



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS**

Simulación Numérica de la Dispersión de Aerosoles  
Producidos por Incendios Forestales en el Área de  
Protección de Flora y Fauna La Primavera, Jalisco

Tesis que presenta

**Flor Silvestre Bautista Vicente**

Para obtener el grado de

**Maestra en Ciencias Aplicadas**

En la opción de

**Ciencias Ambientales**

Director de la Tesis:

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

San Luis Potosí, S.L.P., octubre de 2009



San Luis Potosí a 19 de octubre de 2009  
Constancia de aprobación de la tesis

La tesis **Simulación Numérica de la Dispersión de Aerosoles Producidos por Incendios Forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, Jalisco** presentada para obtener el Grado de Maestra en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales fue elaborada por Flor Silvestre Bautista Vicente y aprobada el 25 de octubre de 2009 por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

José Noel Carbajal Pérez

---

Dr. Nombre

María Cristina Noyolà Medrano

---

Dra. Nombre

Antonio Aragón Piña

---

Dr. Nombre



## Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Noel Carbajal Pérez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia Tecnología (211831) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. y de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 029 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 6 días del mes de noviembre del año 2009, se reunió a las 16:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

**Dr. Antonio Aragón Piña**

**Presidente**

**UASLP**

**Dra. María Cristina Noyola Medrano**

**Secretario**

**UGTO**

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

**Sinodal**

**IPICYT**

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS APLICADAS  
EN LA OPCIÓN DE CIENCIAS AMBIENTALES**

sustenta la C.

**Flor Silvestre Bautista Vicente**

sobre la Tesis intitulada:

*Simulación Numérica de la Dispersión de Aerosoles Producidos por Incendios Forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, Jalisco*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLA**

Dandose por terminado el acto a las 18:15 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 6 días del mes de noviembre de 2009.

**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento de Asuntos Escolares

**Dr. Marcial Bohua Marín**  
Secretario Académico



*A mi madre María A.  
Por su amor, apoyo y motivación en cada momento*

# Agradecimientos

*A Dios*

*Por darme la vida y la salud para desarrollar esta tesis.*

*A mi Madre y Hermanos*

*Por acompañarme en la distancia durante el desarrollo de este trabajo.*

*A mis asesores de tesis*

*Por sus ideas y aportaciones para llevar a buen término este trabajo.*

*A CONACYT*

*Por concederme la beca durante la realización de este trabajo.*

*A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y la División Académica de Ciencias Básicas por haberme otorgado la beca: Superación para Egresados.*

*Al Dr. Luis Felipe Pineda Martínez*

*Por su valioso apoyo y asesorías para desarrollar este trabajo.*

*Al Dr. José Alfredo Ramos Leal*

*Por brindarme su confianza para desarrollar esta tesis.*

*Al Ing. David Ernesto Torres Gaytan*

*Por su apoyo en las dificultades técnicas*

*A mis compañeras*

*Brisaida, M. Adriana y Lucy. Por brindarme su valiosa amistad.*

*A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo.*

# Contenido

LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XVI
1 INCENDIOS FORESTALES: UN PROBLEMA AMBIENTAL GLOBAL	1
1.1 Incendios Forestales en los Ecosistemas	1
1.2 Tipos de Incendios	1
1.3 Efectos Ambientales Locales	2
1.4 Efectos Ambientales, Regionales y Globales por Quema de Biomasa	3
1.5 Incendios Forestales en México	4
1.5.1 Características Geográficas de México y Tipos de Vegetación	4
1.5.2 Distribución Geográfica de Episodios de Incendios en México	6
1.5.3 Estadísticas de Incendios Forestales Ocurridos en México	7
1.5.4 El evento ENSO y su Influencia en la Ocurrencia de Incendios Forestales en México	10
1.5.5 ENSO y su Relación con los Incendios Forestales Ocurridos en México en el Periodo 1970-2007	11
1.6 Características de una Correcta Evaluación de Incendios Forestales	13
2 QUEMA DE BIOMASA: FUENTE DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	14
2.1 La atmósfera, su Estructura y Composición	14
2.1.2 Balance Energético, Superficie Terrestre-Atmósfera	15
2.2 Contaminación Atmosférica	18
2.2.1 Fuentes y Sumideros de Contaminación Atmosférica	18
2.2.2 Receptor	18
2.2.3 Transporte y Difusión	19
2.2.4 Escalas del Problema de Contaminación del Aire	20

2.3 Incendios Forestales como Fuentes de Contaminación Atmosférico	21
2.3.1 Alteración de los ciclos Geoquímicos Biosfera-Atmósfera	21
2.3.2 Cuantificación de Gases y Partículas	23
2.3.3 Cálculo de Gases y Partículas Emitidas a la Atmósfera	23
2.3.4 Calculo de Emisiones	24
2.4 Efectos Atmosféricos Debido a la Emisión de Gases Trazas por Quema de Biomasa	26
2.5 Planteamiento de la Propuesta de Investigación	30
2.5.1 Hipótesis	31
2.5.2 Justificación	31
2.5.3 Objetivo General	31
2.5.4 Objetivos Particulares	32
3 MODELADO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	33
3.1 Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera	33
3.2 Descripción del Modelo MM5	34
3.3 Características Principales del Modelo MM5	36
3.3.1 Anidamiento Múltiple	36
3.3.2 Modelo no Hidrostático	36
3.4 Parametrizaciones Físicas en el Modelo MM5	38
3.5 Descripción del Modelo MCCM	40
4 ÁREA DE ESTUDIO	43
4.1 Antecedentes	43
4.2 Ubicación Geográfica del APFFLP	43
4.3 Medio Físico	45
4.4 Clima	46
4.5 Suelo	47
4.6 Uso del Suelo	47
4.7 Geología	48
4.8 Hidrología	49

4.9 Flora	49
4.10 Vegetación	50
4.11 Fauna	54
4.12 Aves	55
4.13 Reptiles y Anfibios	55
4.14 Población	55
<b>5 MODELACIÓN NUMÉRICA DE AEROSOLAS PRODUCIDOS POR INCENDIOS FORESTALES, CASO DE ESTUDIO</b>	<b>57</b>
5.1 Incendios Forestales en el Bosque La Primavera	57
5.2 Efecto de El Niño-La Niña en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera	58
5.3 Impacto del Fuego en el Combustible del Bosque La Primavera	58
5.4 Evaluación de Zonas de Riesgo de Incendios Forestales en el APPFFLP	59
5.5 Estudio de la Dispersión de los Aerosoles Producidos por los Incendios Forestales, Caso de Estudio 25 y 26 de Abril de 2005	62
5.5.1 Descripción del Evento	62
5.5.2 Cálculo de la Carga de Biomasa Quemada en el APFFLP el 25 y 26 de Abril de 2005	64
5.5.3 Cuantificación de la cantidad de carbón liberado a la atmósfera el 25 y 26 de abril de 2005	65
5.5.4 Cálculo de la cantidad de CO <sub>2</sub> liberado a la atmósfera el 25 y 26 de abril de 2005	66
5.5.5 Cálculo de la Cantidad de NO <sub>2</sub> Emitido a la Atmósfera el 25 y 26 de Abril de 2005	66
5.6 Metodología de la Modelación Numérica	67
5.6.1 Creación del Terreno del Dominio Estudio	67
5.6.2 Transformación de Datos de Presión a Coordenadas Sigma	70
5.6.3 Ejecución del Sistema MM5	70
5.7 Modelación del Transporte de Contaminantes Usando el Modelo MCCM	71
<b>6 RESULTADO Y DISCUSIÓN</b>	<b>73</b>
6.1 Validación de Resultados	73
6.1.2 Validación de Resultados para la Temperatura del 24/04/05 al 27/04/05	73

6.1.3 Validación de Resultados de la Humedad Relativa del 24/04/05 al 27/04/05	75
6.1.4 Validación de Resultados de la Velocidad del Viento del 24/04/05 al 27/04/05	76
6.1.5 Validación de la Dirección del Viento del 24/04/05 al 27/04/05	78
6.2 Análisis de Datos de Superficie Calculados con el Modelo MM5	79
6.2.1 Resultados Meteorológicos para el Día 24 de abril de 2005	79
6.2.2 Resultados Meteorológicos para el Día 25 de abril de 2005	81
6.2.3 Resultados Meteorológicos para el Día 26 de abril de 2005	82
6.2.4 Resultados Meteorológicos para el Día 27 de abril de 2005	83
6.3.1 Humedad Relativa para el Día 24 de abril de 2005	85
6.3.2 Humedad Relativa para el Día 25 de abril de 2005	86
6.3.3 Humedad Relativa para el Día 26 de abril de 2005	87
6.3.4 Humedad Relativa para el Día 27 de abril de 2005	88
6.4 Resultados de la Dispersión de Aerosoles	89
6.4.1 Dispersión del Monóxido de Carbono	90
6.4.2 Dispersión del NO <sub>2</sub>	90
6.4.3 Dispersión de dióxido de Azufre	91
6.4.4 Dispersión de Material particulado, PM10	92
6.4.5 Validación de la Modelación de la Pluma de Contaminantes	93
6.5 Contaminación Atmosférica Sobre la Zona Metropolitana de Guadalajara del 24 al 28 de abril de 2005	94
6.5.1 Niveles de Contaminación Sobre la Zona Metropolitana de Guadalajara	95
6.5.2 Comparación de Datos Observados con Datos Calculados con el MCCM	97
7 CONCLUSIONES	103
REFERENCIAS	107
ANEXO I	114

## Lista de Tablas

Tabla 2.1. Composición del aire seco a nivel del mar.	15
Tabla 2.2. Factores de emisión.	24
Tabla 2.3. Proporción de emisión para incendios forestales en bosque tropical.	26
Tabla 4.1. Porcentaje de área del bosque la primavera.	44
Tabla 4.2. Porcentaje de ocupación de uso de suelo.	48
Tabla 4.3. Variación en altitud de las especies del bosque de encino-pino.	51
Tabla 4.4. Censo Poblacional 2000 .	56

# Lista de Figuras

Figura 1.1. Distribución geográfica de áreas afectadas por quema de biomasa.	3
Figura 1.2. Principales Grupos de Vegetación en México.	5
Figura 1.3. Distribución geográfica de incendios ocurridos en México entre 1999 y 2007.	7
Figura 1.4. Correlación de áreas afectas y número de incendios ocurridos en México durante el periodo 1970-2005.	8
Figura 1.5. Número de incendios forestales por estado a) y áreas afectadas b).	9
Figura 1.6. Incendios en años El Niño (a) e Incendios en años La Niña (b).	12
Figura 2.1. Distribución espacial y temporal de procesos atmosféricos.	21
Figura 2.2. Bosquejo para cuantificar los contaminantes emitidos por incendios.	23
Figura 2.3. Imagen de satélite. Imagen microscópica del hollín y partículas sulfatadas.	28
Figura 2.4. Gotas de agua y carbón negro formando una nube. Partículas de carbón negro y gotas de agua.	29
Figura 2.5. Partículas ricas en carbón y morfología hexagonal y pentagonal(a). Partículas de carbón con forma esferoidal procedentes de la quema de residuos de cultivo de caña (b).	30
Figura 3.1. Esquema que resume el sistema de módulos que integran a MM5.	35
Figura 3.2. Niveles de coordenadas sigma a) y malla anidada b).	37
Figura 3.3. Descripción esquemática del modelo MCCM.	41
Figura 4.1. Modelo digital de elevación de APFFLP.	44
Figura 4.3. Clasificación de vegetación dentro del dominio de estudio y Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera realizada a partir de una imagen Landsat TM del 8 de mayo del 2001.	54
Figura 5.1. Incendios forestales ocurridos en el APFFLP.	57
Figura 5.2. Número de incendios en años El Niño a) y La Niña b).	58
Figura 5.3. Índice de vegetación para el APFFLP calculado a partir de una imagen Landsat TM del 22 de abril del 2003.	60

Figura 5.4. Posiciones de incendios forestales ocurridos durante el periodo 2000-2007 en el dominio de estudio de D3 y Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP).	61
Figura 5.5. Incendio del 25 y 26 abril de 2005.	64
Figura 5.6. Arriba a la izquierda se indican los dominios anidados. A la derecha, la malla y uso de suelo del dominio D3. A la izquierda inferior se muestra la topografía del dominio D3.	69
Figura 5.7. Modelo digital del dominio D3 y posición de los puntos de calor en el APFFLP.	72
Figura 6.1. Comparación de temperatura modelada y observada.	73
Figura 6.2. Humedad relativa, calculada y observada, en las estaciones meteorológicas Los Colomos, Jocotepec y Chapala.	75
Figura 6.3. Velocidad de viento en las tres estaciones meteorológicas, ubicadas dentro del dominio de estudio D3.	77
Figura 6.4. Rosa de viento para cada estación del dominio de estudio D3.	78
Figura: 6.5. Temperatura, isobaras y vectores de viento para el 24 de abril de 2005.	80
Figura 6.6. Temperatura, líneas de presión y vectores de viento para el 25 de abril de 2005.	81
Figura. 6.7. Distribución de temperatura, presión y viento para el 26 de abril de 2005	82
Figura 6.8. Distribución de temperatura, presión y viento para el 27 de abril de 2005.	84
Figura 6.9. Distribución de humedad relativa y viento para el 24 de abril de 2005.	85
Figura 6.10. Distribución de humedad relativa y viento para el 25 de abril de 2005.	86
Figura 6.11. Distribución de humedad relativa y viento para el 26 de abril de 2005.	87
Figura 6.12. Distribución de humedad relativa y viento para el 27 de abril de 2005.	88
Figura 6.13. Pluma de dispersión de CO emitida por incendios forestales en el APFFLP.	90

Figura 6.14. Dispersión de la pluma de NO <sub>2</sub> .	91
Figura 6.15. Dispersión del SO <sub>2</sub> .	92
Figura 6.16. Dispersión de la pluma de material particulado, PM <sub>10</sub> .	93
Figura 6.17. Imagen de satélite Aqua, muestra la dispersión del humo del incendio ocurrido el 26 de abril de 2005 en el APFFLP.	94
Figura 6.18. Dominio D3 y posición de las estaciones de la red de monitoreo atmosférico en la Zona Metropolitana de Guadalajara Jalisco, México.	95
Figura 6.19. Comportamiento del CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , y PM <sub>10</sub> en las 7 estaciones de monitoreo de la ZMG.	96
Figura 6.20. Variación del O <sub>3</sub> en las 7 estaciones de monitoreo de la ZMG.	97
Figura 6.21. Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de concentración de óxidos de nitrógeno.	98
Figura 6.22. Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de concentración de monóxido de carbono.	99
Figura 6.23. Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de concentración de ozono troposférico.	100
Figura 6.24. Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de PM <sub>10</sub> .	101

## Resumen

Los incendios forestales son un problema ambiental global que afecta los ecosistemas forestales del planeta. La quema de biomasa ocasiona daños en la vegetación, pérdida de especies animales, pérdida de cobertura de suelo e influye en la calidad del aire. La quema de biomasa altera los ciclos geoquímicos que existen de manera natural en la atmósfera debido a la emisión de aerosoles que se generan durante los incendios forestales. Los elementos que más predominan durante la quema son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) el monóxido de carbono (CO) el nitrógeno y pequeñas cantidades de dióxido de sulfuro y partículas PM10 y PM2.5. Estos elementos favorecen la formación de niebla toxica que afecta la salud de las personas. Estas nieblas tóxicas o plumas son dispersadas por la circulación atmosférica, pueden alcanzar grandes distancias y afectar grandes regiones. En la Republica Mexicana, los episodios de incendios se han incrementado en los últimos 13 años, llegándose a registrar hasta 15,000 incendios por año y áreas afectadas de hasta 800,000 ha. Estos episodios se concentran principalmente en la Sierra Madre Oriental y al Sur de México. La mayoría de los incendios son inducidos por actividades antropogénicas y favorecidos por eventos climáticos como El Niño. Un ecosistema con incendios recurrentes es el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) en Jalisco. Un promedio anual de 29 incendios ocurren en el APFFLP. Durante el año 2005, este ecosistema fue impactado por 89 incendios de acuerdo con los datos registrados por el Programa de Monitoreo de Incendios Forestales a cargo de la CONABIO. El evento más devastador que ha sufrido el APFFLP sucedió entre el 25 y 26 de abril de 2005, donde un área de 8478 ha fue devastada por el fuego. Para evaluar la dispersión de los aerosoles emitidos, se aplicó el Modelo de Mesoescala de Quinta Generación (MM5), desarrollado por el Nacional Center for Atmospheric Research (NCAR) y la Universidad de Pensilvania (USA), y el Modelo Químico y Climático de Mesoescala (MCCM), desarrollado por el Instituto Fraunhofer (Alemania). Los resultados de las modelaciones mostraron que los contaminantes liberados a la atmósfera se dispersaron sobre la zona urbana de

Guadalajara ocasionando altas concentraciones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{CO}$ , estos elementos son gases que favorecen el efecto invernadero. La comparación entre valores modelados y observados reveló un grado de correlación aceptable. La forma de la pluma modelada concuerda muy bien con la observada en una imagen de satélite. La modelación reprodujo los picos de concentraciones de varias sustancias observadas en diferentes estaciones meteorológicas. La modelación numérica de la evolución de la pluma de aerosoles permitió conocer las concentraciones de los contaminantes en las regiones afectadas. La metodología empleada en este trabajo, junto con la aplicación de los modelos MM5 y MCCM puede ser aplicada a cualquier área de interés para evaluar los efectos de los incendios forestales sobre la calidad del aire en zonas urbanas y rurales.

## Abstract

Forest fires are a global environmental problem that affects many ecosystems in the world. The corresponding burning of biomass causes large vegetation damages, the lost of animal species, land use changes and affect the air quality. The biomass burning alters the natural geochemical cycles in the atmosphere due to the emissions of aerosols generated during the forest fires. The principal substances emitted during the biomass burning are: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), NO<sub>x</sub> and small quantities of sulphur dioxide and particulate matter PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>. These chemical substances and other favor the formation of toxic fogs that affect the health of inhabitants. These toxic fogs or plumes are dispersed by the atmospheric circulation and can reach large distances and affect big regions. In Mexico, the number of forest fires increased in the last 13 years, reaching a rate of 15000 fires a year and affecting an area of about 800000 hectares. These fires occur principally in the Mountain Range Eastern Mother and to the South of Mexico. Most of the fires are produced by anthropogenic activities and are favored by climatic events like El Niño phenomenon. An ecosystem underlying recurrently a large number of forest fires is the Protected Area of Flora and Fauna La Primavera (Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera) (APFFLP) in the state of Jalisco, Mexico. In averaged, 29 forest fires occur in the APFFLP, but during the year 2005, 89 fires impacted the ecosystem according to data records of the Monitoring Program of Forest Fires of CONABIO (National Commission for the Knowledge and Use of the Biodiversity). The most outstanding event occurred in the APFFLP happened on April 25 and 26 of 2005 when an area of 8478 hectares was devastated by forest fires. To evaluate the dispersion of the emitted aerosols, the models MM5 (Mesoscale Model of fifth Generation), developed by the National Center for Atmospheric Research and the University of Pennsylvania, and MCCM (Mesoscale Climatic and Chemistry Model) developed by the Institute Fraunhofer (Germany), were applied. The results of the numerical

experiments showed that the emitted contaminants were transported to the urban area of the city of Guadalajara causing high concentration of CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and CO. These substances favor the green house effect. The comparison among calculated and observed values of concentrations revealed an acceptable degree of correlation. The form of the modeled plume agrees well with what was observed on a satellite image. The numerical experiments reproduced well high concentration values observed at different meteorological stations. The numerical modeling of the plume allowed knowing the concentration of the contaminants in the affected regions. The applied methodology, including the numerical models MM5 and MCCM, can be extended to investigate other areas where forest fires affect significantly the air quality of urban and land zones.

# 1 Incendios forestales: Un problema Ambiental Global

## 1.1 Incendios Forestales en los Ecosistemas

El papel ecológico del fuego influye en varios factores como; el desarrollo de comunidades de plantas, disponibilidad de nutrientes en el suelo y la diversidad biológica. En los bosques y tierras silvestres, el fuego es un proceso vital y natural que inicia ciclos naturales de sucesión de vegetación y mantiene la viabilidad del ecosistema (Cochrane, 2003, Carl, 1996 y Alan 2003).

Es frecuente que los efectos positivos del fuego sean menos apreciados. En este sentido, los incendios son un fenómeno importante en la dinámica de la mayor parte de los ecosistemas (Peter, 1998). Sin embargo, el empleo del fuego como instrumento en la organización de las tierras y sus recursos, es esencial en la cultura y tradiciones de muchas sociedades. La población utiliza el fuego como parte de sus prácticas agrícolas, tanto para incrementar la producción como para abrir nuevas tierras para los asentamientos y cultivos en respuesta al continuo crecimiento demográfico de esas zonas (Cochrane, 2001 y Heidi, 1998). El uso del fuego en prácticas agrícolas y cambio de usos de suelo ha ocasionado que los incendios forestales sean un problema ambiental global. A nivel mundial el 90% de los incendios que ocurren son de origen antropogénico, mientras que el 10% se debe a procesos naturales (Levine, 1991).

## 1.2 Tipos de Incendios

Cuando el suelo está cubierto de una capa gruesa de materia orgánica acumulada, ésta puede encenderse y quemarse durante periodos largos. Esto puede suceder inclusive cuando el material esté húmedo, debido a que la parte delantera de la oxidación activa avanza lentamente y el calor seca a un ritmo igual los restos adyacentes del material no quemado, manteniendo una zona de combustible. A este tipo de combustión, sin llamas y subterráneas se

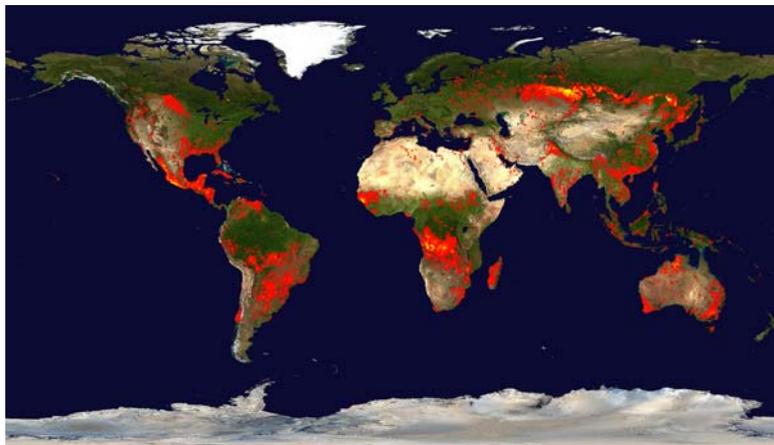
denominan *incendios subterráneos*. Este tipo de incendios matan a casi todas las plantas que se encuentran arraigadas en el material que se está quemando, las plantas leñosas viejas pueden sobrevivir si sus raíces largas poseen una corteza gruesa y han descendido a mayor profundidad que la materia orgánica. Con frecuencia, el fuego barre la superficie del suelo rápidamente, las llamas consumen el mantillo, las hierbas, los arbustos y abrazan las bases de todos los árboles que encuentran a su paso. A este tipo de combustión se le llama *incendio superficial*. En la vegetación leñosa y densa, el fuego puede pasar de la copa de una planta a otra. A dicho fuego, se le denomina *incendio de las copas*. Cuando las condiciones de la combustión cambian, algunos de los tipos de incendios anteriormente mencionados, pueden cambiar de un tipo a otro. Los incendios subterráneos pueden arder durante varios días antes que el viento convierta el material incandescente en llamas activas y ocurra un incendio superficial o de las copas. Los efectos inmediatos de los incendios que matan las plantas leñosas y reducen el mantillo a cenizas son muy obvios. En cambio, los efectos indirectos por la quema de vegetación no son tan evidentes y por eso no se les prestaba atención (Daubenmire, 2000).

### 1.3 Efectos Ambientales Locales

Los incendios no controlados tienen efectos a escala local. En relación a la fauna, los reptiles y los batracios son los más susceptibles a ser muertos por las llamas, dada su menor movilidad (Villers y López, 2004). En cuanto a los mamíferos, ellos escapan con mayor facilidad del fuego, pero mueren posteriormente por el hambre o la depredación si no encuentran refugios o establecen un nuevo territorio (Cochrane, 2003). En cuanto a la composición y estructura de las regiones afectadas, 15 años después de la quema, los bosques no muestran evidencias de recuperación de las especies perdidas (Carl, 1996). El suelo de la superficie quemada tarda su regeneración debido al nacimiento de pequeñas plantas (Cochrane, 2003).

La intensidad y severidad de los incendios varían de acuerdo al tipo de vegetación y tipo de ecosistema. Levine *et al* (1991) reporta que la biomasa

que más se quema son: bosques de sabanas, bosques tropicales, bosques templados, bosques boreales y biomasa de terrenos de uso agrícola. En términos globales, los incendios forestales ocurren principalmente en los trópicos, la mayoría ocurre en los bosques del sur de América, México, Sureste de Asia, en las sabanas de África, en los bosques boreales de Rusia, Canadá y Alaska (Levine, 1991 y Crutzen, 2001). Los países más afectados se muestran en la **Figura 1.1**.



**Figura 1.1.** Distribución geográfica de áreas afectadas por quema de biomasa. Disponible en: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/?2006131-2006140>.

#### 1.4 Efectos Ambientales, Regionales y Globales por Quema de Biomasa

Los incendios forestales o quema de biomasa representan una fuente importante de aerosoles atmosféricos y gases de efecto invernadero (Vander Werf, 2006 y Levine, 1994). La emisión de gases y partículas generadas en la quema de biomasa dependen de la naturaleza de la vegetación quemada y ésta, a su vez, está en función del ecosistema y de la temperatura a la cual se realice la combustión. En una combustión completa, la biomasa quemada produce principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y vapor de agua. El efecto de los incendios, además de los ya mencionados, también se refleja en el sistema socioeconómico de los países afectados. Por ejemplo, una estimación realizada en 1998, por la Economía y Programa de Ambiente para el Sudeste

de Asia (EEPSEA/WWF, 1998b) indica que el costo de daños provenientes de los incendios ocurridos en 1997 en el sudeste asiático, asciende a más de 4 mil millones de dólares.

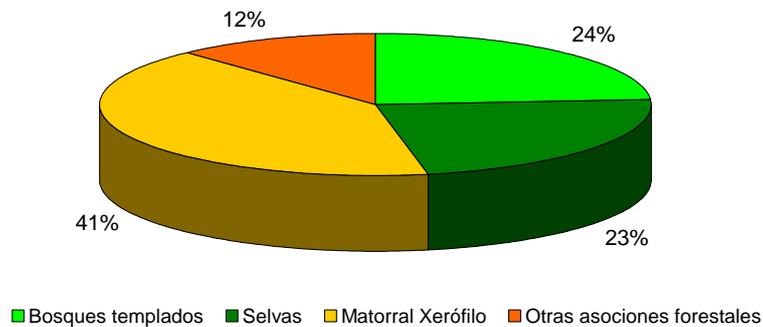
## 1.5 Incendios Forestales en México

### 1.5.1 Características Geográficas de México y Tipos de Vegetación

La ubicación y la forma del territorio de la República Mexicana revisten características notables. Sus dos millones de km<sup>2</sup> de extensión se hallan más o menos equitativamente distribuidos en ambos lados del Trópico de Cáncer y sus extremos meridional y boreal alcanzan el paralelo 14° 30' N y 32° 42'N, respectivamente. Su forma peculiar es el resultado del estrechamiento que con dirección sur sufre Norteamérica, de la torsión hacia el sureste que se manifiesta en esta masa continental a partir del paralelo 20°, y de la existencia de dos penínsulas sobresalientes: Baja California y Yucatán. La irregularidad del contorno del país se refleja en la extraordinaria longitud de sus límites que alcanza aproximadamente 13000 km. Cerca de las 3/4 partes de estos límites corresponden al litoral marino. La corteza terrestre que corresponde al territorio mexicano se encuentra entre las más accidentadas de la Tierra. Menos de 35% de la superficie del país tiene una altitud inferior a 500m y más de la mitad del territorio se encuentra a alturas mayores de 1000 metros sobre el nivel del mar. Las elevaciones máximas que sobrepasan la cota de 4000m se alinean, en su mayoría, a lo largo del paralelo 19° N aproximadamente. La cumbre más alta es el Pico de Orizaba que alcanza 5653 metros sobre el nivel medio del mar (Rzedowski,1981).

La cobertura vegetal en el territorio mexicano, se compone por una cobertura vegetal muy variada, ocupando una superficie de alrededor de 140 millones de hectáreas (Mha), equivalente al 73% de la superficie nacional. Las coberturas vegetales con mayor distribución en México son el matorral xerófilo con 41%, el bosque templado con 24% y la selva con 23% (PI-CONAFOR, 2008) y (Rzedowski, 1981, ver **Figura 1.2**). Los ecosistemas forestales, además de ser

el hábitat de una importante diversidad biológica, proporcionan servicios ambientales como la regulación del ciclo hidrológico, captura y almacenamiento de agua, captura del bióxido de carbono; regeneración de la fertilidad del suelo, la producción y mantenimiento de la biodiversidad.



**Figura 1.2.** Principales Grupos de Vegetación en México (datos: IP-CONAFOR, 2008).

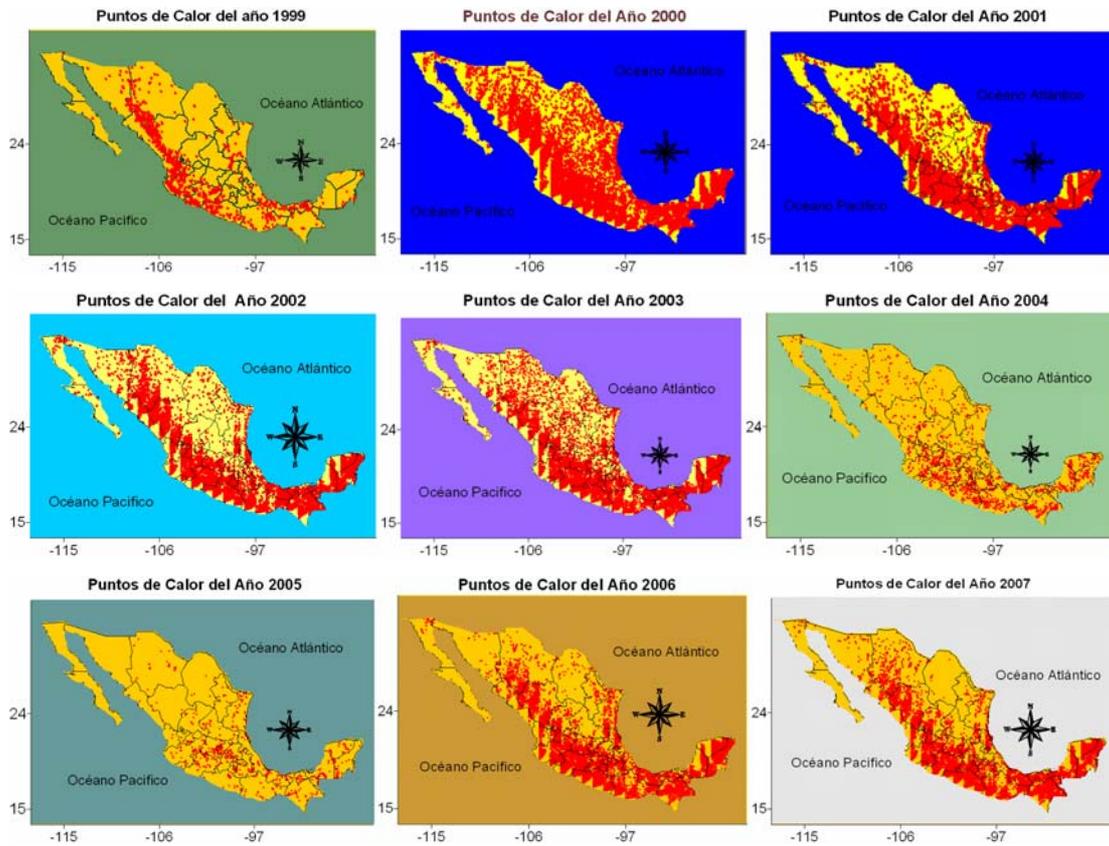
Históricamente en México, la superficie ocupada por los ecosistemas terrestres naturales ha presentado grandes cambios en su distribución original debido a los procesos de expansión de otros usos de suelo que se han registrado en el país con el fin de aprovechar sus recursos naturales y utilizar las superficies para desarrollar otras actividades productivas, principalmente agricultura y ganadería. La pérdida de bosque y selvas ha sido en promedio de 341 mil hectáreas por año (PI-CONAFOR, 2008). En el contexto de pérdida de bosques en México, una de las causas que han originado pérdida de cobertura vegetal, son los incendios forestales. Para contrarrestar sus efectos nocivos, algunas dependencias de gobierno como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y La Comisión Nacional para Uso y Conservación de la Biodiversidad (CONABIO) han implementado estrategias de control y monitoreo de los incendios que ocurren en el territorio mexicano. Dentro de las medidas de prevención destacan las quemas controladas, aunque su aplicación sigue siendo muy limitada, debido a la falta de documentación de los efectos ambientales que producen los incendios forestales (Villers y López, 2004). El monitoreo de incendios se realiza a través del programa de registro de

incendios forestales, a cargo de la CONABIO. El programa de monitoreo inició en el año 1999, aprovechando las trayectorias que realiza sobre nuestro país el sensor MODIS abordo del satélite AVHRR (Advanced very high Resolution Radiometer). El programa de monitoreo consiste en registrar la ubicación de las zonas que presentan incendios. La temporada de Incendios comienza en enero y continua hasta mayo o junio, aunque en algunos años puede iniciarse desde noviembre (Villers y López, 2004).

