Figuras

5.5, 5.7, 5.9 y 5.11, las áreas mayormente impactadas por altas concentraciones de partículas PM_{10} provenientes del suelo son las zonas sureste, este, noreste y norte de la Ciudad de México.

A partir de los resultados aquí mostrados, se observa que durante el período de secas caliente (Febrero-Abril) se presentaron los eventos más severos de contaminación. En el caso de Marzo '06, se presentó la concentración más elevada (Figura 5.4); mientras que para Abril '08, se presentó la mayor área de afectación al presentarse altas concentraciones de partículas en cinco estaciones de monitoreo (Figura 5.8). Debido a las emisiones provenientes del vaso del lago, durante el período de secas-fría (Noviembre-Enero), las áreas más afectadas son la norte y noreste (Figuras 5.7 y 5.11).

Se concluye que la problemática de la contaminación del aire en la región de la cuenca de México durante la temporada de secas, no solamente es causada por las emisiones de partículas por fuentes antropogénicas, sino que además, está ampliamente influenciada por emisiones de partículas provenientes de zonas propensas al fenómeno de la erosión eólica localizadas en los alrededores de la Ciudad de México, con lo cual, comprobamos la hipótesis planteada en el capítulo 2.

MCCM-WEPS es una herramienta útil, ya que podrá ser utilizado para la evaluación y propuesta de políticas de control considerando la conservación y la regeneración del suelo, así como el mejoramiento de las prácticas agrícolas. Esto con la finalidad de disminuir el impacto de las emisiones de partículas del suelo sobre la calidad del aire de la Ciudad de México.

Trabajo a futuro.

MCCM-WEPS se puede perfeccionar utilizando un modelo de mayor resolución espacial para tener resultados meteorológicos más cercanos a las mediciones. Se puede usar el modelo uMM5 para poder estudiar el transporte de partículas dentro de la zona urbana, para lo cual el modelo MM5 no cuenta con las parametrizaciones necesarias. De este modo

se podrían mejorar los cálculos de temperaturas, intensidades y direcciones del viento. Actualmente se implementa el modelo uMM5 para la Ciudad de México en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Por otro lado, es recomendable elaborar una cartografía de los suelos de usos agrícolas, para tener la información de características de éstos en toda la Cuenca Atmosférica de la Ciudad de México, para que de este modo, las capacidades del modelo MCCM-WEPS sean incrementadas.

Es necesario también, que el modelo MCCM tenga la capacidad de simular las emisiones de partículas provenientes de incendios, para tener un modelo que tenga la capacidad de simular dos fenómenos de gran importancia en la afectación de la calidad del aire de la Ciudad de México, como lo son la erosión eólica y la quema de biomasa.

Así mismo, 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, para poder simular los eventos de contaminación generados por la presencia de partículas tanto antropogénicas como naturales con mayor fidelidad.

APÉNDICE.

A. Boletines informativos sobre la calidad del aire en la Ciudad de México.

A continuación se presentan los boletines informativos emitidos por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, en los que se reportan altas concentraciones de partículas PM_{10} en diferentes zonas de la ciudad. A partir de ellos, se decidió aplicar el sistema MCCM-WEPS para realizar la simulación de los escenarios.

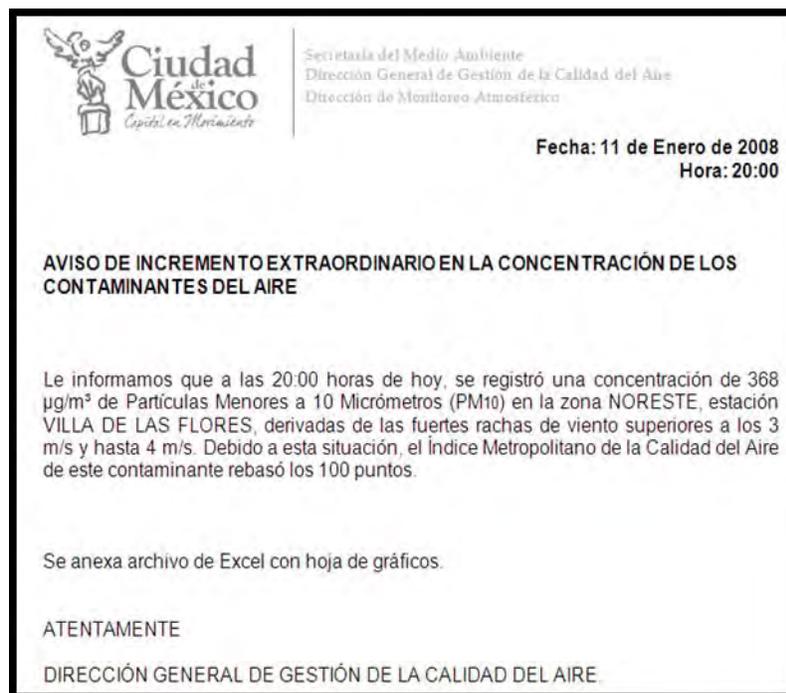


Figura A.1. Boletín informativo para el día 11 de Enero del 2008 (Episodio 2).



