



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

IMPACTO DEL SECTOR ENERGÉTICO DE TULA HIDALGO EN LA
CALIDAD DEL AIRE DE LA ZMVM

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

JENNIFER SANDRA GARCÍA ESCALANTE

MEXICO, D.F

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profesor:	RODOLFO TORRES BARRERA
VOCAL:	Profesor:	VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO
SECRETARIO:	Profesor:	JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO
1 ^{er} SUPLENTE:	Profesor:	EUBERTO HUGO FLORES PUEBLA
2 ^{do} SUPLENTE:	Profesor:	ABRAHAM RODRIGO FLORES RAMOS

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

AREA DE FISICOQUIMICA ATMOSFÉRICA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM
CIRCUITO ESCOLAR S/N, CIUDAD UNIVERSITARIA
COYOACÁN, DISTRITO FEDERAL, 04510
TEL: 5622 4073

ASESOR:

Dr. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SUSTENTANTE:

JENNIFER SANDRA GARCÍA ESCALANTE

AGRADECIMIENTOS

Al *Dr. José Agustín García Reynoso*, por su valiosa contribución a la realización de este trabajo, por su apoyo y paciencia.

Al *Ing. Rodolfo Torres Barrera* y al *Dr. Víctor Manuel Luna Pabello* por las observaciones realizadas que ayudaron a enriquecer este trabajo.

A la UNAM, por ser mi casa durante los últimos años y darme el privilegio de pertenecer a la máxima casa de estudios.

A la Facultad de Química por darme los cimientos para construir mi futuro.

Y al Centro de Ciencias de la Atmósfera por que aquí encontré el final de mi carrera y el principio de mí vocación.

DEDICADO A:

A DIOS porque siempre estas a mi lado.

A María de los Ángeles Escalante por ser siempre un ejemplo de fuerza, porque te debo lo que soy, porque me enseñaste que se puede llegar a donde se quiera sola, por tus regaños y abrazos, por dejarme decidir y siempre estar ahí con una sonrisa, por tu apoyo, por ser tú, por ser el amor más grande de mi vida, por ser mi MADRE.

A mi hermana Mónica por darme ese buen ejemplo a seguir como hermana mayor, por que siempre hiciste lo que estaba en tus manos para ayudarme, por tus consejos, tu apoyo y porque hiciste que la vida fuera más fácil. ¡Te quiero mucho!

A mi hermano Jorge Omar, por que me cuidas y siempre estas cuando te necesito, porque me defiendes y quieres siempre lo mejor para mí, porque me haces reír, por tu espontaneidad. ¡Te quiero mucho!

A mis amigos, que han hecho que mi vida sea de otro color en cada etapa, y que espero sigan en ella el tiempo que dure, los quiero mucho y siempre los llevare en mi corazón.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
CÁPITULO 2: MARCO TEORICO	3
2.1 CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES	4
2.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN	4
2.3 CARACTERISTICAS DE CONTAMINANTES	5
2.3.1 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂).....	5
2.3.2 OZONO (O ₃)	7
2.3.3 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	8
2.3.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)	9
2.3.5 HIDROCARBUROS	9
2.3.6 PARTÍCULAS	10
2.4 NORMATIVIDAD	13
2.5 EXTERNALIDADES	15
2.6 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
2.7 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO EN TULA	21
CÁPITULO 3: METODOLOGÍA	25
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	26
3.2 PREPROCESADORES	28
3.2.1 TERRAIN	28
3.2.2 REGRID	28
3.2.3 PREGRID	29
3.2.4 REGRIDDER	29
3.2.5 RAWINS/LITTLE_R	29
3.2.6 INTERPF	29
3.2.7 INTCHEM	30
3.2.8 MCCM.....	30
3.2.9 RADM2	31
3.2.10 NESTDOWN	31
3.3 EVALUACIÓN DEL MODELO	32
3.4 ESTRATEGIA DE ANIDAMIENTO	35
3.5 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS	37
3.6 FECHAS DE ANÁLISIS	39
3.7 METEOROLOGÍA	40
CAPITULO 4: RESULTADOS	42
4.1 COMPARACIONES ENTRE MEDICIONES DE LA RAMA Y RESULTADOS DEL MODELO.	42
4.1.1 Temperatura	42
4.1.2 Velocidad de viento	43
4.1.3 Concentraciones de ozono.....	43

4.1.4 Concentraciones de monóxido de carbono (CO)	43
4.1.5 Concentraciones de NO ₂	43
4.1.6 Concentraciones de NO _x	44
4.1.7 Concentraciones de SO ₂	44
4.1.8 Concentraciones de PM ₁₀	45
4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	47
4.2.1 MAPAS DE ESCENARIOS DE REDUCCIÓN.	48
4.3 EVENTOS EXTRAORDINARIOS	52
<i>CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</i>	<i>56</i>
<i>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>	<i>58</i>
<i>REFERENCIAS</i>	<i>60</i>
<i>REFERENCIAS ELECTRONICAS</i>	<i>63</i>
<i>GLOSARIO.....</i>	<i>64</i>

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Características de los combustibles.....	07
Tabla 2.2 Normas oficiales que evalúan la calidad del ambiente con respecto a los contaminantes en el aire como medida de protección a la salud de la población.....	13
Tabla 2.3 Inventario de emisiones anuales de la ZMVM 2004.....	20
Tabla 2.4 Emisiones por sector en Ton/año.....	24
Tabla 3.1 Características de los dominios de modelación.....	36
Tabla 3.2 Climatología del año 2005.....	40
Tabla 4.1 Índice de concordancia(Ic) en las variables meteorológicas y emisiones por estación de la RAMA vs. MCCM.....	47
Tabla 4.2 Métricas de exposición, extensión y severidad para NO ₂ , O ₃ , y SO ₂ , para el caso base y reducción del 40%	51
Tabla 4.3 Eventos extraordinarios de concentración de SO ₂ en la ciudad de México.	52
Tabla 4.4 métricas de exposición, extensión y severidad para SO ₂ , para el caso, base y control con una reducción del 20%.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Valor máximo de las concentraciones promedio anual de SO ₂	16
Figura 2.2 valor máximo de las concentraciones promedio anual de NO _x	16
Figura 2.3 Topografía y límites políticos de la ZMVM.....	19
Figura 2.4 Zona Metropolitana del Valle de México.....	20
Figura 2.5 Localización geográfica de el estado de Hidalgo.....	21
Figura 2.6 Emisiones por sector en el estado de Hidalgo (ton/año), 2002.....	22
Figura 2.7 Localización del sector energético de Tula Hidalgo.....	23
Figura 3.1 Localización de las estaciones de la RAMA.....	25
Figura 3.2 Dominios utilizados en la modelación regional.....	35
Figura 3.3 Patrones de viento promedio que pueden inducir el transporte de emisiones de Tula hacia la ciudad de México y Toluca.....	41
Figura 4.1 Diferencia de concentraciones en por ciento de SO ₂ en la región, (Escenario-Base)/BaseX100.....	49
Figura 4.2 Reducción en la concentración de ozono en por ciento.....	50
Figura 4.3 Concentraciones de SO ₂ y trayectorias a futuro. Cada línea es la trayectoria a una hora y su longitud abarca 6 horas.....	53
Figura 4.4 Diferencias en por ciento de las concentraciones de SO ₂	54

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Los objetivos de este trabajo son:

- Poder modelar la calidad del aire mediante la implementación del modelo MCCM (Multiscale Climate Chemistry Model, Grell *et al.* (2000)) en la región.
- Evaluar cuantitativa y cualitativamente las emisiones en un escenario base y uno de control.
- Comparación de escenarios con el uso de tres métricas que son: exposición, extensión y severidad.

Con lo anterior se pretende identificar la influencia de las emisiones del sector energético de Tula en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) mediante el empleo de un modelo de calidad del aire tridimensional y aplicando escenarios de control.

Se realiza una evaluación del impacto de las emisiones del sector energético en la región de Tula y la ZMVM.

Se realizó una primera evaluación considerando una reducción del 40% en las emisiones totales del sector energético en Tula, con la finalidad de observar su impacto durante un periodo específico de emisiones en esa región, se tomo en cuenta este 40% ya que no se contaba con una cifra real y fue solo una aproximación, en una segunda etapa y ya con datos de rendimiento de los procesos de remoción de azufre se estudiaron eventos extraordinarios de concentraciones de SO₂ medidos

por la Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA) donde se aplicó una reducción del 20% de las emisiones con la finalidad de identificar si la emisión de la región de Tula tenía influencia sobre la ZMVM.

De los resultados obtenidos se observa que las emisiones de Tula si llegan a influenciar a la ZMVM, y que reducciones de óxidos de nitrógeno (NOx) en Tula pueden inducir un incremento en concentración de contaminantes atmosféricos como el ozono (O₃), los eventos de concentración extraordinaria de dióxido de azufre (SO₂) en la ZMVM pueden ser explicados por las emisiones provenientes de la región de Tula.

En el capítulo 1 se mencionan objetivos principales y características de este trabajo, y en el capítulo 2, generalidades de la contaminación atmosférica como es su clasificación y características, fuentes de contaminación y los principales contaminantes atmosféricos, así mismo se mencionan las externalidades debidas a contaminantes criterio.

En el capítulo 2 también se menciona la descripción del área de estudio así como la descripción del sector energético en Tula.

La metodología, descripción del modelo, los preprocesadores utilizados por el modelo, las métricas estadísticas para evaluar el desempeño del modelo y la estrategia de anidamiento utilizada se describen en el capítulo 3. Así también como una descripción de la meteorología.

Los resultados de la comparación del modelo con mediciones de la RAMA así como las métricas estadísticas del SO₂ y O₃ y el estudio realizado de los eventos extraordinarios de concentración de SO₂ se muestran en el capítulo 4.

Las conclusiones y recomendaciones se presentan en el capítulo 5 y 6.

CÁPI TULO 2: MARCO TEORICO

La ZMVM cuenta con una población total de 18 millones 335 mil habitantes, 18% de la población total del país, (INEGI 2008) siendo así la más poblada del país y una de las más contaminadas del país y del mundo (SMA), por tal motivo se requiere de evaluar las fuentes externas a la ciudad que influyen en la calidad del aire. De acuerdo con la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, el sector energético ubicado en la región de Tula, emite 33 veces más SO₂ que todo el Valle de México y está ubicado como el más contaminante de todo el país (SEMARNAT-CEPAL). Este sector esta conformado por la termoeléctrica de la CFE "Francisco Pérez Ríos", la refinería "Miguel Hidalgo" que es la principal contaminante de las seis que tiene PEMEX y el complejo Petroquímico "Tula" que actualmente cuenta con una planta de acrilonitrilo la cual esta diseñada para producir 50 mil toneladas métricas de acrilonitrilo y 6 mil toneladas métricas de ácido cianhídrico por año. Por lo tanto la calidad del aire en esta región en base a la concentración de contaminantes atmosféricos presentes, y a la mayor generación y mayor residencia, representa un mayor impacto en la calidad del aire de la ZMVM.

A continuación se describen algunos términos y definiciones que se utilizarán dentro de este trabajo.

2.1 CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES

Por su fuente:

Biogénicos: Se deben a procesos en los cuales no interviene el hombre, por ejemplo: erupciones, incendios, producción de gases en pantanos, transporte de polen por el viento, etc.

Antropogénicos: Se deben a los procesos propios de la actividad humana.

Por su origen:

Primarios: son emitidos a la atmósfera desde su fuente.

Secundarios: son formados en el seno de la atmósfera misma a través de procesos químicos o fotoquímicos que sufren los contaminantes primarios.

Por su tamaño:

Partículas: compuestos o agregados que poseen un tamaño grande tales como las PM₁₀ y PM_{2.5}, etc.

Gases: partículas a escalas atómicas y moleculares

Por su composición química:

Orgánicos: Compuestos que contienen cadenas de carbonos e hidrógenos, tales como los Compuestos orgánicos volátiles.

Inorgánicos: tales como los metales, Azufre, Nitrógeno, Halogenuros, etc. (García Reynoso, J.A. et al. 2005)

2.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Fuentes puntuales: Generan grandes cantidades de contaminantes en áreas pequeñas. Por ejemplo industrias farmacéuticas, químicas, plantas generadoras de energía, cementeras, vidrieras, fundidoras, etc.

Fuentes lineales: Son ocasionadas por las emisiones de los vehículos en las vialidades.

Fuentes de área: Estas son emisiones que no se pueden localizar en un punto en específico y que abarca una amplia distribución. No pertenece a ninguna de las clasificaciones anteriores.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE CONTAMINANTES

Los principales contaminantes emitidos por el sector energético son los contaminantes criterio (CO, NOx y SO₂, el O₃ troposférico, los compuestos orgánicos volátiles (COV), el plomo y las partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}). Estos contaminantes son importantes porque contribuyen a problemas ambientales como el smog, la lluvia ácida, la carga de nutrientes (Eutrofización), así como también afectan a la salud humana.

2.3.1 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro que en altas concentraciones puede ser detectado por su sabor y por su olor cáustico e irritante, se disuelve con facilidad en el agua para formar ácido sulfuroso (H₂SO₃), el cual se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico (H₂SO₄) con el oxígeno del aire. Estas partículas de ácidos se dispersan en el ambiente en forma de lluvia, llovizna, niebla, nieve y rocío dando origen a un proceso de acidificación de la tierra y cuerpos de agua. Este fenómeno es conocido como lluvia ácida.

Se origina por la quema de combustibles que contienen azufre (diesel y combustóleo principalmente) y durante la fundición de minerales ricos en sulfatos.

En altas concentraciones el dióxido de azufre puede ocasionar dificultad para respirar, humedad excesiva en las mucosas de las conjuntivas,

irritación severa en vías respiratorias e incluso en el interior de los pulmones por formación de partículas de ácido sulfúrico, ocasionando vulnerabilidad en las defensas, puede ser el causante de enfermedades respiratorias como broncoconstricción, bronquitis y traqueatitis, y la muerte, si bien, los efectos dependen en gran medida de la sensibilidad del individuo, siendo más sensibles los niños y ancianos, asmáticos y aquellos con enfermedades pulmonares.

Se genera en la región de Tula por el sector de generación de energía eléctrica principalmente con una cantidad de 150,000 ton/año, seguido por la industria química con 116.22 ton/año, industria del petróleo y petroquímica con una generación de 173,248.14 ton/año y otras, dando un total de 362,754.82 ton/año de SO₂ (Inventario de emisiones Hidalgo 2002).

La permanencia media de SO₂ en la atmósfera es de algunos días, y depende de la rapidez con la cual se convierta en ácido sulfúrico (H₂SO₄) por absorción de humedad y en partículas de sulfatos por acción de la radiación solar.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de 100 a 150 µg/m³ promedio de 24 horas, y de 40 a 60 µg/m³ en una media aritmética anual. La norma oficial mexicana NOM-022-SSA1-1993 establece como límite de protección a la salud, una concentración de SO₂ de 0.13 ppm (ó 341 µg/m³) promedio de 24 horas, una vez al año, y 0.03 ppm (ó 79 µg/m³) en una media aritmética anual para protección de la población susceptible.

Los procesos industriales y de combustión son los principales generadores de dióxido de azufre las cantidades dependen del contenido de azufre del combustible. A continuación en la Tabla 2.1 se presentan

las características de los combustibles más comunes.

Tabla 2.1 Características de combustibles.