### 1.5.2 Distribución Geográfica de Episodios de Incendios en México

Con el programa de monitoreo es posible obtener información de las regiones afectadas por incendios forestales en México. **La Figura 1.3**, muestra la distribución geográfica de sucesos de incendios en México durante el periodo 1999-2007. Los mapas se elaboraron con datos proporcionados por la CONABIO. Obsérvese, que la mayor densidad de incendios ocurre sobre la Sierra Madre Oriental y al Sur de la República Mexicana. También es posible observar que la cantidad de incendios no es constante, pues hay años con una gran cantidad de incendios y otros, en donde los incendios son escasos. Por ejemplo, vemos que para el año 2000 hubo una alta incidencia de incendios forestales en toda la República Mexicana en comparación con los demás años. El registro e incidencia de incendios forestales se debe a varios factores:

- a) A veces no se logra el registro de los incendios por el satélite debido a condiciones atmosféricas (Cochrane, 2002).
- b) La detección de incendios depende del número de trayectorias que el satélite realice sobre nuestro país. De esta forma no se registran algunos incendios que pudieran ocurrir antes o después de la trayectoria realizada por el satélite.
- c) El combustible forestal disminuye o aumenta en algunos años.
- d) El incremento de incendios forestales en algunos años se debe a la variabilidad climática conocido como Oscilación Sur El NIÑO-La NIÑA.

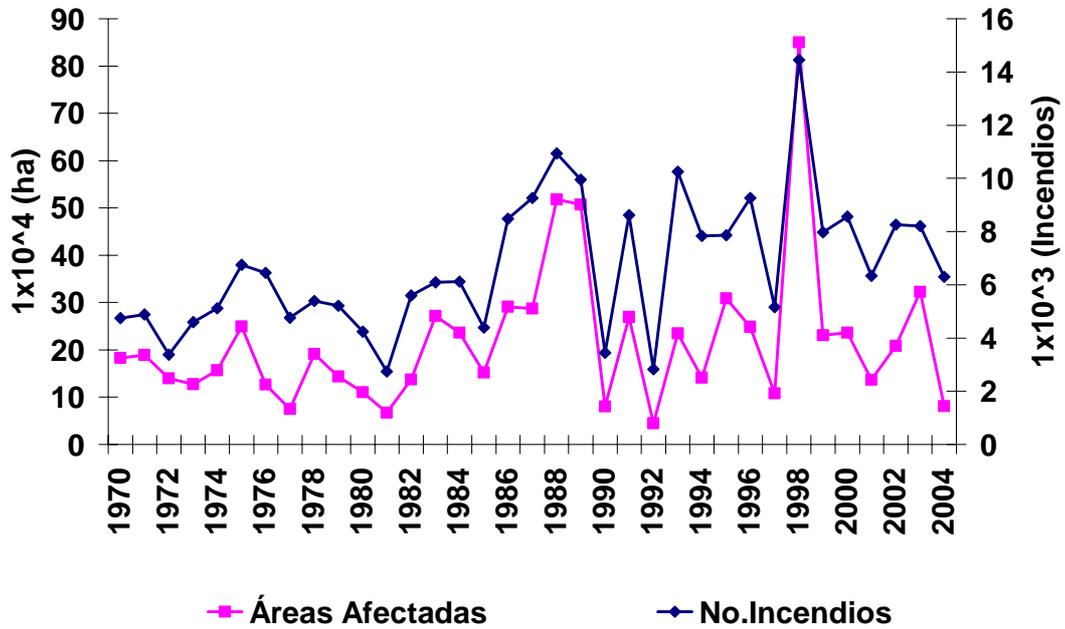


**Figura 1.3.** Distribución geográfica de incendios ocurridos en México entre 1999 y 2007. Datos: CONABIO.

### 1.5.3 Estadísticas de Incendios Forestales Ocurridos en México

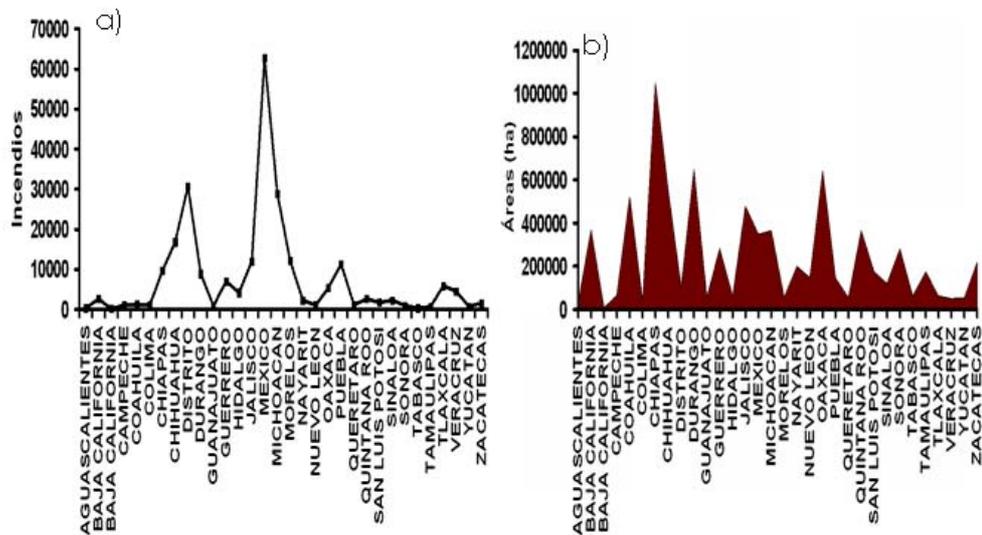
En la **Figura 1.4** se presenta un análisis estadístico de los datos sobre incendios forestales ocurridos durante el periodo 1970-2005 en México. Se observa el incremento anual del número de incendios y áreas afectadas (datos: SHI-CONAFOR, 2007). El coeficiente de correlación entre el número de incendios y áreas afectadas es  $0.84$ . La tendencia de aumento de incendios forestales así como el aumento de áreas afectadas se distingue claramente en la **Figura 1.4**. En caso de continuar el aumento de incendios forestales, se tendrá un incremento en los efectos ambientales que estos eventos generan en la vegetación. De igual manera, se incrementarán los efectos indirectos debido a las emisiones de gases y partículas a la atmósfera, contribuyendo con esto a

la disminución de la calidad del aire en zonas urbanas y rurales cercanas a zonas forestales con problemas de incendios forestales recurrentes.



**Figura 1.4.** Correlación de áreas afectadas y número de incendios ocurridos en México durante el periodo 1970-2005.

Siguiendo con el análisis de los datos, en la **Figura 1.5a** observamos los estados de la República Mexicana con mayor número de incendios durante el periodo analizado. En primer lugar está el Estado de México con 62729 incendios forestales durante los 35 años que se analizaron, en segundo lugar, el Distrito Federal con 30771 incendios, un tercer lugar es para el estado de Chihuahua con 16857 incendios y en cuarto lugar los estados de Jalisco y Nayarit con 12066 y 12162 incendios respectivamente.



**Figura 1.5.** Número de incendios forestales por estado a) y áreas afectadas b).

Se comentó anteriormente que el mayor número de incendios forestales han ocurrido en el estado de México. Sin embargo, en la **Figura 1.5b** observamos que el mayor número de áreas afectadas ocurren en los estados de Chiapas, Durango, Oaxaca y Jalisco. Lo anterior se explica de acuerdo a lo siguiente: aunque hay más incendios en el Estado de México esto se debe a que es un estado con menor cantidad de vegetación comparado con los demás estados donde hay más áreas afectadas. Otra razón puede ser que los incendios ocurridos en el estado de México se deben a la quema de residuos agrícolas pudiendo ser incendios controlados, que no por eso dejan de ser fuentes de contaminación de la atmósfera. Por otra parte, en los estados donde hay menos incendios y más áreas afectadas, son estados que se ubican en las Sierra Madre Occidental y Oriental y en el Eje Neovolcánico (véase la **Figura 1.3**) donde los incendios suelen ocurrir en lugares no accesibles para su combate, por lo que consumen más áreas. Además, hay que tomar en cuenta que en la mayoría de los estados de la República, la quema de residuos agrícolas es una práctica común. El tratamiento de las tierras de uso agrícolas se realiza muchas veces sin tomar las medidas de control del fuego necesarias y sin considerar las condiciones climáticas al momento de realizar las quemas (Villers y López, 2004).

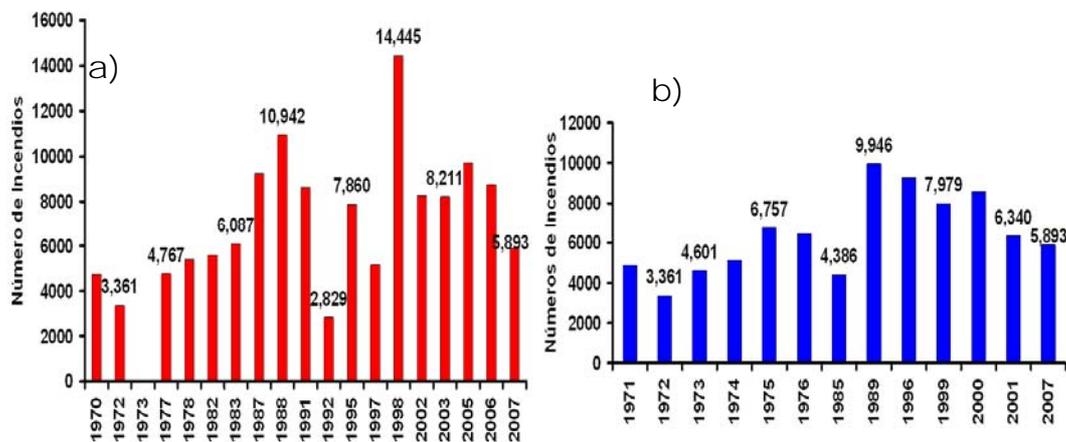
#### 1.5.4 El evento ENSO y su Influencia en la Ocurrencia de Incendios Forestales en México

El evento de Oscilación Sur El Niño se asocia a una alteración de movimientos atmosféricos que abarcan amplias zonas del planeta, causando, por ejemplo, la ruptura de los vientos alisios del sureste que son reemplazados por un régimen de vientos del oeste. Estos, a su vez tienden a conducir el agua cálida de la superficie oceánica hacia el este del pacífico tropical. Esta situación provoca inundaciones en el noroeste de América del Sur y sequías en muchas zonas de Australia. En otras partes también se tienen pequeños aunque significativos efectos. Cuando sucede el fenómeno inverso, es conocido como La Niña (Bruce y otros, 2004). En conjunto El Niño-La Niña, se les denomina ENSO (El Niño Southern Oscillation). En Términos generales, El Niño se asocia a altas temperaturas en la parte oriental del Océano Pacífico y La Niña, se asocia a relativamente bajas temperaturas. En México, una señal de El Niño se refleja en la falta de la precipitación en verano. Los veranos de El Niño son más secos y cálidos que los veranos de La Niña llegando con frecuencia a producir sequías. Los efectos de El Niño en materia ambiental, se asocia a disminución de la precipitación y de la humedad en el suelo, en consecuencia, pérdidas de miles de hectáreas de bosques por incendios forestales. La disminución en la densidad de nubes sobre México ocasiona el aumento en la cantidad de radiación que llega a la superficie con lo que se registran temperaturas por encima de lo normal en gran parte del territorio durante veranos El Niño. El contraste entre anomalías de temperatura de superficie durante veranos El Niño y La Niña tiene que ver en cierta medida con la cubierta nubosa en unos y otros periodos. Estos procesos atmosféricos dan origen a sequías severas que afectan a los ecosistemas forestales, como la que ocurrió en 1997, reflejándose después, en la intensificación de incendios forestales en la primavera de 1998 (Magaña, 2004). En el contexto de las causas que provocan los incendios, la sequía es semejante al calor, ya que el principal efecto del fuego es incrementar las necesidades del calor para lograr una combustión sostenida.

Por lo tanto, como el oxígeno es un elemento que se encuentra de manera natural en la atmósfera, y si el clima es seco y caluroso, especialmente durante un largo período, habrá mayor disponibilidad de combustibles en el terreno. Estos combustibles son sustancias que requieren menos calor para alcanzar el punto de combustión del que se esté radiando en el medio que las rodea. La combustión sostenida se presenta cuando el fuego se extiende a los combustibles adyacentes para comenzar la ignición antes de que se consuman los que estén encendidos. Si este proceso continúa, entonces el fuego se extenderá (Cochrane, 2002). La presencia de sequía causada por el evento ENSO influye sobre la ocurrencia de incendios forestales en México.

#### 1.5.5 ENSO y su Relación con los Incendios Forestales Ocurridos en México en el Periodo 1970-2007

La sequía generada por la anomalía climática ENSO propicia la ocurrencia de incendios forestales. Este fenómeno, asociado a prácticas de quema no controladas de tierras de uso agrícola incrementa la generación de incendios descontrolados. Puesto que el comportamiento del fuego es el resultado de las condiciones climatológicas, la composición y estructura del combustible y la topografía. El viento incrementa la disponibilidad de oxígeno, mejorando la cantidad e intensidad del proceso de combustión, y el fuego se extiende. La humedad del combustible y la composición química afectan la temperatura de ignición, así como la liberación de energía de la combustión. La estructura del combustible determina la disponibilidad de oxígeno y la efectividad de la transferencia del calor. La topografía modifica la geometría relativa de las llamas de un incendio y de los combustibles cercanos, afectando así la eficacia de la transferencia del calor del fuego a combustibles aledaños, y por lo tanto la posibilidad de que el fuego se extienda (Cochrane, 2002). Las siguientes graficas muestran la relación de ocurrencia de incendio en México durante años El Niño y años La Niña.



**Figura 1.6.** Incendios en años El Niño (a) e Incendios en años La Niña (b).

La **Figura 1.6a**, presenta los incendios ocurridos durante años El Niño. El orden de ocurrencia va de 5893 a 14,445, mientras que en los años La Niña (**Figura 1.6b**), el orden de ocurrencia de incendios forestales va de 5893 a 9946. El inicio del intervalo de valores para ambos gráficos es el mismo, esto se debe a que en ese año ambos eventos se hicieron presentes y su alternancia influyó en la ocurrencia del número de incendios que se indican. Es claro que en los años El Niño se tienen más incendios que en años La Niña. Esto se debe a que en años El Niño se tienen incrementos de temperatura y sequías. En los años Niñas siempre se tienen temperaturas bajas y mayor humedad relativa. En el contexto de efectos generados por incendios forestales, en México estos eventos representan el 2% de las causas de deforestación de los ecosistemas forestales. Este tipo de eventos son generados en un 99% de los casos por actividades humanas y en 1% por fenómenos naturales, todo esto aunado a la variabilidad climática del fenómeno ENSO. La actividad que provoca el mayor número de incendios continúan siendo las quemas agropecuarias en 43% de los casos, el 95% de los incendios son de tipo superficial y afectan en un 89% a pastizales, arbustos y matorrales, en tanto que 11% de la superficie afectada corresponde a zonas arboladas (PI-CONAFOR, 2008).

## 1.6 Características de una Correcta Evaluación de Incendios Forestales

En términos de alerta temprana y prevención de incendios, muchos componentes, tales como las condiciones meteorológicas, climatológicas y de combustible se combinan para dar una amplia imagen de los riesgos actuales de fuego a lo largo del terreno. El poder evaluar el potencial de un incendio que va a comenzar o a expandirse es fundamental para un programa de manejo de siniestros. Sin embargo, contar con una herramienta de prevención y control con tales características puede resultar costoso para algunos países en vías de desarrollo y con problemas de incendios forestales. Las herramientas, tales como bases de datos históricos de los puntos de calor del AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) pueden utilizarse para trazar la distribución típica de los eventos de ignición tanto en espacio como en tiempo dentro del terreno (Cochrane, 2002), véase la **Figura 1.3** para el caso de México. Dada la complejidad que resulta el estudiar los efectos sobre el ambiente producidos por incendios forestales, se hace necesaria la cooperación de varias ramas de la ciencia para comprender sus efectos. En México existen grupos de científicos dedicados al estudio del fuego en los ecosistemas forestales, la mayoría de los estudios se enfoca a la comprensión de los efectos directos producidos por el fuego y muy pocos se enfocan al estudio de los efectos indirectos debido a las emisiones de gases y partículas que se liberan a la atmósfera.

# 2 Quema de Biomasa: Fuente de Contaminación Atmosférica

## 2.1 La atmósfera, su Estructura y Composición

La atmósfera actual es el producto de un proceso que comenzó hace unos  $4.6 \times 10^9$  años. La característica físico-química de la atmósfera no es homogénea. Varía no solo con la altura sino también con la latitud, estación del año, actividad solar etc. Esas variaciones se explican en parte dividiendo a la atmósfera en varias capas. A la hora de hacer esa división en capas se han propuesto diversas clasificaciones atendiendo a las variaciones con la altura de propiedades como la presión, composición química, propiedades eléctricas o magnéticas entre otras. En una de las primeras clasificaciones se divide a la atmósfera en 4 capas y 3 pausas: Tropósfera, Tropopausa, Estratósfera, Estratopausa, Mesósfera, Mesopausa y Termósfera. En lo que se refiere a la contaminación atmosférica, la mayoría de las fuentes de contaminantes están ubicadas en los primeros kilómetros de altura que corresponden a la tropósfera. En este contexto, se estructura a la tropósfera en dos capas: la capa límite atmosférica que se extiende aproximadamente hasta 1km de altura, el resto se conoce como tropósfera libre. En la primera, el movimiento del aire está influenciado por las fuerzas de fricción con la superficie y es altamente turbulento. El proceso es un conjunto de componentes mecánicos y térmicos. En la tropósfera libre se anula la influencia superficial. El concepto de capa límite es dinámico: sus dimensiones varían con la hora del día y las condiciones climatológicas (Figueroa, 2004).

La masa total de la atmósfera es aproximadamente de  $5 \times 10^{15}$  toneladas. Esto es aproximadamente la millonésima parte de la masa de la Tierra. La composición de la atmósfera es estable y sus componentes principales están regulados por ciclos de formación-descomposición que conducen a concentraciones estacionarias, sobre todo en las proximidades de la superficie terrestre. En la siguiente tabla se muestra la composición media del aire seco a

nivel del mar, variando poco la proporción de los diferentes componentes hasta altura de unos 80 km.

**Tabla 2.1.** Composición del aire seco a nivel del mar.

Componente	%Volumen	Componente	% En volumen
N <sub>2</sub>	78.085	Kr	0.00011
O <sub>2</sub>	20.946	H <sub>2</sub>	0.000058
Ar	0.934	N <sub>2</sub> O	0.000031
CO <sub>2</sub>	0.0314	CO	0.00001
Ne	0.00182	Xe	8.7x10 <sup>-6</sup>
He	0.000524	O <sub>3</sub>	1x10 <sup>-6</sup> a 50x10 <sup>-6</sup>
CH <sub>4</sub>	0.00015	NH <sub>3</sub>	0.01x10 <sup>-7</sup> a 1x10 <sup>-7</sup>

Además de los componentes indicados en la **Tabla 2.1**, también se encuentran en menores proporciones óxido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) y ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), diversos hidrocarburos, otros óxidos de nitrógeno y el vapor de agua que varía de 0.01% a 5%, dependiendo de la temperatura. En la **Tabla 2.1**, se observa como componentes mayoritarios al N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> con más del 99% del total. Muchos otros componentes están en proporciones ínfimas. Concretamente, aquellos con abundancia menores al 0.0001% reciben el nombre de componentes trazas (Figueruelo, 2004).

### 2.1.2 Balance Energético, Superficie Terrestre-Atmósfera

Las características físico-químicas de la atmósfera y el balance energético de la Tierra vienen determinados en gran medida por los procesos de transferencia de masa y energía que transcurren en la atmósfera. El intercambio de energía entre atmósfera –hidrosfera-geosfera se realiza en diversas formas: mecánica (cinética y potencial), química calorífica y electromagnética. Esta última, proveniente de la radiación solar, es la única fuente externa y tiene un papel fundamental. El que en la superficie terrestre y su atmósfera mantenga una temperatura templada se debe a la energía solar.

El flujo solar promedio recibido en la tierra por unidad de superficie es aproximadamente 343 W. Si toda esa energía alcanzara y permaneciera en la superficie terrestre, el planeta se hubiera evaporado hace tiempo. El flujo actínico (flujo solar a que está sometido un determinado volumen de aire) depende de la naturaleza y concentración de los constituyentes atmosféricos que encuentra en su camino; es decir de la distancia a la que se encuentre el volumen considerado del espacio exterior, del ángulo que forma con el sol, hora del día, estación del año, latitud, de la presencia de nubes y el albedo del suelo.

Para que la temperatura se mantenga constante la cantidad de energía que absorbe el planeta debe estar balanceada con la que reenvía al exterior. Los mecanismos por los que transcurre este reenvío de energía son: *Conducción*, en la cual la transferencia de energía se realiza a través de la interacción de moléculas adyacentes sin que el material macroscópico sufra movimiento (calor sensible), *convección*, que lleva aparejada movimientos de grandes masas de aire y es el mecanismo causante de los cambios bruscos de temperatura. A través de este mecanismo, también se puede transportar calor sensible. Una fracción importante de calor de la superficie llega a las nubes por conducción y convección, antes de ser enviado al espacio por el tercer mecanismo de transporte de energía: *la radiación*. Por otra parte, el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) absorben radiación infrarroja (IR), por lo que no toda la radiación IR emitida por la superficie y por la atmósfera escapa al espacio, sino que es absorbida por dichos compuestos y por los aerosoles atmosféricos, y es reemitida inmediatamente en todas las direcciones, volviendo aproximadamente la mitad a la superficie terrestre, donde es reabsorbida. Si no sucediera esto, la temperatura promedio de la superficie terrestre sería de -18 °C en lugar de 15 °C. Este aumento de temperatura es el efecto invernadero, motivo de gran preocupación actual por el aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> debido a las actividades humanas que están ocurriendo en las últimas décadas y que pueden romper el equilibrio térmico.

### 2.1.3 Humedad Atmosférica

La atmósfera transporta humedad en dirección horizontal y en vertical por lo que, es una variable importante en el estudio de eventos atmosféricos como la contaminación del aire. Existen varias formas de medir la humedad del aire, estas medidas dependen de varias variables importantes, por ejemplo la proporción de mezcla definido por:

$$r = (\varepsilon \cdot e / P - e) \quad (2.1)$$

donde  $\varepsilon = R_d / R_v$  es la proporción de un gas constante para aire seco a la de vapor de agua,  $e$  = presión de vapor y  $P$  = presión atmosférica.

#### 2.1.3.1 Humedad específica

La humedad específica se define por:  $q = \varepsilon \cdot e / P$  (2.2)

y tiene unidades de g/ kg. La humedad específica es la proporción de vapor de agua (en gramos) contenido en un kilogramo de aire húmedo.

#### 2.1.3.2 Humedad absoluta

Es la concentración de vapor de agua en el aire y tiene unidades en gramos por metro cúbico ( $\text{g}/\text{M}^3$ ) se define por:

$$\rho_v = e / P \varepsilon \cdot \rho \quad (2.3)$$

donde  $\rho_d$  es la densidad del aire seco.

#### 2.1.3.3 Humedad Relativa

Es la proporción de la cantidad real de vapor de agua en el aire en comparación con la cantidad de vapor de saturación a una temperatura y se define por:

$$RH = r / r_s (100\%) \quad (2.4)$$

donde  $r$  es la proporción de mezcla y  $r_s$  es la proporción de mezcla saturada.

## 2.2 Contaminación Atmosférica

El aire no contaminado es un concepto idealizado, pues no se sabe cómo sería su composición si las actividades humanas no estuvieran sobre la superficie terrestre. En realidad nunca podremos conocer la composición precisa de un aire no contaminado debido a que las actividades humanas han contaminado el aire por cientos de años. La atmósfera real es una mezcla seca de gases permanentes y otros constituyentes, como el vapor de agua, componentes orgánicos volátiles y partículas sujetos a suspensión (Richard, 1994).

Para dar una definición de contaminación atmosférica es necesario definir lo que es un contaminante. Un contaminante es una sustancia presente en la atmósfera con una concentración mayor a la natural como resultado de la actividad humana y que ejerce un efecto pernicioso sobre el ambiente o sobre algo valioso para el ambiente. En términos generales, la contaminación atmosférica involucra un arreglo de fuentes u orígenes complejos, el transporte meteorológico de los contaminantes hacia un receptor, y una gama amplia de efectos económicos y en la salud de las personas (Wark, 1998).

### 2.2.1 Fuentes y Sumideros de Contaminación Atmosférica

Los lugares de donde emanan los contaminantes son llamados fuentes. Existen, fuentes naturales así como antropogénicas, de gases permanentes considerados contaminantes. Las fuentes naturales, incluyen la descomposición de la materia orgánica, la respiración de las plantas y animales, las erupciones de volcanes y los incendios forestales. Los lugares donde los contaminantes desaparecen con el aire son llamados sumideros, por ejemplo, el suelo, la vegetación, cuerpos de agua y los océanos (Richard, 1994).

### 2.2.2 Receptor

Un receptor es algo que está adversamente afectado por el aire contaminado. Este puede ser una persona o animal que respira el aire contaminado y que puede ser afectado en su salud y experimentar irritación de los ojos, piel reseca

y problemas respiratorios. También algunos materiales pueden ser considerados como receptores: el papel, cuero, tela, metal, piedra, pintura e incluso algunas propiedades de la atmósfera como la habilidad para la transmisión de energía (Richard, 1994).

### 2.2.3 Transporte y Difusión

El transporte es el mecanismo que mueve a los contaminantes de una fuente a un receptor. El viento es el medio por el cual el contaminante es transportado de una fuente a un receptor. Los remolinos turbulentos en el aire afectan la forma de la pluma del contaminante. Si la velocidad de viento es más grande que la velocidad a la cual se emite el contaminante, el viento estirará la pluma hasta que la velocidad de la pluma iguale la velocidad del viento. También puede ocurrir que la pluma del contaminante no pueda seguir una línea recta entre el origen y el receptor, pero puede aproximarse un poco sobre la línea de dirección de viento, debido a las fluctuaciones de los vientos durante el momento del tránsito entre los dos puntos fuente emisora-receptor. Los dos procesos, el mezclado por la turbulencia y el estiramiento de la pluma, más un tercero si la pluma no sigue la dirección de viento, tiende a que la concentración de los contaminantes sea menor cuando llegue al receptor que cuando está cerca de la fuente emisora (Richard, 1994). Una de las ecuaciones primarias que intervienen en el proceso de dispersión es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C = k_c \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C + C_F \quad (2.5)$$

donde  $K_c$  es una constante,  $C_F$  es cualquier fuente emisora,  $C$  es la concentración de cualquier contaminante y  $\vec{v}$  es el vector velocidad del flujo con componentes  $u$ ,  $v$  y  $w$ . La ecuación anterior se puede escribir como:

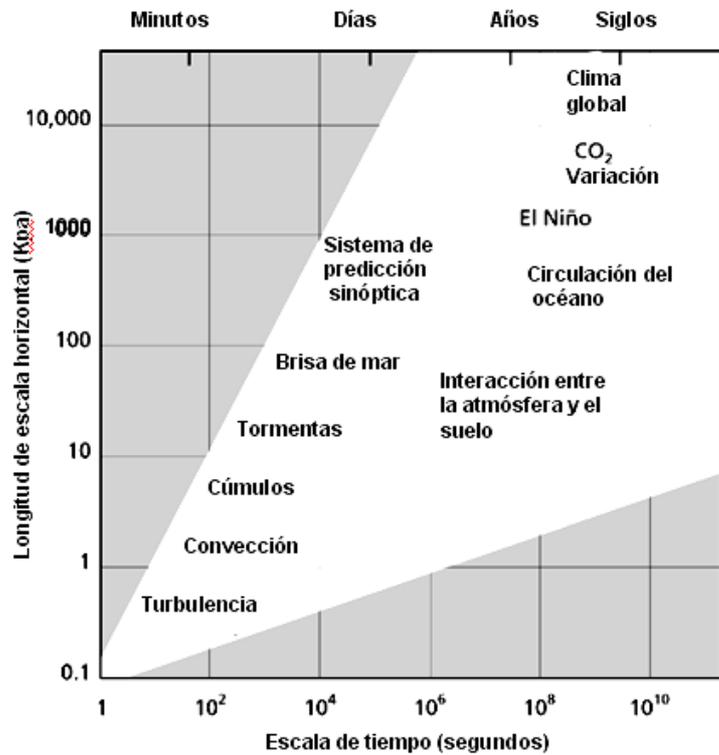
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = k_c \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + C_F \quad (2.6)$$

El término a la izquierda es el cambio local del contaminante más los términos advectivos, el término a la derecha es el término difusivo multiplicado por una

constante más la fuente emisora. La ecuación anterior es utilizada en la dispersión de los contaminantes.

#### 2.2.4 Escalas del Problema de Contaminación del Aire

Los problemas de contaminación a nivel local usualmente se caracterizan por un gran número de fuentes emisoras. Los vehículos de motor, evaporación de componentes volátiles orgánicos, plantas hidroeléctricas, fuentes industriales y muchos otros pueden causar problemas, especialmente bajo condiciones meteorológicas que causan que porciones de la pluma alcancen altas concentraciones. Existen dos diferentes tipos de contaminación en áreas urbanas. Una es la liberación de contaminantes primarios, estos son liberados directamente de las fuentes. Otra son los contaminantes secundarios, éstos son los que se forman a través de las reacciones químicas de los contaminantes primarios. El problema de contaminación del aire puede ser causado por una fuente individual a escala local y urbana. A escala regional se consideran tres tipos de problema que contribuyen a la contaminación. Uno es el sobrante de oxidantes urbanos, el segundo tipo es causado por los contaminantes primarios y que relativamente reaccionan lentamente pasando por transformaciones químicas durante el tiempo largo de transporte. El tercer tipo de contaminación en esta escala, es la que altera la visibilidad, esta puede ser generada por una pluma o por niveles regionales de partículas que producen varias intensidades de neblina. A escala continental se involucra la contaminación de los países vecinos. A nivel global el problema de contaminación del aire contiene a todos los tipos anteriores (Richard, 1994). Puesto que los contaminantes están sujetos a la dinámica de la atmósfera, su distribución espacial y temporal depende de la circulación atmosférica de acuerdo al siguiente diagrama de escalas de procesos atmosféricos (ver **Figura 2.1**).



**Figura 2.1.** Distribución espacial y temporal de procesos atmosféricos (Jordi, 2004).

## 2.3 Incendios Forestales como Fuentes de Contaminación Atmosférico

Un incendio forestal es la quema de vegetación viva y muerta incluyendo los incendios iniciados por los humanos y los que se generan por procesos naturales. En este trabajo se consideran todos los tipos.