Secretaría del Medio Ambiente
Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire
Dirección de Monitoreo Atmosférico

Fecha: 05 de Abril de 2008
Hora: 17:00

AVISO DE INCREMENTO EXTRAORDINARIO

Le informamos que a las 17:00 horas de hoy, se registraron las siguientes concentraciones de partículas menores a 10 micrómetros (PM10), derivadas de las fuertes rachas de viento superiores a los 3 m/s y hasta 6 m/s.

ESTACIÓN	CONCENTRACIÓN	ZONA(S)
XALOSTOC	366 µg/m ³	NORESTE
CERRO DE LA ESTRELLA	311 µg/m ³	SURESTE

Debido a esta situación, el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de este contaminante rebasó los 100 puntos.

Se anexa archivo con hoja de gráficos.

ATENTAMENTE
DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Figura A.2. Boletín informativo para el 5 de Abril del 2008 (Episodio 3).



Secretaría del Medio Ambiente
Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire
Dirección de Monitoreo Atmosférico

Fecha: 29 de Noviembre de 2008
Hora: 18:00

AVISO DE INCREMENTO EXTRAORDINARIO

Le informamos que a las 18:00 horas de hoy, se registró en la estación SAN AGUSTIN de la zona NORESTE, un promedio horario de 418 µg/m³ de partículas menores a 10 micrómetros (PM10), derivadas de las fuertes rachas de viento superiores a los 3 m/s y hasta 8 m/s. Debido a esta situación, el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire de este contaminante rebasó los 100 puntos.

Se anexa archivo de Excel con hoja de gráficos.

ATENTAMENTE
DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.

Figura A.3. Boletín informativo para el 29 de Noviembre del 2008 (Episodio 4).

BIBLIOGRAFÍA.

- **Beasley**, R.P. 1972. *Erosion and Sediment Pollution Control*. Iowa University.
- **Becerra**, Antonio. 1999. *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- **Burk**, S. y W. Thompson: 1989, *A vertically nested regional numerical weather prediction model with second order closure physics*. *Mon. Wea. Rev.* **117**, 2305–2324.
- **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.
- **Chow**, J.C. *et al.* 2002. *Chemical Composition of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Mexico City during winter 1997*. *The Science of the Total Environment*. 287: 177-201.
- **CONABIO**. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. *La cuenca de México ayer y hoy*. 2003. [en línea]. *Arqueología Mexicana*. <<http://www.arqueomex.com/S2N3nPreclasico86.html>> [Consulta: Enero, 2010].
- **de Icaza**, Gabriel. 2003. *Formation and transformation mechanisms of particulate matter under ten micrometers (PM_{10}) and ozone (O_3) in the Mexico City Metropolitan Area and the Greater Manchester Area*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- **Díaz-Nigenda**, E. 2005. *Modelación de partículas PM_{10} emitidas por erosión eólica en el Valle de México*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ingeniería, UNAM. 84 pp.
- **Fast**, J.D., de Foy, B. Acevedo Rosas, F., Caetano, E., Carmichael, G., Emmons, L., McKenna, D., Mena, M., Skamarock, W., Tie, X., Coulter, R.L., Barnard, J.C., Wiedinmyer, C., Madronich, S. 2007. *A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns*. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7: 2233-2257.

- **Fernández-Buces**, M. Norma. 2006. *Variabilidad espacial de la salinidad y su efecto en la vegetación en el Ex lago de Texcoco: Implicaciones para su monitoreo por percepción remota*. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM. 210pp.
- **Foth**, Henry D. 1984. *Fundamentals of soil science*. 6a. Edición. Edit. John Wiley and sons.
- **Fryrear**, D.W., Stout, S.E., Hagen, L.J., Vories, E.D. 1991. *Wind erosion: Field measurement and analysis*. ASAE 34(1): 155-160.
- **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.
- **Grell**, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R. 1994. *A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Technical Report, NCAR. Tech Note TN-398+SRT.
- **Grell**, G.A., Emei, S., Stockwell, W.R., Schoenemeyer, T., Forkel, R., Michalakes, J., Knoche, R., Seild, W. 2000. *Application of a multiscale, coupled M5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign*. Atmospheric Environment. 34: 1435-1453.
- **Hagen**, L.J. 1995. *WEPS technical documentation: erosion submodel*. SWCS WEPP/WEPS Symposium. Ankeny, IA.
- **Hagen**, L.J. 2001. *Validation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) Erosion Submodel on Small Cropland Fields*. Proceedings of the International Symposium. Soil Erosion Research for the 21st Century. January 3-5. Honolulu, Hawaii.
- **Hagen**, L.J. 2004. *Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields*. Environmental Modelling & Software. 19: 171-176.
- **Hamba**, F. 1993. *A modified K model for chemically reactive species in the planetary boundary layer*. J. Geophys. Res. **98D**, 5173–5182.
- **INEGI**: 2000, *Censo Estadístico de Población y Vivienda 2000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- **Kalnay**, E. 1996. *The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project*. Bulletin of the American Meteorological Society. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