Combustibles	Consumo por MWh Generado Ton/h	Poder Calorífico Kcal/Kg	Características del Combustible	Emisiones KWh SO ₂	Emisiones KWh NO ₂	Emisiones KWh PST
Carbón	0.492	4,367 Kcal/Kg	Gravedad específica: 0.9 Azufre: 0.9% Ceniza: 38.1%	8.41	4.43	150
Combustoleo	0.220	10,000 kcal/Kg	Gravedad específica: 0.981 Azufre: 2.71% Ceniza: 0.06%	11.70	2.86	0.23
Diesel	0.203	10,800 Kcal/Kg	Gravedad específica: 0.837 Azufre: 1.0 Ceniza: 0.02%	3.40	2.25	0.0
Gas Natural	170m ³ /h	4.367 Kcal/m ³	Gravedad específica: 0.571 Nitrogeno: 1.4%	0.002	1.06	0.0

FUENTE: Elaboración propia

2.3.2 OZONO (O₃)

El ozono es un contaminante secundario que se forma a partir de reacciones con contaminantes primarios y precursores (por ejemplo, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) en presencia de oxígeno atmosférico y luz solar.

Los daños por exposición a ozono dependen de la sensibilidad de cada individuo y del tipo de exposición. La NOM-020-SSA1-1993 establece como límite horario permisible una concentración de 0.11ppm en un periodo de tres años.

Los resultados de estudios recientes sobre efectos en la salud producto de la exposición a ozono muestran que ocasiona inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función pulmonar así como en la estructura y el

metabolismo pulmonar, además de efectos sistémicos en órganos blancos como el hígado y que a niveles diversos de este contaminante se presentan en forma aguda, en el sistema respiratorio superior, además de exacerbación de infecciones respiratorias agudas, a nivel de tracto respiratorio inferior se presenta tos, dificultad para respirar, así como un decremento en la función pulmonar, en este estudio es de menor importancia por tratarse de un contaminante secundario, y que tiene medidas de control.

2.3.3 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro y tóxico, que se genera principalmente por la combustión incompleta del carbono de los combustibles. En las ciudades más del 90% de CO proviene de los vehículos automotores, y el remanente constituye el 10% que se genera a través de los sistemas de combustión externa de las industrias y fuentes esporádicas como quemas de basura e incendios forestales.

La intoxicación por monóxido de carbono comprende dolor de cabeza, mareos, náuseas, desorientación y en altas concentraciones provoca convulsiones, paro cardíaco y respiratorio.

La permanencia media de las moléculas de CO en la atmósfera, es de un mes aproximadamente, antes de oxidarse y convertirse en CO₂.

La OMS (Organización Mundial de Salud) recomienda como límite para preservar la salud pública una concentración de 9ppm (ó 10,000 µg/m³) promedio de 8 horas 1 vez al año. La Norma Oficial Mexicana de CO

(NOM-021-SSA-1993) establece como límite de protección a la salud, una concentración de 11ppm (ó 12,595 µg/m³) promedio de 8 horas, la

cual puede rebasarse 1 vez al año, como medida de protección a la salud de la población susceptible

2.3.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son un grupo de compuestos como el óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El término NO_x se refiere a la combinación de estas dos sustancias. Las fuentes más comunes de óxidos de nitrógeno en la naturaleza son la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos, y la actividad volcánica. Las fuentes principales de emisión antropogénica son los escapes de vehículos y la quema de combustibles fósiles. En el proceso de combustión, el nitrógeno presente en el combustible y el aire se oxidan para formar óxido nítrico y algo de dióxido de nitrógeno. Los óxidos nítricos emitidos en el aire se convierten en dióxido de nitrógeno mediante reacciones fotoquímicas condicionadas por la luz solar.

El óxido nítrico es relativamente inofensivo, pero el dióxido de nitrógeno puede causar efectos en la salud y bienestar. El dióxido de nitrógeno daña el sistema respiratorio porque es capaz de penetrar las regiones más profundas de los pulmones. Asimismo, contribuye a la formación de lluvia ácida, que provoca graves daños a las plantas y materiales hechos por el hombre.

2.3.5 HIDROCARBUROS

Las principales fuentes de emisión de hidrocarburos son las industrias del petróleo y del gas natural, así como los vehículos automotores, tanto por efectos de evaporación como por una deficiente oxidación de los combustibles.

Los efectos de los hidrocarburos se pueden diferenciar, de manera general, por grupos; los de tipo parafínico son asfixiantes por desplazamiento del oxígeno, los alquenos o oleofínicos se caracterizan por ser muy reactivos en la atmósfera al igual que los alquinos, aunque, estos últimos rara vez se encuentran en el aire, los cíclicos, en especial los aromáticos, presentan diferentes propiedades tóxicas y anestésicas.

La existencia de estos contaminantes se debe a la emisión de hidrocarburos no quemados y a la formación de otras especies durante la combustión, así como la evaporación de compuestos orgánicos volátiles (COV's) emitidos en diversas actividades industriales, especialmente en la fabricación, almacenamiento y aplicación de solvente y pinturas.

La principal razón para su control radica en que muchos de ellos son precursores de oxidantes fotoquímicos.

2.3.6 PARTÍCULAS

Se clasifican en: Partículas totales, partículas primarias y secundarias, partículas suspendidas totales (PST), partículas con diámetro aerodinámico menor que 10 micras (PM_{10}), partículas con diámetro aerodinámico menor que 2.5 micras ($PM_{2.5}$); así como partículas filtrables y condensables.

Las partículas primarias incluyen a los materiales sólidos, líquidos o gaseosos emitidos directamente por las fuentes de emisión y que pueden mantenerse en la atmósfera como partículas en condiciones ambientales de temperatura y presión. Las partículas secundarias son

aerosoles formados a partir de material gaseoso a través de reacciones químicas atmosféricas.

Las PST están integradas por toda la materia emitida como formas sólidas, líquidas y vapor, pero que están suspendidas en el aire como sólidos o líquidos particulados, pueden incluir partículas con un diámetro aerodinámico de hasta 100 μ m.

El tamaño de las partículas PM₁₀ o PM_{2.5} les permite entrar fácilmente en los espacios alveolares de los pulmones humanos, donde pueden depositarse y causar efectos adversos sobre la salud.

La emisión de partículas puede ser natural o antropogénica. Entre las fuentes naturales se encuentran: erosión del suelo, material biológico

fraccionado, erupciones volcánicas, incendios forestales, etc. Entre las fuentes antropogénicas se encuentran: combustión de productos derivados del petróleo, quemas en campos agrícolas y diversos procesos industriales.

Las partículas pueden tener una composición fisicoquímica homogénea o estar constituidas por diversos compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los componentes orgánicos se encuentran: fenoles, ácidos, alcoholes y material biológico (polen, protozoarios, bacterias, virus, hongos, esporas y algas). Entre los compuestos inorgánicos se encuentran nitratos, sulfatos, polímeros, silicatos, metales pesados (hierro, plomo, manganeso, zinc o vanadio) y elementos derivados de pesticidas y plaguicidas.

Las partículas mayores a $10\mu\text{m}$ son retenidas básicamente en las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, por lo que no son consideradas significativamente dañinas para la salud, sin embargo la exposición continua a altas concentraciones puede causar irritación de garganta y mucosas.

Por otra parte, las PM_{10} (fracción respirable) no son retenidas en las vías respiratorias superiores, cerca de un tercio penetra hasta los pulmones. Su efecto depende de su composición química, pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares. Se relacionan con la enfermedad de los pulmones negros en mineros, silicosis y asbestosis. En el corto plazo la contaminación por PM_{10} puede causar el deterioro de la función respiratoria. En el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura.

Una atmósfera contaminada con partículas suspendidas y con bióxido de azufre es particularmente perjudicial ya que paraliza los cilios epiteliales del tracto respiratorio, las partículas penetran hasta los pulmones donde se sedimentan. Los sólidos son entonces adsorbidos y concentran dióxido de azufre, aumentando el tiempo de contacto directo de este con los delicados tejidos pulmonares. Se ha observado un aumento en la mortalidad en la población en general cuando las concentraciones tanto de partículas en suspensión como de óxidos de azufre exceden $500\mu\text{m}/\text{m}^3$ (equivalente a 0.19 ppm de SO_2) durante 24 horas. El aumento es principalmente, en grupos vulnerables de la población, especialmente en los individuos con problemas cardiacos o pulmonares.

La norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-1993 establece que la concentración de partículas menores de 10 micras, como contaminantes atmosféricos, no deben rebasar el límite permisible de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$, en 24

horas una vez al año y $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.

2.4 NORMATIVIDAD

Considerando que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todo el país y para asegurar el bienestar de la población y el equilibrio ecológico, las emisiones a la atmósfera se deben reducir y controlar mediante normas, algunas de ellas se presentan en la Tabla 2.2 donde se observan las principales normas que evalúan la calidad del aire.

Tabla 2.2 Normas Oficiales que evalúan la calidad del ambiente con respecto a los contaminantes en el aire como medida de protección a la salud de la población

Contaminante	Límite de exposición aguda Concentración y tiempo promedio	Límite de exposición crónica (valor medio)		Norma
		Frecuencia máxima aceptable	Para protección de la salud de la población susceptible	
O₃	0.11 ppm (1 hrs.)	1 vez cada 3 años	na	NOM-020-SSA-1993
SO₂	0.13 ppm (24 hrs.)	1 vez al año	0.030 ppm (maa)	NOM-022-SSA-1993
NO₂	0.21 ppm (1 hrs.)	1 vez al año	na	NOM-023-SSA-1993
CO	11 ppm (8 hrs.)	1 vez al año	na	NOM-021-SSA-1993
PST	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 hrs.)	1 vez al año	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (maa)	NOM-024-SSA-1993
PM₁₀	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 hrs.)	1 vez al año	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (maa)	NOM-025-SSA-1993

na: No aplica

maa: Media aritmética anual

FUENTE: NORMA OFICIAL MEXICANA DE EMERGENCIA NOM-EM-148-SEMARNAT-2006, CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.- REFINERÍAS DE PETRÓLEO.- RECUPERACIÓN DE AZUFRE.

La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993 establece que la concentración de dióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 0.13 ppm, en 24 horas una vez al año y 0.03 ppm en una media aritmética anual.

La información de la calidad del aire en estudios realizados sobre la contaminación generada en el municipio de Tula de Allende, Hidalgo,

han detectado que en estas zonas se rebasa el límite establecido por la NOM-022-SSA1-1993 para el promedio diario más de 30 días al año lo cual constituye una emergencia ambiental toda vez que cada día fuera de norma aumenta la probabilidad de que la población susceptible presente impactos negativos en su salud por los riesgos atribuibles a la exposición a este contaminante.

En dichas zonas las actividades de refinación del petróleo contribuyen con un alto porcentaje de las emisiones de compuestos de azufre, que en su mayor parte pueden evitarse si se recupera este elemento en plantas recuperadoras, lo cual contribuirá a mejorar sustancialmente la calidad del aire de la región;

Las NOM-085-SEMARNAT-1994 como la NOM-137-SEMARNAT-2003 excluyen de su campo de aplicación las plantas recuperadoras de azufre de las refinerías, lo cual hace necesario establecer en otras normas especificaciones para estas unidades con el fin de controlar y reducir emisiones.

La Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-148-SEMARNAT-2006, establece las especificaciones y requisitos para el proceso de recuperación de azufre de las corrientes de gas amargo de las refinerías de petróleo, con el fin de reducir las emisiones de SO₂ para mitigar sus impactos sobre la calidad del aire, la salud de las personas y los ecosistemas. Así mismo, establece el método de prueba que debe seguirse para verificar su cumplimiento con base en un balance de azufre.

La presente norma oficial mexicana de emergencia es de observancia obligatoria para los responsables de las refinerías de petróleo ubicadas en Salamanca (Guanajuato) y en Tula de Allende (Hidalgo).

La NOM-085-SEMARNAT-1994 para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

La NOM-137-SEMARNAT-2003, Contaminación atmosférica.- Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos.- Control de emisiones de compuestos de azufre.

2.5 EXTERNALIDADES

Basándose en el Informe de la Evaluación de Externalidades Ambientales de la Generación Eléctrica en México (SEMARNAT-CEPAL Noviembre, 2004), se observan las industrias que emiten la mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera y se incluyó al sector energético de Tula Hidalgo, como este sector energético es el más cercano a la ciudad de México (87Km) es de vital importancia para la calidad del aire de la ZMVM, en base a este estudio se muestran a continuación la externalidades del sector industrial sobre la economía del país, donde se caracterizan primero las fuentes de emisión, la dispersión de contaminantes, la evaluación de impactos y por último la evaluación monetaria. Con esto se obtienen los costos del impacto de las emisiones del sector energético sobre la calidad de vida de la población.

A continuación en las Figuras 2.1 y 2.2 se presentan gráficas que muestran donde se localiza la máxima emisión promedio anual de diferentes sectores energéticos del país. Se observa que la máxima emisión de SO₂ es en Tula y queda en segundo lugar en emisiones de NOx. He aquí lo importante de estudios relacionados a este sector.

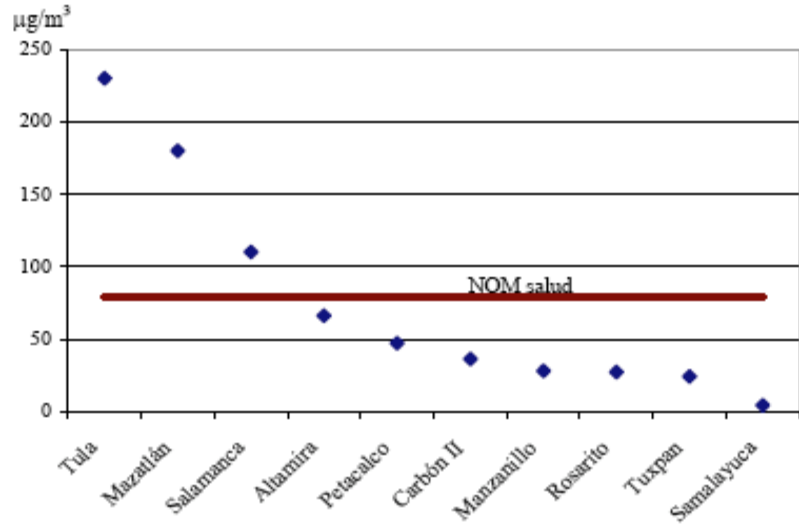


Figura 2.1 Valor máximo de las concentraciones promedio anual de SO₂

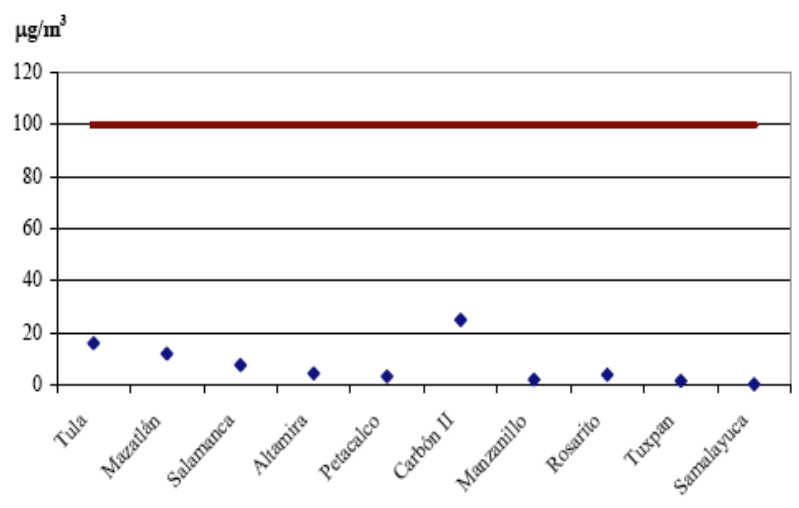


Figura 2.2 Valor máximo de las concentraciones promedio anual de NOx

En la evaluación económica de las externalidades los costos más elevados son para las plantas de Tuxpan, Manzanillo, Tula y Petacalco, que son hasta ahora las centrales de mayor emisión del país, los costos dependen en gran medida de la densidad de población en el área de impacto siendo Tula la más importante por su cercanía a la ciudad de México. Con esto se obtuvo el costo del efecto de las emisiones en la salud, sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, bosques, o en el calentamiento global.