### 2.3.1 Alteración de los ciclos Geoquímicos Biosfera-Atmósfera

La quema de biomasa es una fuente importante de aerosoles atmosféricos y gases de efecto invernadero (Van der Werf, 2006 y Levine, 1999). La biomasa está compuesta de 45% de carbón (en peso) y 55% de hidrógeno y oxígeno (en peso); cantidades trazas de nitrógeno (0.3% a 3.8% en masa), sulfuro (0.1% a 0.9%), fósforo (0.01% a 0.3%), potasio (0.5% a 3.4%) y pequeñas cantidades de cloro y bromo (Levine et al). La cantidad y composición de los

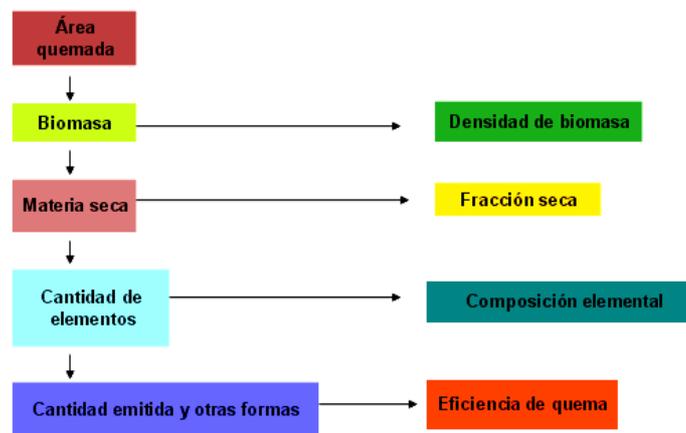
gases y partículas que se liberan a la atmósfera depende de la naturaleza de la vegetación quemada y ésta a su vez, está en función del ecosistema y de la temperatura a la cual se realice la combustión. En una combustión completa, la biomasa quemada produce dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua como productos directos de acuerdo a la siguiente reacción:

$CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ , donde  $CH_2O$  representa el promedio aproximado de la composición química de la vegetación (Levine, 2003). En el caso de una combustión incompleta (fase del fuego sin llamas) el carbón se libera en forma de monóxido de carbono ( $CO$ ), metano ( $CH_4$ ), hidrocarburos diferentes del metano ( $NMHC_s$ ) y varios componentes orgánicos parcialmente oxidados incluyendo aldehídos, alcoholes, cetonas, ácidos orgánicos y partículas negras de carbón (hollín). El nitrógeno está presente principalmente como grupo amino. Durante la combustión, el nitrógeno es liberado por descomposición pirolítica de la materia orgánica parcial o completamente oxidada en varios componentes volátiles que incluye nitrógeno molecular ( $N_2$ ), óxido nítrico ( $NO$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), amonio ( $NH_3$ ), ácido cianhídrico ( $HCN$ ), cianógeno ( $NCCN$ ), nitrilo orgánico ( $CH_3CN$ ), acrilonitrilo ( $CH_2CHCN$ ) y propionitrilo ( $CH_3CH_2CN$ ) y nitratos. Durante la quema, el sulfuro es liberado principalmente en forma de dióxido de sulfuro ( $SO_2$ ) y pequeñas cantidades de sulfoxicarbonil. La mitad del sulfuro contenido en la materia se queda en las cenizas, mientras que el nitrógeno se libera casi totalmente (Levine, 1991).

Un experimento realizado por Jürgen M. Lobert *et al* (1991) reporta que en promedio, 95% del carbono inicialmente presente en el combustible es liberado a la atmósfera, donde el 82% se libera como dióxido de carbono ( $CO_2$ ) seguido del monóxido de carbono ( $CO$ ) 5.7%, metano ( $CH_4$ ) 0.42%, 0.12% de hidrocarburos diferentes del metano. El otro 5% es desconocido. También reporta emisión de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ,  $x=1,2,3$ ) donde, el 22% del nitrógeno contenido en el combustible se emite como nitrógeno molecular ( $N_2$ ). La mayoría de los compuestos se producen principalmente cuando se tiene una combustión completa. En una combustión completa o incompleta predomina el  $CO_2$  y  $CO$  seguido por los componentes del nitrógeno.

### 2.3.2 Cuantificación de Gases y Partículas

Cuantificar con exactitud las emisiones de gases y partículas emitidas a la atmósfera por la quema de biomasa es muy complejo. Para una correcta evaluación se debe tomar en cuenta varios factores de acuerdo al siguiente esquema:



**Figura 2.2.** Bosquejo para cuantificar los contaminantes emitidos por incendios (Helas, 1995).

El área quemada puede ser fácilmente cuantificada, mientras que para definir la carga de combustible, se deben tomar en cuenta los factores mostrados en la **Figura 2.2**. En la literatura se reportan los siguientes límites (Helas, 1995): De 2 a 8 toneladas por hectárea ( $t\ ha^{-1}$ ) de materia seca para áreas de sabanas y de 20 a 34  $t\ ha^{-1}$  para bosques boreales.

### 2.3.3 Cálculo de Gases y Partículas Emitidas a la Atmósfera

El cálculo de emisión de una especie  $x$  se basa en la siguiente ecuación:  $Q(x)=M(EF(x))$ , donde  $Q(x)$  es el flujo de emisión del gas o aerosol,  $M$  es la cantidad de biomasa quemada y  $EF(x)$  el factor de emisión para la especie  $x$  en gramos de  $x$  por kilogramos de materia seca ( $gx/kgms$ ) (Michel, 2005). La emisión de cualquier gas o partícula de la biomasa quemada depende de dos

parámetros: la cantidad de biomasa quemada y la proporción de un componente liberado durante la combustión. Generalmente para calcular el EF(x) de una especie x, se toma como base la cantidad de CO<sub>2</sub> liberado en la combustión (Delmas, 1995). Michel *et al* (2005) reporta los siguientes factores de emisión (**Tabla 2.2**) para carbón negro (cn) y carbón orgánico (co) liberado en la combustión, también se muestra la densidad de biomasa (db) y eficiencia de quema (ef) para algunos tipos de vegetación:

**Tabla 2.2.** Factores de emisión.

Tipo de vegetación	FE(cn)	FE(co)	db(g/m <sup>2</sup> )	ef
Bosques perennes siempre verde	0.6	6	36700	0.25
Bosque hojoso siempre verde	0.7	6.4	23350	0.25
Bosque hojoso de hojas caducas	0.6	6	18900	0.25
Bosque templado de hojas caducas	0.6	6	20000	0.25
Bosque mezclado	0.61	5	10000	0.35
Arbolado	0.62	4	3300	0.4
Prado enselvado	0.61	5	7200	0.5
Zona de arbusto cerrado	0.62	4	1600	0.85
Zona de arbusto abierto	0.62	4	1250	0.95
Pastizales	0.725	2.1	5100	0.6
Tierras de cultivo				

#### 2.3.4 Cálculo de Emisiones

Los gases y partículas emitidos de la vegetación quemada pueden ser calculados usando la siguiente ecuación:

$$M = ABE \quad (2.6)$$

Donde  $M$  es la masa total de la vegetación quemada (toneladas),  $A$  es el área quemada ( $\text{km}^2$  o ha),  $B$  la carga de la biomasa ( $\text{t km}^{-2}$  o  $\text{t ha}$ ) y  $E$  la eficiencia de quema (adimensional). Con los datos anteriores, se puede calcular la masa total de carbón, ( $M(C)$ ), liberado a la atmósfera durante la quema, y está relacionado con  $M$  de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M(C) = CM \text{ (toneladas de carbón)} \quad (2.7)$$

$C$  es el porcentaje de carbón en la biomasa. Para una vegetación tropical,  $C=0.45$ . La masa de  $\text{CO}_2$ ,  $M(\text{CO}_2)$  liberado durante el fuego está relacionado con  $M(C)$  por la siguiente expresión:

$$M(\text{CO}_2) = CEM(C) \quad (2.8)$$

Donde  $CE$ , es la eficiencia de combustión y se define como: La fracción de carbón emitido como  $\text{CO}_2$  relativo al carbón total liberado durante la quema. Para bosque tropical  $CE = 0.90$ . Una vez que la masa de  $\text{CO}_2$  es conocido, se pueden calcular la masa de cualquier otra especie producida durante la quema y liberado a la atmósfera. Para el cálculo de otras especies, se debe usar la proporción de emisión. La proporción de emisión ( $ER(X_i)$ ) de una especie  $X_i$ , es la proporción de producción de la especie  $X_i$  a la producción de  $\text{CO}_2$  en el fuego. La masa total liberada de la especie  $X_i$  se calcula con la siguiente expresión:

$$M(X_i) = ER(X_i) M(\text{CO}_2) \text{ (toneladas de carbón de } X_i) \quad (2.9)$$

donde  $X_i$  puede ser,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HNO}_3$  y  $\text{O}_3$ . Aunque el  $\text{O}_3$  no es un producto directo de la biomasa quemada. Sin embargo es producido vía reacción fotoquímica de  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{NO}_x$  estos últimos si son producidos directamente de la biomasa quemada. Así, la masa del ozono como resultado

de la biomasa quemada, puede ser calculada considerando los gases precursores de ozono producido por la biomasa quemada.

Para calcular el material particulado emitido por la biomasa quemada, se usa la siguiente ecuación:

$$TPM = MP \text{ (toneladas de carbón)} \quad (2.9)$$

Donde  $P$  es la biomasa transformada en material particulado durante la quema de la biomasa. Para bosque tropicales  $P = 20$  toneladas de TMP por kilotón de biomasa consumida por el fuego. (Keeling, 2000). Los valores de proporción de emisión para bosque tropical se muestran en **Tabla 2.3**.

**Tabla 2.3.** Proporción de emisión para incendios forestales en bosque tropical.

$CO_2$	90.00%
$CO$	8.5%
$CH_4$	0.32%
$NO_x$	0.21%
$NH_3$	0.09%
$O_3$	0.48%
$TMP$	20 t kf <sup>-1</sup>

## 2.4 Efectos Atmosféricos Debido a la Emisión de Gases Trazas por Quema de Biomasa

La quema de biomasa en incendios forestales es uno de los procesos que afectan el ciclo de los gases geoquímicos y partículas de la biosfera a la atmósfera que existen de manera natural en la atmósfera, además es uno de los procesos del cambio global sobre el medio ambiente (Levine, 1999). Estos cambios globales tienen muchas fases: Disminución de ozono, deforestación tropical, deposición ácida e incremento de concentración de gases

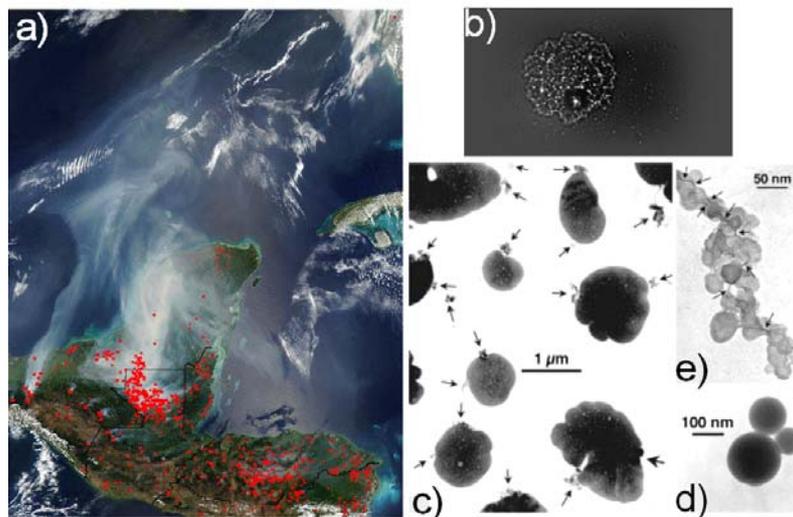
atmosféricos que atrapan el calor y pueden producir un calentamiento global. La atmósfera es la componente más variable del sistema climático. Su composición, mostrada en la **Tabla 2.1**, indica que los elementos que más predominan son el nitrógeno, oxígeno y otros gases trazas como el dióxido de carbono y el vapor de agua (Drake, 2000). La alteración de los gases trazas en la atmósfera están transformando el sistema climático. El metano y el dióxido de carbono son gases que producen el efecto invernadero (Andrae, 2004). El CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> tienen la propiedad de actuar como absorbentes y dispersores de la radiación infrarroja de onda larga emitida por la superficie terrestre. Parte de la radiación dispersada por estos elementos, es reabsorbida por la superficie terrestre, lo que favorece el incremento de temperatura en la troposfera y en consecuencia se produce el efecto invernadero (Drake, 2000).

El monóxido de carbono, es otro de los elementos que favorece el efecto invernadero. Además, produce daños en la salud de las personas cuando es inhalado directamente. Los daños se producen en el sistema circulatorio donde ocasiona una disminución de la hemoglobina (Richard, 1994).

Los óxidos de nitrógeno tienen una vida dentro de la atmósfera de aproximadamente 120 años. Una molécula de óxido de nitrógeno es 200 veces mas efectiva que un gas de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> (Drake, 2000). La principal importancia de los óxidos de nitrógeno (NO, NO<sub>2</sub>) en la química de la atmósfera es la asociación con la distribución del ozono en la Tierra. A bajas altitudes el óxido nítrico actúa catalíticamente para producir ozono por la reacción natural de niebla tóxica. El ozono troposférico es un contaminante tóxico. Mientras que la presencia de óxidos nítrico en la estratosfera inhiben la producción de ozono en la estratosfera. El ozono estratosférico protege a la biosfera de la radiación dañina ultravioleta (Crutzen, 2001). El vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono juegan un papel fundamental en el balance de radiación de la atmósfera terrestre por debajo de los 80 km (Crutzen, 1979). También se ha identificado que en la quema de biomasa se libera mercurio de la vegetación, el mercurio liberado se vuelve parte de la reserva global sufriendo transformaciones químicas en las nubes y

en la tropósfera libre y eventualmente regresa a la superficie terrestre vía lluvia o deposición seca (Levine, 1991).

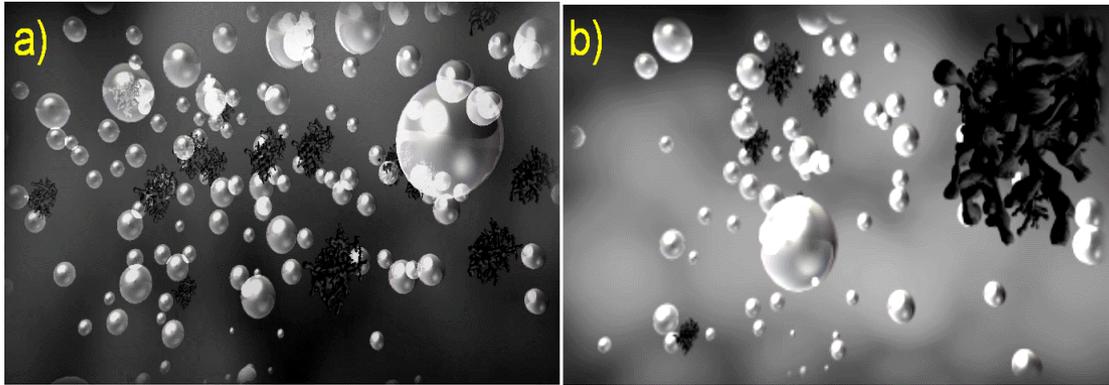
Los aerosoles, partículas sólidas y líquidas tienen la propiedad de absorber y dispersar la radiación solar afectando el clima a nivel local, regional y global. El tiempo de residencia en la atmósfera puede ser de días a semanas. Dependiendo de la intensidad del incendio, las partículas pueden alcanzar la estratosfera por una fuerte corriente térmica convectiva producida durante el fuego. En la quema de biomasa, los aerosoles que más predominan son: cenizas, compuestos orgánicos volátiles; carbón orgánico y negro. El carbón negro, también conocido como hollín, se produce por una combustión incompleta, por lo que depende de la eficiencia de quema y de la cantidad de combustible quemado (Buseck, 2003, y Andreae, 2004) (ver **Figura 2.3**).



**Figura 2.3.** Imagen de satélite, Fuente: NASA (a). Imagen microscópica del hollín (b). Hollín y partículas sulfatadas. Fuente: NASA, disponible en: <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/> (c, d, e).

Los aerosoles sirven como núcleos de condensación de vapor de agua en la atmósfera (**Figura 2.4**). Las moléculas de agua atmosférica son atraídas por las partículas de aerosoles formando gotas de agua y, finalmente, la formación de nubes. La introducción de un mayor número de aerosoles modifica las

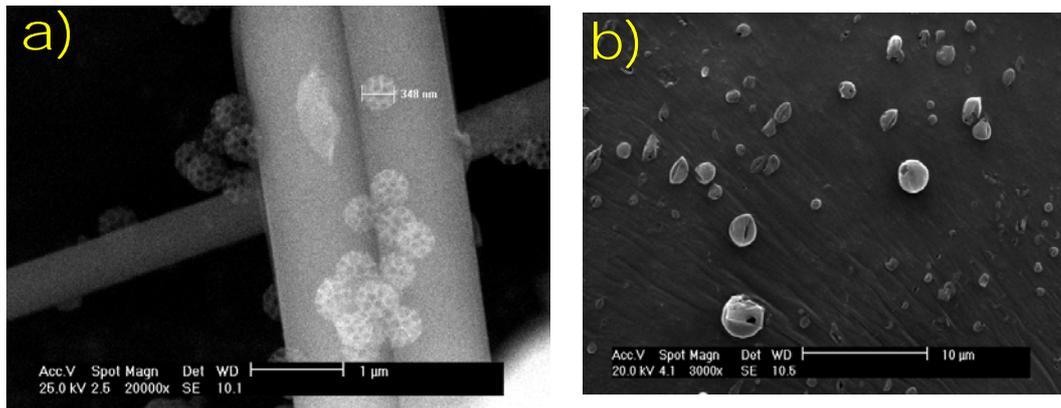
propiedades físicas en el proceso de formación de las nubes, lo que conduce a una acumulación de gotas de agua que son de menor tamaño, pero mayor en número (Buseck, 2004).



**Figura 2.4.** Gotas de agua y carbón negro formando una nube (a). Partículas de carbón negro y gotas de agua. Fuente: NASA, disponible en: <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/> (b).

La quema de residuos agrícolas es una fuente importante de carbón orgánico y carbón negro (Keeling, 2004). Un estudio de caracterización de partículas de fuentes antropogénicas y fuentes naturales conducido por Campos-Ramos *et al* en el 2009 muestra que en el estado de Colima, en las quemas prescritas como parte del cultivo de caña predomina una alta emisión de partículas menores a 10 micrómetros. Parte de ese estudio consistió en analizar 3600 partículas separadas en grupos de acuerdo a su composición química, morfología y abundancia relativa. Uno de los grupos analizados estuvo constituido por partículas ricas en carbón (39 % abundancia relativa) de origen natural. Aproximadamente el 29% de estas partículas corresponden a estructuras microscópicas procedentes de secreción de saltamontes (Brochosomes), las partículas de ese grupo tienen una morfología hexagonal y pentagonal, su tamaño es menor que 0.5 micrómetros (ver **Figura 2.5a**). Estas partículas se han encontrado en muestras de aire contaminado con carbón negro. De las muestras de partículas procedentes de la quema de residuos agrícolas, se identificó una gran abundancia de partículas esferoidales de

suave textura con un tamaño menor a 5.0 micrómetros. El tamaño y morfología de esas partículas (ver **Figura 2.5b**) coinciden con partículas ricas en carbón procedente de la quema de residuos agrícolas del cultivo de caña, Campos Ramos *et al* (2009).



**Figura 2.5.** Partículas ricas en carbón y morfología hexagonal y pentagonal(a). Partículas de carbón con forma esferoidal procedentes de la quema de residuos de cultivo de caña (b). Fuente: Campos Ramos *et al* (2009).

El efecto de los aerosoles en la atmósfera es un proceso complejo que afecta la química de la atmósfera. Las partículas emitidas junto con los gases liberados por la quema de biomasa dan origen a la formación de niebla tóxica, generándose la contaminación atmosférica. Las partículas de un tamaño de 2.5µm a más pequeñas, afectan las vías respiratorias de las personas y provocan diversos daños en la salud cuando son inhalados (Richard, 1994 y Crutzen, 2001).

## 2.5 Planteamiento de la Propuesta de Investigación

De acuerdo con lo expuesto anteriormente es evidente el deterioro de la calidad del aire por gases y partículas que se emiten de los incendios forestales. En México, la CONAFOR y la CONABIO tienen programas que regulan, controlan y monitorean la ocurrencia de incendios. Sin embargo, existen pocos estudios del transporte y dispersión de las emisiones de gases y

partículas que se generan en los incendios. Este trabajo se enfoca al estudio de la dispersión de los contaminantes o aerosoles que se generan en la quema de biomasa a través de la aplicación de los modelos de circulación atmosférica MM5 y de dispersión de contaminantes MCCM, que mas adelante serán descritos.

### 2.5.1 Hipótesis

La combinación de un modelo de circulación atmosférica con uno de dispersión de contaminantes permite predecir el comportamiento de la pluma de contaminantes producidos por quema de biomasa y que afectan la calidad del aire en zonas urbanas y rurales.

### 2.5.2 Justificación

En México existe alta frecuencia de quema de biomasa por incendios forestales que emiten cantidades importantes de sustancias químicas generadas durante la combustión. Estos elementos contribuyen con la contaminación atmosférica debido a las altas concentraciones de contaminantes que se emiten y que exceden los niveles permisibles de emisión de gases y partículas de acuerdo a las normas Mexicanas de calidad del aire. A pesar de esta problemática, existen pocos estudios del comportamiento y cuantificación del proceso dispersivo de este fenómeno.

### 2.5.3 Objetivo General

Adaptar el Modelo de Mesoescala de Quinta generación (MM5) a la zona de estudio y acoplarlo con el Modelo Químico y Climático de Mesoescala (MCCM). La aplicación a una zona específica del país tiene el propósito de diagnóstico de la dispersión de la pluma de contaminantes producido por quema de biomasa.

#### 2.5.4 Objetivos Particulares

1. Generar información estadística acerca de incendios forestales en México y en la zona de interés.
2. Generar información de la dispersión de los contaminantes producidos por incendios forestales basados en la modelación numérica.
3. Determinar zonas vulnerables a incendios en el dominio de estudio.
4. Cuantificar concentraciones de contaminantes emitidos en la quema de biomasa.

# 3 Modelado del Transporte de Contaminantes en la Atmósfera

## 3.1 Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera

La dispersión atmosférica de descargas de contaminantes, aunado a la aglomeración de áreas fuentes y fuentes móviles dependen de muchos factores interrelacionados. Por ejemplo, la naturaleza física y química del efluente, las características meteorológicas del ambiente, la localización de las fuentes de descargas en relación a la obstrucción al movimiento del aire y la naturaleza del terreno en la dirección del viento. La cantidad total de efluentes puede contener diversos gases y partículas. Si las partículas son del orden de 20  $\mu\text{m}$  o menos en diámetro, tienen una menor velocidad de movimiento de la misma manera como el gas en el cual están inmersas. Si las partículas son más grandes que 20  $\mu\text{m}$ , tienen una significativa velocidad de asentamiento que resulta en una alta concentración a nivel del suelo de los contaminantes sólidos que se encuentran cerca de la acumulación de contaminantes. Para que se dé una máxima dispersión de contaminantes, el efluente debería dejar la fuente con una velocidad y flotabilidad suficiente para incrementar la salida. Cuando la velocidad del viento es baja, la densidad de la pluma de contaminantes tiende a alcanzar altas concentraciones a nivel del suelo. Las partículas grandes y la pluma densa de gas caen en la vecindad de la fuente. La alta velocidad del viento incrementa la dilución de los contaminantes en la atmósfera, favoreciendo el aumento de bajas concentraciones a nivel del suelo en la dirección del viento y por tanto de la pluma. El aumento en elevación de la mayoría de las plumas calientes es causado casi completamente por la flotabilidad debido a la alta temperatura de los gases. Cuando la pluma es afectada por el viento, ésta es diluida a lo largo de su eje en proporción al promedio de la velocidad de viento. En aire estratificado, la flotabilidad de la pluma es disipada en condiciones de estabilidad de la atmósfera circundante. Cuando existen condiciones neutrales atmosféricas, la pluma se disipa por

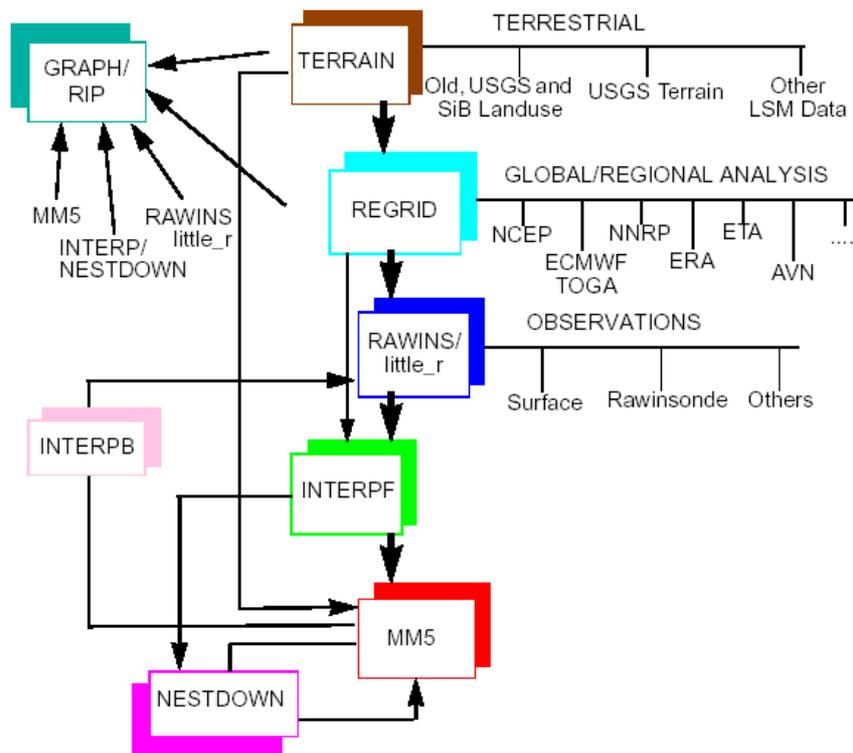
turbulencia, cuya intensidad es función de la rugosidad del suelo, la altura, y la más importante, la velocidad de viento.

La capacidad de pronosticar las concentraciones de contaminantes en áreas urbanas, en base a la dispersión de fuentes contaminantes es esencial para mantener los estándares de calidad del aire ambiental nacional. Esto debe alcanzarse a pesar del futuro crecimiento industrial y residencial. El impacto potencial de la contaminación del aire usualmente es estimado a través del uso de modelos numéricos para simular la calidad del aire. Existe una gran variedad de modelos disponibles, los cuales usualmente son distinguidos por el tipo de fuente, contaminante, transformaciones, remoción, distancia de transporte y promedio de tiempo. Un modelo requiere dos tipos de datos de entrada: Información de la fuente o fuentes incluyendo ritmos de emisión de contaminantes y datos meteorológicos como la velocidad del viento y turbulencia. Por lo que, los modelos numéricos de calidad del aire simulan matemáticamente el transporte, dispersión, reacciones químicas, transformaciones físicas y procesos de remoción de los contaminantes atmosféricos (Wark, 1998 y Richard 1994). Para modelar la dispersión de la pluma de contaminantes emitida por incendios forestales, se adaptaron dos modelos numéricos a una zona de la República Mexicana, uno de circulación atmosférica y otro de dispersión de contaminantes. Por sus siglas en inglés el primero es llamado MM5 y el segundo MCCM.

### 3.2 Descripción del Modelo MM5

El modelo de mesoescala de quinta generación (MM5) fue desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania (PSU) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) de Estados Unidos. La quinta generación del modelo de mesoescala es la última versión desarrollada. El MM5 es un modelo comunitario de acceso totalmente libre, soportado por NCAR y en la que una gran variedad de grupos de investigación han aportado tanto software propio del modelo como herramientas para el preprocesado y postprocesado de datos. El código fuente del MM5 está escrito en lenguaje Fortran 90 y es

totalmente libre, bien documentado y soportado por NCAR. En términos generales, el sistema del MM5 consiste en una serie de módulos que se resumen en la **Figura 3.1**.



**Figura 3.1.** Esquema que resume el sistema de módulos que integran a MM5.

El MM5 cuenta con 5 módulos básicos: TERRAIN, REGRID, INTERPF, MM5 y GRAPH. También, cuenta con otros módulos opcionales, como se muestra en la **Figura 3.1**. Los datos de topografía y meteorológicos son procesados e interpolados horizontalmente por los programas TERRAIN y REGRID de coordenadas geográficas (latitud/longitud) a puntos de malla a una proyección Lambert-Conformal. Una vez realizada esta interpolación, no es necesario incluir más detalles de mesoescala en los datos. Aunque, cuando se tienen observaciones superficiales de redes regionales de mediciones estas pueden ser incluidas en un re-análisis de datos (programas LITTLE\_R/RAWINS). La interpolación vertical es llevada a cabo por el programa INTERPF, la interpolación cambia de niveles de presión a coordenadas sigma para poder

ser leídos por el programa MM5. Los programas gráficos (GRAPH y RIP) se usan para visualizar las salidas de todo el sistema de modelación (Pineda Martínez, 2005).

### 3.3 Características Principales del Modelo MM5

#### 3.3.1 Anidamiento Múltiple

MM5 tiene la capacidad de anidamiento múltiple. El anidamiento consiste en concentrar una malla con una resolución más fina, dentro de una malla de área superior (ver **Figura 3.2a y 3.2b**). Las condiciones de frontera son dadas por la rejilla mayor a la menor. El modelo MM5 presenta dos formas de llevar a cabo este acoplamiento entre dos dominios de integración:

Anidamiento en una dirección, en este, solo hay interacción en un sentido. La malla madre impone las condiciones de frontera a la malla hija, siendo la malla madre totalmente independiente de lo que suceda en la malla hija.

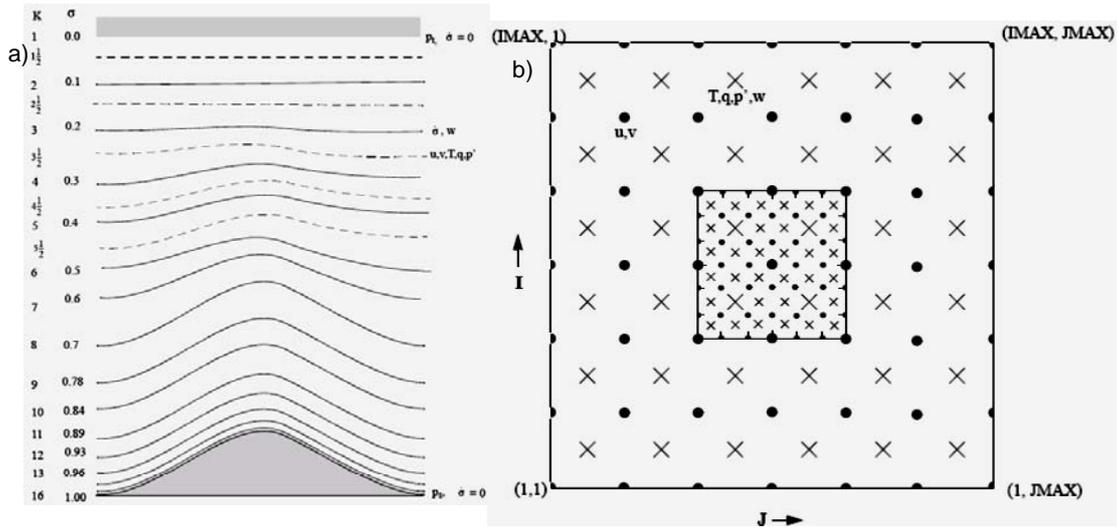
Anidamiento en dos direcciones. En este tipo de interacción hay una realimentación entre la malla madre e hija, la madre pasa dinámicamente las condiciones de frontera a la hija y ésta es capaz de modificar las condiciones de los puntos de la malla del dominio madre en las que sean coincidentes y por ende, afectar al dominio global del dominio madre (Duhia, 2001).

#### 3.3.2 Modelo no Hidrostático

La formulación de una dinámica no hidrostática en el modelo MM5, es decir, que considere el aporte de la componente vertical en las ecuaciones de movimiento, permite que el modelo pueda ser empleado eficazmente para representar fenómenos con dimensiones de muy pocos kilómetros. En este contexto, las coordenadas  $(x, y, \sigma)$  son consideradas en las ecuaciones básicas de un modelo no-hidrostático, en donde la coordenada  $\sigma$  esta en términos de la presión usada para determinar los niveles verticales (**Figura 3.2-a**) del modelo (Duhia 2001). La coordenada sigma se define como:

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_t)}{(P_{s0} - P_t)}$$

Donde  $P_0$  es la presión de referencia,  $P_t$  es la presión superior constante,  $P_{s0}$  es la presión de referencia en la superficie.