- **Jáuregui**, E. 1971. *La erosión eólica en los suelos vecinos al lago de Texcoco*. Ingeniería Hidráulica en México. XXV-2: 103-117.
- **Jáuregui**, E. 1983. *Variaciones de largo periodo de la visibilidad en la Ciudad de Mexico*. Geofísica Internacional. 22-3: 251-275.
- **Jáuregui**, E. 1989. *The dust storms of Mexico City*. International Journal of Climatology. 9: 169-180.
- **Jazcilevich** D. A., A. García, L. Gerardo Ruíz-Suárez. 2002. *A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico*. Atmospheric Environment. 36: 2297-2307.
- **Jazcilevich** D. A., A. Garcia, L. Gerardo Ruíz-Suárez. 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, E. Caetano. 2005. *Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the Valley of Mexico*. Atmospheric Environment. 39: 5481-5489.
- **Lomelí**, M. Guadalupe and Tamayo R. *Plan Lago de Texcoco*. [en línea] <<http://www.sagan-gea.org/hojared/CAgua.html>>. [Consulta: Agosto, 2009].
- **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.
- **Merlo**, Agustín. *Proyecto Lago de Texcoco, de nuevo santuario de aves*. [en línea]. Planeta Azul, periodismo ambiental. 20 de Febrero, 2009. <<http://www.planetaazul.com.mx/www/2009/02/20/proyecto-lago-de-texcoco-de-nuevo-santuario-de-aves/>> [Consulta: Enero, 2010].
- **Mesinger**, F., et al. (2006), *North American Regional Reanalysis*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 87, 343–360.
- **Millar**, C.E. et al. 1975. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. C.E.C.S.A.
- **Moreno Sánchez**, E. 2007. *Características territoriales, ambientales y sociopolíticas del Municipio de Texcoco, Estado de México*. Quivera. 9(001): 177-206.

- **Mugica**, V., Ortiz, E., Molina, L., De Vizcaya-Ruiz, A., Nebot, A., Quintana, R., Aguilar, J., Alcántara E. 2009, *PM composition and source reconciliation in Mexico City*. Atmospheric Environment. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.051
- **Nirmalakhandam**, N. 2002. *Modeling Tools for Environmental Engineers and Scientist*. CRC Press.
- **NOM-025-SSA1-1993**. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado. Valor de concentración máxima de material particulado para partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM_{2.5} en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
- **OMS**. Organización Mundial de la Salud.
<<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html>>. [Consulta: Enero, 2010].
- **Pinzon**, J., Brown, M.E. and Tucker, C.J. 2005. *Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition*. In: N. Huang (Editor), Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications, pp. 167-186.
- **Querol**, X., Pey, J., Minguillón, M.C., Pérez, N., Alastuey, A., Viana, M., Moreno, T., Bernabé, R.M., Blanco, S., Cárdenas, B., Vega, E., Sosa, G., Escalona, S., Ruiz, H., Artíñano, H.B. 2008. *PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 campaign*. Atmospheric Chemistry and Physics. 8: 111-128.
- **SENSIT COMPANY**. 2006. *SENSIT data processing and calibration document*. Portland, ND USA. 30 pp. Available at: www.sensit.com
- **SMA**. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Secretaria del Medio Ambiente. <<http://www.sma.df.gob.mx/simat2/>> Consultation date: December 2008.
- **Tucker**, C.J., J.E. Pinzon, M.E. Brown. 2004. *Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11-VIg, 2.0, Global Land Cover Facility*, University of Maryland, College Park, Maryland, 04/15/1994.
- **Tucker**, C.J., J. E. Pinzon, M. E. Brown, D. Slayback, E. W. Pak, R. Mahoney, E. Vermote and N. El Saleous. 2005. *An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 26:20, pp. 4485-5598.

- **USDA-ARS-WERU**. 2001. *WEPS Technical documentation*. USDA-ARS-Engineering and Wind Erosion Research Unit. Manhattan, KS USA. 175pp.
- **USDA-ARS-WERU**. 2003. *The Wind Erosion and Prediction System, user manual*. USDA-ARS-Engineering and Wind Erosion Research Unit. Manhattan, KS USA.
- **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.
- **Van Donk**, Simon J., Skidmore, E.L. 2003. *Measurement and simulation of wind erosion, roughness degradation and residue decomposition on an agricultural field*. Earth Surface Processes and Landforms. 28: 1243-1258.
- **Vega**, E., Reyes, E., Sánchez, G., Ortíz, E., Ruíz, M., Chow, J., Watson, J., Edgerton, S. 2002. *Basic statistics of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere of Mexico City*. The Science of the Total Environment, 287: 167-176.
- **Vázquez-Morales**, W. 2007. Tesis de Maestría. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 56 pp.
- **Willmott**, Cort J. 1981. *On the validation of models*. Physical Geography. 2: 184-194.
- **Yamada**, T. y Mellor G. 1975. *A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data*. J. Atmos. Sci. 32, 2309-2329.