En la actualidad el uso de combustibles fósiles para generación de energía en México conlleva a impactos locales, regionales y globales. Tanto para la salud como para el medio ambiente.

El costo de estos impactos es denominado costo externo, el cual no ha sido incorporado al precio de la electricidad en ningún país por el efecto económico que generaría (Evaluación de las Externalidades Ambientales de la Generación Termoeléctrica en México SEMARNAT-CEPAL 2004).

El costo por tonelada de contaminante emitida en Tula según este estudio es, para PM_{10} de 1,157, para SO_2 de 359, y de NO_x es de 199 dólares/tonelada.

Sobresale la central de Tula, con externalidades superiores a 50 millones de dólares anuales por lo cual es importante conocer el impacto en las concentraciones de contaminantes de este sector en una ciudad tan grande como lo es la ZMVM.

2.6 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ZMVM se localiza en la región central de la república mexicana, forma parte de una cuenca semicerrada de 9,560 km^2 , y una elevación promedio de 2,240msnm, (Figura 2.3) se encuentra rodeada con cadenas montañosas que alcanzan hasta 5km de altura sobre el nivel del mar, al norte se encuentra la sierra de Guadalupe, al sur la sierra del

Ajusco-Chichinautzin, al este la sierra Nevada que incluye los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl y al oeste la Sierra de las Cruces, su compleja orografía da a la región características climatológicas particulares, como es el estancamiento de masas de aire y por tanto de contaminantes sobre todo provenientes del norte, aunado a inversiones térmicas frecuentes principalmente en invierno.

Las inversiones térmicas frecuentes que ocurren en el valle, en más del 70% de los días del año, son un fenómeno que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera, ello inhibe la capacidad de auto depuración de ésta y favorece la acumulación de los contaminantes.

Debido a la altitud el contenido del oxígeno en la ZMVM es 23% menor que al nivel del mar lo que implica que los procesos de combustión sean menos eficientes y emitan una mayor cantidad de contaminantes. Por otro lado tenemos que la cadena montañosa impide una buena dispersión de contaminantes propiciando su estancamiento y acumulación (PROAIRE, 2007).

Aunado a esto su latitud 19° N y 99° de longitud oeste ocasiona una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el ozono (O₃) (Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2006).

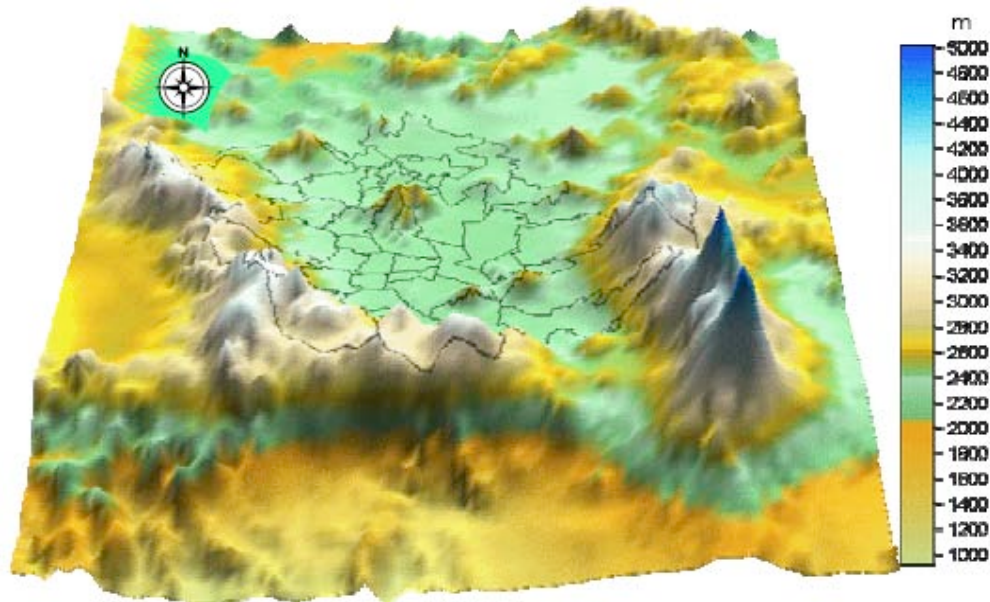


Figura 2.3 Topografía y límites políticos de la ZMVM

FUENTE: Inventario de emisiones de la ZMVM (2004)

Se observa como las características del clima y geográficas de la ZMCM se consideran como factores que ayudan a la acumulación de contaminantes antropogénicos. Y esto implica que los niveles de contaminación sobrepasen la norma de ozono de 11ppm más del 70% de los días del año. En la Tabla 2.3 se presenta el Inventario de emisiones anuales de la ZMVM, (2004), donde se observa que el sector energético es el que tiene mayor influencia junto con la fuentes móviles en la emisión de contaminantes, por lo anterior se estudia el impacto del sector de Tula Hidalgo en la calidad del aire de la ZMVM (Inventario de emisiones de la ZMVM (2004)).

En las emisiones anuales de la ZMVM, se observa que el contaminante mas abundante en peso es el CO, emitiéndose a la atmósfera cerca de 1.8 millones de toneladas al año y es generado principalmente por las fuentes móviles (Automóviles) , referente a la contaminación por NOx, se estima que se liberaron al aire más de 179 mil toneladas y el 82% lo generan fuentes móviles, el SO₂ se atribuye a la actividad industrial de

algunas zonas con una generación de 3,284 toneladas al año. (SENER-SEMARNAT 2002).

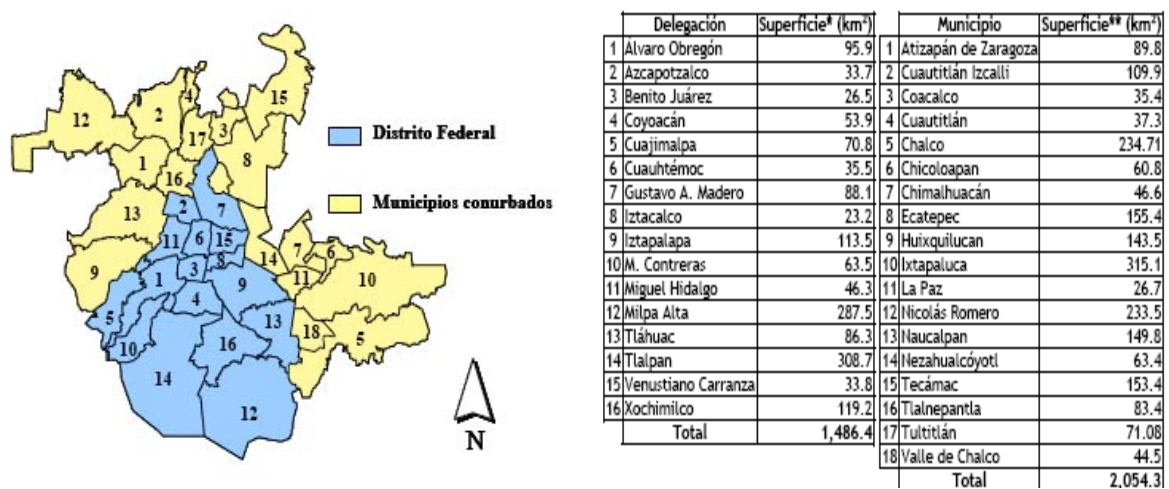


Figura 2.4 Zona Metropolitana del Valle de México

Tabla 2.3 Inventario de emisiones anuales de la ZMVM 2004

Sector	Emisiones																	
	PM ₁₀		PM _{2.5}		SO ₂		CO		NO _x		COT		CH ₄		COV		NH ₃	
	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]	[ton/año]	[%]
Fuentes puntuales	3,916	18.9	651	9.8	3,284	49.4	6,443	0.4	19,737	11.0	119,748	14.8	1,559	0.7	114,101	21.4	198	1.1
Fuentes de área	10,801	52.2	1,962	29.6	41	0.6	7,731	0.4	11,662	6.5	487,057	59.2	223,690	95.2	216,562	40.7	13,543	77.3
Fuentes móviles	4,768	23.0	3,748	56.6	3,321	50.0	1,777,907	99.2	147,971	82.2	198,136	24.1	9,816	4.2	183,899	34.6	3,775	21.6
Vegetación y suelos	1,201	5.8	261	3.9	N/A	N/A	N/A	N/A	626	0.3	17,606	2.1	N/A	N/A	17,606	3.3	N/A	N/A
Total	20,686	100	6,622	100	6,646	100	1,792,081	100	179,996	100	822,545	100	235,065	100	532,168	100	17,514	100

N/A : No Aplica

Con base en la tabla anterior se observa que la industria emitió el 49.4% (3,284 ton/año) de las 6,646 toneladas totales de SO₂ que se generaron en la ZMVM, también se observa un alto impacto en la concentración de NO_x, con el 11.0% (19,737 ton/año) de este mismo sector.

2.7 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO EN TULA

Este sector es uno de los complejos industriales más importantes del país se encuentra ubicado a 5-9 Km al este de la ciudad de Tula sobre la carretera federal Jorobas-Tula. Este parque industrial esta ubicado en el estado de Hidalgo (Figura 2.5) y tiene importantes industrias del sector energético como es la refinería “Miguel Hidalgo” de Petróleos Mexicanos (PEMEX), se encuentra localizada en el Estado de Hidalgo, en el municipio de Tula de Allende, a 82 km. al norte de la Ciudad de México.

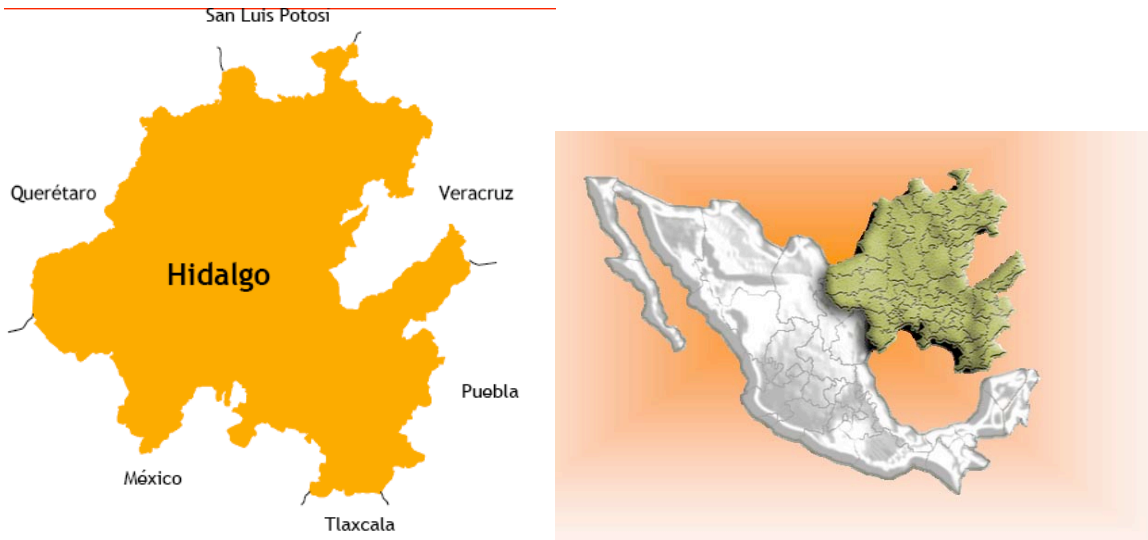


Figura 2.5 Localización Geográfica de el estado de Hidalgo.

Sus instalaciones ocupan un área total de 749 hectáreas, que se encuentran estratégicamente situadas por encontrarse entre los principales consumidores de combustible. La refinería Miguel Hidalgo, fue la primera refinería planeada de forma integral con plantas de proceso de hidrocarburo de alta capacidad esta es considerada como una de las más importantes en el país por su capacidad instalada, y la porción del mercado que controla, ya que procesa el 24% de crudo total que se refina en México.

Tula cuenta actualmente con una capacidad de refinación de 325,000 barriles por día. El área productiva está integrada por 10 sectores de proceso que incluyen plantas de proceso, plantas ecológicas, sistemas de bombeo y almacenamiento de productos y un sector de servicios auxiliares.

Se han instalado sistemas para el reutilizamiento de varios desechos, como es el caso de los gases producto de la regeneración del catalizador de las Plantas Catalíticas que son empleados en la producción de vapor, evitando con esto enviar a la atmósfera gases a altas temperaturas. Uno de esos procesos es el de Girbotol, para recuperación de azufre.

De acuerdo con el inventario de emisiones del Estado de Hidalgo, en la Figura 2.6- se observa que las industrias de petróleo y de generación de energía eléctrica son las que emiten mayores cantidades de SO₂ en esta entidad, con 173,428 y 150,000 ton/año respectivamente, mientras que el CO es principalmente emitido por la industria del cemento (Consejo Estatal de Ecología del Estado de Hidalgo, 2002)

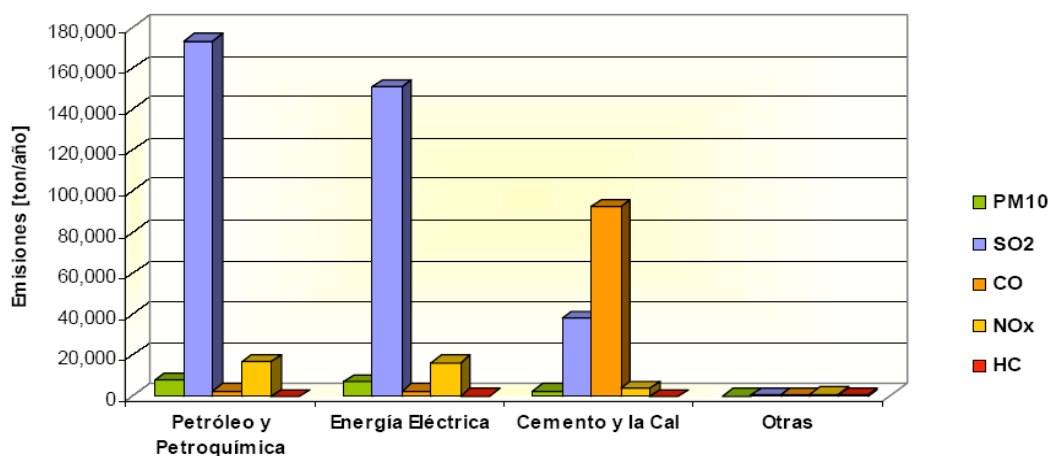


Figura 2.6 Emisiones por sector en el estado de Hidalgo (Ton/año), 2002.

FUENTE: Inventario de Emisiones Hidalgo (2002)

La otra industria importante para este trabajo es la central de generación eléctrica “Francisco Pérez Ríos” de “Ciclo Combinado” de la CFE (Comisión Federal de Electricidad), esta termoeléctrica cuenta con 5 unidades de 300 MW. Sólo por referencia para el caso de la CFE, las capacidades efectivas instaladas en la central termoeléctrica (C.T) y de ciclo combinado (C.C) son de 1500 y 382 MW respectivamente.