**Figura 3.2.** Niveles de coordenadas sigma a) y malla anidada b).

### 3.3.3 Ecuaciones básicas de MM5

Las ecuaciones básicas del modelo y la ecuación de la coordenada sigma se muestran a continuación:

Ecuación de presión

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} = -\mathbf{v} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left( \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right)$$

Momento en la dirección x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{v} \cdot \nabla u + v \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - ew \cos \alpha - \frac{uw}{r_{earth}} + D_u$$

Momento en la dirección y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{v} \cdot \nabla v - u \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + ew \sin \alpha - \frac{vw}{r_{earth}} + D_v$$

Momento en la dirección z

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0 g}{\rho p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g p'}{\gamma p} = -\mathbf{v} \cdot \nabla w + g \frac{p_0 T'}{p T_0} - \frac{g R_d p'}{c_p p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w$$

Donde e, es la fuerza de Coriolis:

$$e = 2\Omega \cos \lambda, \quad \alpha = \phi - \Phi_c,$$

$\lambda$  es la latitud,  $\phi$  la longitud y  $\Phi_c$  es la latitud central.

Termodinámica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta$$

Término de advección

$$\mathbf{v} \cdot \nabla A \equiv m u \frac{\partial A}{\partial x} + m v \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma}$$

Donde

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

Término de divergencia

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g \partial w}{p^* \partial \sigma}$$

Para una demostración de estas ecuaciones véase Dudhia 2001.

### 3.4 Parametrizaciones Físicas en el Modelo MM5

Un modelo numérico meteorológico de predicción consta de dos partes fundamentales: una parte dinámica y otra formada por las parametrizaciones. Las parametrizaciones son representaciones matemáticas de procesos atmosféricos en los que se toman en cuenta los procesos que se generan a escalas de metros y que no pueden ser representados matemáticamente en un

modelo numérico. La parte dinámica es la parte que resuelve las ecuaciones de movimiento de fluidos. El modelo MM5 cuenta con una amplia gama de parametrizaciones físicas y que se mencionan a continuación:

1. Parametrización de nubes (cúmulos). El modelo MM5 presenta la posibilidad de elegir entre 7 tipos diferentes de cúmulos, además de no necesitar ningún tipo de parametrización cuando se trabaja con resoluciones inferiores a 5km, pues se supone que ya no quedan fuera de la subescala del modelo.
2. Parametrización en la primera capa de la tropósfera (capa límite), en este caso hay 7 posibilidades.
3. Esquemas de humedad explícita. El modelo MM5 posee 8 posibilidades de distinta complejidad para el tratamiento de cambios de estado del agua.
4. Esquemas de temperatura del suelo. Presenta 2 modelos simples, y tres modelos de suelo. Los dos modelos simples son:
  - a) None (ITGFL=3), en este modelo no hay predicción de la temperatura del suelo. Se supone una temperatura constante, este modelo no es realista.
  - b) Force/Restore (Blackadar). Este modelo supone un sustrato con temperatura constante y una sola capa de suelo. La temperatura de la capa superficial se basa en el balance energético y el espesor asumido para representar el espesor de la variación diurna de temperatura aproximadamente 10 a 20cm.

Los tres modelos de suelo son:

- c) Five Layer Soil Model (SOIL 1). Este modelo predice la temperatura del suelo en las siguientes capas: 1, 2, 4, 8 y 16 cm suponiendo un sustrato fijo por debajo y utilizando para ello la ecuación de difusión vertical. Este modelo resuelve verticalmente las variaciones diurnas de temperatura permitiendo una respuesta más rápida de la temperatura de la superficie del suelo.
- d) Modelo Noah Land Surface Model (NOAH\_LSM). Este modelo es capaz de predecir la humedad y la temperatura del suelo en cuatro capas: 10, 30, 60

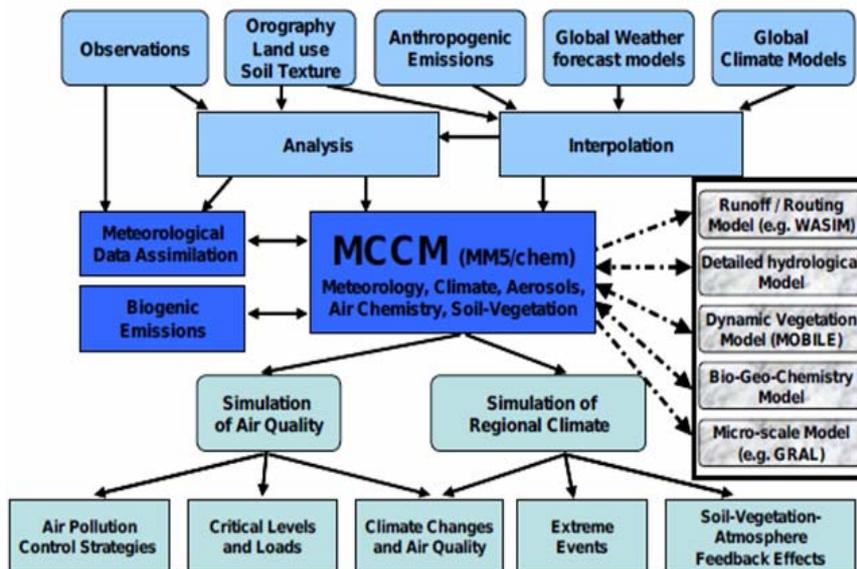
y 100 cm de espesor, así como la humedad de la capa Canopy (capa húmeda del suelo) y la profundidad del agua equivalente de la nieve. El NOAH\_LSM hace uso la vegetación y del tipo de uso suelo para tener en cuenta los efectos tales como, evapotranspiración, conductividad del suelo y flujo gravitacional de la humedad. El NOAH\_ LSM tiene algunas modificaciones y los procesos adicionales para mejorar la cubierta de la nieve, predice también la profundidad física de la nieve y los efectos congelados del suelo. Además de la humedad del suelo, el agua del suelo es una variable separada 4 capas, y la humedad del suelo se toma para ser el total de agua y de hielo del suelo. La altura física de la nieve también se diagnostica y se predice.

- e) Modelo del suelo Pleim-Xiu Land Surface Model (SOIL PX): Este modelo del suelo va acoplado a la parametrización de capa límite Pleim-Chang. Es una combinación de modelos de capa límite y de suelo. Representa la temperatura y humedad del suelo en dos capas, en una superficial de espesor 1 cm y una zona a 1m, así como la humedad de la capa canopy. Trabaja con flujos superficiales, flujos de la capa canopy y flujos de humedad por evapotranspiración. Para más detalle véase Dudhia *et al* (2001).

### 3.5 Descripción del Modelo MCCM

El modelo MCCM (Multiscale Climate Chemistry Model) es la parte del sistema de modelación, donde la predicción de la meteorología, el transporte de contaminantes y la transformación química toma lugar. El modelo MCCM fue desarrollado en el Instituto Fraunhofer (IFU) en Alemania, siendo en la actualidad una herramienta útil y flexible con la que es posible estudiar el fenómeno de contaminación atmosférica a nivel regional. El modelo MCCM consiste de la parte meteorológica, que principalmente equivale al MM5, y a la parte acoplada de química que incluye advección, intercambio turbulento, emisiones antropogénicas y biogénicas, deposición y transformaciones químicas. En el modelo MCCM todas las capacidades del modelo MM5 se mantienen, por lo que puede utilizarse como modelo no hidrostático (García, 2003). El MCCM incluye varios módulos de química en fase gaseosa, un

modulo de fotólisis y uno de procesos de aerosol que considera como único compuestos sulfatos, nitratos, amonio, agua y 4 compuestos orgánicos. Los procesos de acumulación en modo fase gas-partícula de sulfatos secundarios, nitrato, amonio y componentes de aerosol líquido están basados en equilibrio termodinámicos. La química orgánica asume que los componentes de aerosoles secundarios interactúan con la fase gas y forman una solución cuasi ideal. Las emisiones biogénicas (compuestos orgánicos volátiles y nitrógeno orgánico) de nitrógeno son calculadas de acuerdo a los datos de uso de suelo, la temperatura de superficie y la radiación. Las emisiones de contaminantes primarios son suministrados a intervalos horarios o por inventario de emisiones. El MCCM está vinculado a otros modelos como son modelos hidrológicos y biosfera, estos describen los mecanismos de interacción en cada uno de ellos y sus efectos sobre la calidad del aire y viceversa (Suplan, 2007) ((ver **Figura 3.3**).



**Figura 3.3.** Descripción esquemática del modelo MCCM (Suppan, 2007).

El acoplamiento de la meteorología y la química asegura que los componentes de calidad del aire del modelo MCCM sean completamente compatibles con el transporte meteorológico, debido a que MCCM usa los mismos módulos de meteorología que el modelo MM5. También usa los mismos dominios, las

mismas configuraciones físicas empleadas en el modelo MM5. El modelo MCCM a escala regional puede ser aplicado en un rango espacial de varios cientos de kilómetros con resolución de 30-100 km. En áreas urbanas el rango espacial es de 100-200 km con resolución de 1-5 km (Suppan, 2007).

# 4 Área de Estudio

## 4.1 Antecedentes

En 1934, bajo la administración del Presidente Lázaro Cárdenas, se declaró como zona de protección forestal un área de aproximadamente 10,000 km<sup>2</sup> que bordeaban a la ciudad de Guadalajara incluido el bosque La Primavera. Sin embargo, fue hasta el 26 de diciembre de 1970 que el Gobierno del Estado de Jalisco consideró al bosque la primavera como de utilidad pública y uso turístico. Pasaron varios años para que el bosque La Primavera fuera considerado como una zona de reserva urbana. Para 1980, por mandato del entonces Presidente José López Portillo, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Decreto de que por causa de utilidad pública se establecía como Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre la región conocida como La Primavera (ZPFRFSLP), que se localiza dentro de una superficie aproximada de 30,500 has en los Municipios de Tala, Zapopan y Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. Finalmente, fue hasta el 7 de junio del año 2000 que se publicó en el Diario Oficial de la Federación el acuerdo mediante el cual se dota al Área Natural Protegida con una categoría acorde con la legislación vigente, quedando con el carácter de Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) (CONANP, 2000).

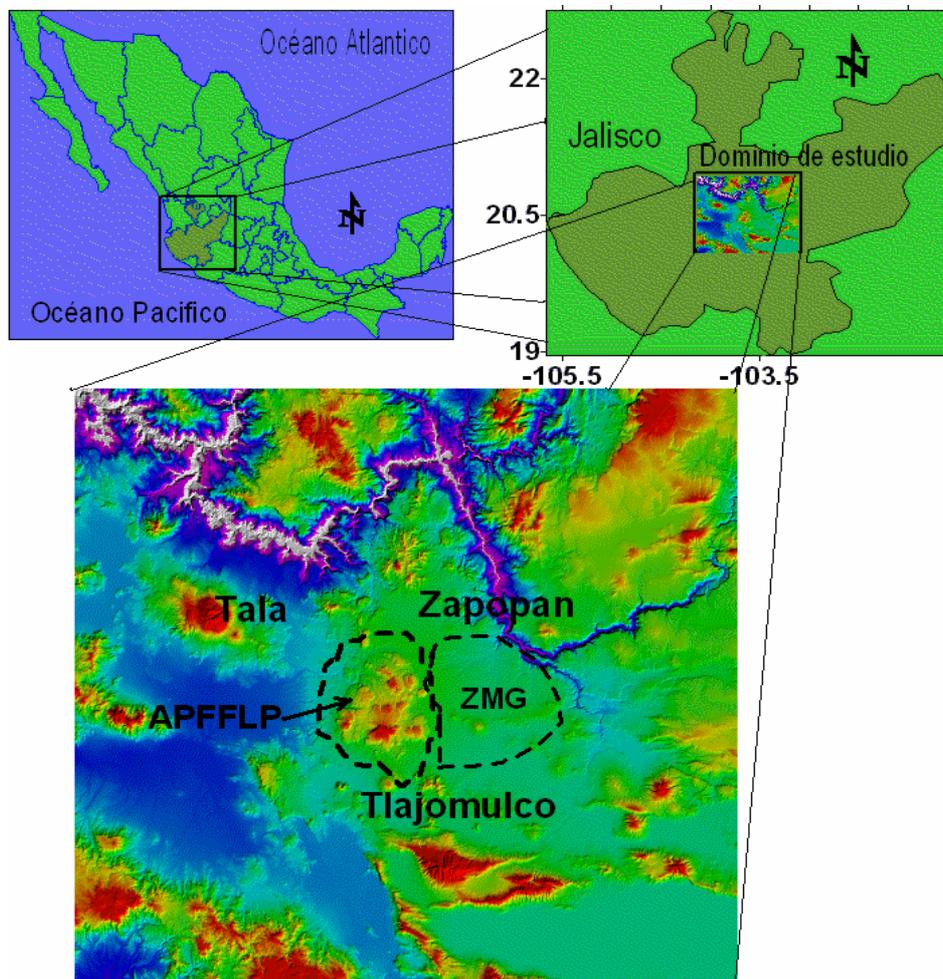
## 4.2 Ubicación Geográfica del APFFLP

El bosque la primavera se localiza al poniente de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), en el centro occidental de Jalisco entre las coordenadas de: 103° 28' a 103° 42' longitud oeste y de 20° 32' a 20° 44' latitud norte (ver **Figura 4.1**). El intervalo de altitud va de 1300 a 2300 m.s.n.m. Se sitúa al centro de 5 valles: Tesistán, Tala, Toluquilla, Atemajac y San Isidro Mesatepec. Se extiende por los municipios de Zapopan, Tala y Tlajomulco de Zúñiga. La

proporción de superficie del Área Protegida en los municipios mencionados se muestra en la **Tabla 4.1**.

**Tabla 4.1:** Porcentaje de área del bosque la primavera.

Municipio:	Porcentaje de superficie perteneciente a APFFLP
Zapopan	54 %
Tala	35 %
Tlajomulco	11 %



**Figura 4.1.** Modelo digital de elevación de APFFLP.

La Primavera es el bosque más cercano a la ciudad de Guadalajara, localizándose al poniente de la misma, y está rodeado por las siguientes carreteras: Guadalajara-Nogales al norte; Tala-Ahuisculco al oeste; Tlajomulco de Zúñiga-San Isidro Mazatepec al sur; y Guadalajara-Barra de Navidad y Periférico poniente de la Ciudad de Guadalajara desde la Av. López Mateos hasta la Av. Vallarta, al este.

El APFFLP tiene alrededor de 22 puntos de acceso mediante caminos de terracería y brechas, tres de los cuales se utilizan principalmente con fines recreativos: uno por la Av. Mariano Otero, en el lado oriente de esta zona, y dos en el lado norte, por el ejido La Primavera y Puente Las Tortugas. Los 19 accesos restantes tienen usos y destinos variados, tales como el ingreso a pequeñas poblaciones (Emiliano Zapata) o a fraccionamientos (Pinar de la Venta, El Palomar y El Roble); ingreso a zonas de ganadería extensiva, siembra, a instalaciones de educación ambiental (Centro de Ecología y Bosque Escuela de la Universidad de Guadalajara), y otros (CONANP,2000).

#### 4.3 Medio Físico

El Área de Protección de Flora Fauna la Primavera (APFFLP), comprende la zona de traslape entre dos provincias florísticas: la Sierra Madre Occidental y las Sierras Meridionales o Eje Neovolcánico Transversal. Está constituida por áreas montañosas aisladas, donde se distribuyen diferentes comunidades vegetales conformadas por bosques de encino-pino, vegetación riparia y bosque tropical caducifolio. Estas características favorecen que el APFFLP sea considerado una fuente importante de servicios ambientales para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG). Como flora nativa predomina el bosque de pino-encino, encontrándose rodales puros de pino y de encino, de las especies de pino destacan: *Pinus devoniana* (*P.michoacana*) y *Pinus oocarpa*, mientras que de las especies de encino, se tienen *Quercus Magnoliifolia* y *Quercus Viminea*. Se encuentran asociaciones donde predomina el encino sobre el pino. En el sustrato inferior destaca la vegetación herbácea y algunos pastos, hallándose varias especies de flores compuesta, dentro de esta se

tienen: *Dalia coccinea*, *Vevuencia greenmania*, *Asistida spp*, *Mulenbergia spp* y *Paspalum spp* entre otras. En forma natural y también desarrollados artificialmente, se tienen áreas de pastizales y matorrales, producto de la actividad ganadera que se ha ido implementando en la zona. La calidad de arbolado no es muy buena desde un punto de vista comercial, sin embargo, cumple funciones muy importantes como son: Protección del suelo, hábitat y alimento a la fauna (CONANP, 2000 y Flores Garnica, 2005).

Fisiográficamente, el APFFLP es uno de los relieves volcánicos con mayor diversidad de manifestaciones ígneas ácidas, cuyos suelos presentan una alta proporción de arenas pomáceas, lo que le confiere una alta vulnerabilidad a la erosión.

La captación media anual de agua de lluvia es de 240 millones de metros cúbicos, lo cual genera un potencial hídrico superficial y subterráneo que es aportado a tres cuencas hidrológicas de suma importancia para el estado de Jalisco. Así mismo, de las recargas de esta área dependen una importante superficie con infraestructura de riego, algunas industrias como los ingenios de Tala, Ameca y Bella Vista, así como un gran número de pozos, manantiales y norias de importancia vital para los pobladores del bosque y de su área de influencia (Gallegos, 2002).

#### 4.4 Clima

El clima en la zona de Guadalajara es subtropical, que difiere del clima tropical por la diferencia de altitud. Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García, (1973), el clima predominante en el APFFLP está representado por dos tipos: templado subhúmedo y semicálido subhúmedo, ambos con lluvias en verano e invierno con precipitaciones anuales que fluctúan entre 800 y 1,980 mm. El 77% de las lluvias se consideran de tipo erosivas (lluvias ácidas). La temperatura media anual es de 20.6 °C, siendo el mes más frío enero y el más cálido junio. El promedio anual de humedad es de 63%. Los vientos dominantes provienen del suroeste, con una velocidad máxima 53 km/h. Los días más despejados se presentan con mayor frecuencia

en invierno y primavera, entre los meses de octubre a mayo (CONANP, 2000 y Gilabert, 2005).

#### 4.5 Suelo

Las unidades de suelo que constituyen el área, están clasificadas por regosol y litosol. El regosol conforma el 92% del APFFLP, el cual es derivado del intemperismo de la toba, pómez y riolita. En el restante 8% de la superficie se encuentran distribuidos suelos de tipo litosol (Gallegos, 2002). Ambos suelos se caracterizan por presentar una profundidad efectiva máxima de acuerdo a lo siguiente: el 44% de la superficie con suelo presenta un espesor de 10 a 30 cm; el 9% de 30 a 60 cm y el 47% restante es mayor de 60 cm. El 80% del suelo involucrado en el APFFLP presenta valores de contenido de materia orgánica menores al 2%, lo que indica que no existe el suelo típico de bosque como era de esperarse.

Otro de los componentes que forman los agregados es la arcilla, cuyo porcentaje es menor al 15%. El color del suelo fluctúa entre café pálido, amarillo oscuro y rojizo (CONANP, 2000).

#### 4.6 Uso del Suelo

Un estudio conducido por Gallegos et al (2002) para un periodo de 25 años, constató que la cobertura arbórea se ha mantenido constante en un promedio del 90%. La cobertura Agrícola-Pastizal mostró una dinámica alternada. En algún tiempo el pastizal tuvo mayor ocupación espacial que la agricultura y viceversa sin rebasar en un promedio el 10% de ocupación en el APFFLP. La cobertura de Urbanización es la que presentó mayor cambio (Gilabert, 2005) (ver **Tabla 4.2**).

**Tabla 4.2.** Porcentaje de ocupación de uso de suelo. Gallegos et al 2002.

USO	1977	1986	1993	2002
Agricultura	4.0 %	9.8%	4.0%	3.6%
Pastizal	6.0%	0.9%	3.9%	5.9%
Bosque	89.0%	89.4%	91.9 %	90.35
Urbanización	Sin datos	Sin datos	0.2%	0.2%

#### 4.7 Geología

El bosque La primavera forma parte de un macizo montañoso de origen volcánico y tectónico, con una antigüedad aproximada de 30 millones de años. Esta zona procede del periodo terciario superior, a fines a la época del mioceno, continuando con su estructuración durante todo el cenozoico superior en la que siguieron las emisiones volcánicas. El último periodo importante para la parte central de Jalisco fue el cuaternario superior, Pleistoceno superior y Holoceno, en el cual se produjeron los derrames de lavas ácidas que dieron lugar a la formación de la sierra La Primavera. Las primeras erupciones que dieron lugar a la formación del APFFLP se remonta a 130,000 años atrás. La actividad volcánica culminó hace 28,000 años con la formación del Cerro Pelón y el Cerro El Colli, que son los domos más recientes. Las rocas predominantes son ígneas extrusivas ácidas con menor resistencia a la erosión. El tipo de roca y su proporción son: Riolita porfírica 10%, toba limparítica 46%, pómez 34%, obsidiana 8% y andesita basáltica 2%. Estos materiales presentan una edad que va de los 25 mil a los 5 millones de años, siendo las formas más recientes las correspondientes a La Primavera, que manifiesta un relieve producto de una caldera de tipo explosivo, aproximadamente de 11 km de diámetro y modificada por diversos domos riolíticos en la zona de fractura anular (CONANP,2000 y Gilabert, 2005).

## 4.8 Hidrología

Los patrones de drenaje más comunes en la región de la sierra la Primavera son de tipo dendrítico y subdendrítico radial, con una densidad de 2.3 corrientes por km<sup>2</sup> y con un escurrimiento de 100 a 200 mm/año (Gilabert, 2005). La captación media anual de agua de lluvia es de 240 millones de metros cúbicos, lo cual genera un potencial hídrico superficial y subterráneo que es aportado a tres cuencas hidrológicas de suma importancia para el estado de Jalisco, La Vega Cocula, Lago de Chapala y Río Santiago-Guadalajara y cuatro subcuencas. Río Verde Bolaños, Río Salado, Laguna San Marcos y Corona-Río Verde, que abastecen acuíferos de los valles Atenajac-Tesistan, Toluquilla y Etzatlan-Ahualulco y de manera indirecta a los del valle de Ameca (CONANP, 2000). Los ríos y arroyos más importantes son: Río Salado, Río Ahuiscolco, Arroyo Las Tortugas, Arroyo blanco, Arroyo a las Ánimas, Arroyo la Villa y Arroyo Agua Caliente. También, se encuentran 8 presas que dependen de la recarga del bosque, 1,158 pozos, 57 manantiales y 452 norias de importancia (Gilabert, 2005).

## 4.9 Flora

A la fecha, dentro del área de estudio se han registrado 961 especies de plantas vasculares, agrupadas en 6 Divisiones, 107 Familias y 419 géneros. De las 6 divisiones: Psilotophyta, Equisetophyta, Lycopodiophyta, Polypodiophyta, Pinophyta y Magnoliophyta. La División Magnoliophyta es la más importante dentro de la región con 933 especies, siendo la clase Magnoliopsida la que contribuye mayormente con 621 y la clase Liliopsida con 312 especies, conformando ambas el 97.80% del total de especies. Las demás divisiones en su conjunto contribuyen pobremente en la flora con tan sólo 21 especies (2.20% del total). De las 107 familias registradas, en tan sólo 6 familias podemos encontrar 557 especies, lo que constituye más de la mitad (58.37%) del total de especies agrupadas en 202 diferentes géneros. Las familias más importantes por su diversidad son Gramineae, Compositae y

Leguminosae, las cuales constituyen un 18.76 %, 15.72 % y 11.74 % respectivamente. La clase Liliopsida, a pesar de estar constituida por sólo 15 familias, representa el 32.70 % del total de la flora siendo la familia Gramineae la de mayor importancia con 179 especies abarcando el 18.76%. La clase Magnoliopsida, con 621 especies, conforma el 65.09 % del total de la flora, siendo las familias Compositae y Leguminosae las más representativas, ya que con 150 y 112 especies, conforman el 15.72% y el 11.74% respectivamente (CONANP, 2000).

#### 4.10 Vegetación

La diversidad vegetal del APFFLP se ve influenciada por estar comprendida en la zona de traslape de dos provincias florísticas: la Sierra Madre Occidental y Sierras Meridionales o Eje Neovolcánico Transversal. A su vez, estas provincias se localizan en la Región Mesoamericana de Montaña, formada por la confluencia entre dos grandes regiones biogeográficas: Neártico y Neotropical. En el APFFLP se encuentran cuatro tipos de vegetación de acuerdo a la clasificación de Rzedowski, siendo los siguientes: bosque de encino (*Quercus*); bosque de encino-pino (*Quercus-Pinus*); bosque de pino (*Pinus*) y bosque tropical caducifolio; así como tres comunidades vegetales, riparia, rupícola y ruderal, que se desarrollan dentro de los diferentes tipos de vegetación antes mencionados (CONANP,2000).

La siguiente descripción de comunidades vegetales está basada en el estudio botánico que conforma el Programa de Manejo del APFFLP (2000).

Bosque de encino (*Quercus*). Esta comunidad presenta elementos arbóreos con alturas que van desde los 6 a 8 m, con la excepción de *Quercus castanea* cuya altura sobrepasa los 15 m. De acuerdo con la fisonomía de las especies, *Quercus resinosa* es la especie dominante para esta comunidad, con una presencia subordinada de *Q. magnoliifolia*; las especies más comunes en esta comunidad, para los diferentes estratos, se presentan como sigue: además de las especies mencionadas, para el estrato arbóreo encontramos *Quercus castanea*, *Clethra rosei* y *Arbutus xalapensis*; en el estrato arbustivo tenemos

*Comarostaphylis glaucescens* y *Vaccinium stenophyllum*; y en el estrato herbáceo, ejemplares de *Andropogon pringlei*, *Aristida jorullensis*, *Nemastylis tenuis*, *Sisyrinchium palmeri*, *Bletia roezlii* y *Bletia macristhomochila*.

A continuación se discute el bosque de encino-pino (*Quercus-Pinus*). Este tipo de vegetación es el más representativo y abundante del APFFLP y se presenta en todos los gradientes topográficos del área (ver **Figura 4.2**). Además, presenta elementos arbóreos con alturas de 6 a 15 m, su aspecto es ligeramente cerrado y en ocasiones abierto, con una serie de asociaciones conforme se incrementa la altitud y disminuye la temperatura, como se puede observar en la **Tabla 4.3**.



**Figura 4.2.** Agrupaciones vegetales dentro del Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. Fuente: Dirección Ejecutiva del Bosque.

**Tabla 4.3.** Variación en altitud de las especies del bosque de encino-pino.

Rango altitudinal (m.s.n.m)	Asociaciones
1,800 a 1900	<i>Quercus castanea</i> , <i>Q. laeta</i> , <i>Q. obtusata</i> y <i>Pinus oocarpa</i>
1,900 a 2000	<i>Q. coccolobifolia</i> , <i>Q. viminea</i> , <i>P. oocarpa</i> , <i>Clethra rosei</i> y <i>Agarista mexicana</i>
2,000 a 2,225	<i>Q. magnoliifolia</i> , <i>P. douglasiana</i> y <i>Prunas serotina</i> var. <i>Capuli</i>

La última de las asociaciones mencionadas se halla principalmente en el cerro San Miguel y en el cerro Planillas, que son los más altos del APFFLP. Los elementos del estrato arbustivo en esta comunidad alcanzan alturas de 1 a 3 m y se presentan en una distribución espaciada. Los más comunes son: *Calliandra anomala*, *Diphysa suberosa*, *Comarostaphylis glaucescens*, *Vaccinium stenophyllum* y *Agave guadalajarana*. El estrato herbáceo comprende especies tales como: *Aristida barbata*, *Aristida hintonii*, *Dalea pectinata* y *Lostephane heterophylla*, entre otras.

Bosque de pino (*Pinus*). El pinar es una comunidad con aspecto siempre verde y se caracteriza por presentar elementos dominantes con alturas de 8 a 15 m. Este tipo de vegetación es muy escaso en el APFFLP. La especie dominante en esta comunidad es *Pinus oocarpa*, siguiendo en orden descendente *Pinus devoniana*, *P. douglasiana*, *P. lumholtzii* y *P. luzmariae*, los cuales son acompañados por otras especies arbóreas como: *Arbutus glandulosa*, *Arbutus xalapensis*, *Clethra rosei* y *Quercus magnoliifolia*. El estrato herbáceo presenta principalmente gramíneas amacolladas tales como: *Muhlenbergia robusta*, *M. watsoniana*, *Eragrostis* sp., *Aristida jorullensis*; otras especies frecuentes son: *Desmodium grahamii*, *Eryngium comosum*, *Habenaria jaliscana*, *H. novemfida* y *Bletia encifolia*.

Bosque tropical caducifolio. Este tipo de vegetación tiene una baja presencia en el APFFLP, ya que se ubica solamente en el cerro El Colli y en la región sureste del área protegida, en altitudes de los 1,450 a 1,600 msnm. La altura de sus elementos varía entre 5 y 15 m; se distribuye de manera ligeramente densa y la mayoría de las especies arbóreas pierden sus hojas durante la época seca del año. En esta comunidad se observan tres estratos bien definidos. El estrato superior está compuesto principalmente por: *Ficus petiolaris*, *F. glaucescens*, *F. cotinifolia*, *Ceiba aesculifolia*, *Lysiloma acapulcense*, *Quercus magnoliifolia* y *Q. resinosa*. El estrato medio lo componen especies tales como: *Bursera fagaroides*, *B. bipinnata*, *B. multijuga*, *B. palmeri*, *B. penicillata* y *Croton cilliato-glandulifera*. Las herbáceas más

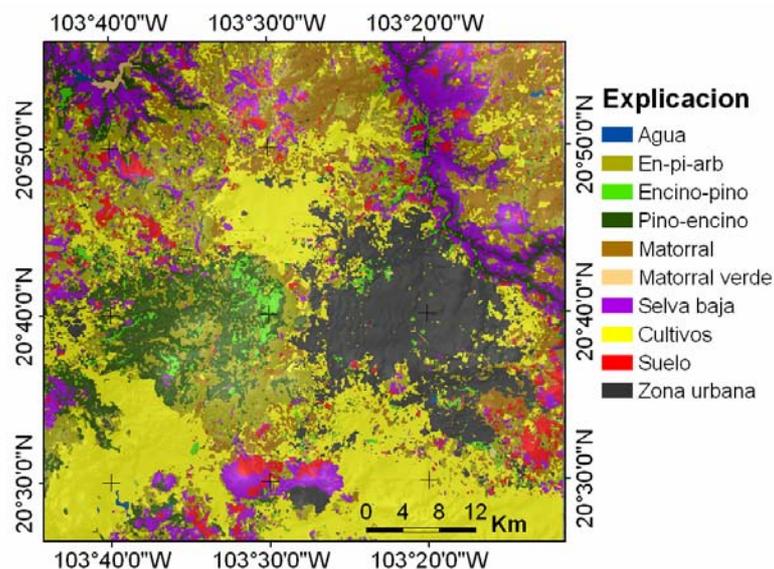
frecuentes en la época de lluvias son: *Phaseolus coccineus*, *Passiflora sp.*, *Physalis jaliscensis*, *Cestrum nitidum*, *Gonolobus jaliscensis*, *Oplismenus burmanii*, *Canavallia villosa*, *Dalia coccinea*, *Dioscorea sparciflora*, *Sacoila lanceolata* y *Spiranthes aurantiaca*, entre otras.

Comunidad riparia. Esta comunidad es característica de las márgenes de ríos y arroyos permanentes o temporales, principalmente en los ríos Salado, Ahuisulco y en los arroyos Las Ánimas, El Taray y Caliente entre otros. Los elementos que conforman su fisonomía presentan una heterogeneidad de alturas, siendo comunes para el estrato superior elementos con alturas de 6 a 10 m. Las especies más comunes para el estrato arbóreo son: *Salix humboldtiana*, *Lysiloma acapulcense*, *Psidium guajava* y *Clethra rosei*. El estrato medio lo componen: *Salix taxifolia*, *Kosteletskya tubiflora*, *Leucaena macrophylla*, *Myrica mexicana* y *Tecoma stans*. Las herbáceas más frecuentes en la época de lluvias son: *Aster subulatus*, *Cyperus amabilis*, *C. seslerioides*, *Habenaria crassicornis*, *Oplismenus burmanii*, *Sporobolus macrospermus*, *Commelina diffusa*, *Heteranthera reniformis*, *Polygonum punctatum* y *Heimia salicifolia*.

Comunidad rupícola. Son aquellas plantas que se desarrollan sobre las rocas y en los cantiles rocosos. En el APFFLP las especies rupícolas más comunes son las siguientes: *Begonia gracilis*, *Pitcairnia karwinskiana*, *Agave guadalajarana*, *Sedum sp.*, *Echeveria dactylifera*, *Mammillaria jaliscana*, *Opuntia robusta* y *Ficus petiolaris*, entre otras.

Comunidad ruderal. El establecimiento de esta comunidad se ha visto propiciado por la apertura de caminos y áreas de cultivo, las que son abandonadas posteriormente. Su presencia contribuye tanto a evitar la erosión del suelo como a favorecer la formación del mismo. Las especies que lo forman son: *Acacia farnesiana*, *Acacia pennatula*, *Datura stramonium*, *Hyptis albida*, *Nicotiana glauca*, *Senecio salignus*, *Wigandia urens* y *Verbesina greenmanii*. *Bidens odorata*, *B. pilosa*, *Bouteloua repens*, *Brassica campestris*, *Cosmos bipinnatus* y *C. sulphureus*.

Para complementar la formación a cerca del tipo de vegetación del dominio de estudios se realizó una clasificación de vegetación. Esta clasificación, se realizó utilizando el método de clasificación supervisada. Este método se define informalmente como el uso de muestras (o píxeles) de identidad conocida para clasificar píxeles de identidad desconocida. Se asume que cada clase espectral puede ser descrita por una distribución probabilística que determina la pertenencia de un píxel a una clase dada en el espacio espectral (Noyola Medrano, 2005). La clasificación supervisada se realizó usando una imagen de satélite landsat TM tomada el 8 de mayo del 2001 (ver **Figura 4.3**).



**Figura 4.3.** Clasificación de vegetación dentro del dominio de estudio y Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera realizada a partir de una imagen Landsat TM del 8 de mayo del 2001.

En el área de estudio se identificaron varios tipos de vegetación y cuerpos de agua según se observa en la **Figura 4.3**. Los tipos de vegetación identificados coinciden con lo que se ha documentado anteriormente en este trabajo.

#### 4.11 Fauna

El APFFLP cuenta con un registro de 200 especies de vertebrados, distribuidos en 7 de peces, 19 anfibios y reptiles, 135 de aves y 29 de mamíferos. El área

cuenta con un registro de 200 especies de vertebrados, distribuidos en 7 de peces, 19 de anfibios y reptiles, 135 de aves y 29 de mamíferos (entre los mamíferos presentes en el área de estudio se encuentran: Jaguarundi. Estas especies se encuentran enlistadas en la categoría de amenazadas. Entre los carnívoros registrados recientemente cabe destacar la presencia del puma, por ser una especie indicadora de calidad del hábitat. Además, se cuenta con registros de otros mamíferos mayores como el gato montés, venado cola blanca, armadillo, comadreja, coyote y la zorra gris, entre otros). Se ha encontrado que de estos registros, 19 se encuentran enlistados bajo alguna categoría de protección, de conformidad con la NOM-059-ECOL-1994.

#### 4.12 Aves

Hasta la fecha se tienen registros de 135 especies de aves, correspondientes a 92 géneros, 29 familias y 12 órdenes, de las cuales 12 especies están incluidas en la NOM-059-ECOL-94, distribuidas de la siguiente manera: *Accipiter striatus*, *Bubo virginianus*, *Icterus cucullatus*, *Icterus wagleri*, *Regulus calendula* y *Melanotis caerulescens*, 6 están amenazadas y de éstas, las dos últimas son endémicas; 2 bajo protección especial: *Buteo jamaicensis* y *Myadestes townsendii*; 2 en peligro de extinción: *Colinus virginianus* y *Pipilo erythrophthalmus* (ésta última también es endémica); y 2 raras: *Passerculus sandwichensis* y *Myioborus pictus*.

#### 4.13 Reptiles y Anfibios

Estos grupos han sido poco estudiados en el APFFLP, por lo que el número de registros oficiales es muy reducido. Hasta el momento se tienen registros de 19 especies pertenecientes a 17 géneros.

#### 4.14 Población

El APFFLP ocupa partes de tres municipios del Estado de Jalisco. Las principales características poblacionales de cada uno de estos municipios y su extensión territorial se muestran en la **Tabla 4.4**.

**Tabla 4.4.** Censo Poblacional 2000 (Gilabert, 2005).

Municipio	Extensión territorial (km <sup>2</sup> )	Población total	Densidad de población (Hab/km <sup>2</sup> )
Tala	389.24	53,616	137,75
Tlajomulco	636.93	123,619	194,08
Zapopan	893.15	1,001,021	1120,77
Total del estado	80,138	6,322,002	78.89

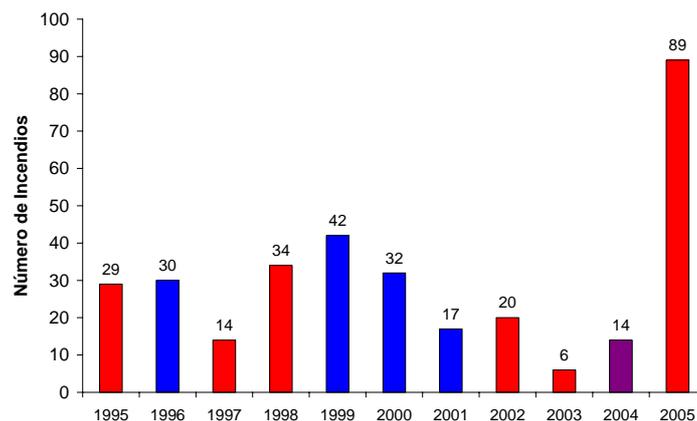
El 50% de la superficie del APFFLP es de propiedad privada, el 35% es propiedad ejidal y el 15% restante es de propiedad del gobierno. Por su ubicación geográfica y al estar en las fronteras de las poblaciones mencionadas anteriormente, el Área de Protección de Flora y Fauna la Primavera, experimenta diversos problemas ambientales, como son pérdida de cobertura de suelo, de especies animales, deforestación, invasión por zona urbana, ganadera, agrícola y uno de los más graves son los incendios forestales de acuerdo con varios trabajos de investigación que se han realizado en el área de estudio. La flora y la fauna que se han mencionado anteriormente se ven amenazadas por el recurrente fenómeno de incendios forestales.

Es fundamental tener presente lo que pueden destruir los incendios forestales, cuya mayoría son de origen antropogénico.

# 5 Modelación Numérica de Aerosoles Producido por Incendios Forestales, Caso de Estudio

## 5.1 Incendios Forestales en el Bosque La Primavera

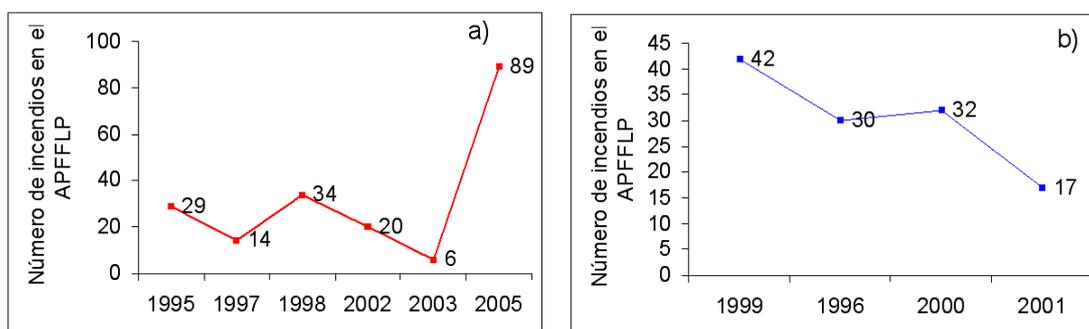
El fuego es una constante en todo ecosistema forestal. Por lo que, el bosque la primavera no ha sido la excepción en experimentar este evento recurrente año con año. Datos estadísticos reportados por la Administración del APFFLP para el periodo 1995 – 2004, en el bosque la primavera han ocurrido 207 incendios forestales. Por otra parte, la CONABIO reporta 89 puntos de calor como incendios forestales ocurridos durante el año 2005 en el bosque La Primavera. Por lo que, el número de incendios forestales ocurridos en el bosque La Primavera durante el periodo 1995-2005 es de 296, véase la **Figura 5.1**. Este número de incendios justifica sobradamente el investigar también sus consecuencias indirectas en deteriorar la calidad del aire en la zona urbana adyacente. La explicación de que en el año 2005 hayan ocurrido muchos incendios en el APFFLP se debe a varios factores: acumulación del combustible forestal, condiciones climáticas a adecuadas para la ignición del fuego, mantenimientos de las tierras de uso agrícolas que se encuentran adyacente al APFFLP.



**Figura 5.1.** Incendios forestales ocurridos en el APFFLP (Datos: Dirección ejecutiva del APFFLP y CONABIO).

## 5.2 Efecto de El Niño-La Niña en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera

En referencia a la alteración climática que se genera en varias partes del planeta cuando se tiene la presencia del evento ENSO (Véase capítulo 1), las anomalías en la temperatura, presión y humedad incrementa el riesgo de incidencia de los incendios forestales. El Área de Protección de Flora y Fauna La primavera ejemplifica que la presencia del ENSO influye en la ocurrencia de incendios forestales. En la **Figura 5.2a**, indica años con presencia de El Niño y la **Figura 5.2b** muestra años con evento de La Niña. El año 2004 es considerado un año normal (sin presencia del ENSO), el número de incendios en ese año fue de: 14 (véase la **Figura 5.1**). Nótese que en años El Niño se tiene más incendios que en años La Niña. Por lo que, la presencia del ENSO desempeña un papel fundamental en la ocurrencia de incendios. La distribución y cantidad disponible del combustible forestal es de vital importancia para que en algunos años se incremente el número de incendio que en otros años.



**Figura 5.2.** Número de incendios en años El Niño a) y La Niña b). Datos: Dirección ejecutiva del bosque.

## 5.3 Impacto del Fuego en el Combustible del Bosque La Primavera

La distribución del combustible forestal en los ecosistemas forestales determina el comportamiento del fuego, lo que propicia si los incendios son de baja o alta intensidad. En consecuencia, los efectos variables en todo el entorno del

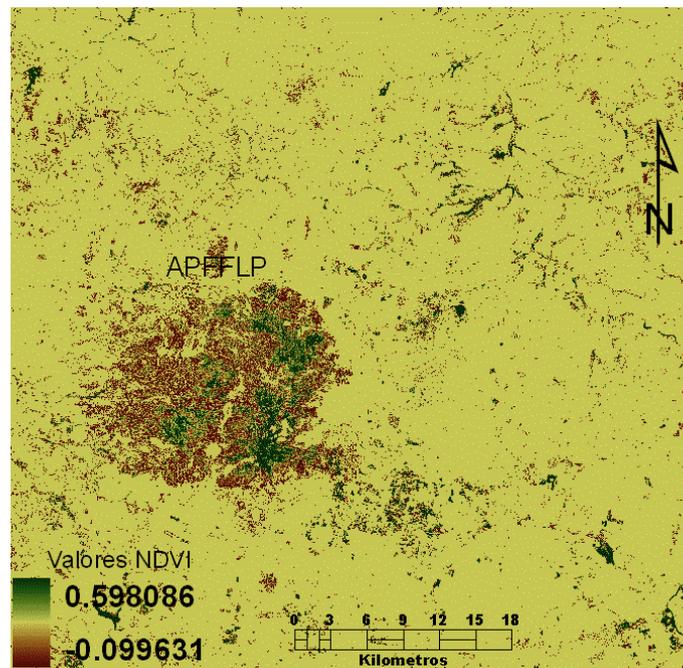
ecosistema contribuyen a tipificar el incendio forestal. Un estudio realizado por Flores Garnica *et al* (2005), evaluó el impacto del fuego sobre el combustible forestal en el bosque La Primavera, y muestra que el incremento de incendios en algunos años, depende de las condiciones climáticas y la cantidad acumulada de combustible. Esto se debe a que los incendios forestales son más intensos en las áreas donde el material combustible es abundante y seco. La distribución en continuidad vertical de los árboles favorece la acumulación del material combustible. Cada vez que ocurre un incendio, las llamas del fuego afectan la copa de los árboles. De esta manera, el material que se quema, en poco tiempo es sustituido por el material de la copa de los árboles que no se quemó completamente y va quedando como reserva de combustible. Los bosques de pino como el del APFFLP se caracterizan por acumular materia seca lo que favorece la ocurrencia de incendios anualmente. Siguiendo con el estudio de Flores Garnica, en el bosque La Primavera destacan combustibles finos y gruesos. El estudio se hizo tomando en cuenta áreas con antecedentes de incendios y áreas sin antecedentes de incendios. En áreas con antecedentes de incendios, se encontró que la cantidad de combustible grueso en promedio es de 2.2 ton/ha y la cantidad de combustible fino en promedio es de 22 ton/ha. Para áreas sin antecedentes de incendios se encontró un promedio de carga de combustible grueso de 0.224 ton/ha y de combustible fino de 6.3 ton/ha. Los rangos de carga de combustible que se determinaron en ese estudio muestran que los incendios son más destructivos en áreas sin antecedentes de incendios que en área con antecedentes de incendios. También se determinó que los combustibles en las áreas con antecedentes de incendios se recuperan en siete u ocho semanas, favoreciendo la presencia de incendios recurrentes en el bosque La Primavera.

#### 5.4 Evaluación de Zonas de Riesgo de Incendios Forestales en el APFFLP

Es evidente que la distribución del combustible desempeña un papel importante en la ocurrencia de incendios de un ecosistema. En el caso del

bosque La Primavera, donde los incendios son recurrentes, la distribución del combustible es uno de los factores que favorece los eventos año con año. De acuerdo con la **Figura 5.1**, se infiere que en promedio ocurren 29.7 incendios por año en el APFFLP.

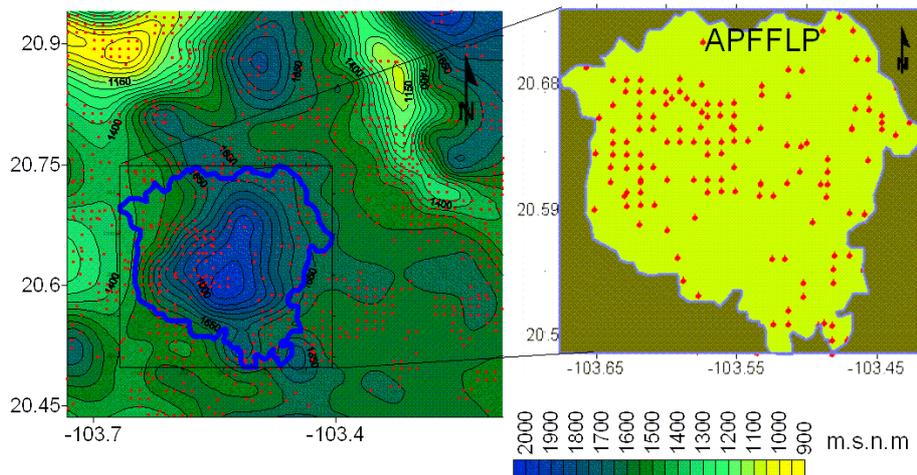
Haciendo un cálculo de índice de diferenciación normalizada de vegetación (NDVI) es posible conocer la distribución de materia seca (combustible forestal) en un área de interés. Básicamente lo que se calcula es el vigor de la vegetación, es decir la cantidad de clorofila contenida en las hojas o tallos de las plantas, el NDVI está definido como:  $NDVI = (\rho_{IRC} - \rho_R) / (\rho_{IRC} + \rho_R)$ , donde  $\rho_{IRC}$  y  $\rho_R$  indican la reflectividad en el canal del infrarrojo cercano y en el rojo, respectivamente (Luévano, 2006). El índice de vegetación se calcula usando datos de imágenes de satélite, por ejemplo, la **Figura 5.3** es una imagen de satélite Landsat TM. La imagen muestra el índice de vegetación del APFFLP para el 22 de abril del 2003.



**Figura 5.3.** Índice de vegetación para el APFFLP calculado a partir de una imagen Landsat TM del 22 de abril del 2003. Disponible en:

<http://glovis.usgs.gov/>.

La imagen nos da una representación de la salud de la vegetación del APFFLP para el año 2003 en la época de sequía que regularmente va de enero a junio. El rango de valores de NDVI en la **Figura 5.3** indica que los valores negativos corresponden a vegetación seca y los valores positivos a vegetación viva. En la imagen de NDVI de abril de 2003, se observa que la mayor parte del bosque tiene un alto porcentaje de combustible disponible para un incendio. Sin embargo en la **Figura 5.1** vemos que en el año 2003 hubo pocos incendios comparados con los demás años. En el año 2004 también se tiene pocos incendios, pero en el 2005 se eleva el número de incendios, uno de ellos, se sabe, ha sido el más desastroso. Por otra parte, con los datos estadísticos proporcionados por la CONABIO, se realizó el siguiente mapa, que muestra las posiciones de los incendios ocurridos en el bosque durante el periodo 2000 - 2007.



**Figura 5.4.** Posiciones de incendios forestales ocurridos durante el periodo 2000-2007 en el dominio de estudio de D3 y Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP). Datos: CONABIO.

Según lo que se observa en la **Figura 5.4**, la mayor parte de los incendios forestales en el bosque La Primavera ocurren en la parte oeste. Complementando, la **Figura 5.3** indica que la mayor parte del combustible forestal se acumula también en la parte oeste del bosque. Con esto se concluye que la acumulación de materia seca y las condiciones climáticas

adecuadas favorecen la generación de incendios forestales. Si a esto añadimos las actividades antropogénicas en las áreas de influencias del APFFLP, el riesgo de incidencia de incendios se incrementa en las épocas de sequía en la parte oeste que es la zona vulnerable a incendio forestal.

## 5.5 Estudio de la Dispersión de los Aerosoles Producidos por los Incendios Forestales, Caso de Estudio 25 y 26 de Abril de 2005

El bosque La Primavera experimenta diversos problema de degradación, entre ellos los incendios forestales (CONANP, 2000). La evaluación del impacto global de estos incendios forestales es posible realizarla a través de diversas perspectivas, como pueden ser el cambio climático y el calentamiento global (Gallegos, 2005). En este trabajo, se analiza un evento de incendio forestal ocurrido en el año 2005 en el APFFLP. Se diagnostica el transporte de los contaminantes producidos durante el incendio. El diagnostico se realiza por medio de simulaciones numéricas.

### 5.5.1 Descripción del Evento

El 25 de abril del año 2005 se originó un incendio forestal en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (**Figura 5.5**). El incendio se prolongó hasta el 26 de abril, fecha en la que alcanzó la máxima dispersión del fuego y emisión de aerosoles. El incendio afectó en diversas formas. La superficie total afectada fue de 8,478ha. El área afectada se divide de acuerdo a la siguiente lista:

- 423 ha de arbustos y matorrales,
- 254 ha de arbolado adulto y renuevo, y
- 7,799 ha de pastos nativos e inducidos.

El personal y equipo que participaron en el combate del incendio, pertenecen a diversos organismos gubernamentales (ver **Figura 5.5**). El total de elementos fue de 1,190, todos ellos perteneciente a los siguientes organismos:

CONAFOR, SEDENA, SEDER, BRIGADA TALA II DE LA DIRECCIÓN EJECUTIVA DE APFFLP, BRIGADA SIERRA DE EQUILA, AYUNTAMIENTO DE ZAPOPAN; BOMBEROS DE GUADALAJARA y DE ZAPOPAN, GUARDABOSQUES DE GUADALAJARA, PROTECCIÓN CIVIL DEL ESTADO, PROTECCIÓN CIVIL DE ZAPOPAN, SECRETARÍA DE SEGURIDAD PÚBLICA DEL ESTADO, SECRETARÍA DE SEGURIDAD DE ZAPOPAN, BRIGADA PREPARATORIA NO.2 (VOLUNTARIOS), BRIGADA FORESTAL UNIVERSITARIA Y CIUDADANOS VOLUNTARIOS. Gracias a todos estos participantes en el combate de incendio, fue posible salvar la mayor parte del bosque La Primavera. Los equipos de combate que se usaron fueron: Dos helicópteros de CONAFOR, uno de SEDENA y uno del ayuntamiento de Zapopan; un carro tanque bomba de CONAFOR, dos carros cisternas de bomberos y un carro cisterna de fraccionamientos (RPADEPFFLP, 2005).





**Figura 5.5.** Incendio del 25 y 26 abril de 2005. Fuente: Dirección ejecutiva del bosque La Primavera.

Además de los daños ambientales que se producen en los incendios forestales, también se pierden vidas humanas, en este caso no fue la excepción, uno de los elementos que participaban en el combate del incendio, perdió la vida en el cumplimiento de su deber (REPDEAPFFLP, 2005).

Con los datos que se tienen acerca del incendio forestal ocurrido el 25 y 26 de abril de 2005, es posible calcular de manera aproximada la cantidad de carbón liberado a la atmósfera durante el incendio forestal. También es posible dar una estimación de la cantidad de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno liberado a la atmósfera durante los incendios forestales del 25 y 26 de abril de 2005.

### 5.5.2 Cálculo de la Carga de Biomasa Quemada en el APFFLP el 25 y 26 de Abril de 2005

De acuerdo a lo que se argumenta en la sección 5.3 sobre la carga de combustible que se acumula en el bosque La Primavera, se consideran los siguientes criterios para aproximar la carga de biomasa quemada durante los incendios del 25 y 26 de abril de 2005.

Criterio 1. Se evalúa la carga de combustible para un área sin antecedentes de incendios en el APFFLP, se consideran los siguientes datos:

$A= 8478$ ha, área quemada el 25 y 26 de abril de 2005, reportada por la administración del APFFLP (ver capítulo 5).

$B=24.2$  ton/ha, carga promedio de biomasa acumulada en el APFFLP reportada por Garnica *et al* (2005) (ver sección 5.3).

$E=0.25$ , eficiencia de quema de vegetación, reportada por Michel *et al* (2005) (ver capítulo 2) para un bosque con varios tipos de vegetación.

Sustituyendo los datos anteriores en la ecuación:  $M=ABE$ , tenemos que la carga de la biomasa quemada es:

$$M1= ABE= (8478 \text{ ha}) (24.2 \text{ ton/ha})(0.25)=51,291.9 \text{ ton.}$$

Criterio 2. Se evalúa la carga de combustible para un área con antecedentes de incendios en el APFFLP, se consideran los datos anteriores excepto:  $B=6.524$ ton, Así:

$$M2= ABE=(8478 \text{ ha}) (6.524 \text{ ton/ha}) (0.25)=13,827.6 \text{ ton.}$$

Así, en promedio, la carga de biomasa quemada los días 25 y 26 de abril de 2005 está en un intervalo:

$$13,827.6 \text{ ton} < M < 51,291.9 \text{ ton.}$$

La carga de biomasa está dentro del rango que reporta Helas *et al* (1995).

### 5.5.3 Cuantificación de la cantidad de carbón liberado a la atmósfera el 25 y 26 de abril de 2005

Sustituyendo  $M1$  en la ecuación:  $M(C)= CM$  tenemos que:

$$M1(C)= CM1= (0.45) (51,291.9 \text{ ton})= 23,081.36 \text{ toneladas de carbón.}$$

Análogamente, usando  $M_2$  en la ecuación:  $M(C)=CM$  tenemos:

$$M_2(C) = CM = (0.45) (13,827.6 \text{ ton}) = 6,222.4 \text{ toneladas de carbón.}$$

En los cálculos anteriores  $C=0.45$  es el porcentaje de la biomasa quemada que se transforma en carbón (ver capítulo 2). De los resultados anteriores tenemos que la cantidad promedio de carbón liberado a la atmósfera el 25 y 26 de abril de 2005 está dentro del siguiente intervalo:

$$6,222.4 \text{ ton} < M(C) < 23,081.36 \text{ ton.}$$

#### 5.5.4 Cálculo de la cantidad de $\text{CO}_2$ liberado a la atmósfera el 25 y 26 de abril de 2005

Usando la siguiente ecuación:  $M(\text{CO}_2) = CE(M(C))$  es posible conocer la masa de  $\text{CO}_2$  liberado a la atmósfera el 26 de abril.

A sí,  $M_1(\text{CO}_2) = CE(M_1(C)) = (0.90) (23,081.36 \text{ ton}) = 10,873.224 \text{ toneladas de } \text{CO}_2.$

Similarmente tenemos que:

$$M_2(\text{CO}_2) = CE(M_2(C)) = (0.90) (6,222.4 \text{ ton}) = 5,600.16 \text{ toneladas de } \text{CO}_2.$$

El promedio de  $\text{CO}_2$  liberado está dentro del siguiente intervalo:

$$5,600.16 \text{ ton} < M(\text{CO}_2) < 10,873.224 \text{ ton.}$$

Donde  $CE = 0.90$  es la eficiencia de combustión.

#### 5.5.5 Cálculo de la Cantidad de $\text{NO}_2$ Emitido a la Atmósfera el 25 y 26 de Abril de 2005

Una vez conocido la masa de CO<sub>2</sub> se puede calcular la masa de cualquier otra especie. Por ejemplo, la cantidad de NO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera para la misma fecha.

$$M1(NO_2) = (ER(NO_2))M(CO_2) \text{ toneladas de } NO_2 \\ = (0.21) (10,873.224 \text{ ton}) = 2,283.4 \text{ toneladas de } NO_2.$$

Análogamente,

$$M2(NO_2) = (ER(NO_2)) M(CO_2) = (0.21) (5,600.16 \text{ ton}) = 1,176.03 \text{ toneladas de } NO_2.$$

A sí, el promedio de emisión de NO<sub>2</sub> está dentro del siguiente intervalo:

$$1,176 \text{ ton} < M(NO_2) < 2,283 \text{ ton}.$$

Donde  $ER(NO_2) = 0.21$  es la proporción de emisión NO<sub>2</sub> relativo al CO<sub>2</sub> liberado, véase la tabla 2.3 del capítulo 2.

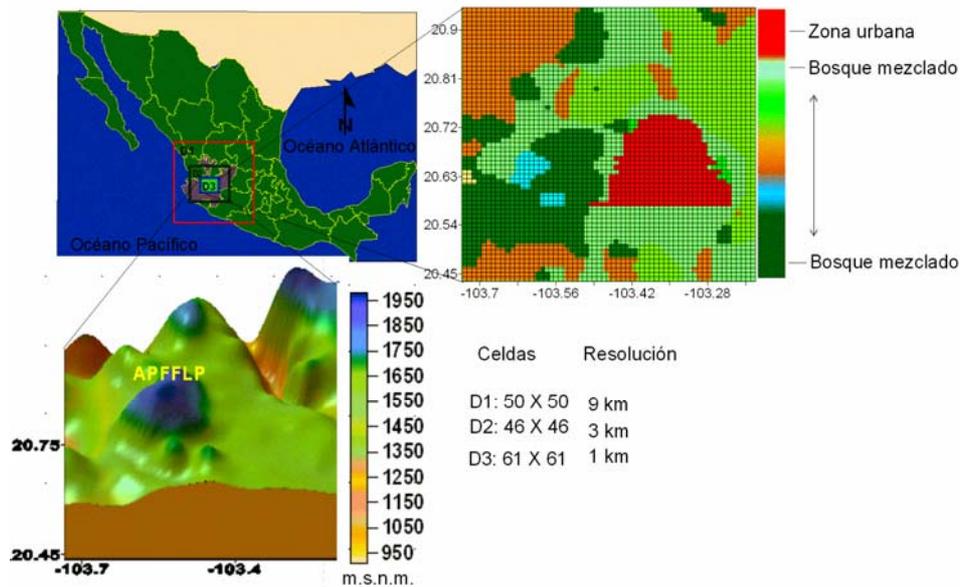
## 5.6 Metodología de la Modelación Numérica

Para realizar la modelación numérica de la dispersión de los aerosoles (humo y partículas) producido en el incendio forestal ocurrido en el APFFLP el 25 y 26 de abril de 2005, se utilizó el Modelo de Mesoescala de Quinta Generación (MM5) y el Modelo Químico y Climático de Mesoescala (MCCM) (Véase el capítulo 3). La modelación se divide en dos partes, en la primera parte se utiliza el modelo MM5 para simular la circulación y en la segunda al Modelo MCCM para simular el transporte o dispersión de los aerosoles. La metodología empleada para modelar con el MM5 se describe a continuación.

### 5.6.1 Creación del Terreno del Dominio Estudio

Un primer paso en la modelación con el MM5 es la elección del dominio de estudio y el correspondiente terreno. En este proceso se hace uso del primer modulo del sistema de modelación de MM5, TERRAIN. En éste, se crean las mallas de los dominios a utilizar (véase el capítulo 3). Para el área de estudio

de nuestro interés, se eligió un anidamiento en una dirección utilizando tres dominios anidados, siendo el dominio principal: el dominio 3 (D3). El dominio D3 del área de estudio, se centró en la coordenada central. (-103.6, 20.64). El dominio D3 tiene la dimensión de 61 X 61 puntos de malla, con un tamaño de celdas de malla de un kilómetro, esto es para tener una mayor resolución o una buena representación del evento que queremos modelar. TERRAIN crea la malla del terreno (topografía) y calcula las coordenadas de latitud-longitud para cada una de las celdas de la malla. Para efectuar estos cálculos en TERRAIN es necesario indicar la coordenada central del dominio D3, luego se interpolan los datos para todos los puntos de la malla. De esta manera se tienen datos de longitud-latitud y altura del terreno para cada punto de malla del dominio 3 (ver **Figura 5.6**). El modelo MM5 cuenta con varias categorías de uso de suelo, por lo que es importante que en TERRAIN se indique el tipo de uso de suelo del dominio a estudiar. La importancia de especificar el uso de suelo en el modelo MM5 se debe a que el modelo considera la interacción que hay entre la atmósfera y el suelo, estas interacciones influyen por ejemplo, en la predicción de flujos de calor, en la humedad relativa, en la distribución de la precipitación y en general en la circulación de la atmósfera. Si no se considerara el uso de suelo los resultados esperados para el evento que se quiere modelar pueden no ser correctos. Para el dominio de estudio se usó una categoría de uso de suelo de bosque mezclado específicamente para el APFFLP. También, se consideró el uso de suelo correspondiente a la zona urbana de la ciudad de Guadalajara. En la **Figura 5.6**, se muestra la gráfica de uso de suelo del dominio D3, el color rojo denota la zona urbana de Guadalajara y los demás colores corresponden a bosque y vegetación mezclada. La forma de la mancha urbana (color rojo en la **Figura 5.6**) no es como en la realidad, pero es lo más aproximado que se puede representar, debido a que en el modelo solo se pueden modificar 200 puntos de malla en cada dominio una vez que se ha elegido el tamaño de resolución.



**Figura 5.6.** Arriba a la izquierda se indican los dominios anidados. A la derecha, la malla y uso de suelo del dominio D3. A la izquierda inferior se muestra la topografía del dominio D3.

Una vez creado el terreno en TERRAIN se procede a la preparación de los datos externos que fijaran las condiciones de frontera e iniciales del dominio más grande del sistema anidado. Para esto, el dominio más grande es alimentado con datos analizados de otros modelos meteorológicos, de esta manera se crean las condiciones iniciales y de frontera para el dominio D1. Una vez que se resuelve para el dominio madre, este genera las condiciones de frontera para el dominio más pequeño. Para este proceso se hace uso del siguiente modulo del MM5, REGRID. Este modulo tiene la tarea de leer los datos de análisis o salidas de otros modelos meteorológicos que se encuentran en niveles de presión e interpolar estos desde su malla y proyección original a las que han sido creadas por TERRAIN.

Tomando en cuenta lo anterior, se investigaron los datos de la meteorología del 24 al 26 de abril de 2005. Los datos meteorológicos para esa fecha se obtuvieron del NCEP (Nacional Center for Environmental Prediction) y que se encuentra disponible en la siguiente página electrónica:

<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/> . Una vez obtenido los datos de meteorología, se sigue a procesar los datos con REGRID, básicamente lo que se hace en este módulo, es leer los datos externos e interpolar al área de estudio.

### 5.6.2 Transformación de Datos de Presión a Coordenadas Sigma

Según como se menciona en el capítulo 3, el modelo MM5 trabaja en la vertical en niveles sigma. Para transformar los datos de presión a coordenadas sigma se utilizan los archivos de salida de REGRID. Los datos son procesados en el módulo INTERPF. La función principal de este módulo es interpolar los datos de presión a coordenadas hidrostáticas en el dominio de estudio. También se realizan otros cálculos en la vertical como la velocidad y la cantidad de agua contenida en la atmósfera entre otros, para más detalles véase Duhia *et al* (2005). Como resultado final en este módulo se obtienen tres ficheros o archivos de salida que son necesarios para integrarlos a sistema MM5.