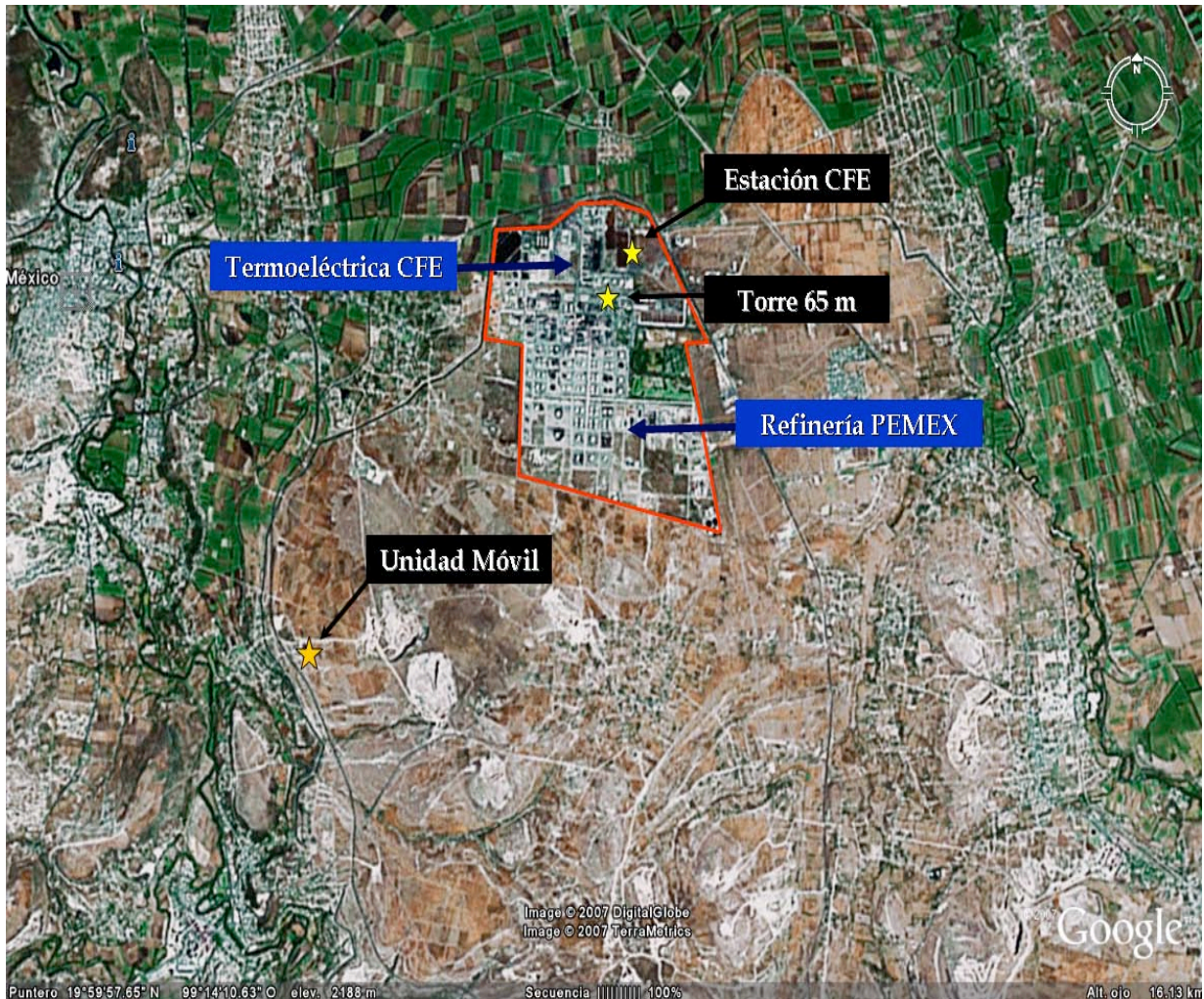


Figura 2.7 Localización del sector energético de Tula Hidalgo

El complejo petroquímico Tula (PEMEX), se encuentra ubicada en el kilómetro 23.5 de La carretera Jorobas–Tula en Tula de Allende, inicia operaciones en 1979, actualmente cuenta con una planta de acrilonitrilo la cual esta diseñada para producir 50 mil toneladas métricas de

Acrilonitrilo y 6 mil toneladas métricas de Acido Cianhídrico por año (PEMEX)

En el inventario de emisiones de fuentes puntuales de Hidalgo (Tabla 2.4) se ve que este sector industrial es uno de los de mayor importancia en la generación de emisiones en la región.

Tabla 2.4 Emisiones por sector en Ton/año

Sector	Emisiones (ton/año)				
	Partículas	SO ₂	CO	NO _x	HC
Generación de Energía Eléctrica	7,115.01	150,700.67	2,702.33	16,361.55	89.65
Industria Química	3.49	116.22	3.43	18.72	27.23
Industria del Cemento y la Cal	2,520.60	37,771.96	92,272.00	3,804.68	6.95
Industria Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	117.75	5.61	152.37	435.67	30.20
Industria Automotriz	10.61	1.03	124.73	3.69	44.37
Industria de la Celulosa y el Papel	26.31	2.08	290.82	346.21	42.07
Industria de Pinturas y Tintas	0.00	0.18	0.02	0.08	6.07
Tratamiento de Residuos Peligrosos	0.00	0.00	0.02	0.12	43.73
Industria del Petróleo y Petroquímica	8,159.18	173,428.14	2,530.35	16,937.42	61.43
Industria del Asbesto	0.18	2.31	2.71	5.12	0.00
Producción de textiles, prendas de vestir e industria del cuero	37.28	602.44	43.85	110.52	6.23
Minería	0.01	0.41	0.05	0.19	0.00
Producción de bienes a base de minerales no metálicos	9.03	0.00	0.56	0.67	0.04
Producción de alimentos, bebidas y tabaco	6.67	63.50	39.12	57.38	13.58
Manufacturas de productos metálicos	0.32	0.59	1.87	10.80	64.34
Producción de sustancias químicas y artículos de plástico o hules	2.50	44.42	1.48	7.07	0.04
Manufacturas de la madera	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Terminales de almacenamiento y distribución	0.85	15.26	0.14	1.49	415.41
Total	18,009.79	362,754.82	98,165.84	38,101.37	851.33

 Giros de competencia estatal

Fuente: Inventario de emisiones Hidalgo (2002)

En la Tabla 2.5 se observan las emisiones en toneladas al año de cada sector y se observa como el sector energético es el más importante junto con el sector Petroquímico.

CÁPITULO 3: METODOLOGÍA

La herramienta utilizada en la modelación fue el MCCM (Multiscale Climate and Chemistry Model, Grell et al. (2000), con él se intenta modelar la calidad del aire en la ZMVM y para analizar los resultados obtenidos por el MCCM se realiza un análisis estadístico, las comparaciones entre los resultados de la modelación y los datos medidos se efectuaron mediante el empleo de observaciones de la Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la cual posee 32 estaciones, en la Figura 3.1 se muestra la localización de las estaciones de la RAMA empleadas para realizar las comparaciones de los resultados del modelo, los cuales posteriormente son analizados con métricas estadísticas que evalúan el escenario y que se explican a continuación de la descripción del modelo.



Figura 3.1 Localización de estaciones de la RAMA

FUENTE: Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

Se construyó una base de datos a partir de inventarios para así generar un escenario de emisiones utilizable por el MCCM, esto fue posible con información proporcionada por diferentes instituciones gubernamentales (Instituto Nacional de Ecología, Gobierno del Distrito Federal, Instituto Mexicano del Petróleo y Universidad Nacional Autónoma de México).

Durante el periodo del 20 al 28 de octubre del 2005 se realizó una campaña de monitoreo intensiva en la región de Tula la cual sirvió de base para poder obtener las emisiones de SO₂ de las plantas (Cabrera, 2008). Los resultados de ese estudio se utilizan en este trabajo.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo MCCM (Multiscale Climate and Chemistry Model, Grell et al. (2000) fue desarrollado por el Instituto Fraunhofer en Alemania, cuya principal característica es el acoplamiento entre la química atmosférica con la meteorología, incluye la química de fase gaseosa, depositación, emisiones antropogénicas y biogénicas, incorpora una descripción explícita de los procesos de precipitación y nubes.

Este modelo se ha aplicado con anterioridad para la zona centro de México y también se ha evaluado su desempeño (García, 2002) donde se concluyó que puede emplearse para modelar la meteorología y la calidad del aire.

El MCCM es un modelo que:

- Acopla directamente los procesos meteorológicos y químicos.
- Incluye la química de la fase gaseosa, depositación, emisiones antropogénicas y biogénicas

-
- Incorpora una descripción explícita de los procesos de precipitación de nubes.
 - Posee la capacidad de anidamientos múltiples.

Para efectos de modelación se requiere conocer los contaminantes emitidos a la atmósfera, con resoluciones espacial y horaria adecuadas al modelo.

Debido a la complejidad de los procesos involucrados en la fotoquímica de los contaminantes, especialmente en regiones con terreno complejo es útil que el transporte de contaminantes pueda reaccionar directamente a los cambios en otro plazo de condiciones meteorológicas, los cuales son sólo posibles en un modelo acoplado como el MCCM. Debido a su capacidad intrínseca de predicción de clima y a que se encuentra directamente acoplado a procesos químicos, el MCCM se puede aplicar en tiempo real a la predicción regional y urbana de la calidad del aire.

El MCCM se basa en el modelo a mesoescala de quinta generación de NCAR/Penn State (National Center for Atmospheric Research/ Pennsylvania State University), MM5 (mesoscale model) (Grell *et al.* 1994). El MM5 incluye la capacidad de anidamiento múltiple, dinámica no-hidrostática (Dudhia 1993) y la asimilación de datos en cuatro dimensiones no-hidrostática (Stauffer y Seaman 1994) así como también otras opciones de modelación de procesos microfísicos.

Las emisiones biogénicas se calculan con base en los datos de uso de suelo, temperatura superficial y radiación. El modelo calcula simultáneamente los cambios meteorológicos y químicos en el dominio del modelo y genera las distribuciones tridimensionales dependientes del tiempo de las principales especies orgánicas e inorgánicas relevantes a

la formación de oxidantes. Una ventaja del acoplamiento en línea de la meteorología y la química es que provee resultados consistentes sin la interpolación de datos en contraste con modelos no acoplados de química y transporte.

Para realizar una corrida del programa MCCM se utilizaron los siguientes programas.

TERRAIN, REGRID, RAWINS o LITTLE_R, INITCHEM, MCCM, NESTDOWN, MCCM (para dominio anidado).

Los cuales se definen a continuación:

3.2 PREPROCESADORES

3.2.1 TERRAIN

Este modulo especifica los dominios y la posición de los mismos, prepara la topografía y la información de uso de suelo mediante la interpolación por longitud-latitud de la elevación del terreno, uso del suelo y cobertura vegetal a una malla rectangular del MCCM.

Los archivos de salida de TERRAIN son *TERRAIN_DOMAIN1...* *TERRAIN_DOMAINn*. Y que contienen la información de cada uno de los dominios.

3.2.2 REGRID

Su propósito es leer análisis meteorológicos archivados o las salidas de modelos a gran escala en niveles de presión e intercalarlos de una malla horizontal a la malla especifica en TERRAIN. REGRID es una aplicación del sistema MM5 sin ninguna modificación.

REGRID consiste en dos componentes, pregrid y regridder

3.2.3 PREGRID

Lee diferentes formatos de los archivos de entrada y genera archivos de salida, con un formato simple, que serán leídos posteriormente por regridder. La salida de pregrid son archivos con datos meteorológicos tridimensionales, temperatura superficial de mar y nieve, un archivo por cada intervalo de tiempo dentro del análisis.

3.2.4 REGRIDDER

Interpola cada archivo de pregrid en la malla horizontal de MCCM especificada en el archivo *TERRAIN_DOMAIN1*. La salida es un archivo con el nombre de *REGRID_DOMAIN1*, aquí las variables todavía se encuentran en niveles de presión. La información de entrada requerida por regridder son los archivos de salida de TERRAIN y los archivos de pregrid.

3.2.5 RAWINS/LITTLE_R

Su objetivo es mejorar la primera aproximación de los datos de entrada meteorológicos, que son generados por regridder, con observaciones. Estas pueden ser por tanto de superficie como radio sondeos.

3.2.6 INTERPF

Es un preprocesador que interpola las salidas de REGRIDDER, RAWINS o LITTLE_R de los niveles de presión a los niveles sigma (σ) de MCCM

La salida de INTERPF son las condiciones iniciales meteorológicas que es el archivo *MMINPUT_DOMAINn*, las condiciones de frontera dependientes del tiempo de las variables meteorológicas es el archivo

BDYOUT_DOMAINn y las condiciones de la frontera inferior es *LOWBDY_DOMAINn*

3.2.7 INITCHEM

Suministra los valores de concentración típicos de las variables químicas para todos los puntos de la malla del dominio. Actualmente INITCHEM suministra una distribución homogénea horizontal para todas las especies químicas. Los valores de concentración se distinguen entre capa límite, troposfera libre y troposfera superior. Las concentraciones de todas las especies pueden modificarse por el usuario dentro de este programa.

3.2.8 MCCM

Es la parte del sistema de modelación, donde la predicción de la meteorología, el transporte de contaminantes toma lugar.

El MCCM consiste en una parte meteorológica, que principalmente equivale a MM5 y a la parte acoplada de química, intercambio turbulento, emisiones antropogénicas y biogénicas, deposición y transformaciones químicas. Además de la estimación de las especies químicas en la fase gaseosa, MCCM incluye la predicción de PM₁₀ y PM₂₅, que toma en consideración la advección, el transporte turbulento, la emisión y la deposición. En la parte meteorológica, la diferencia se encuentra en el empleo de suelo diferente con un tratamiento mejorado de la capa límite de la superficie.

Para la química en la fase gaseosa el modelo emplea el mecanismo RADM2 que incluye 14 especies estables inorgánicas, 4 intermediarios reactivos y 3 especies abundantes estables (oxígeno, nitrógeno y agua). La química orgánica la representan 26 especies estables y 16 radicales peroxi. El mecanismo RADM2 emplea la aproximación de reactividad agregada molecular de Middleton *et al.* (1990). Donde se agrupan compuestos orgánicos similares en especies del modelo mediante el empleo de un peso por su reactividad con el radical OH.

3.2.9 RADM2

El RADM2 es el mecanismo empleado en el MCCM que representa la química orgánica mediante la técnica de moléculas agrupadas. Contiene parametrizaciones de varios procesos químicos importantes incluye tres clases de alcanos superiores, un tratamiento de la química de los aromáticos; dos clases de alcanos superiores que representan los alquenos terminales e intermedios; manejo de cetonas y especies de dicarbonilos como clases diferentes a la de los aldehídos; incluso de isopreno como especie explícita; y un tratamiento detallado de las reacciones de radicales peroxi.

El RADM2 se ha evaluado y revisado contra cámaras de smog (Stockwell *et al.* 1995), donde se muestra que este mecanismo puede reproducir la química atmosférica regional adecuadamente.

3.2.10 NESTDOWN

Este programa genera los datos de entrada para dominios anidados en el caso de MCCM se encuentra ligeramente modificado del programa MM5, con él se incrementa el tamaño del arreglo para acomodar las variables adicionales de la química.

3.3 EVALUACIÓN DEL MODELO

Para conocer si un modelo puede reproducir lo que se desea es necesario evaluarlo, para esto se utilizan dos metodologías una cualitativa y otra cuantitativa.

La cualitativa se realiza mediante el empleo de graficas, mapas y diagramas, en los cuales se observa la proximidad de los datos del modelo contra los valores observados y la evaluación cuantitativa se realiza mediante el empleo de parámetros estadísticos.

Para evaluar el desempeño del modelo de forma cuantitativa se calcularon las siguientes métricas estadísticas:

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_o = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2 \right]^{1/2}$$

$$RMSD = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 \right]^{1/2}$$

Donde σ_p y σ_o son las desviaciones estándar de los datos predichos y observados respectivamente, para un parámetro o contaminante dado en las N ubicaciones o puntos de monitoreo, Los parámetros p_i y o_i fueron tomados como promedio por hora para cada punto o estación de monitoreo, donde \bar{p} y \bar{o} son los valores de las medias para las N ubicaciones. RMSD (root-mean-square-difference) es la raíz cuadrática de las diferencias medias entre los valores predichos y los observados.

Con estas herramientas se puede determinar que el nivel de acierto del modelo es considerado alto si la desviación estándar de los datos de predicción es similar a la desviación de los datos de observación, mientras que RMSD sea menor que la desviación estándar de los datos observados.

RMSD se descompone en dos componentes:

(RMSDs) Raíz sistemática cuadrática media de la desviación, entre valores medidos y modelados.

$$RMSD_s = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\hat{p}_i - o_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

Raíz no sistemática cuadrática media de la desviación, entre valores medidos y modelados. (RMSDu)

$$RMSD_u = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\hat{p}_i - p_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

Donde:

$$\hat{p}_i = a + b\tilde{i}_i$$

Donde a y b son la ordenada y pendiente respectivamente de la regresión lineal de mínimos cuadrados entre p y o. RMSDs es una medida de error sistemático en el modelo de predicción mientras que RMSDu describe la discrepancia no lineal entre las predicciones y lo observado, la cual puede ser interpretada como una medida de precisión, que corresponde a errores aleatorios.

El índice de concordancia entre las predicciones y las observaciones de un parámetro es definido como:

$$I_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2}$$

Este índice compara las salidas de los valores de predicción con los valores observados. El rango posible para este índice es de 0 a 1, siendo el valor de 1 una concordancia perfecta.

3.4 ESTRATEGIA DE ANIDAMIENTO

Se utilizó la estrategia de anidamientos unidireccionales (one way) como se ve en la Figura 3.2.

La modelación tiene como objetivo el conocer la influencia a nivel regional de las emisiones de la termoeléctrica. Se considera como radio de influencia de 90 km. La estrategia de anidamientos emplea 3 dominios que se muestran en la Figura 3.2. El centro de los dominios se localiza en latitud 20.055N y longitud -99.278W.

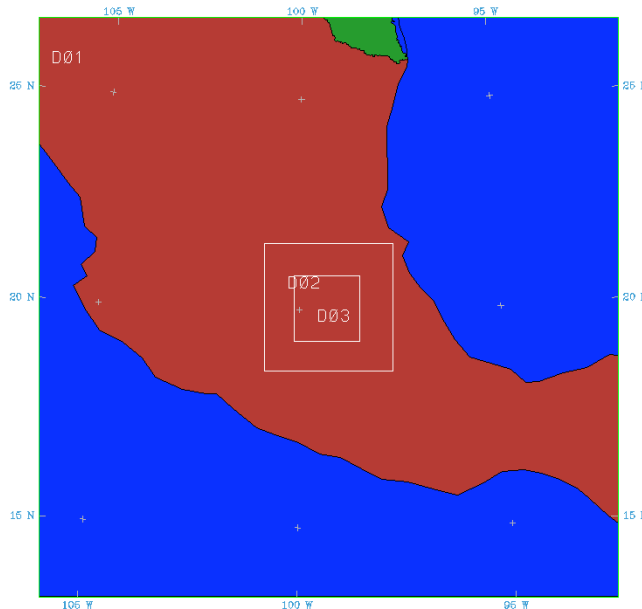


Figura 3.2 Dominios utilizados en la modelación regional

FUENTE: Evaluación de Escenarios Utilizando el MCCM, 2002

El arreglo de los dominios se muestra en la Tabla 3.1. El dominio mayor es un cuadrado que posee un lado 1,620km, el segundo dominio es de 360km y el tercer dominio de 183km encontrándose en la parte central la termoeléctrica.

Tabla 3.1 Características de los dominios de modelación

	Dominio 1	Dominio 2	Dominio 3
Dirección Oeste-este	60	40	61
Dirección Sur-Norte	60	40	61
Dimensión celda km	27.	9.	3.

El modelo posee la capacidad de modelar los dominios anidados de forma bidireccional (información meteorológica generada en el dominio madre o hija se puede retroalimentar al dominio hija o madre según sea el caso). Para este caso el dominio 1 y 2 se realizan de forma bidireccional y debido a que la química sólo se puede realizar de forma unidireccional el 3^{er} dominio solo se puede realizar de esa forma (García, 2008).

3.5 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

La utilidad principal del modelo de calidad del aire es su capacidad para reproducir escenarios donde se presenten altos niveles de concentración de contaminantes. Para efectuar esta evaluación se propusieron dos escenarios de reducción uno del 40% y otro del 20% de reducción en las emisiones de contaminantes del sector energético de Tula Hidalgo, esto basado en que las emisiones de la refinería y termoeléctrica podrían alcanzar dichas reducciones

Para cuantificar el efecto de los gases criterio y poder hacer el estudio comparativo de forma más objetiva se utilizan tres métricas (Georgopoulos y Arunachalam, 1997), Extensión (E_{c^*}), Severidad (S), y Exposición potencial integrada de la población (Ψ).

Extensión E_{c^*} ; suma los elementos de malla que durante el episodio han sobrepasado la norma de contaminación para cada gas, y la formula para calcularlo es:

$$E_{c^*} = \sum_{n=1}^m N_{c^*,n}$$

donde: N_{c^*} , nN_{c^*} , n es el número de celdas que excedan una concentración c^* , durante m horas de duración del episodio.

Severidad S ; suma las veces que las concentraciones de un gas criterio han sobrepasado la norma ambiental y se calcula de la siguiente forma:

$$S = \sum_{n=1}^m \sum_{i,j} c_{i,j,n} H_{i,j}(c^*)$$

donde :

$$H_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } c_{i,j} > c^* \\ 0 & \text{si } c_{i,j} < c^* \end{cases}$$

Y $c_{i,j,n}$ es la concentración en la celda i, j al tiempo n . Las unidades son las correspondientes al gas criterio.

Exposición Ψ ; cuantifica la magnitud de la exposición en tiempo y espacio, incorporando el tamaño de la población potencialmente expuesta a los niveles no saludables de algún gas criterio y se calcula mediante la fórmula;

$$\Psi = \frac{\sum_{n=1}^m \sum_{i,j} \varpi_{i,j,n} c_{i,j}}{m \varpi_{\max}}$$

donde: $\varpi_{i,j,n}$ es la población en la celda i, j y ϖ_{\max} es la población máxima en la región de estudio.

La evaluación se hace calculando dichas métricas con las emisiones originales y se comparan con las del escenario de reducción.

3.6 FECHAS DE ANÁLISIS

Para seleccionar los días de simulación se utilizaron datos obtenidos de la RAMA, (SMA, 2000), Y datos que se obtuvieron durante una campaña de monitoreo intensiva en la región de Tula que se realizó en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA, UNAM), la cual sirvió de base para obtener los datos de emisiones de contaminantes criterio de las plantas generadoras durante el periodo del 20 al 28 de octubre del 2005 y con que el ultimo inventario de emisiones de la ZMVM (2004), utilizamos estas fechas para correr el modelo.

Empleando el MCCM se observara si existe un impacto en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México ocasionado por el sector energético ubicado en la ciudad de Hidalgo, la Termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos", y la refinería "Miguel Hidalgo".

3.7 METEOROLOGÍA

Para empezar nuestra metodología es necesario conocer la meteorología del lugar, y como se observa en la Tabla 3.2 en el mes de Octubre los vientos pudieron llevar las emisiones de Tula a la ciudad de México.

Tabla 3.2 Climatología del año 2005

	Dirección del viento	Influencia	T (°C)
Enero	Sureste-Noroeste	NO	15-17
Febrero	Sureste-Noroeste	NO	15-17
Marzo	Suroeste-Noreste	NO	19-19,5
Abril	Suroeste-Noreste	NO	21-22
Mayo	Suroeste-Noreste	NO	21-22
Junio	Sureste-Noroeste	NO	21-22
Julio	Sureste-Noroeste	NO	19,5-20
Agosto	Sureste-Noroeste	NO	19-19,5
Septiembre	Este-Sur	SI	19-19,5
Octubre	Noreste-Sur	SI	17-18
Noviembre	Este-Suroeste	NO	15-17
Diciembre	Noreste-Suroeste	NO	15-17

En los meses en negritas se observa que las condiciones meteorológicas promedio durante ese periodo pueden presentar una influencia en el transporte de las emisiones de la región de Tula hacia la ZMCM.

A continuación se presentan imágenes con los patrones de viento y se observa que estos pudieron influir en el transporte de emisiones a la ciudad de México.

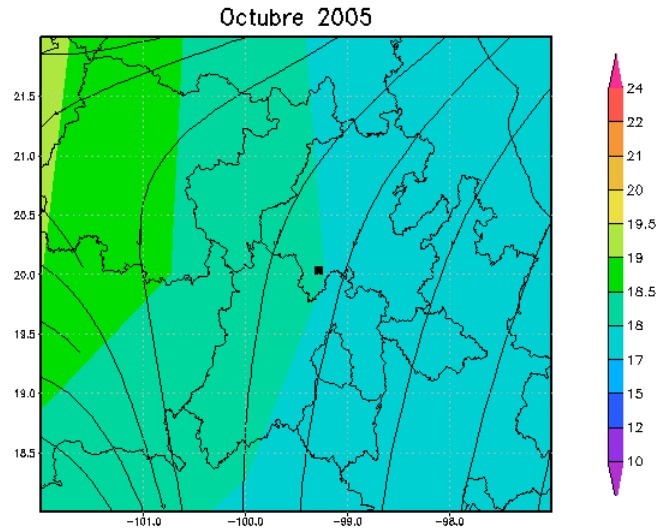


Figura 3.3 Patrones de viento promedio que pueden inducir el transporte de emisiones de Tula hacia la ciudad de México y Toluca.

FUENTE: Realización Propia con el programa GRADS.

En este periodo no se observa claramente los patrones de viento durante todo el mes siguen una trayectoria hacia la ZMVM, lo que da casi por hecho que lleguen las emisiones del sector energético de Tula Hidalgo a la ZMVM, por tal motivo y ya con esta información se buscaron casos en los que se haya presentado un alto índice de contaminantes en el valle de México debido a altas concentraciones de NO_x y SO₂, proporcionados por mediciones de la RAMA (GDF), en esta entidad gubernamental se obtuvieron los datos de dichas eventos extraordinarios y se les aplicó la misma metodología, para comprobar la eficacia del modelo y la aplicación de este trabajo.

CAPITULO 4: RESULTADOS

Una vez que se tienen los resultados del modelo, lo que continua es el realizar las comparaciones con los datos de la RAMA donde se analizará si el modelo reproduce satisfactoriamente la meteorología.

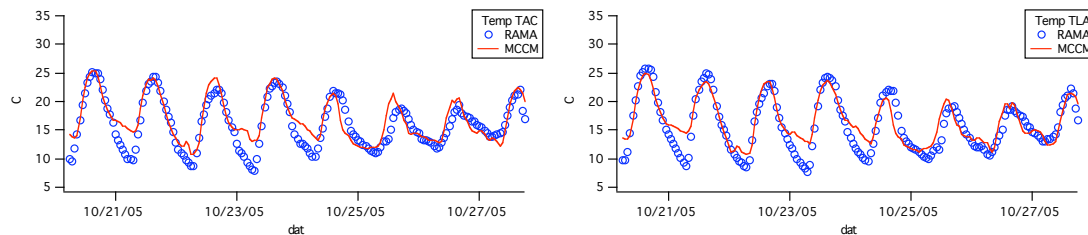
4.1 COMPARACIONES ENTRE MEDICIONES DE LA RAMA Y RESULTADOS DEL MODELO.

A continuación se observan las gráficas de comparaciones entre las mediciones de la RAMA y las salidas del MCCM, donde se vera la eficacia del modelo.

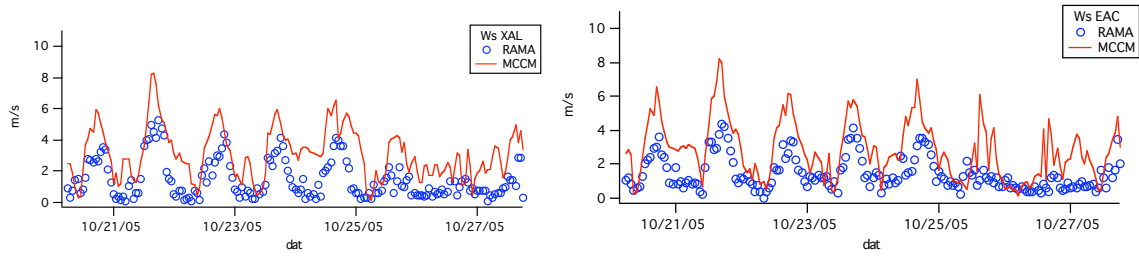
Estas graficas son en la variación horaria de magnitudes de viento, de temperatura, y las concentraciones de los contaminantes criterio en superficie, entre datos medidos por la RAMA y las salidas del MCCM para el periodo 20-28 de octubre del 2005, las discontinuidades indican ausencia de datos y el tiempo es en horas locales, son en diferentes estaciones de la RAMA, ya que seleccionamos las que mejor representaban el modelo.

4.1.1 Temperatura

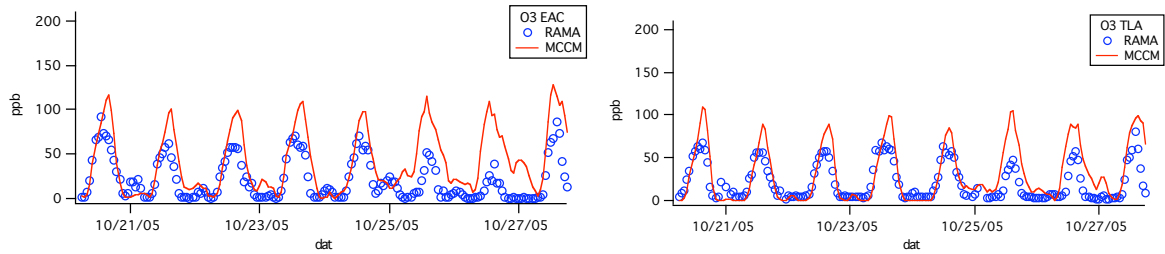
Comparaciones entre los resultados del modelo y mediciones para la temperatura. Se observa que el modelo reproduce adecuadamente el patrón de temperaturas.