### 5.6.3 Ejecución del Sistema MM5

Para finalizar el proceso de modelación con el modelo MM5, se integran los archivos de salida de INTERPF y se procede a elegir una configuración de parametrizaciones físicas. En este paso se tienen varias opciones y se escoge la que mejor represente al evento simulado. Para saber si la opción elegida es válida, se compara los datos modelados con datos observados. De esta manera, se asegura que se está representando adecuadamente la física de la atmósfera al momento en que ocurre el evento. En nuestro caso, se realizaron varios experimentos hasta obtener resultados que representaran muy bien la física de la atmósfera al momento en que ocurrió el incendio forestal en APFFLP. En los experimentos se consideraron varias categorías de uso de suelo considerando el tamaño de la mancha urbana correspondiente a la ZMG. También, se consideró el tipo de vegetación. En el experimento final se

consideró un uso de suelo de bosque con varios tipos de vegetación (bosque mezclado). Para los procesos atmosféricos se usó el esquema de humedad relativa. En este proceso se considera una atmósfera cuasi-equilibrio, se consideró los movimientos de aire ascendente y descendente. También, se consideraron los procesos turbulentos en las capas verticales y los cambios de temperatura del suelo.

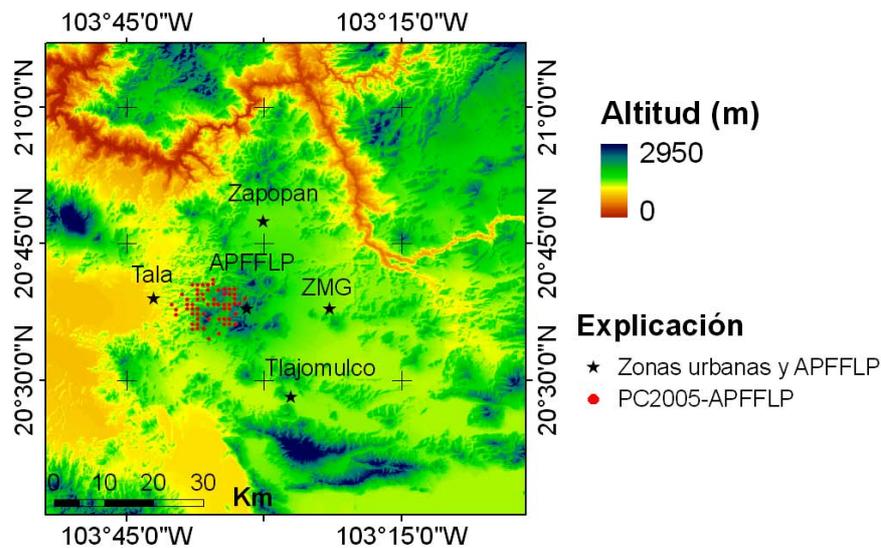
Finalmente con el sistema de modelación MM5 se obtienen los datos de meteorología como son: Velocidad y dirección del viento, temperatura, presión, datos de precipitación y humedad relativa entre otros.

## 5.7 Modelación del Transporte de Contaminantes Usando el Modelo MCCM

Una vez calculadas las variables meteorológicas con el modelo MM5, los archivos de salida son procesados con el siguiente módulo, NESTDOW. Este se encarga de generar las condiciones iniciales y de frontera para el dominio más pequeño. De esta manera, se generaron las condiciones iniciales y de frontera para el dominio D3 del área de estudio. Una vez preparados los datos para el dominio más pequeño, se especifican las concentraciones iniciales del contaminante. Este proceso se realiza en el módulo INITCHEM, en el sistema de modelación del MCCM. INITCHEM suministra los valores de concentración típica de las variables químicas para todos los puntos de malla del tercer dominio. Los valores de concentración se distinguen entre capa límite, tropósfera libre y tropósfera superior.

Las concentraciones para el dominio D3 se indicaron tomando en cuenta lo anterior. La ubicación de las fuentes emisoras de contaminantes, se realiza en el módulo EMISISION. En este se especifica la posición y el tiempo de emisión del contaminante por la fuente emisora. Para el área de estudio la fuente emisora de contaminantes es el incendio forestal. Para realizar este proceso, se indicaron en el modelo las coordenadas geográficas de donde ocurrieron los incendios en el APFFLP el 25 y 26 de abril de 2005.

Las coordenadas de los puntos de calor fueron proporcionados por la CONABIO, organismo encargado del monitoreo de incendios forestales en México. Luego, de manera virtual, se ubicaron las coordenadas de puntos de calor en el dominio D3. La **Figura 5.7**, muestra la posición de las coordenadas de los incendios forestales ocurridos del 25 al 26 abril de 2005 en APFFLP (PC2005-APFFLP).



**Figura 5.7.** Modelo digital del dominio D3 y posición de los puntos de calor en el APFFLP.

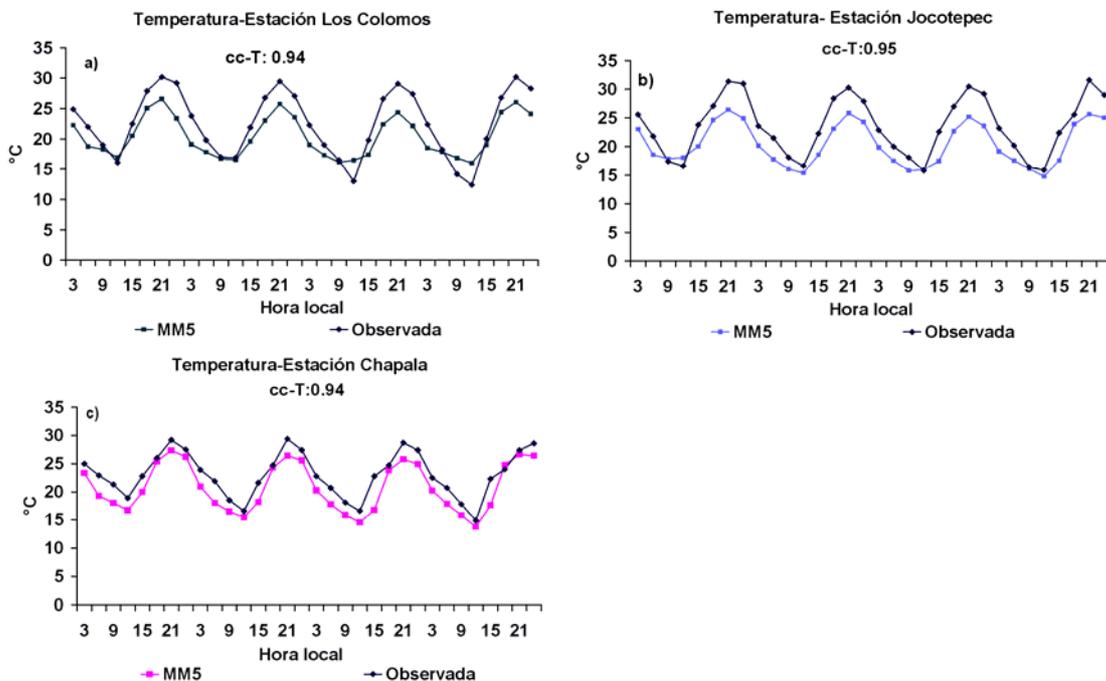
Una vez que se ha indicado la posición y tiempo de emisión de contaminantes por los incendios, el proceso que se sigue es ejecutar el MCCM. Este módulo es parecido al último módulo del sistema de modelación del MM5, por lo que, de acuerdo a la configuración de opciones físicas que se hayan elegido en el MM5 son las mismas para el modelo MCCM. Este es el último paso en la modelación numérica del transporte de contaminantes tanto con el MM5 como con el MCCM. En la modelación con el MCCM, se realizaron varios experimentos, cada uno de estos tuvo una duración de 5 días. Al terminar la simulación con el MCCM lo que sigue es el procesamiento y análisis de los datos obtenidos.

# 6 Resultado y discusión

## 6.1 Validación de Resultados

En esta sección se muestra la validación de los resultados calculados con el modelo MM5. Una forma de validar los resultados es comparar los datos modelados con los datos observados. Los datos para validar los resultados de las diferentes variables meteorológicas fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional. Estos corresponden a las siguientes variables meteorológicas: temperatura, presión, humedad relativa y velocidad y dirección del viento, observadas del 24 al 28 de abril de 2005 en las estaciones meteorológicas Los Colomos, Jocotepec y Chapala. Estas estaciones se localizan dentro del dominio D3.

### 6.1.2 Validación de Resultados para la Temperatura del 24/04/05 al 27/04/05

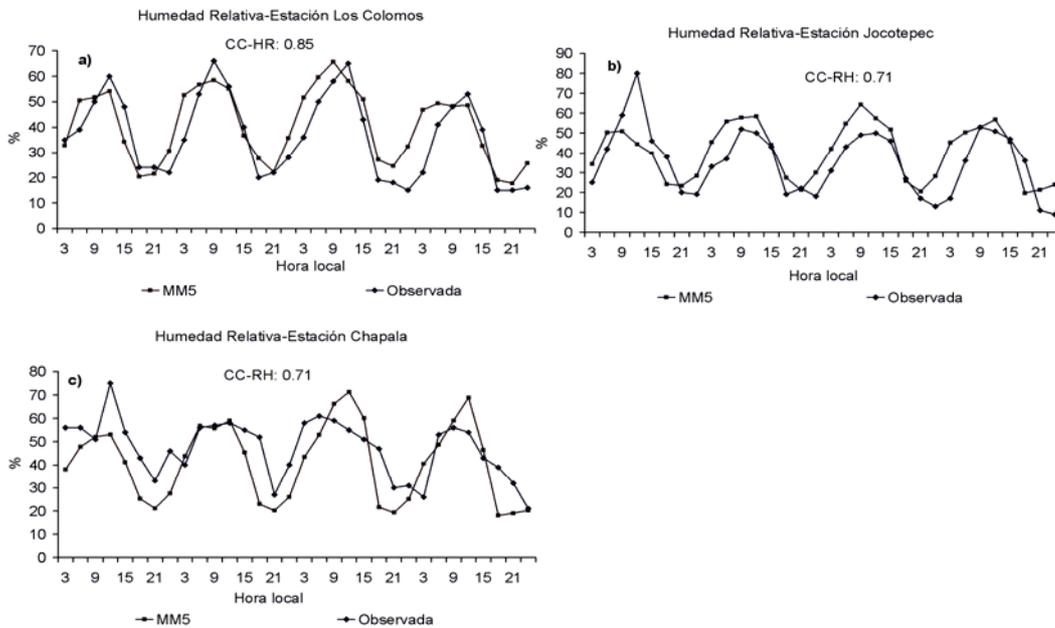


**Figura 6.1.** Comparación de temperatura modelada y observada.

La **Figura 6.1** muestra los resultados obtenidos para la variable temperatura del 24 al 28 de abril de 2005. Este intervalo comprende la fecha en la que ocurrió el incendio forestal en el APFFLP. La **Figura 6.1a** representa los datos de la estación Los Colomos. La temperatura promedio mínima observada en esa estación es de 14.6 °C, y la calculada con el modelo MM5 es de 16.47 °C. La diferencia de los promedios de temperatura es de 1.87 °C. Es interesante mencionar que los máximos de temperatura son mejor reproducidos que los mínimos. Siguiendo el análisis para la estación Jocotepec (**Figura 6.1b**), la temperatura promedio mínima observada es de 16.25 °C y la obtenida con el modelo MM5 es de 16 °C. En esta estación, el modelo MM5 sobrestima consistentemente la temperatura. En la estación Chapala (**Figura 6.1c**), la temperatura promedio mínima observada es 16.52°C y modelada es de 15.13 °C, siendo la diferencia de 1.39 °C. En promedio la temperatura mínima observada en las tres estaciones es de 15.79 °C y la calculada es 15.86 °C, la diferencia es de 0.07° C. De forma análoga, se analizan las temperaturas promedio máximas en cada una de las estaciones. En la estación Los Colomos el promedio máximo de temperatura observada es de: 28.4 °C y la calculada es de: 26.76°C con una diferencia de 1.64 °C. En la estación Jocotepec el promedio máximo de temperatura observada es 29.8 °C y la calculada es 25.23 °C, la diferencia de ambas es de 4.57 °C. En la estación Chapala el promedio de las temperaturas máximas observadas fue de 28.97°C y la calculada fue de 26.54 °C con una diferencia de 2.43 °C. El día 26 de abril, fecha en la que el incendio alcanzó la máxima emisión de aerosoles, se observó una temperatura promedio de 22.56. Los resultados obtenidos para la variable temperatura, indican que el modelo MM5 estima adecuadamente la temperatura en el dominio de estudio D3. Además, el valor del coeficiente de correlación (cc-T) y el error cuadrático medio (ERCM-T) para la temperatura en cada una de las estaciones, muestran que los valores calculados con el modelo MM5 están altamente correlacionados con los valores observados en las tres estaciones meteorológicas, véase la **Figura 6.1**.

### 6.1.3 Validación de Resultados de la Humedad Relativa del 24/04/05 al 27/04/05

La humedad relativa es la proporción de vapor de agua en el aire comparada con la cantidad de vapor de agua que habría en condiciones de saturación a una temperatura considerada (Stull, 2000). De la humedad relativa dependen la mayor parte de efectos meteorológicos y biológicos causado por el vapor de agua. En la **Figura 6.2a**, se muestra que la humedad relativa observada en la estación Los Colomos durante el día 26 de abril alcanzó un máximo de 65%, cuyo valor es correctamente reproducido por el modelo MM5 para la misma fecha. De acuerdo con estos resultados, se puede inferir que el modelo calculó adecuadamente el comportamiento de la humedad relativa. El error cuadrático medio fue de aproximadamente 9.2, el cual puede ser considerado como bajo para esta variable. La **Figura 6.2b** muestra resultados para la estación Jocotepec. Aunque el comportamiento de la humedad relativa calculada con el modelo MM5 está en fase con la observada, existe una mayor discrepancia, sobre todo en los máximos. El error cuadrático medio en este caso fue de 12.6.

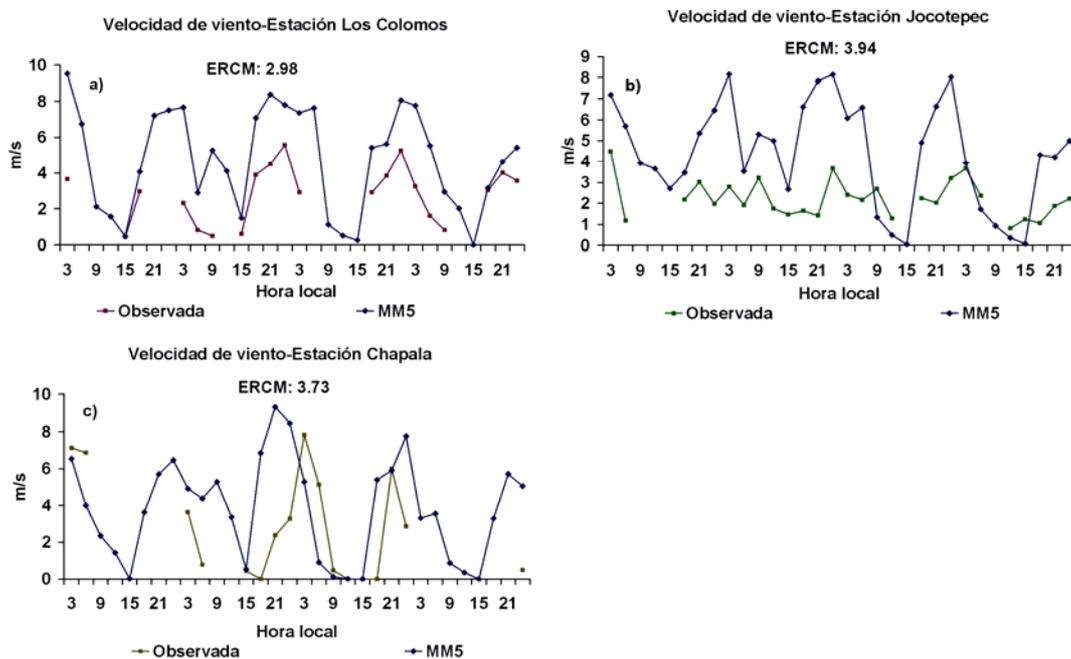


**Figura 6.2.** Humedad relativa, calculada y observada, en las estaciones meteorológicas Los Colomos, Jocotepec y Chapala. Las series de tiempo incluyen los días 24, 25, 26 y 27 de abril de 2005.

La **Figura 6.2c** describe los datos calculados y observados en la estación Chapala. Se observa que los valores máximo y mínimo de la humedad relativa son poco variables durante el periodo modelado. El valor máximo calculado con el modelo para el día 26 es de 71.36%. Para la misma fecha, la humedad observada es de 55%, lo cual implica que la diferencia es de 16.36%. El error cuadrático medio en esta estación fue de 13.2. Esta diferencia puede deberse a factores locales, o bien, a que el modelo MM5 (capítulo 3) tiene diferentes opciones para configurar parametrizaciones físicas relacionadas con la fuente de humedad del suelo. Los resultados dependen en cierta medida de la configuración elegida. En este caso, se seleccionó una configuración que en términos generales reproduce aceptablemente los valores observados de humedad relativa. En la **Figura 6.2**, se indican los resultados del coeficiente de correlación para la humedad relativa (CC-RH) para cada una de las estaciones meteorológicas. También se muestra el error cuadrático medio (ERCM-RH). Los valores de CC-RH y de ERCM-RH demuestran que el modelo reproduce de manera admisible los valores de la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera. El valor máximo de humedad para cada estación se observó a las 9 horas.

#### 6.1.4 Validación de Resultados de la Velocidad del Viento del 24/04/05 al 27/04/05

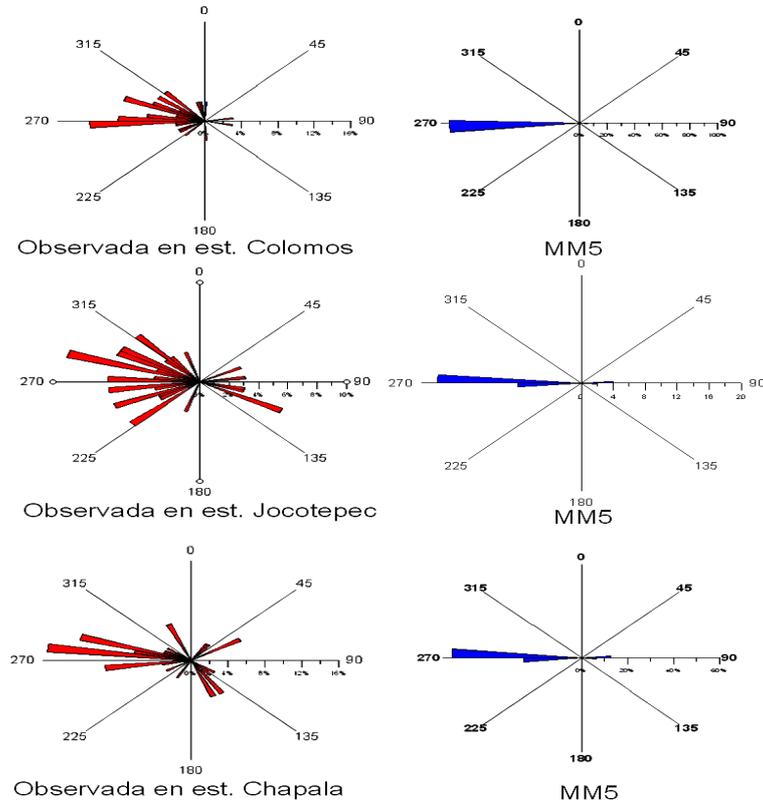
La velocidad de viento es un factor importante que influye en la dispersión de los contaminantes emitidos a la atmósfera (Richard, 1994). Puesto que el tema central de este trabajo de investigación es modelar la dispersión de aerosoles producidos por incendios forestales, es de gran relevancia reproducir correctamente la intensidad y dirección del viento.



**Figura 6.3.** Velocidad de viento en las tres estaciones meteorológicas, ubicadas dentro del dominio de estudio D3.

Los valores de velocidad del viento obtenidos con el modelo MM5 se muestran en la figura 6.3 a, 6.3b y 6.3c. Las gráficas describen los resultados para las estaciones Los Colomos, Jocotepec y Chapala respectivamente. En las series de tiempo de las tres estaciones, se puede ver que la máxima velocidad del viento se registra en las horas de la mañana y tiende a disminuir en el transcurso del día, incrementándose nuevamente en las horas de la tarde-noche. El error cuadrático medio de la velocidad de viento (ERCM-V) obtenido de los valores observados y los valores calculados para cada estación fue de 2.98 para Los Colomos, 3.35 para Jocotepec y 3.73 para Chapala. No se indican los coeficientes de correlación debido a que no se cuenta con datos observados durante algunas horas en las tres estaciones meteorológicas. En general, se observa en la **Figura 6.3** que el modelo simula correctamente la velocidad de viento en el dominio de estudio D3. Esto es un resultado muy importante para un cálculo plausible del transporte de aerosoles.

### 6.1.5 Validación de la Dirección del Viento del 24/04/05 al 27/04/05



**Figura 6.4.** Rosa de viento para cada estación del dominio de estudio D3.

Debido a que el viento puede provenir de todas direcciones, es frecuente que una forma fácil de interpretar y visualizar la dirección del viento es a través de una rosa de viento (Richard, 1994). La **Figura 6.4**, muestra la rosa de viento para cada una de las estaciones meteorológicas que se han venido considerando dentro del dominio de estudio D3. Las rosas de viento mostradas en el lado izquierdo de la **Figura 6.4** representan direcciones observadas en cada estación del 24 al 27 de abril de 2005. Las gráficas a la derecha en la **Figura 6.4** muestran los datos calculados con el modelo MM5 para el mismo periodo. En las rosas de viento de valores observados se observa que para las estaciones Jocotepec y Chapala la dirección del viento predominante es hacia el sureste con algunos vientos hacia el noroeste. En la rosa de viento de datos medidos en la estación Los Colomos, predominan los vientos del oeste. Las rosas de viento que muestran los datos estimados con el modelo MM5 indican

que los vientos predominantes en el dominio de estudio D3 provienen del oeste. Estos resultados indican que el modelo MM5 simula adecuadamente la dirección de los vientos preponderantes en el dominio de estudio D3, estos son los vientos que van en la dirección oeste-este.

Con la validación de los datos de meteorología de las variables más importantes como son la temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de vientos, se concluye que el modelo estima adecuadamente la dinámica de la atmósfera para el periodo modelado.

## 6.2 Análisis de datos de superficie calculados con el modelo MM5

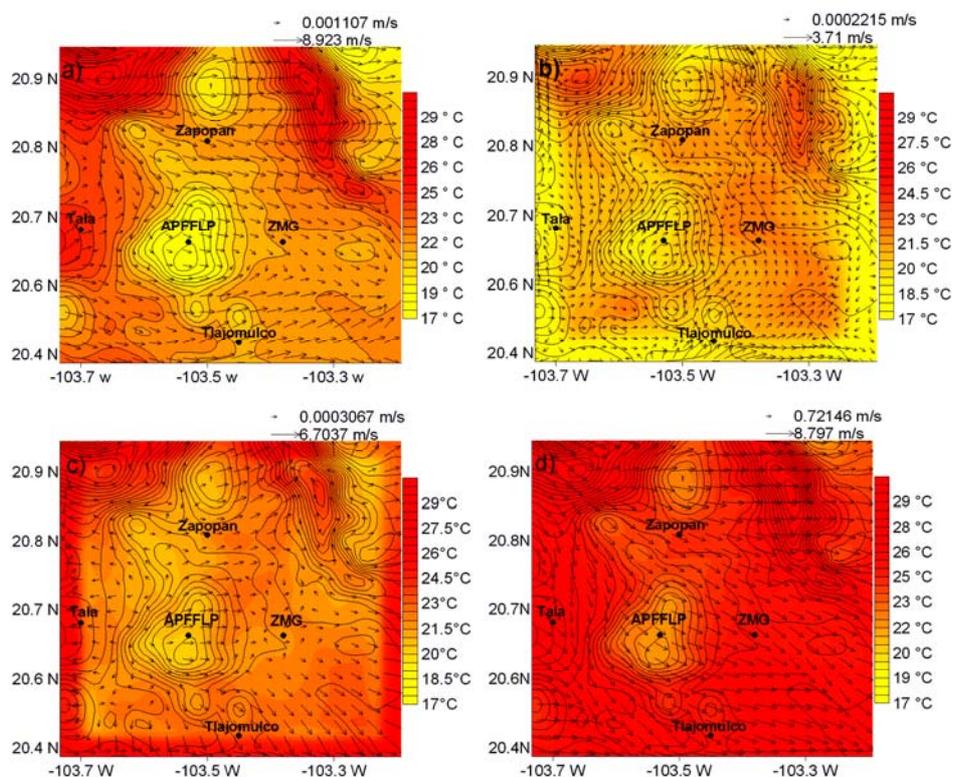
Los flujos atmosféricos locales pueden ser importantes, incluso pueden ser dominantes cuando los flujos de mesoescala llegan a ser de poca intensidad e indefinidos. Estos sistemas de flujos llamados de montaña-valle (catabáticos) o de valle-montaña (anabáticos) son usualmente muy importantes en términos de transporte y dispersión de contaminantes.

La distribución horizontal de algunas variables meteorológicas a nivel de superficie mostradas en esta sección, nos proporcionan información de la circulación de los vientos locales, patrones de temperatura y humedad relativa e isobaras en el dominio D3. Este incluye al Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) y los valles donde se localiza la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), Zapopan, Tala y Tlajomulco.

### 6.2.1 Resultados Meteorológicos para el Día 24 de abril de 2005

Cada una de las gráficas contenidas en la **Figura 6.5** muestra datos a intervalos de 6 horas. La **Figura 6.5a** muestra los patrones de temperatura, presión y viento para la hora 6:00Z. En esta gráfica observamos que los vientos predominantes fluyen en la dirección oeste-este. Nótese el efecto de los vientos descendentes del APFFLP sobre el valle de la ZMG a esta hora de la mañana. Las velocidades máximas fueron del orden de 8 m/s. La **Figura 6.5b** describe la situación a las 12:00Z. En esta situación, los vientos fluyen en

la dirección suroeste-hacia la ZMG pero son desviados por una circulación de vientos provenientes del este teniendo como resultado una circulación de viento directa hacia el APFFLP. También se distingue una circulación con vientos que van en la dirección norte-sur. La velocidad de viento a esta hora del día disminuyó alcanzando valores de alrededor de 4 m/s. En la parte central del bosque La Primavera, los flujos de vientos tienden hacia el valle de Tala donde es desviado hacia el este sobre el valle de Zapopan.

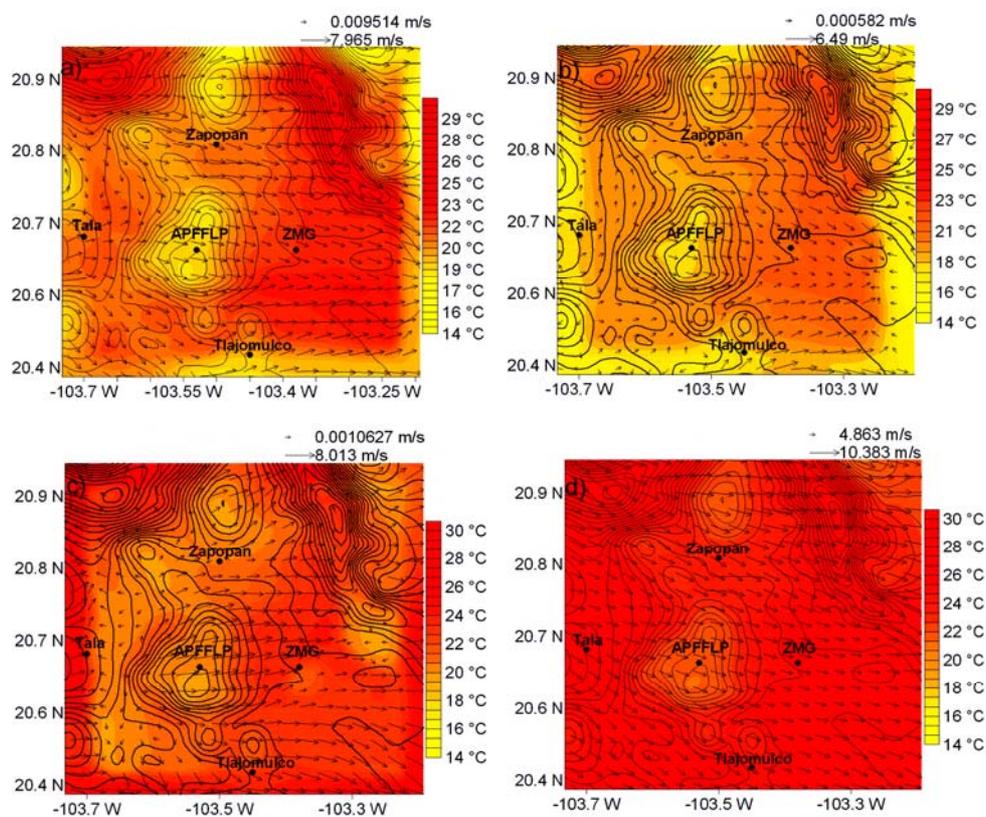


**Figura: 6.5.** Temperatura, isobaras y vectores de viento para el 24 de abril a la hora. a) 6:00Z, b) 12:00Z, c) 18:00Z y 25 de abril a la hora 0:00Z d).

La **Figura 6.5c** describe la situación a las 18:00Z. Se observa el efecto de vientos catabáticos, es decir, de montaña-valle. La dirección de los vientos es predominantemente hacia la ZMG desde la parte central del APFFLP. A Las 0:00Z del 25 de abril (**Figura 6.5-d**), la circulación es en la dirección sureste y los vientos se intensifican en relación a otras horas del día. En todas las

gráficas de la **Figura 6.5**, la temperatura se distribuye de acuerdo a la influencia topográfica, con los vientos distribuyendo aire frío (montaña-valle) o aire caliente (valle-montaña). Esto refleja la importancia de la circulación de la atmósfera en el transporte de calor. La temperaturas altas para este día se registran a las 6:00Z y a la hora 0:00Z (**Figuras 6.5a y 6.5d**).

## 6.2.2 Resultados Meteorológicos para el Día 25 de abril de 2005

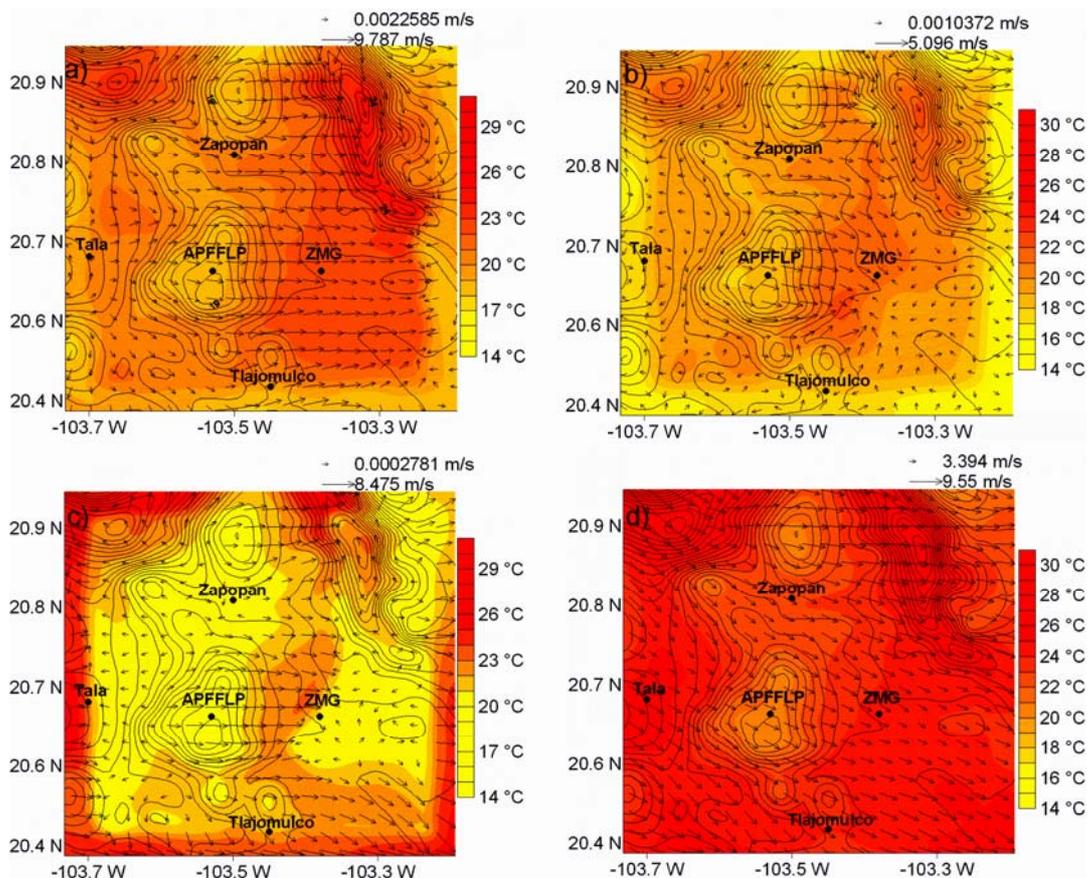


**Figura 6.6.** Temperatura, líneas de presión y vectores de viento para el 25 de abril a la hora: 6:00Z (a), 12:00Z (b), 18:00Z (c) y 0:00Z (26 de abril) (d).

El día 25 de abril a las 6:00Z los valores más altos de temperatura se concentran hacia el este de dominio de estudio D3, principalmente en el valle de la ZMG. En términos generales, debido a los efectos topográficos, los vientos fluyen siguiendo los diferentes valles del dominio D3, pero con una tendencia hacia el este (**Figura 6.6a**). A las 12:00Z (**Figura 6.6b**), nuevamente las temperaturas

más altas se concentran en la parte este del dominio de estudio. El gradiente de temperatura entre la ZMG y el APFFLP se reduce a esta hora, mientras que los vientos, aunque predominantemente hacia el este, tienden a disminuir su intensidad. Conforme va cayendo la tarde (**Figura 6.6c**), los vientos se intensifican sobre la ZMG. La temperatura disminuye en el valle de Tala, Zapopan y en la parte oeste de Tlajomulco. Los vientos fluyen predominantemente hacia el este. A las 00:00Z horas del 26 de abril (**Figura 6.6d**). Los flujos locales de viento son preponderantemente hacia la dirección sureste, pasando sobre el APFFLP y la ZMG prácticamente sin perturbación. En la zona de APFFLP se observa una temperatura relativamente baja.

### 6.2.3 Resultados Meteorológicos para el Día 26 de abril de 2005



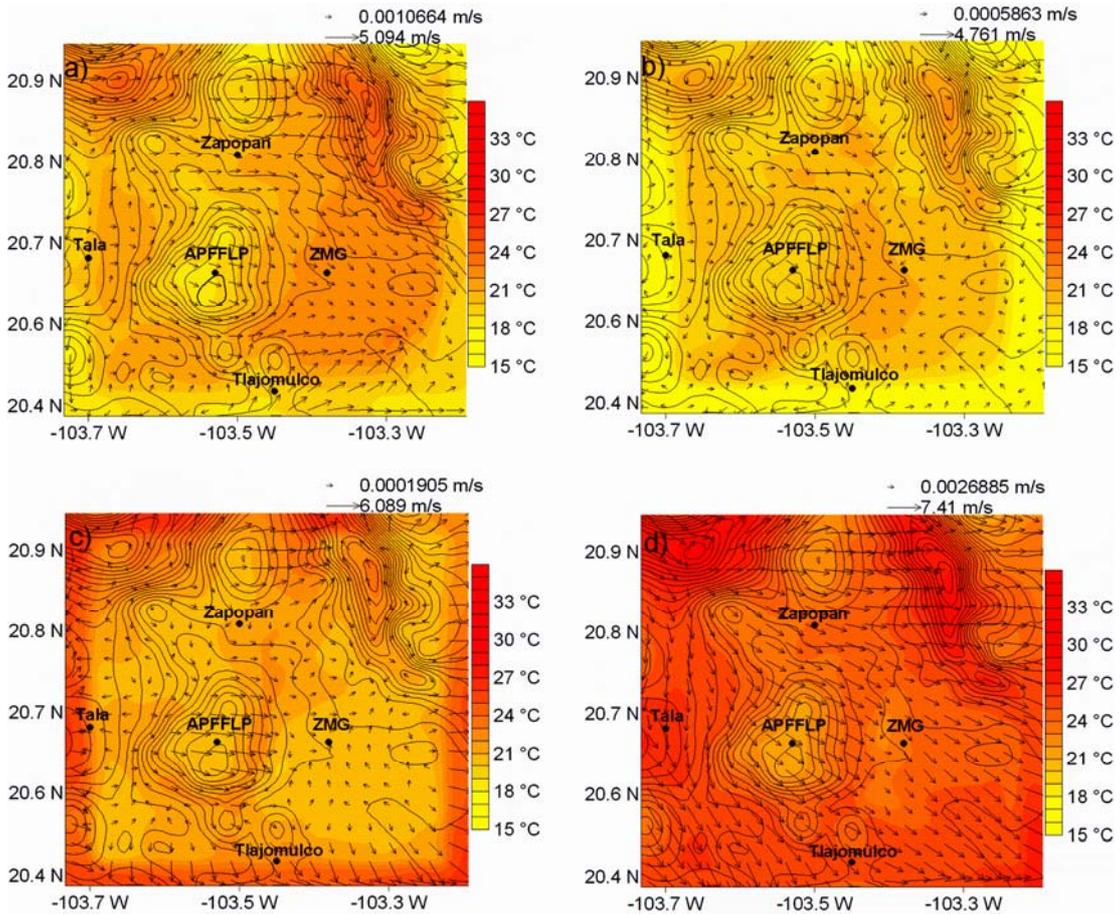
**Figura. 6.7.** Distribución de temperatura, presión y viento para el 26 de abril: 6:00Z (a), 12:00Z (b), 18:00Z (c) y 27 de abril al tiempo 0:00Z (d).

Los resultados meteorológicos para el 26 de abril son importantes por ser la fecha en que el incendio forestal alcanzó su mayor intensidad en el bosque La Primavera. En la mañana a las 6:00Z (**Figura 6.7a**), la dirección de los vientos siguen el mismo patrón que los días anteriores al evento, es decir, fluyendo hacia el este. Se observan temperaturas altas en todo el dominio de estudio y la velocidad de viento es mayor en comparación a los dos días anteriores a esa misma hora de la mañana. Hacia el medio día la velocidad de viento y la temperatura disminuye en todo el dominio de estudio (**Figura 6.7b**). Esto puede ser confirmado en las series de temperatura de diferentes estaciones meteorológicas ubicadas en el dominio D3 (ver **Figura 6.1**). En el valle central del APFFLP, la ZMG y Tlajomulco se observan convergencia de vientos locales provenientes del oeste y del este. Esto favorece el ascenso de aire en esas zonas, de esta forma, los contaminantes atmosféricos que pudieran encontrarse sobre esas áreas son transportados más fácilmente hacia niveles superiores de la atmósfera. En la **Figura 6.7c**, la situación a las 18:00Z horas muestra que los vientos generan una zona de convergencia que favorece una isla de calor en la parte oeste de la ZMG. Aunque el patrón de vientos es aún hacia el este, los efectos de vientos de montaña-valle (vientos catabáticos) sobre la circulación dominante se muestran al occidente de la APFFLP, donde la dirección del viento es hacia el oeste. A las 0:00Z del día 27 (**Figura 6.7d**), los vientos se intensifican y fluyen hacia el este y sureste, manteniendo la tendencia general de los últimos días. La temperatura se incrementa notablemente.

#### 6.2.4 Resultados Meteorológicos para el Día 27 de abril de 2005

Finalmente, para el día 27 de abril la circulación general en el dominio de estudio es como sigue: a las 6:00Z horas (**Figura 6.8a**), se tienen tiempo cálido en los valles que bordean el bosque La Primavera. Los vientos siguen el mismo patrón diurno con descenso de temperatura hacia el medio día (**Figura 6.8b**) y disminución de la velocidad de viento. En la tarde-noche, la circulación es del bosque hacia la ciudad (**Figura 6.8c**), generando una baja temperatura en la

mayor parte del dominio. Hacia las 0:00Z horas del día 28 se tiene valores altos de temperatura en todo el dominio de estudio y la circulación del viento es semejante que en los días anteriores (**Figura 6.8d**).



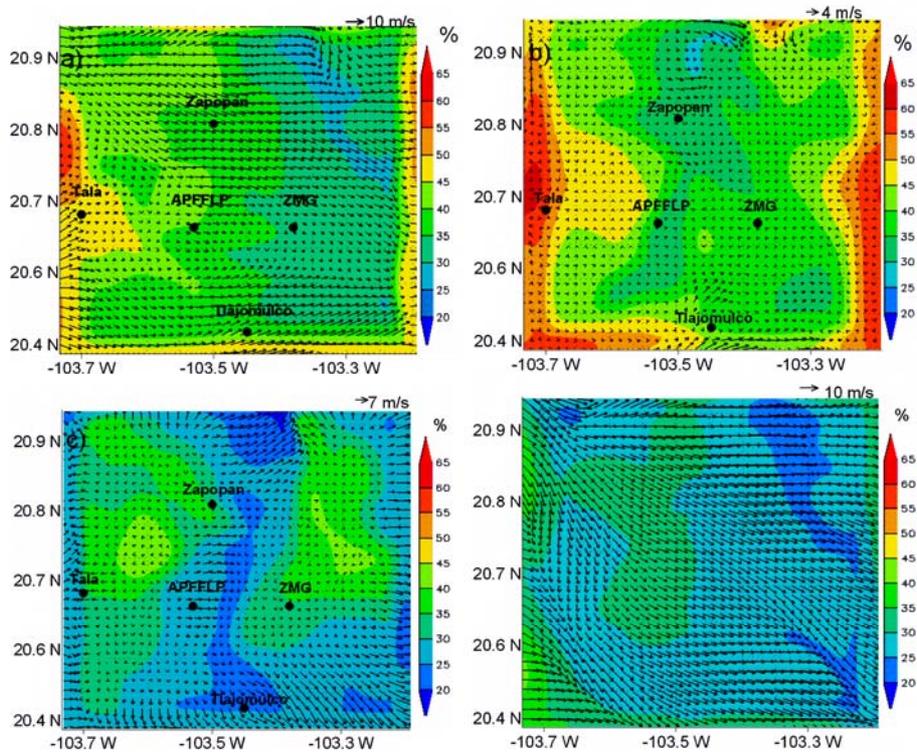
**Figura 6.8.** Distribución de temperatura, presión y viento para el 27 de abril a la hora: 6:00Z (a), 12:00Z (b), 18:00Z (c) y 28 de abril a la hora 0:00Z (d).

En términos generales, la circulación de la atmósfera del 24 al 28 de abril de 2005 (ver **Figuras 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8**) presenta un patrón de vientos con movimientos en la dirección este. Este comportamiento del viento es clave para entender el problema de advección de aerosoles hacia la ZMG producidos por incendios forestales en el APFFLP. La temperatura y los vientos se intensifican en la tarde-noche. La distribución de temperatura, determinada por efectos orográficos, influye en la circulación de los vientos. Con estas evidencias de la circulación atmosférica, considerando los efectos de montaña-valle, valle-

montaña y la canalización inducida por la orografía, se verifica que los contaminantes emitidos por incendios que ocurren en el bosque La Primavera afectan la calidad del aire de la ZMG (véase capítulo 5).

### 6.3.1 Humedad Relativa para el Día 24 de abril de 2005

Los resultados de humedad relativa se muestran a nivel de superficie. En cada una de las figuras se describe la distribución de humedad relativa y patrones de viento del 24 al 28 de abril de 2005. Los datos son mostrados a intervalos de 6 horas.

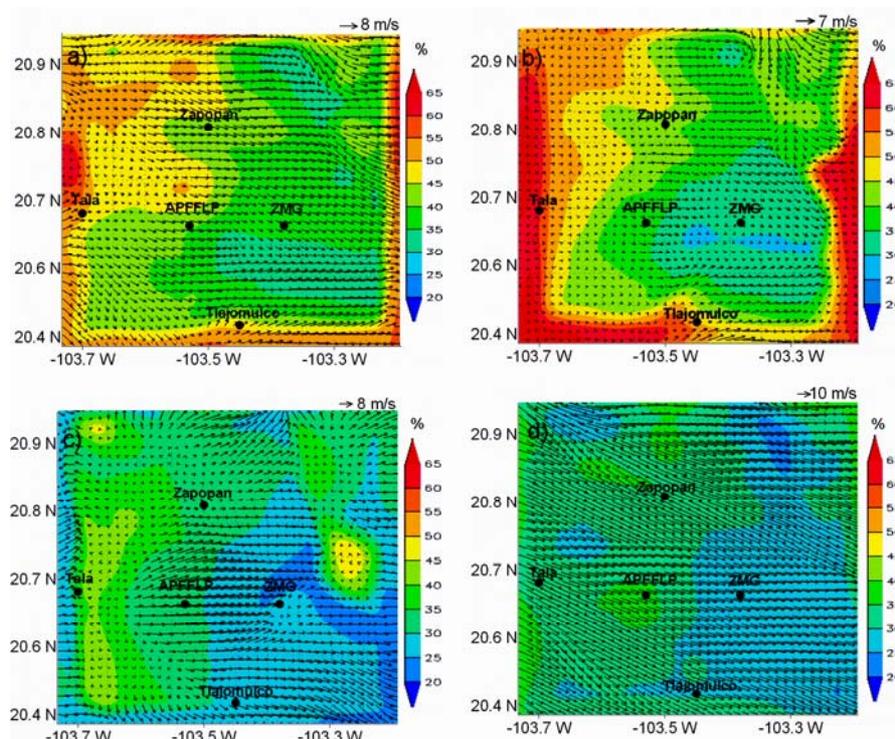


**Figura 6.9.** Distribución de humedad relativa y viento para el 24 de abril de 2005: 6:00Z (a), 12:00Z (b), 18:00Z (c) y 0:00Z del 25 de abril (d).

La humedad relativa en el bosque La Primavera a las 6:00Z del 24 de abril muestra un gradiente con mayor humedad en el oeste del dominio D3 (**Figura 6.9a**). Posteriormente, a las 12:00Z horas la humedad es menor a 40% en la mayor parte de la ZMG y en el APFFLP (**Figura 6.9b**). A las 18:00Z horas (**Figura 6.9c**), la humedad relativa es notablemente mayor en la ZMG, en

Zapopan y en el Valle de Tala, pero en términos general siendo menor a 42 %. A las 0:00Z horas, la humedad tiende a ser homogénea pero manteniéndose en valores bajos (**Figura 6.9d**). La situación general en relación a la humedad relativa, es que en la fecha de inicio de los incendios forestales, la **Figura 6.9** refleja claramente condiciones de baja humedad, es decir, propicias para el desarrollo de incendios forestales.

### 6.3.2 Humedad Relativa para el Día 25 de abril de 2005



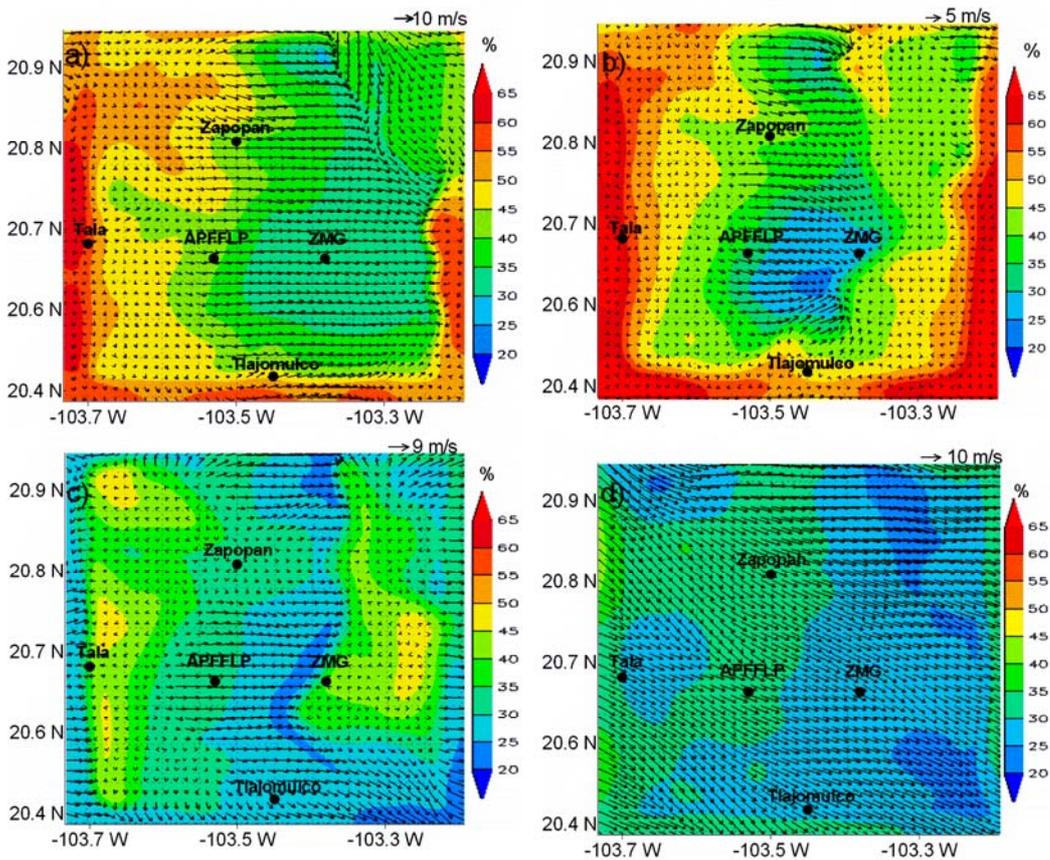
**Figura 6.10.** Distribución de humedad relativa y viento para el 25 de abril de 2005: 6:00Z (a), 12:00 (b), 18:00Z (c) y a las 0:00Z horas del 26 de abril (d).

El 25 de abril a las 6.00Z horas (**Figura 6.10a**), la humedad relativa se incrementa en la parte oeste alcanzando valores de aproximadamente 60 %. En la ZMG, la humedad es baja a esta hora del día. Hacia las 12:00Z horas (**Figura 6.10b**), la ZMG se distingue por valores muy bajos de humedad relativa, incluso menores a 30 %. A las 18:00Z horas (**Figura 6.10c**) de la tarde la humedad relativa disminuye en todo el dominio y a media noche 0.00Z

(Figura 6.10d), la humedad no pasa de 40 %. En términos general, la humedad relativa permanece baja en este día.

### 6.3.3 Humedad Relativa para el Día 26 de abril de 2005

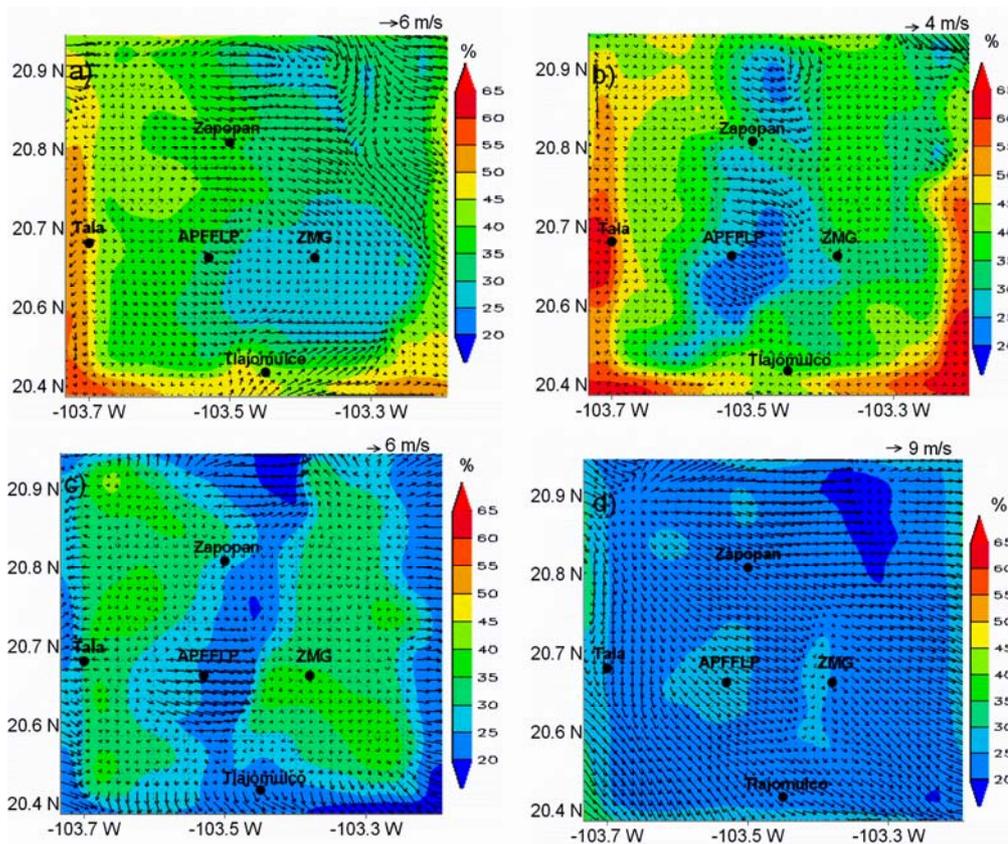
Durante el 26 de abril, la humedad relativa aumentó hasta alcanzar valores de hasta 70 %. Esto puede verse en las Figuras 6.11a y 6.11b. Sin embargo, en la ZMG tuvo valores que no pasaron de 30 %. En la segunda mitad del día, la humedad relativa disminuyó en todo el dominio D3. En la ZMG continuó bajo el contenido de humedad (Figuras 6.11c y 6.11d). Es interesante mencionar, que no obstante los gradientes de humedad, la humedad es bastante baja. Por ejemplo, en el APFFLP la humedad relativa no rebasó el valor de 40 %.



**Figura 6.11.** Distribución de humedad relativa y viento para el 26 de abril de 2005: 6:00Z (a), 12:00 (b), 18:00Z (c) y a las 0:00Z horas del 27 de abril (d).

### 6.3.4 Humedad Relativa para el Día 27 de abril de 2005

El día 27 de abril de 2005, la ZMG y el APFFLP se distinguieron por los valores muy bajos de humedad relativa, incluso alcanzando valores de tan sólo 25 % (Figuras 6.12a, 6.12b, 6.12c y 6.12d). Este día fue el más seco de los investigados y que coincidieron con la mayor presencia de incendios forestales en el APFFLP. Se han descrito en forma detallada aspectos relevantes de parámetros meteorológicos como el viento, la temperatura y la humedad relativa para tener una idea clara de cuales fueron las condiciones tan favorables en las que se produjeron los incendios forestales.

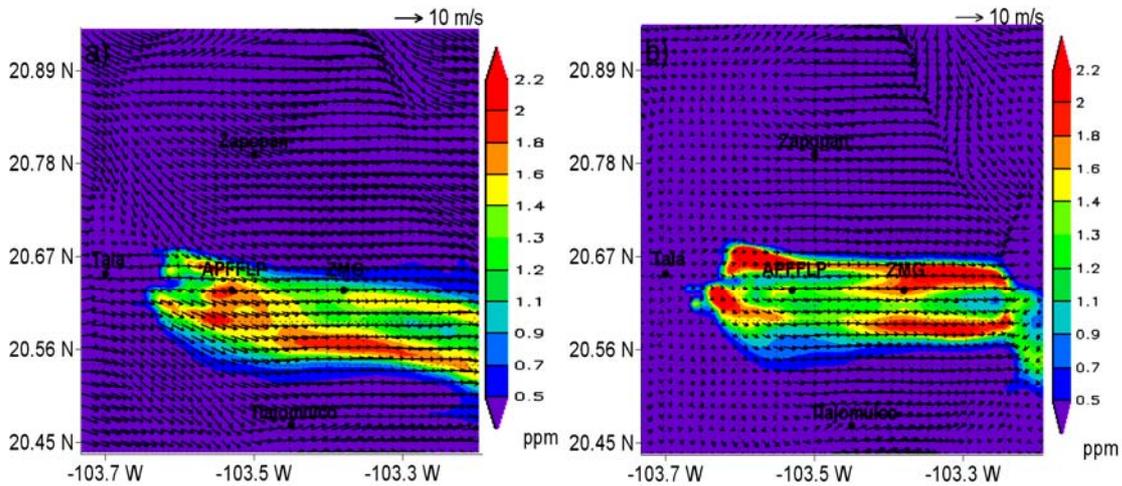


**Figura 6.12.** Distribución de humedad relativa y viento para el 27 de abril de 2005: 6:00Z (a), 12:00 (b), 18:00Z (c) y a las 0:00Z horas del 28 de abril (d).

## 6.4 Resultados de la Dispersión de Aerosoles

Ahora se procede a presentar los alcances más relevantes de este trabajo de investigación, es decir, los resultados de la modelación de la dispersión de aerosoles producidos por incendios forestales aplicando el modelo MCCM. La modelación del transporte de aerosoles producidos por incendios forestales es un proceso complejo en el que interviene la modelación de la dinámica atmosférica y los cálculos de procesos de advección-difusión. Para este fin, se requiere de un esfuerzo computacional y la aplicación de datos claves que permitan obtener resultados lo más aproximado posible a lo que se observa en la realidad. La finalidad principal es reproducir la concentración en espacio y tiempo de algunos contaminantes que son emitidos directamente de los incendios forestales. Para reproducir máximos y mínimos de concentración de manera aceptable, los datos claves para alimentar el modelo son: ritmo de emisión de contaminantes y hora de ignición del fuego. Estos dos conjuntos de datos son precisamente los más difíciles de obtener. Por lo que se tienen que llevar a cabo muchos experimentos numéricos hasta acercarse a valores de ritmo de emisión y hora de ignición que reproducen de manera aproximada valores observados. A continuación se muestran los resultados de la dispersión de la pluma de contaminantes emitida durante el incendio del 26 de abril de 2005. Con los resultados de la dinámica atmosférica, calculada con el modelo MM5 y expuesta en la sección anterior, la modelación de la dispersión de la pluma de contaminantes es estimada aplicando el modelo MCCM. Se estiman las concentraciones de elemento emitidos por la quema de biomasa durante el incendio. En las siguientes figuras se muestra la pluma del monóxido de carbono (CO), óxido nítrico ( $\text{NO}_2$ ) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y partículas con un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros (PM10). Estos elementos son gases que contribuyen al efecto invernadero y al cambio climático.

### 6.4.1 Dispersión del Monóxido de Carbono



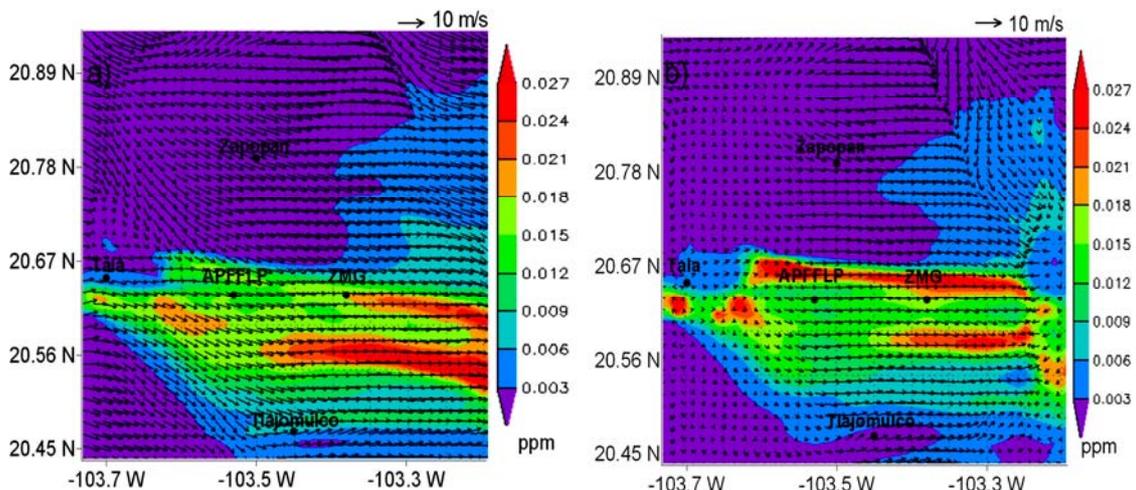
**Figura 6.13.** Pluma de dispersión de CO emitida por incendios forestales en el APFFLP.

En la **Figura 6.13**, se observa el estado de dispersión del monóxido de carbono, CO, a las 3:00Z y 6:00Z de la mañana del 26 de abril de 2005. La máxima concentración de contaminantes proviene del bosque La Primavera, pasando sobre la ciudad de Guadalajara (**Figura 6.13a**). En ella vemos como los vientos, asociados a la circulación atmosférica dominante, dispersan el contaminante especialmente el monóxido de carbono sobre la ZMG. La pluma de CO afecta no sólo a la zona urbana si no también a la mayor parte del bosque La Primavera. En la **Figura 6.17** se presenta una imagen satelital mostrando la extensión y forma de la pluma de los aerosoles producidos por los incendios forestales. Se puede verificar que la mayor parte del área del bosque estuvo cubierta por humo y que la forma de la pluma es correctamente reproducida. La **Figura 6.13-b** muestra la disminución de la estela de humo del CO a las 6:00Z.

### 6.4.2 Dispersión del NO<sub>2</sub>

Otro de los productos que se origina en la quema de biomasa de acuerdo con Lobert *et al* (1991) es el dióxido de nitrógeno o. Este producto en la troposfera resulta ser un contaminante tóxico. La distribución del dióxido de nitrógeno en

el incendio se dispersó más que los elementos anteriores. En la **Figura 6.14c y 6.14d** se visualiza su dispersión a las 3:00Z y 6:00Z de la mañana del 26 de abril respectivamente. Aquí la dispersión varía levemente de los elementos que se han mostrado en las gráficas anteriores. Observando a detalle, se observa que en las inmediaciones de la población Tala, en el lado oeste del dominio D3, hay una zona de emisión dióxido de nitrógeno. Esta fuente no se observa para otras sustancias. Esto se debe a que esa región está clasificada como zona de agricultura, las cuales normalmente se distinguen por una mayor emisión de  $\text{NO}_2$ . En el capítulo 2 se describió que la composición de los elementos emitidos en un incendio va a depender de la vegetación que se queme y del tipo de combustión.

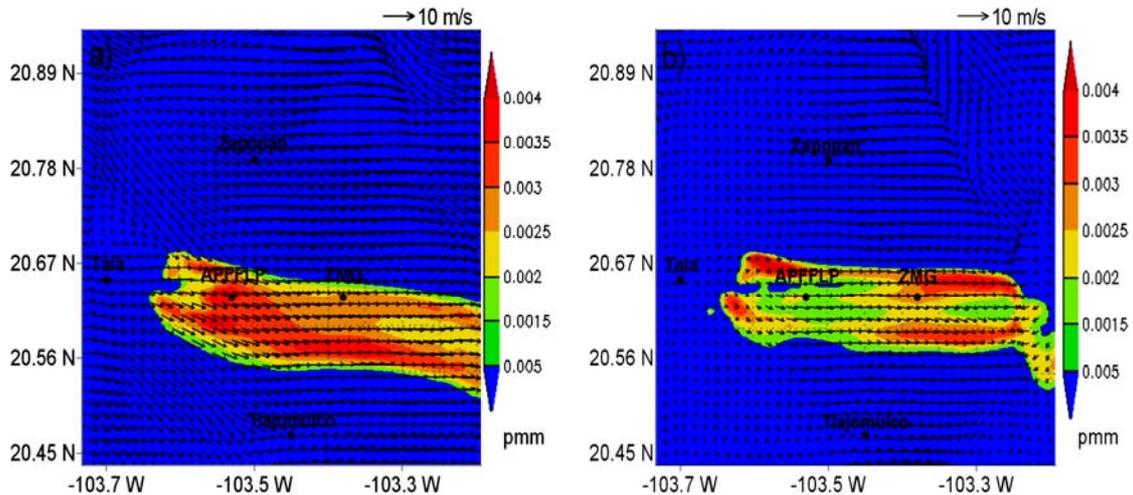


**Figura 6.14.** Dispersión de la pluma de  $\text{NO}_2$ .

### 6.4.3 Dispersión del Dióxido de Azufre

El dióxido de Azufre es un contaminante que se emite en baja proporción en la quema de biomasa. Durante el incendio del 26 de abril en el bosque La Primavera se distingue una baja concentración en las estelas de aerosoles que se visualizan en la **Figura 6.15**. Las altas concentraciones se perciben sobre el área del bosque La Primavera. En la **Figura 6.15a** se aprecia que la alta concentración de dióxido de azufre es transportada por la corriente de aire en la dirección oeste-este, esta gráfica describe condiciones a las 3:00Z de la

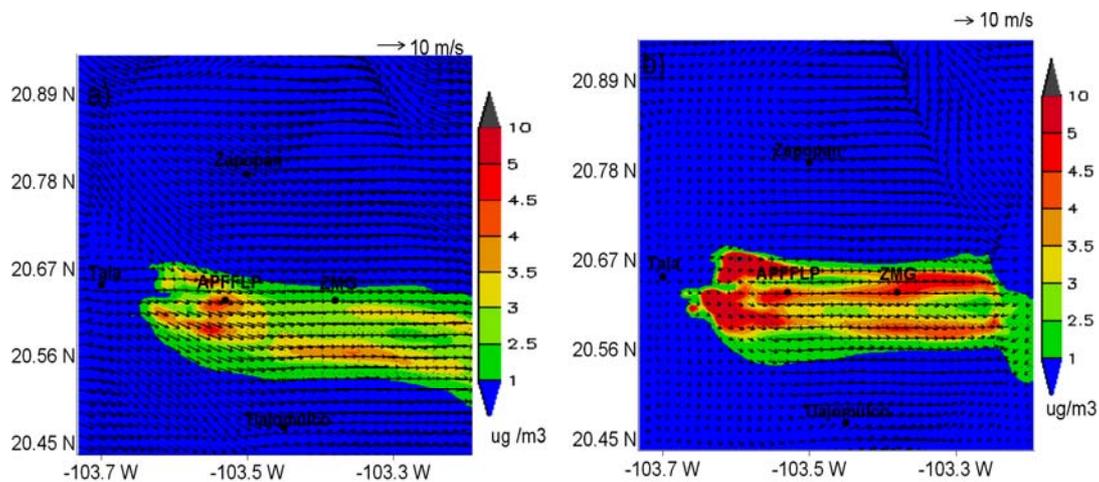
mañana. La **Figura 6.15b** describe la situación de la pluma a las 6:00Z de la mañana. Puede observarse que a esta hora, el dióxido de azufre tiende a disminuir, quedando una estela sobre la zona urbana de Guadalajara (**Figura 6.15b**).