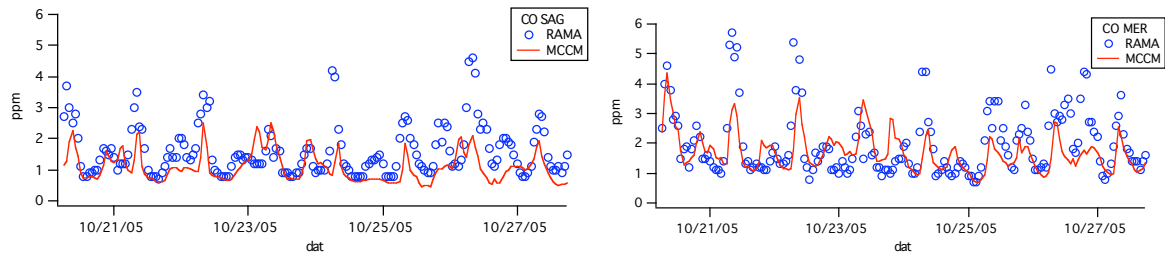
4.1.2 Velocidad de viento



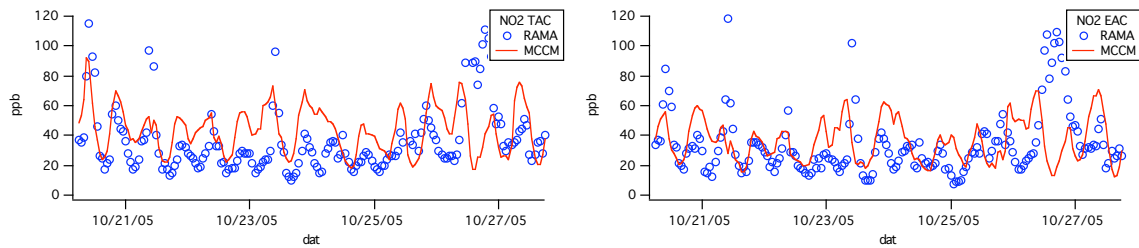
4.1.3 Concentraciones de ozono



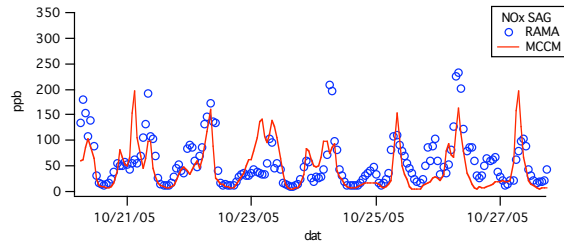
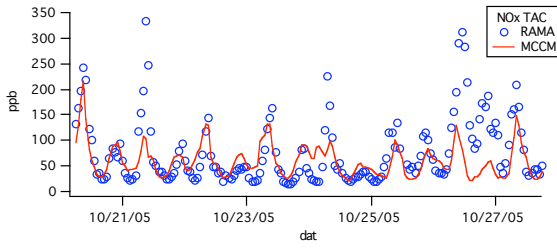
4.1.4 Concentraciones de monóxido de carbono (CO)



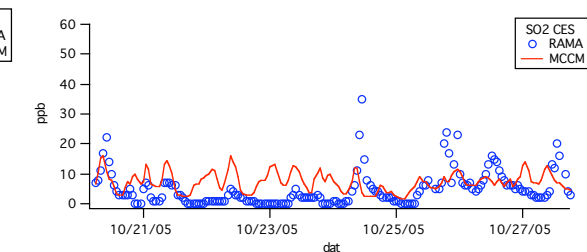
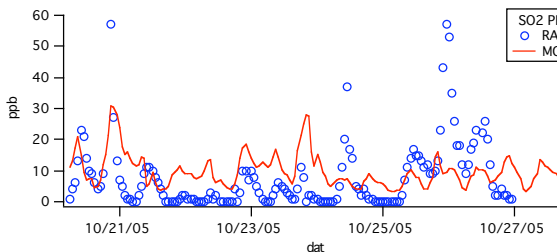
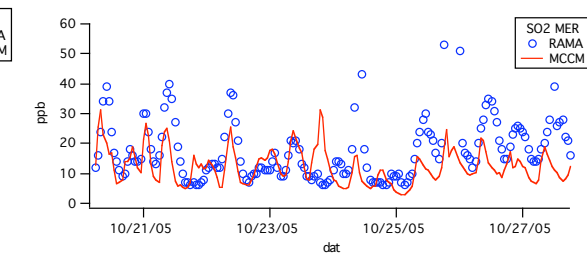
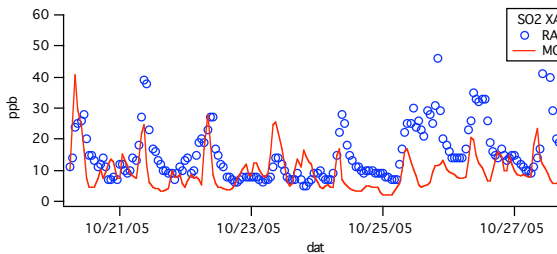
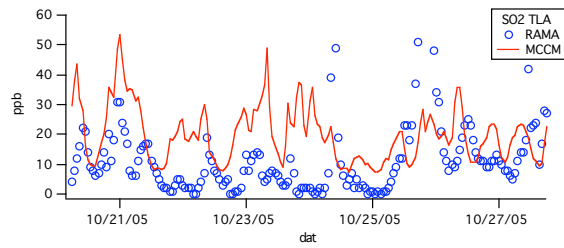
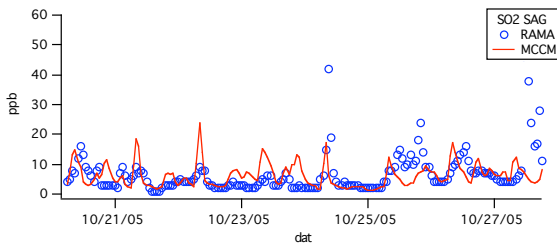
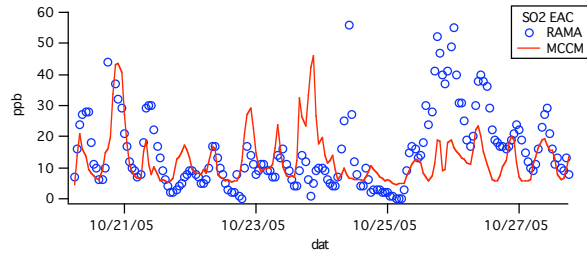
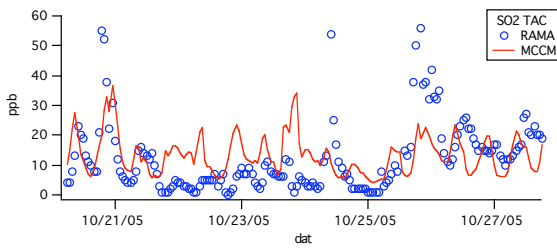
4.1.5 Concentraciones de NO₂

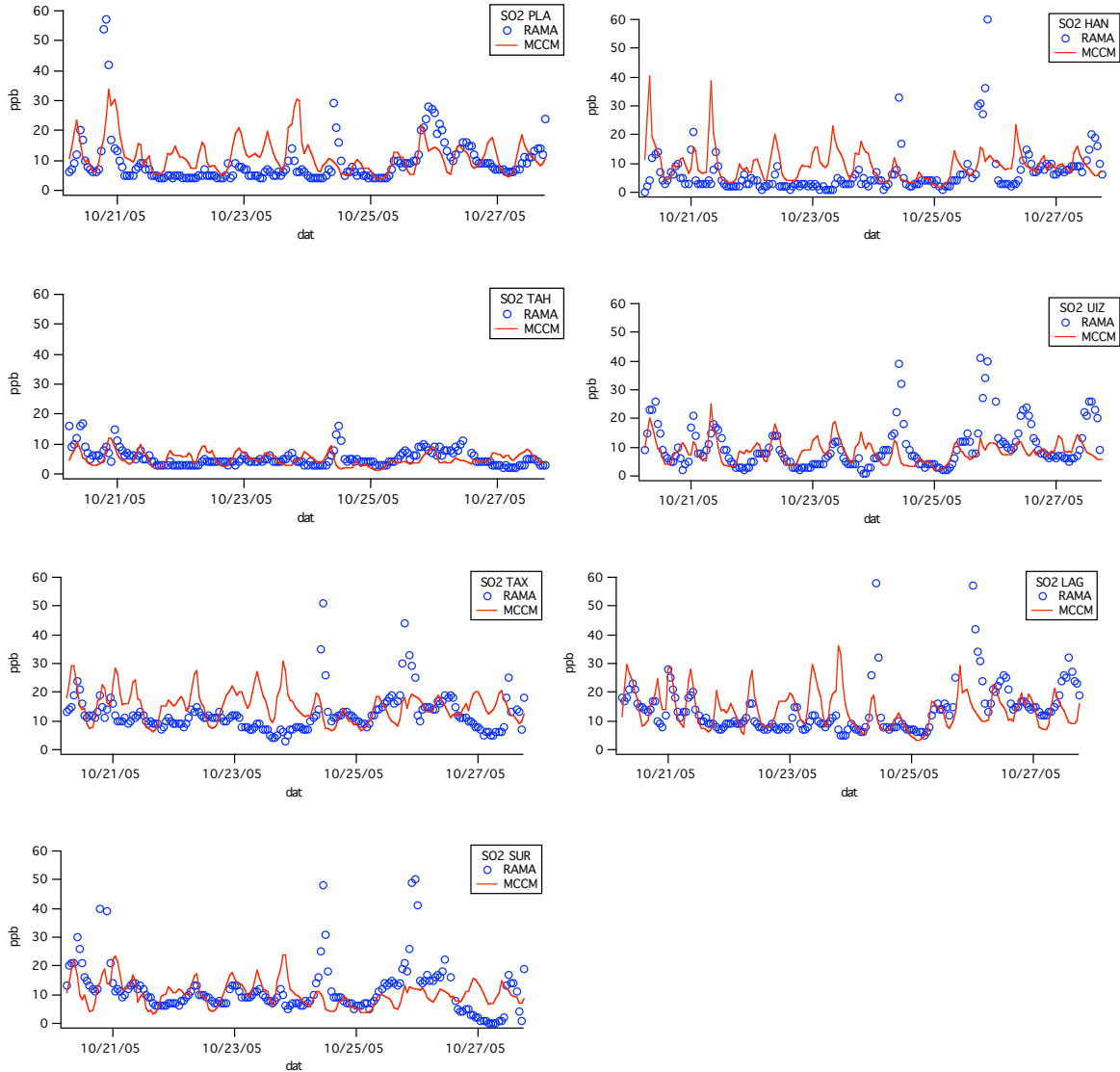


4.1.6 Concentraciones de NO_x

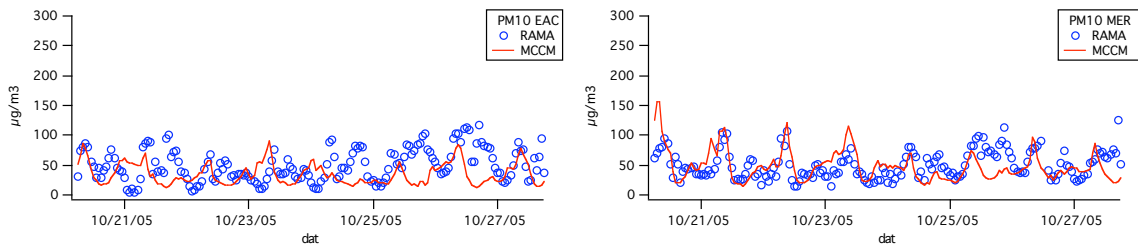


4.1.7 Concentraciones de SO₂





4.1.8 Concentraciones de PM₁₀



En la actualidad la RAMA cuenta con 36 estaciones de monitoreo ubicadas en puntos estratégicos de la Ciudad de México (Ver Figura 3.1), 24 están localizadas en el DF y 12 en el Estado de México. Las

estaciones de monitoreo cuentan con criterios técnicos para su ubicación, densidad de población, distribución de fuentes de emisión y topografía.

Para estas representaciones solo se tomaron en cuenta las estaciones de Tacuba (TAC), Tlanepantla (TLA), Xalostoc (XAL), Eneq Acatlan (EAC), San Agustín (SAG), Merced (MER), Pedregal (PED), Cerro de la estrella (CES), Plateros (PLA), Hangares (HAN), Tláhuac (TAH), Uam Iztapalapa (UIZ), Taxqueña (TAX) y Lagunilla (LAG).

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las tablas del análisis estadístico muestran el índice de concordancia que es el dato entre los valores medidos y los de el modelo cuyo valor va de 0 a 1, y que es una evaluación del error (Willmott, 1981; Willmott et al., 1985) siendo el valor de 1 la concordancia perfecta, en la siguiente tabla se muestran los índices de concordancia tomando sólo algunas estaciones de la RAMA de donde se tienen la mayoría de las mediciones.

Tabla 4.1 Índice de concordancia (Ic) en las variables meteorológicas y emisiones por estación de la RAMA vs. MCCM

Point	Estación	Temp	Wspe	Wdir	PM ₁₀	O ₃	NOx	NO ₂	SO ₂
0	TAC	0.92	0.56	0.71		0.78	0.65	0.48	0.47
1	EAC	0.94	0.65	0.71	0.42	0.75	0.51	0.32	0.51
2	SAG	0.90	0.60	0.79	0.43	0.71	0.73	0.51	0.34
3	TLA	0.93	0.66	0.74	0.51	0.83	0.68	0.43	0.31
4	XAL	0.94	0.66	0.67	0.46	0.62	0.62	0.48	0.51
5	MER	0.94	0.45	0.81	0.64	0.76	0.71	0.59	0.46
6	PED	0.87	0.49	0.64	0.31	0.71	0.46	0.34	0.42
7	CES	0.91	0.34	0.65	0.47	0.65	0.51	0.38	0.43
8	PLA	0.92	0.48	0.64	0.39	0.75	0.66	0.44	0.53
9	HAN	0.94	0.59	0.79	0.54	0.71	0.52	0.49	0.32
10	CUA	0.90	0.66	0.78		0.74			
11	TPN	0.91	0.28	0.65		0.69			
12	CHA	0.95	0.72	0.68		0.83			
13	TAH	0.95	0.76	0.65	0.36	0.74			0.44
14	UIZ					0.74	0.61	0.54	0.38
15	TAX				0.41	0.69	0.48	0.30	0.3
16	LAG					0.77	0.70	0.64	0.42
17	BJU								
18	AZC					0.80	0.74	0.41	0.35

Se puede observar en la Tabla 4.1 que el modelo reproduce satisfactoriamente las variables meteorológicas y las concentraciones ambientales, la que mejor reproduce es la Temperatura, la velocidad de viento, la dirección de viento, el ozono y NOx, ya que el Ic es mayor a

0.6 esto indica que el modelo genera resultados parecidos a los observados y las que tienen el Ic mas bajo son, el SO₂, NO₂ y PM₁₀, indicando un bajo nivel de simulación, pero que puede ser atribuido a variables meteorológicas.

4.2.1 MAPAS DE ESCENARIOS DE REDUCCIÓN.

DIÓXIDO DE AZUFRE SO₂

Aplicando entonces el modelo MCCM se obtienen las concentraciones de contaminantes atmosféricos para la región la cual comprende la ZMVM, y parte de los estados de México, Tlaxcala, Morelos e Hidalgo, que son visualizados gracias al programa GRADS, y que se muestran a continuación, en primera instancia se muestran en porcentaje y en el escenario de reducción del 40%, donde se puede ver que si se alcanza la reducción en la región del 40% Y hasta un 45%, ya que el efecto de la reducción es acumulativo.

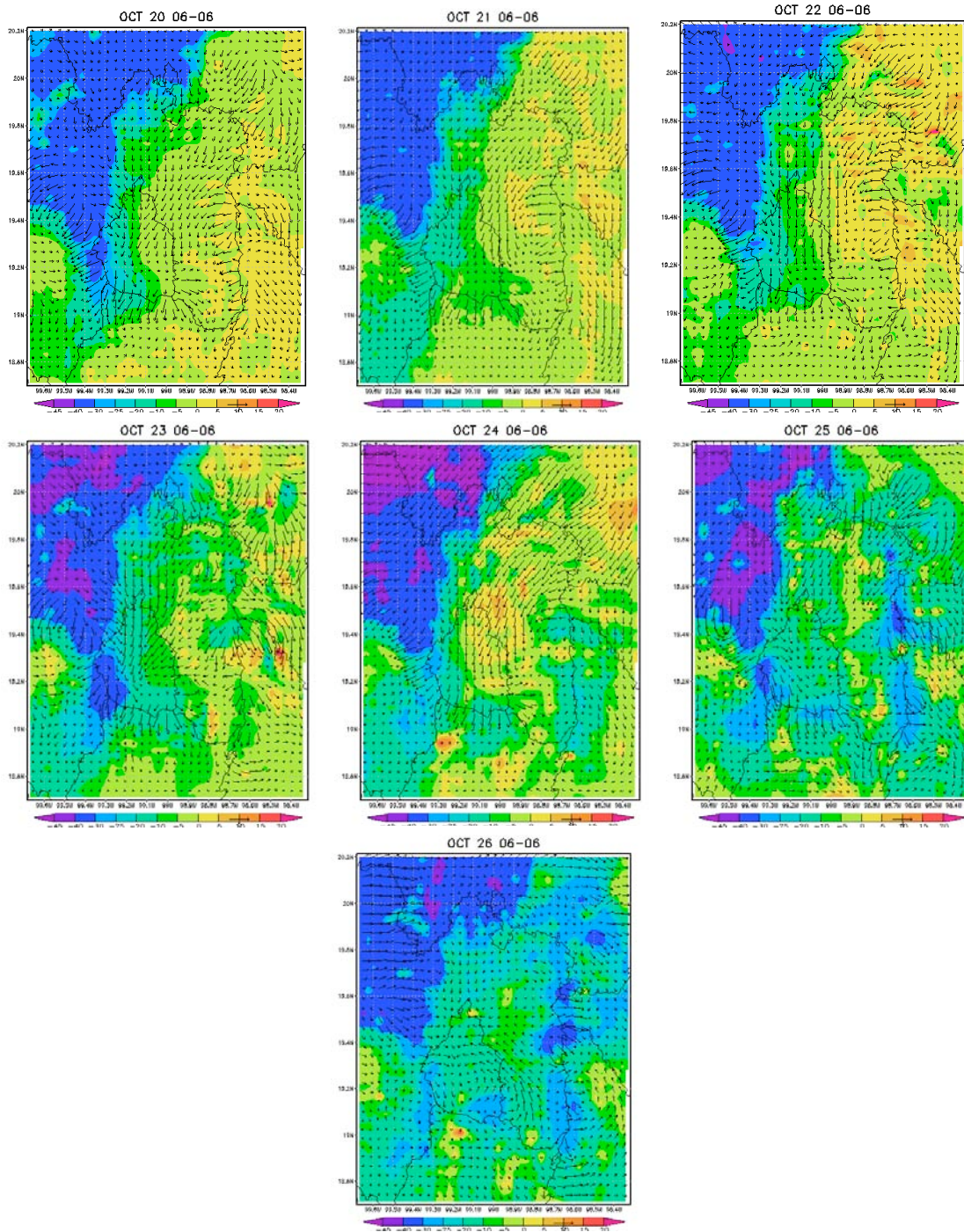


Figura 4.1 Diferencia de concentraciones en por ciento de SO₂ en la región, (Escenario-Base)/Basex100.

OZONO (O_3)

Se observa una reducción cercana a la fuente de hasta el 100% de Ozono, pero en el resto de la zona se ve un incremento del 10% ó más esto debido a las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera.

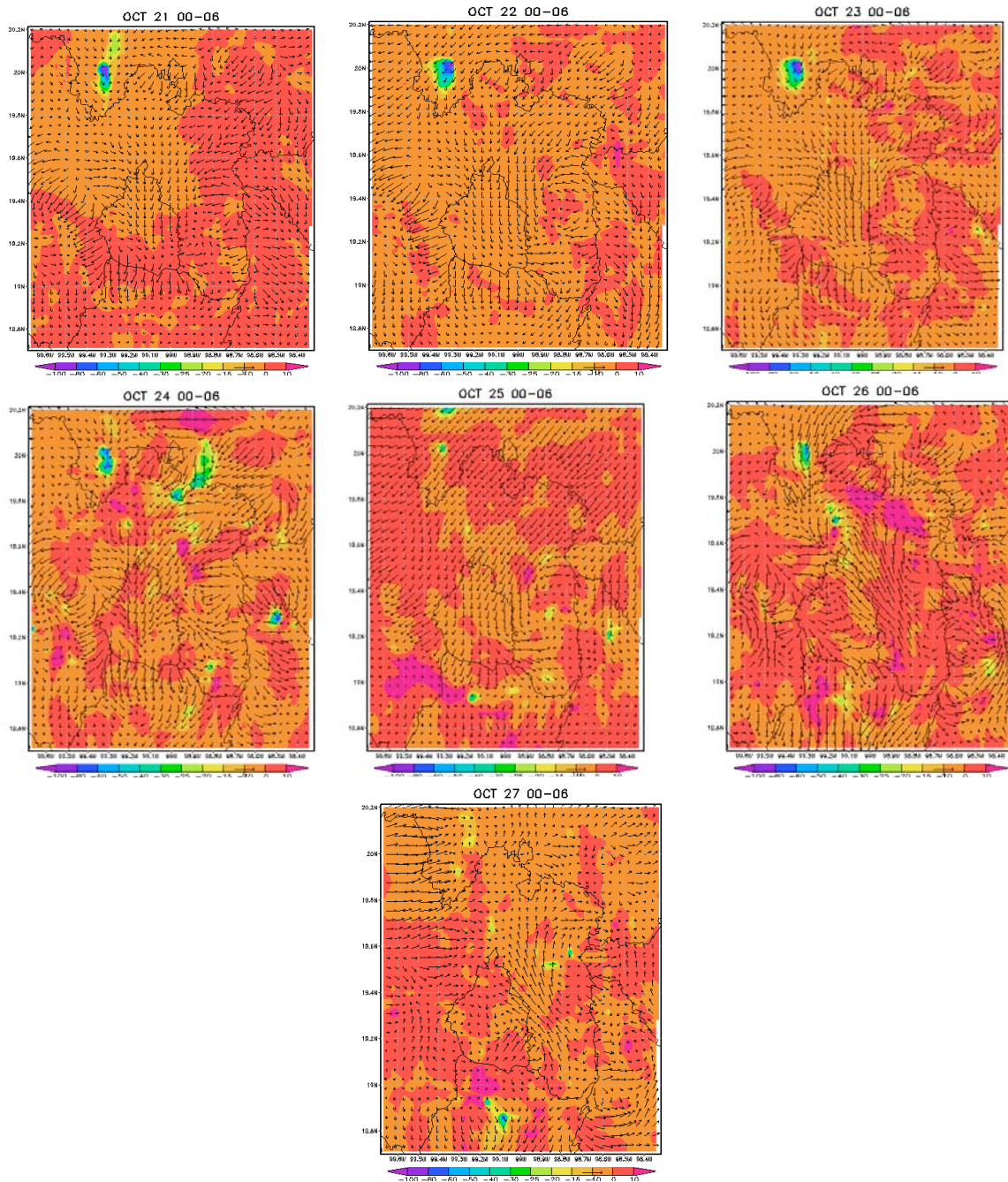


Figura 4.2 Reducciones en la concentración de ozono en porcentaje.

Ya que se tiene la representación de el primer escenario de reducción del 40% con el modelo, se evalúan a continuación las métricas de exposición, extensión y severidad (Tabla 4.2) para así tener el análisis cuantitativo.

Posteriormente para cuantificar el efecto de los gases criterio y poder hacer una comparación más objetiva se utilizan las tres métricas mencionadas con anterioridad, que son exposición potencial integrada de la población, extensión y severidad (Georgopoulos y Arunachalam, 1997). Mientras mayor sea el valor de estas métricas, peor será la calidad del aire.

Tabla 4.2 Métricas de exposición, extensión y severidad para NO₂, O₃, y SO₂, para el caso, base y reducción del 40% .

	NO ₂		O ₃		SO ₂	
	BASE	REDUCCION	BASE	REDUCCION	BASE	REDUCCION
Exposición	6,8	6,7	8,4	8,4	2,3	2,0
Extensión	1,0	1,0	17379,0	17490,0	10517,0	6780,0
Severidad	0,4	0,4	2111,4	2124,9	5032,9	2915,9

Se observa en la Tabla 4.2 que una reducción del 40% genera un efecto de reducción del 1.47% en NO₂, un aumento en O₃ del 0.63% en extensión y 1.46% en severidad, la reducción más significativa es en SO₂ con una disminución en las tres métricas exposición, extensión, y severidad del 13%, 35% y 42%, respectivamente, entonces el efecto más significativo en la disminución del 40% de emisiones en la fuente sería en el SO₂.

4.3 EVENTOS EXTRAORDINARIOS

La evaluación preliminar del impacto de la termoeléctrica en la región se hace empleando la información sobre eventos extraordinarios de concentración de SO₂ en la el Valle de México reportados por la Red Automática de Monitoreo Ambiental y mediante el análisis de trayectorias.

La información meteorológica en la región se obtuvo de los datos meteorológicos de análisis final de NCEP que tiene una malla global de 1x1 grado. Los valores se tiene para cada seis horas y esta información se empleó en el modelo MCCM aplicado a la región según la descripción anterior.

Los casos estudiados son los presentados en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Eventos extraordinarios de concentración de SO₂ en la ciudad de México

Fecha	Hora	Estación	Localización	Concentración
31 Oct 2007	02:00	Los Laureles	Noreste	0.225 ppm
13 Nov 2007	04:00	Villa de las Flores	Noreste	0.252 ppm
10 Dic 2007	11:00	Tultitlán	Noroeste	0.266 ppm
15 Ene 2008	00:00	Tultitlán	Noroeste	0.204 ppm
27 Ene 2008	05:00	Villa de las Flores	Noreste	0.207 ppm
27 Ene 2008	02:00	Vallejo	Noroeste	~ 0.250 ppm
27 Ene 2008	02:00	Tultitlán	Noroeste	~ 0.230 ppm

En la siguiente Figura 4.3 muestran las trayectorias de parcelas de aire liberadas a cada hora, considerando su recorrido de hasta 6 horas. Cada punto sobre la trayectoria representa un desplazamiento de la parcela a cada 20 minutos y en un escenario del 20% de reducción, donde se puede ver entonces como la trayectoria de la emisiones se desplaza a la ZMVM en 4 de los 5 casos, y donde se ve que se rebasa la norma de la

organización mundial de salud que dice que el valor máximo permitido es de 0.035 ppb en 24 horas, pero no la NOM-022-SSA1-1993.

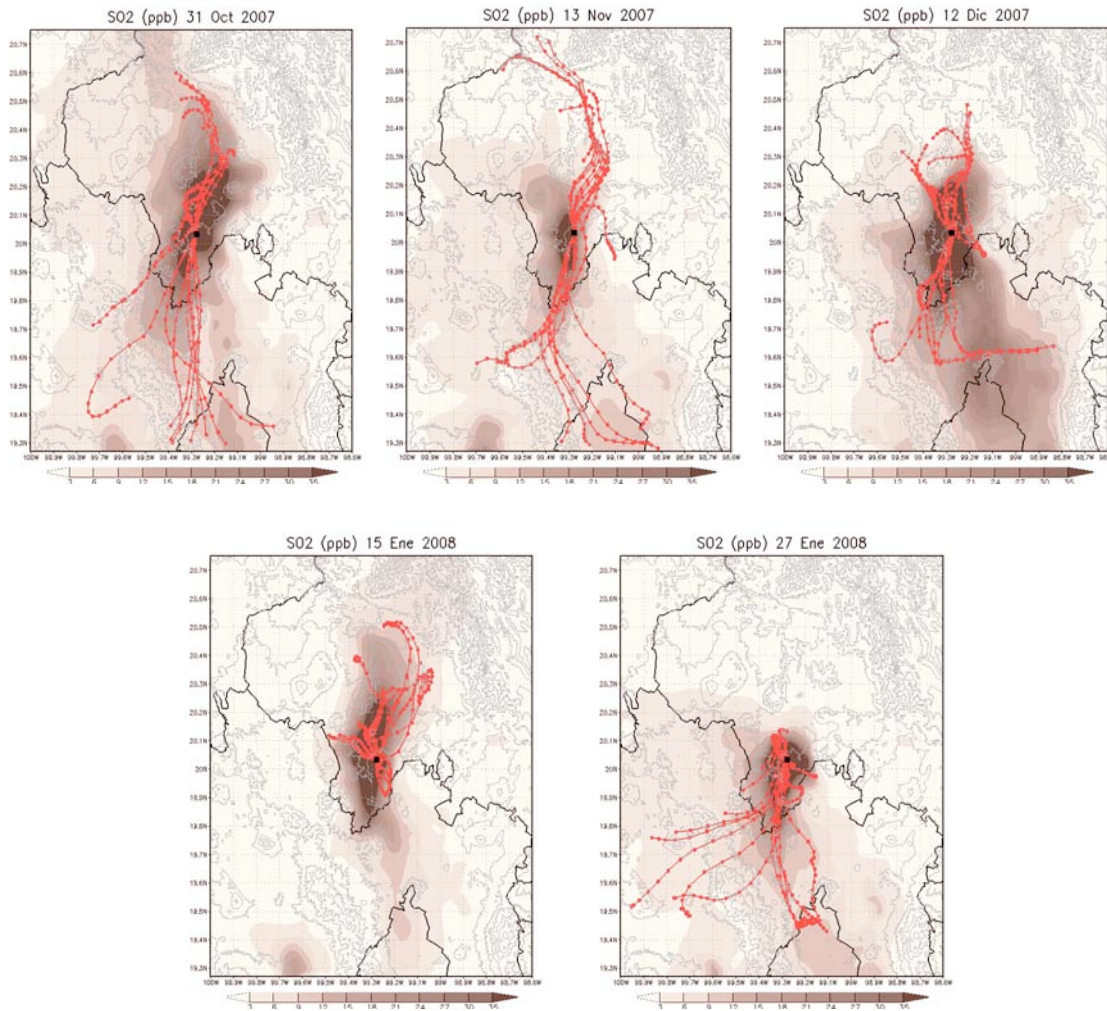


Figura 4.3 Concentraciones de SO₂ y trayectorias a futuro. Cada línea es la trayectoria a una hora y su longitud abarca 6 horas

En la Figura 4.4 se observan las diferencias en por ciento de las concentraciones de SO₂ para los diferentes episodios de concentraciones extraordinarias donde se observa el área de influencia de las emisiones de Tula.

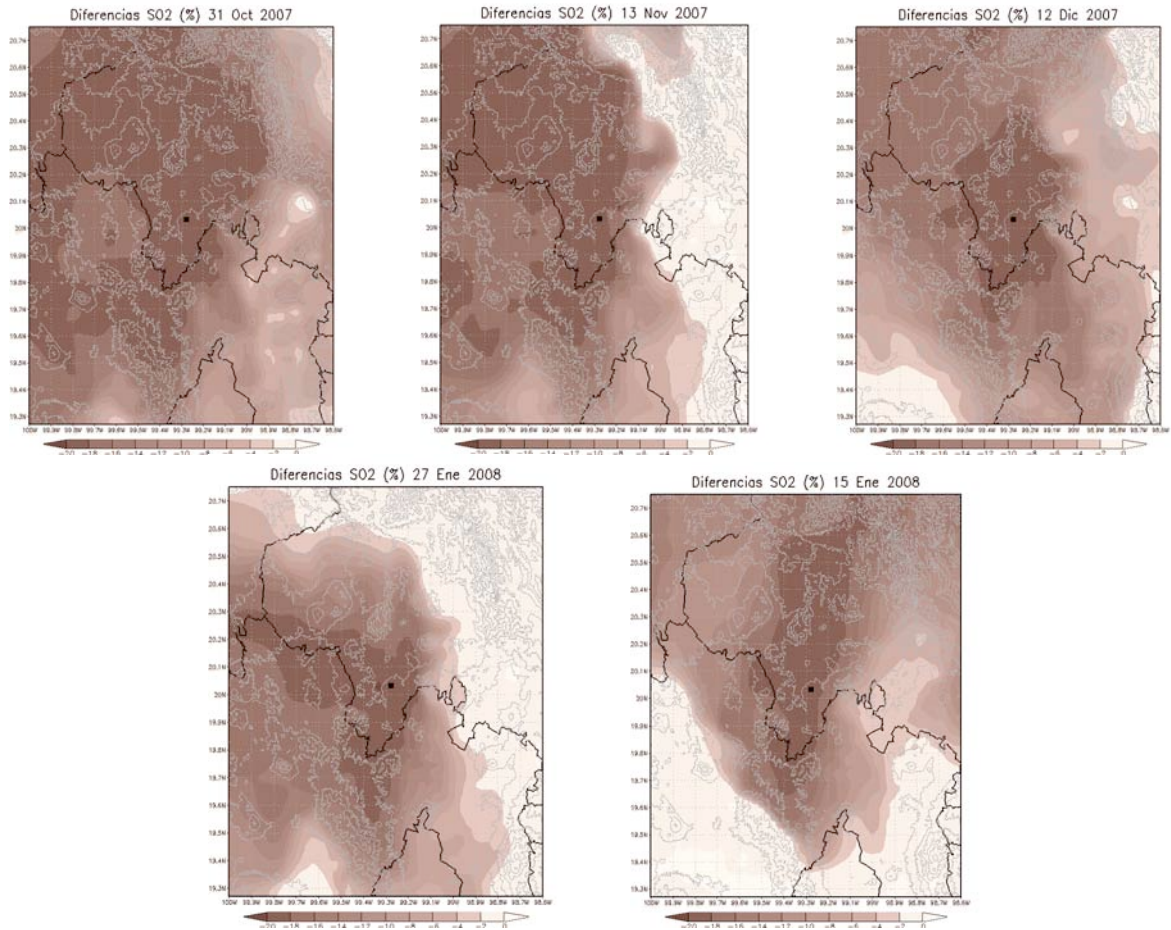


Figura 4.4 Diferencias en por ciento de las concentraciones de SO_2 .

Para la realización de las trayectorias se emplearon los niveles cercanos a la superficie y con éstos se observó el desplazamiento de la trayectoria hasta 6 horas.

De los resultados de la modelación de trayectorias se observa que en cuatro de los cinco episodios estudiados las emisiones de la región de Tula llegan alcanzar la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Para el caso del escenario de reducción se observa que las emisiones de Tula poseen una influencia importante en la región como se observa en la Figura 4.4.

Para hacer el análisis cuantitativo se vuelven a calcular las métricas estadísticas.

Tabla 4.4 Métricas de exposición, extensión y severidad para SO₂, para el caso base y control con una reducción del 20% .

FECHA	EXPOSICION		EXTENSION		SEVERIDAD	
	<i>BASE</i>	<i>CONTROL</i>	<i>BASE</i>	<i>CONTROL</i>	<i>BASE</i>	<i>CONTROL</i>
31 OCTUBRE 2007	0.00859	0.00797	67.759	50.5	5.492	3.949
13 NOVIEMBRE 2007	0.01075	0.01031	67.592	52.629	4.618	3.433
10 DICIEMBRE 2007	0.01253	0.01155	71.555	53.185	5.385	3.895
15 ENERO 2008	0.00878	0.00849	70.925	57.370	5.982	4.665
27 ENERO 2008	0.00920	0.00869	41.907	31.833	4.177	3.128

FUENTE: Elaboración propia

Se observa que hay una disminución del 19 hasta el 25% en la extensión, en severidad del 22 al 28% y en exposición potencial del 3 hasta el 7% de disminución en nuestro escenario de control, para las fechas de eventos extraordinarios, lo cual nos muestra que si hay un impacto la reducir en un 20% las emisiones.

En las métricas que se sobrepasa este 20% como en los casos de extensión y severidad que se alcanza hasta del 28%, se debe a un efecto de acumulación dentro de la región estudiada.

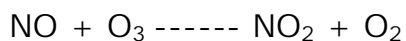
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se observa entonces que las emisiones del sector energético de Tula si influyen en la calidad del aire de la ZMVM.

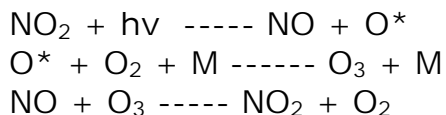
Los resultados de la reducción de 40% muestran beneficios para el SO₂ y lo contrario para O₃ lo cual es un efecto que hay que tomar en cuenta al considerar las medidas de reducción de emisiones.

Esto es debido a que los contaminantes primarios emitidos por las fuentes puntuales reducen la concentración de ozono sobre la ciudad, ya que el NO reacciona con O₃, convirtiéndose en NO₂ y O₂.

La reacción que ocurre cerca de la fuente es la siguiente:



Y las reacciones consecuentes serán:



Al reducir la emisión en un 40% de NO proveniente del sector energético de Tula el efecto que tiene en la región es un incremento de O₃.

Se observa en la Tabla 4.2 que el efecto de la reducción del 40% tiene un efecto para NO₂ del 1.47% de reducción en la exposición potencial, un aumento en O₃ del 0.63% en extensión y 1.46% en severidad, la reducción más significativa es la del SO₂ con una disminución en las tres métricas exposición, extensión, y severidad del 13%, 35% y 42% respectivamente.

En el análisis de los eventos extraordinarios con el escenario del 20% de reducción solo se comprobó que existe una influencia regional de las

emisiones de la industria en Tula y se observa una disminución significativa que va del de el 19 hasta el 25% en la extensión, en severidad del 22 al 28% y en exposición potencial del 3 hasta el 7% de disminución en nuestro escenario de control, para las fechas de eventos extraordinarios, lo cual nos muestra que si hay un impacto la reducir en un 20% las emisiones.

En las métricas que se sobrepasa este 20% como en los casos de extensión y severidad que se alcanza hasta del 28%, se debe a un efecto de acumulación dentro de la región estudiada.

Este proyecto se ha realizado en partes ya que en la primera etapa no se tenía información necesaria para conocer el nivel de reducción posible en la región y se tomo una reducción del 40% como primera aproximación, en la segunda etapa se contó con información de la capacidad de remoción en las plantas de recuperación de azufre y con esto se llego a conocer que una cantidad de reducción factible es del 20%, la cual se empleo para los eventos extraordinarios donde se observa el área de influencia y se ve el beneficio por la reducción de emisiones.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo alcanzo el objetivo principal de modelar la calidad del aire en la ZMVM y con esto se logró realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa de un escenario de control de emisiones.

El estudio se realizó sobre el complejo industrial de Tula Hidalgo y se enfoco principalmente sobre el dióxido de azufre, por ser este un contaminante criterio que se emite en abundancia durante los procesos de combustión.

Se usaron datos de una campaña realizada durante el mes de octubre del 2005, que es la más reciente la cual nos proporcionó la información necesaria de emisiones, que sirvió de base para que se utilizarán fechas recientes de eventos extraordinarios obtenidos de la Secretaria del Medio Ambiente.

Al disminuir en un 40% las emisiones de NO_x de las fuentes puntuales se genera un incremento importante en las concentraciones de O₃, así también se presenta una disminución de los óxidos de nitrógeno y apreciable reducción en el dióxido de azufre.

A partir de este trabajo se muestra que las emisiones del sector energético si influyen en la calidad del aire de la ZMVM.

Las emisiones de NO producidas por las fuentes puntuales reducen la concentración de ozono sobre la ciudad, sin embargo una reducción en las emisiones de NO inducen un incremento en las concentraciones de O₃.

La reducción de las emisiones del sector energético provoca una reducción en la concentración SO₂.

La influencia de estos contaminantes en la ZMVM se observa con los eventos extraordinarios, donde se muestran las trayectorias las cuales si afectan a la ZMVM y provienen del sector energético de Tula Hidalgo, en esa evaluación se analiza la influencia de las emisiones de la termoeléctrica empleando una reducción del 20% en las emisiones observándose que llega a influenciar también a el valle de Toluca el efecto del 20% de reducción sobre la ZMVM que también actúa sobre Toluca. Aunque en este trabajo no se tienen datos para dicha comparación pero seria un buen tema de investigación posterior.

Por tanto se recomienda que si se aplican medidas de reducción en las emisiones del sector energético también se considere reducciones en Cómputos Orgánicos volátiles en la región.

Así se concluye que la ciudad de México si recibe influencia de las emisiones del sector energético de Tula Hidalgo y se espera que esto derive en líneas de acción que faciliten la adecuada regulación y control de las fuentes de emisiones de contaminantes a la atmósfera, y se recomienda la modelación como herramienta auxiliar e indicativa para la toma de decisiones en beneficio del medio ambiente y de la salud de la población de la ciudad de México.

REFERENCIAS

Cabrera, F.C.: 2008, 'Evaluación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con la técnica espectroscópica DOAS Pasiva' Tesis de maestría. CCA. UNAM

Centro Mario Molina: 'Elaboración de políticas y estrategias para la comunicación, orientadas al mejoramiento en la calidad del aire en la ZMVM'.

CEPAL-SEMARNAT: 2004. 'Evaluación de externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México'.

Comisión para la cooperación ambiental de América del norte en Balance, emisiones y transferencias de contaminantes en América del norte 2002, mayo 2005 Canadá –pp-33-54

Diario Oficial de la Federación: Abril 2006, Norma Oficial Mexicana De Emergencia NOM-EM-148-SEMARNAT-2006, CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.- REFINERÍAS DE PETRÓLEO.- RECUPERACIÓN DE AZUFRE.

Dudhia, J.: 1993, 'A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an atlantic cyclone and cold front'. Mon. Wea. Rev. 121, 1492-1513.

Fuentes, V., A. Jazcilevich, R. Aguirre, A. Welens, J. Aysa, y C. Rivera: 1993, 'Modelo Metropolitano de Gestión de la Calidad del aire'. Repote Técnico, Dirección de Ecología, DDF. Informe Final.

García, R. J.: 2002. 'Evaluación de escenarios utilizando el modelo regional de calidad del aire Multiscale Climate Chemistry Model'. Tesis de doctorado. CCA. UNAM

García Reynoso, J.A, Espinoza Almeraya, M.L., y Anaya Gutierrez, S.R. Contenido de la Sala de Contaminación Atmosférica. (2005)

Georgopoulos, P.G. y S. Arunachalam: 1997, 'Alternative metrics for assessing the relative effectiveness of Nox and VOC emission reductions in controlling ground-level ozone'. J. Air Waste Management Assoc. 47, 383-850.

Grell, G.A., Emeis, S., Stockwell, W.R., Schoenemeyer, T., Forkel, R., Michalakes, J., Knoche, R., Seidl, W. 'Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign' (2000) Atmospheric Environment, 34 (9), pp. 1435-1453.

Middleton, P., W. Stockwell, y W.P.L.Carter: 1990, 'Aggregation and análisis of volatile organic compound emissions for regional modeling' Atmos Environ. 24^a, 1107-1133.

PROAIRE: 2002. 'Programa para mejorar la calidad del aire en la ZMVM, 2002-2010'. Cap.2.

Sarmiento, R. J.: 2002. 'Nuevas metodologías del inventario de emisiones modelación y resultados'. GDF-SMA

SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales). Disponible en: <http://portal.semarnat.gob.mx/SEMARNAT/portal>.

SEMARNAT-CEPAL:2004. 'Evaluación de externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México'.

SENER (Secretaría de Energía. 2005. 'Prospectiva del sector eléctrico 2005-2014'. Dirección General de Planeación Energética. México.

SENER y SEMARNAT (Secretaria de Energía y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. 'Programa de Energía y Medio Ambiente' : Hacia el Desarrollo Sustentable.

SMA-GDF: 2006. 'Informe Climatológico Ambiental del Valle de México'.

SMA-GDF:2004. 'Inventario de emisiones de la ZMVM, 2004'.

Stockwell, W., F. Kirchner, y M. Kuhn: 1997, 'A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling'. J. Geophys. Res. 102, 25,874-25,879

Turtos, C. L.:2004. 'Externalidades Ambientales Atmosféricas de la generación eléctrica'. Centro de gestión de la información y desarrollo de la energía.

Willmot, C.J.,S. Acklerson, R. E. Davis, J. J. Feddema, K. M. Klink, D. R. Legates, J. O' Donnell, y C.M. Rowe: 1985, 'Statics for the evaluation and comparison of models'. J. Geophys. Res. 90, 8995-9005

REFERENCIAS ELECTRONICAS

Conceptos

<http://atenea.udistritaledu.com/grupos.htm>

INEGI: 2000, Censo Estadístico de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <http://inegi.gob.mx>

Inventario de Emisiones de Hidalgo (2002). Disponible en: http://www.ine.gob.mx/dgicur/calaire/descargas/rt3_gob_edo_hgo.pdf

Lluvia acida, smog, ciclo combinado

<http://www.monografias.com/trabajo13>

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la ciudad de México disponible en: www.sma.df.gob.mx

U.S. Environmental Protection Agency disponible en: www.epa.gov

GLOSARIO

Broncoconstricción: Estrechamiento de las vías aéreas lo cual disminuye o bloquea el flujo de aire y es uno de los mecanismos que regula la ventilación pulmonar.

Calentamiento Global: Es el fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las ultimas décadas, debido a la emisión de gases asociada con la actividad humana.

Ciclo Combinado: Co-existencia de dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema, uno cuyo fluido de trabajo es vapor de agua y otro cuyo fluido de trabajo es un gas producto de una combustión.

Combustibles fósiles: Combustibles basados en carbono, como petróleo, carbón y gas natural.

Compuestos Orgánicos Volátiles: Sustancias químicas que contienen Carbono, hidrogeno, oxigeno, fluór, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. estos se convierten fácilmente en vapores o gases que son liberados a la atmósfera por la quema de combustibles como gasolina, madera, carbón o gas natural y por el uso de disolventes, algunos de ellos son naturales como el Isopreno, pineno, limoneno, y algunos artificiales como lo son el benceno, tolueno, nitrobenceno.

Son peligrosos contaminantes del aire, pues se mezclan con NO_x, para formar ozono y smog.

Contaminantes criterio: Son los principales contaminantes emitidos por el sector energético como son CO, NOx y SO₂, el O₃ troposférico, los compuestos orgánicos volátiles (COV), el plomo y el material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}.

Eutrofización: Contaminación atmosférica por óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SOx), estos reaccionan con el agua atmosférica para formar Ion nitrato (NO³⁻) e Ion sulfato (SO²⁻) que cuando alcanzan el suelo forman sales solubles. De esta manera se solubilizan los cationes del suelo, provocando el empobrecimiento de éste en nutrientes. Esas sales son arrastradas fácilmente a los acuíferos y a los ríos, contaminándolos.

Emisiones Antropogénicas: Son las emisiones de gases asociadas con la actividad humana debido a la quema de combustibles fósiles para la producción de energía y la quema de cobertura vegetal para fines agrícolas.

Emisiones Biogénicas: Emisión de contaminantes atmosféricos que no provienen de actividades humanas, sino de eventos naturales.

Lluvia ácida: Se forma cuando la humedad en el aire se combina con el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre emitidos por el sector industrial y vehículos para formar ácido sulfúrico y ácido nítrico.

Smog: Contaminación originada a partir de la combinación del aire con contaminantes determinados durante un largo periodo de altas presiones, que provocan el estancamiento de aire y, por tanto la permanencia de los contaminantes en las capas más bajas de la atmósfera, debido a su mayor densidad.