**Figura 6.15.** Dispersión del SO<sub>2</sub>

#### 6.4.4 Dispersión de Material Particulado, PM<sub>10</sub>

En la **Figura 6.16**, se observa mayor concentración de material particulado PM<sub>10</sub> en la parte central del bosque, es decir, donde ocurrió el incendio. Las concentraciones de este contaminante tienden a ser más bajas en la zona urbana tal y como se aprecia en la **Figura 6.16**. Particularmente, en la **Figura 6.16a** se visualiza alta concentración en la parte central del bosque. Esto sugiere que allí mismo se hayan precipitado una cantidad importante de las partículas, y únicamente una menor proporción haya sido desplazada hacia la ZMG. A las 6:00Z de la mañana, se observa baja concentración de partículas PM<sub>10</sub> (**Figura 6.16b**).



**Figura 6.16.** Dispersión de la pluma de material particulado, PM10.

#### 6.4.5 Validación de la Modelación de la Pluma de Contaminante

Una forma de validar los resultados de las modelaciones numéricas de la pluma de aerosoles producidos por incendios forestales con el MCCM, es comparar la forma general de la pluma de aerosoles con imágenes satelitales de la misma y comparar las concentraciones observadas en diferentes estaciones meteorológicas con las concentraciones modeladas. En este contexto, se comparó la estela de humo mostrada en la **Figura 6.17** de una imagen de satélite con las plumas modeladas y mostradas en las **Figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.16**. La imagen de satélite muestra los contaminantes en su constitución total. La estela de aerosoles se dispersa por amplias regiones del bajo, hasta Querétaro. La pluma de contaminantes simulados con el MCCM concuerda muy bien con la pluma observada en la imagen de satélite, esto válida los resultados obtenidos con el MCCM de manera cualitativa.

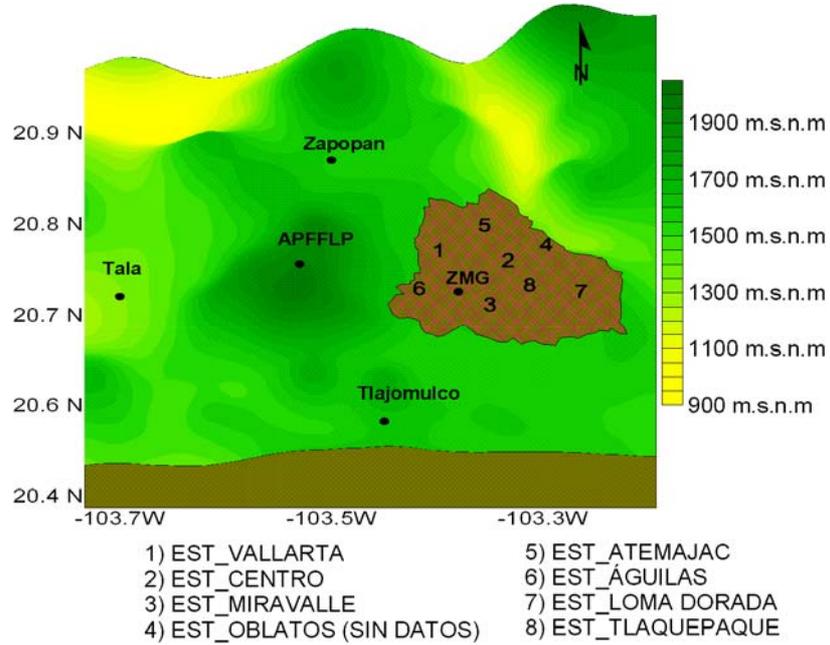


**Figura 6.17.** Imagen de satélite Aqua, muestra la dispersión del humo del incendio ocurrido el 26 de abril de 2005 en el APFFLP. Disponible en: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2005116-0426/Mexico.A2005116.1945.250m.jpg>.

## 6.5 Contaminación Atmosférica Sobre la Zona Metropolitana de Guadalajara del 24 al 28 de abril de 2005

Para diagnosticar y cuantificar el efecto de los aerosoles emitidos por los incendios forestales ocurridos en el bosque La Primavera sobre la ciudad de Guadalajara, se investigaron los datos observados de aquellos contaminantes que se emiten directamente de los incendios como es el CO y NO<sub>2</sub>. Estos contaminantes también son emitidos por los vehículos de motor y fuentes industriales, por lo que las zonas urbanas son consideradas de manera estándar como emisoras de estas sustancias químicas en el modelo MCCM. Los datos observados de los contaminantes se obtuvieron de la red de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana de Guadalajara a cargo del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA). Las redes de monitoreo se componen de 8 estaciones (ver **Figura 6.18**): Águilas (EST\_AGU), Vallarta (EST\_VAL), Centro (EST\_CEN), Tlaquepaque (EST\_TLA), Loma dorada

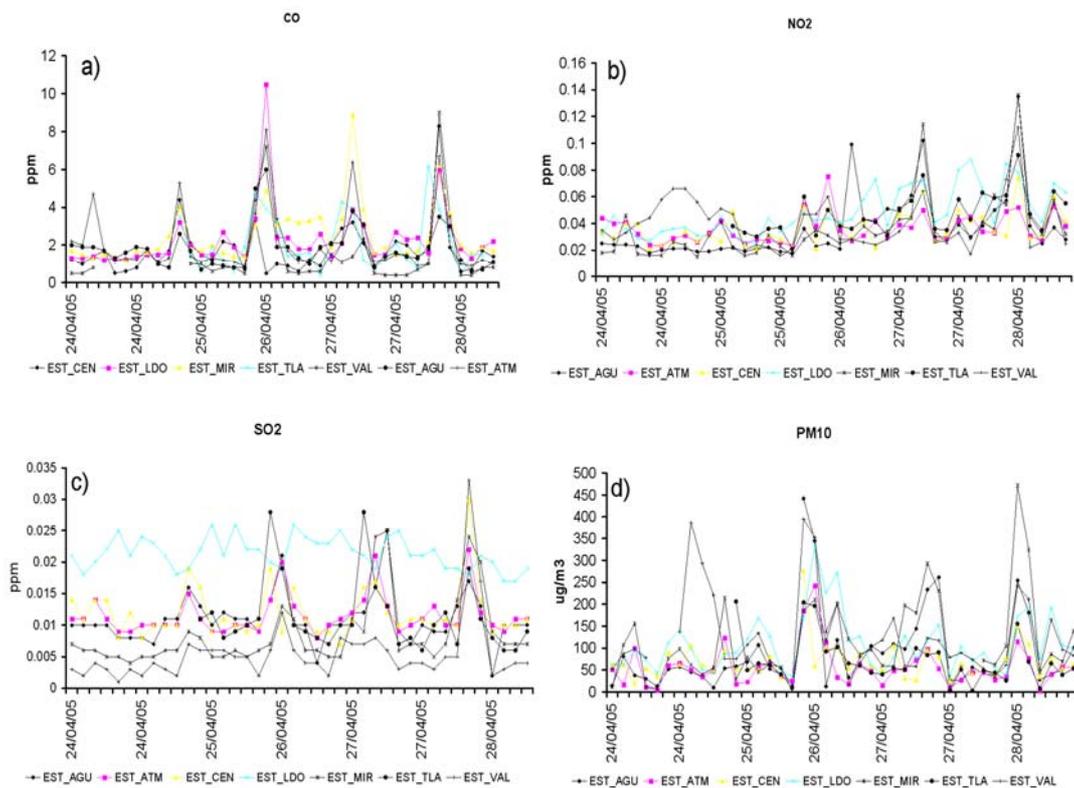
(EST\_LDO), Atemajac (EST\_ATM), Miravalles (EST\_MR) y Oblatos (EST\_OB). Esta última no incluye datos para la fecha de interés (24 al 28 de abril de 2005).



**Figura 6.18.** Dominio D3 y posición de las estaciones de la red de monitoreo atmosférico en la Zona Metropolitana de Guadalajara Jalisco, México.

### 6.5.1 Niveles de Contaminación Sobre la Zona Metropolitana de Guadalajara

En esta parte se mostrará que los niveles de algunos contaminantes se incrementan cuando ocurren eventos de incendios. La **Figura 6.19** muestra el comportamiento de algunos contaminante en cada estación de la ZMG del 24 al 28 de abril de 2005. Las gráficas son a intervalos de 3 horas locales.

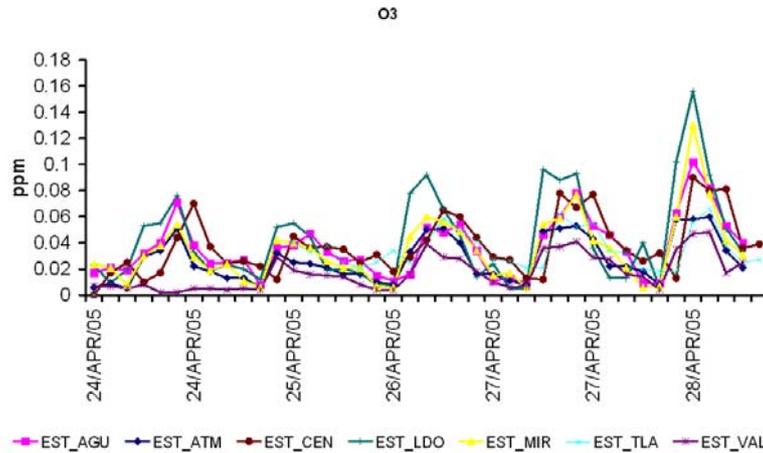


**Figura 6.19.** Comportamiento del CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, y PM<sub>10</sub> en las 7 estaciones de monitoreo de la ZMG. Fuente: SINAICA.

Las series de tiempo mostradas en la **Figura 6.19** revelan altas concentraciones de contaminantes especialmente el día 26 sobre la Zona Metropolitana de Guadalajara. En los gráficos también se observa que además del 26 de abril, hay otros picos de altas concentraciones de contaminantes para otros días. Esto se debe a fuentes urbanas y a otros incendios forestales. Además, los contaminantes pueden estar circulando en la atmósfera hasta por una semana o más.

La formación de O<sub>3</sub> se debe a la interacción de la radiación solar y los óxidos de nitrógeno, por lo que es interesante mostrar los niveles de variación de la concentración de ozono aunque no sea un producto directo de la quema de biomasa (**Figura 6.20**). Se observa claramente como la concentración de

ozono se incrementa notablemente después del incendio del día 26 de Abril de 2005.

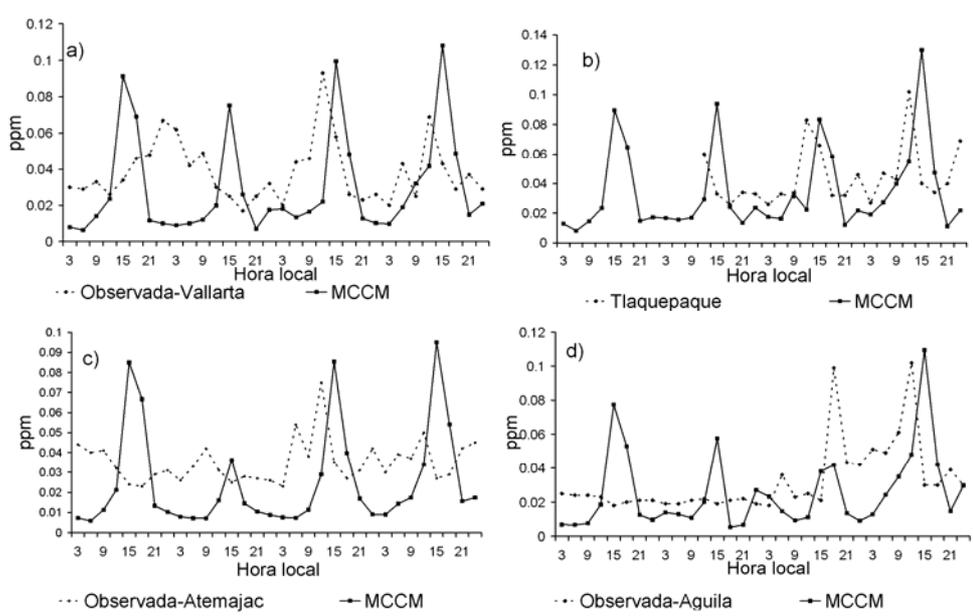


**Figura 6.20.** Variación del O<sub>3</sub> en las 7 estaciones de monitoreo de la ZMG.  
Fuente: SINAICA.

### 6.5.2 Comparación de Datos Observados con Datos Calculados con el MCCM

Dos productos muy importantes que se originan en la quema de biomasa son el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógenos (Lobert et al, 1991). La **Figura 6.21** muestra el comportamiento de los óxidos de nitrógeno en algunas estaciones de la red de monitoreo. En la comparación se debe considerar que en los datos observados se están considerando todas las fuentes de emisión, mientras que en las calculadas con el MCCM solo se consideran las emisiones del incendio forestal ocurrido en el bosque la primavera el día 26 de abril de 2005. Debido a esto, la **Figura 6.21** sólo muestra que el MCCM pudo reproducir de manera aproximada la fase y valor de las concentraciones de los óxidos de nitrógeno en las estaciones ubicadas en la ZMG. En general se reproducen aceptablemente los órdenes de magnitud de las concentraciones y las fases de los picos de concentraciones. El MCCM tiende a sobre estimar los picos de las concentraciones en los primeros días modelados, esto se debe a que no se conoce el ritmo de emisión de los contaminantes. Como puede notarse en la **Figura 6.21**, los picos de máxima concentración alcanzaron

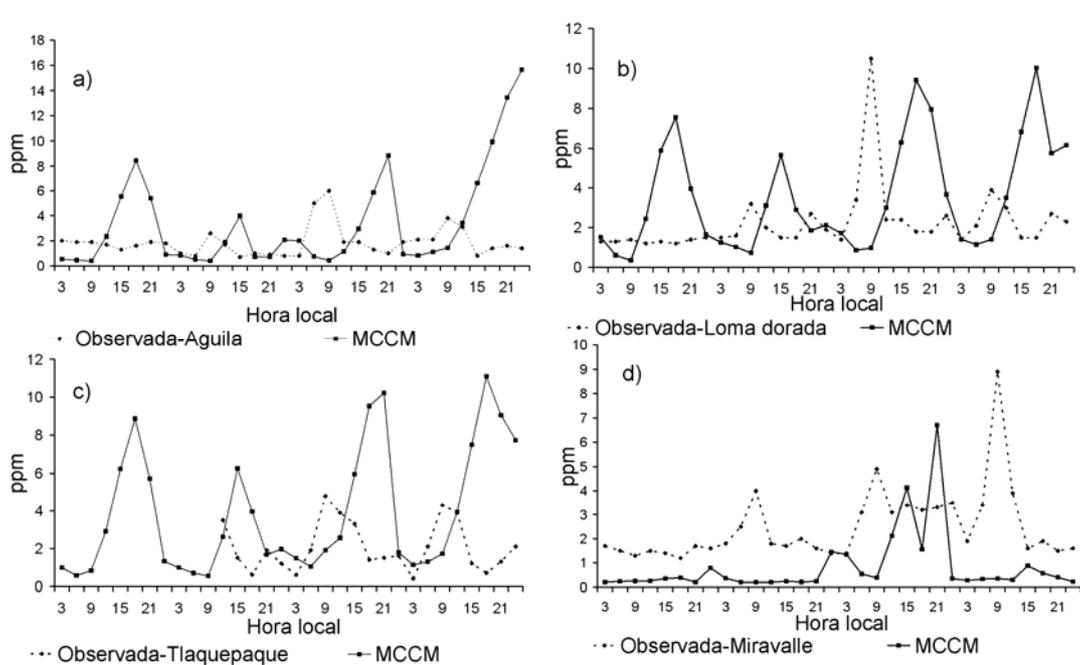
niveles de un rango de 0.075 ppm a 0.102 ppm. Estos valores están por debajo de la norma de calidad del aire que establece un nivel permisible de 0.21 ppm con un tiempo de exposición de una hora una vez al año (ver anexo I). Sin embargo, si se toma en cuenta que en el PFFLP ocurren 29 incendios en promedio anualmente y considerando una concentración promedio (de acuerdo a los resultados de este trabajo) de 0.093 ppm, se tendría anualmente un nivel promedio de concentración de 2.7 ppm. Este valor excede la norma de calidad del aire en una proporción de 12.8 ppm. De lo que se infiere, que a la larga las emisiones de óxidos de nitrógenos emitido de los incendios que ocurren en el bosque la primavera afectan la calidad del aire.



**Figura 6.21.** Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de concentración de óxidos de nitrógeno.

Otro de los gases que conforman la pluma de aerosoles producidos por incendios forestales es el monóxido de carbono. En la **Figura 6.22**, se muestran las variaciones de los niveles de concentración de este contaminante para algunas estaciones. Los órdenes de magnitud son bien simulados. Sin embargo, se tiene un mayor problema para simular correctamente las fases de

los picos observados. Como en el caso anterior, los datos calculados con el MCCM corresponden solo al incendio ocurrido en el bosque La primavera. Los niveles de concentración del CO se mantuvieron por debajo de la norma en un rango de 4,8 ppm a 10.5 ppm (ver anexo I), siendo la estación Loma dorada la que registró el valor más alto. En promedio, el nivel de CO fue de 7.5 ppm en las 4 estaciones, multiplicando este valor por el número promedio de incendios que ocurren se tiene anualmente un nivel de concentración para el CO de 217.5 ppm. Este valor excede la norma en una proporción de 19.77 ppm. Similarmente, el monóxido de carbono si afecta la calidad del aire.



**Figura 6.22.** Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de concentración de monóxido de carbono.

Ya se ha mencionado que el gas ozono no es directamente un producto de los incendios forestales. Es más bien un producto de la reacción fotoquímica del dióxido de nitrógeno. No obstante, se muestra en la **Figura 6.23** la comparación entre valores observados y modelados de ozono. Se observa en las series de tiempo que el modelo MCCM sobrestima los niveles de concentración de ozono según se muestra en la **Figura 6.23**. El ozono

troposférico, se mantuvo por debajo de la norma establecida (ver anexo I). Sus valores más altos variaron de 0.08 ppm a 0.096 ppm en las 4 estaciones. El nivel de concentración de este contaminante depende de los niveles de concentración de los óxidos de nitrógeno, por lo que, cada vez que haya incremento de NO<sub>2</sub> debido a emisiones de incendios forestales en el APFFLP, se incrementará el nivel O<sub>3</sub>.

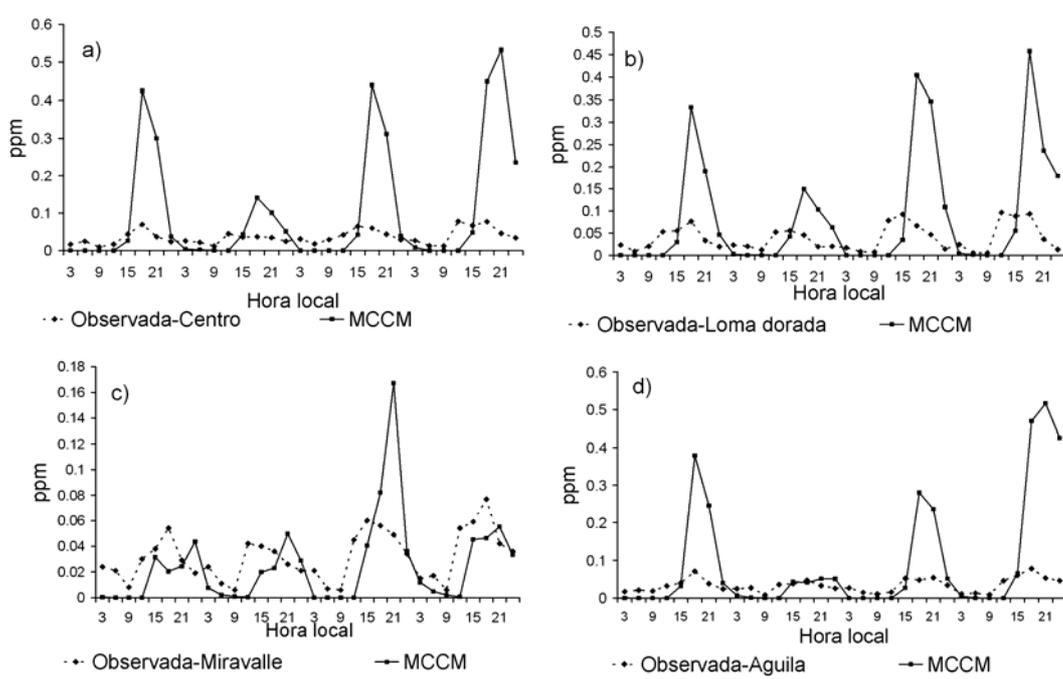
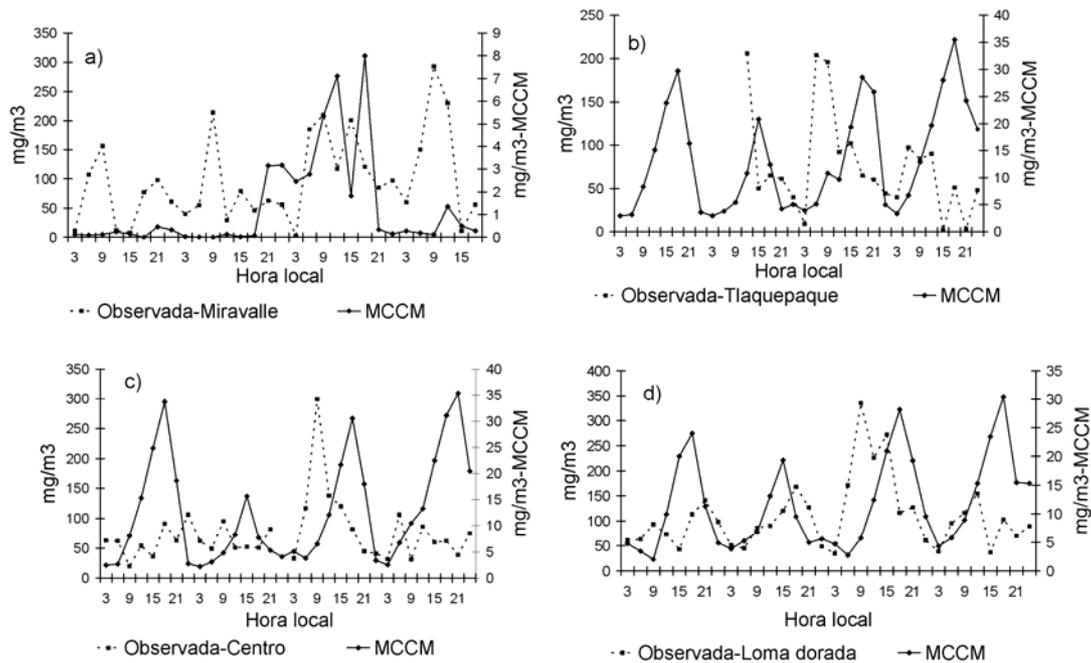


Figura 6.23. Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de concentración de ozono troposférico.

La comparación de los datos calculados con el MCCM y los datos observados del material particulado PM<sub>10</sub> muestran que el modelo logra reproducir en buena aproximación el comportamiento de la concentración de partículas (**Figura 6.24**). Sin embargo, se debe hacer notar que los niveles de concentración son menores por un orden de magnitud. El motivo para esta diferencia de un orden de magnitud, es que en la ZMG hay numerosas fuentes de PM<sub>10</sub> que no son consideradas en el modelo MCCM. Los picos de máxima concentración de PM<sub>10</sub> en los datos registrados, estuvieron en un rango de

206  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 335  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos valores sobrepasan los niveles permisibles establecidos (ver anexo I) en una proporción de 1.89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El valor establecido es de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un tiempo de exposición de 24 horas una vez al año.



**Figura 6.24.** Comparación de datos observados y datos modelados con el MCCM de los niveles de PM10.

De acuerdo con lo que se observa en las **Figuras 6.21, 6.22, 6.23 y 6.24**, el modelo MCCM logra reproducir de manera aproximada los niveles de concentración y comportamiento de contaminantes emitidos por el incendio forestal ocurrido en el bosque La Primavera el 26 de abril de 2005. Aunque, los niveles de concentración de los contaminantes que producidos de forma directa por la quema de biomasa se mantuvieron por debajo de los valores permisibles de las normas de calidad del aire se ha visto que estos anualmente si afectan la calidad del aire.

Con los resultados de la modelación numérica para este caso de estudio es posible visualizar a grosso modo la importancia de este trabajo para establecer

una metodología que permita cuantificar las emisiones de aerosoles producidos por incendios forestales. La metodología empleada puede ser aplicada a cualquier área de la República Mexicana y de esta manera estudiar la influencia de los aerosoles que se emiten de los incendios forestales a nivel nacional y sus consecuencias sobre el cambio climático global.

# 7 Conclusiones

- 1) De acuerdo con los datos reportados por la CONABIO sobre incendios forestales ocurridos en México durante el periodo 1999-2007, se realizaron mapas de la distribución de los eventos ocurridos y se determinó que la mayoría de los incendios ocurren en la Sierra Madre Oriental y al Sur de la República Mexicana. Por otra parte, analizando los datos estadístico reportados por la CONAFOR en relación al numero de incendios forestales ocurridos durante el periodo 1970-2007 se encontró que los estados más afectados en son el estado de México. Distrito Federal, Chiapas, Michoacán, Colima y Jalisco.
- 2) El 90% de los incendios forestales que ocurren en la República Mexicana se debe a actividades antropogénicas. Aunado al fenómeno de El Niño que favorece la ocurrencia de incendios forestales por la sequía severa que se tiene en algunos años. En los últimos años, 2000-2007, el número de incendios forestales alcanzó los 15 000, mientras que el área quemada fue del orden de 850,000 hectáreas, la época de combustión coincide con la época de seca que regularmente va de enero a julio.
- 3) El Área de protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) que se ubican en la región central del estado de Jalisco en promedio experimenta 29 incendios forestales anualmente. La importancia de esta zona se debe a su cercanía con la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), la segunda ciudad más importante de la República Mexicana.
- 4) La zona vulnerable a incendios forestales en el APFFLP es la región localizada al oeste del bosque de acuerdo con los datos estadísticos que se mostraron de los incendios que han ocurrido en el periodo 2004-2005, y de acuerdo al índice de vegetación que se calculó que muestra una

amplia cobertura de combustible disponible en la parte oeste del bosque. El 25 y 26, de Abril de 2005 se originó una serie de incendios forestales que devastaron un área de 8478 ha en el APFFLP, la zona afectada coincide con la zona vulnerable a incendio.

- 5) La cantidad de carbón liberado a la atmósfera por los incendios del 25 y 26 de abril de 2005 está dentro del rango de 6,222.4 ton a 23,081.3 ton, el dióxido de carbono está dentro de un rango de 5,600.16 a 10,873.2 ton, el dióxido de nitrógeno está en un rango de 1,176 ton a 2,283 ton. Los valores de rangos calculados concuerdan con los que se han reportado en la literatura.
- 6) La aplicación del modelo MM5 para investigar la circulación de la atmósfera en las fechas 24, 25,26 y 27 de abril de 2005 y que coinciden en las fechas que ocurrieron los incendios forestales en el APFFLP, muestran que los valores numéricos calculados y valores observados en diferentes estaciones meteorológicas concuerdan muy bien. Las series de tiempo de datos observados y calculados de temperatura, de presión, de humedad relativa y de velocidad del viento muestran una gran correlación, con rangos de concordancia como los que han sido reportados en la literatura científica. Las variables meteorológicas analizadas muestran temperaturas adecuadas y baja humedad relativa que favorecen la dispersión del fuego y de los aerosoles en la dirección de los vientos predominantes que van en la dirección oeste a este.
- 7) La aplicación del modelo MCCM para estudiar la dispersión de los contaminantes emitidos durante los incendios forestales ocurridos en las fechas seleccionadas, resultó un tanto complicada debido a la falta de información del ritmo de emisión de los contaminantes producidos por los incendios y la hora de ignición. Esta información es completamente necesaria para simular correctamente los tiempos en que los picos de

máxima concentración ocurren en las estaciones meteorológicas. Por este motivo se realizaron una serie de experimentos con diferentes tiempos de inicio de los incendios forestales hasta que se pudieron reproducir aceptablemente las series de tiempo, con máximos y mínimos, de diferentes contaminantes observados en las estaciones de monitoreo de la ZMG.

- 8) La aplicación combinada de los modelos MM5 y MCCM permitió, finalmente, la simulación correcta de la pluma de aerosoles producidos por los incendios forestales ocurridos en el APFFLP en Abril de 2005. La concordancia entre la pluma observada a través de una imagen de satélite y la modelada es excelente.
- 9) Los contaminantes que se producen en los incendios forestales que ocurren en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera son transportados hacia las zonas urbanas cercanas al bosque La Primavera, principalmente, hacia la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) donde ocasionan incremento en los niveles de concentración de los contaminantes atmosférico.
- 10) El análisis de los datos de los niveles de concentración de contaminantes registrados en las estaciones de monitoreo de la ZMG en las fechas 24, 25, 26 y 27 de abril de 2005, muestran altos niveles de concentración que rebasan los valores permisibles (en algunas estaciones de la red de monitoreo) establecidos por las Normas Mexicanas de calidad del aire. Durante las fechas en que ocurrieron los incendios forestales en el APFFLP. El monóxido de carbono sobrepasó el nivel permisible en una proporción de 0.5ppm en una de las estaciones de monitoreo mientras que en las demás estaciones los valores registrados se mantuvieron en el límite del valor establecido. Los niveles del dióxido de nitrógeno se incrementaron en las fechas investigadas y sus valores estuvieron dentro

del valor permisible. Los niveles de PM10 excedieron el valor establecido, en una proporción de  $1.89\mu\text{g}/\text{m}^3$  en todas las estaciones de la red de monitoreo.

11) Finalmente, se concluye que las herramientas y la metodología desarrollada en este trabajo es apropiada para investigar la dispersión de aerosoles producidos por incendios forestales de cualquier área de la República Mexicana, puesto que se ha investigado el impacto de los aerosoles generados por incendios forestales sobre la calidad del aire, siendo un problema de contaminación atmosférica creciente, con consecuencias sobre el cambio climático, la elaboración de este trabajo adquiere mucha relevancia.

## Referencias

Alan H, 2003 *Ecological Applications*, 13(3), 704-719 © by the Ecological Society of America.

Andreae. M. O., D. Rosenfeld, P. Artaxo, A. A. Costa, G. P. Frank, K. M and Longo, M. A. F. Silva-Dias. *SCIENCE VOL 303 27 FEBRUARY 2004*. Smoking Rain Clouds over the Amazon.

Bruce Buckley, Edward J. Hopkins, Richard Whitaker, 2004. *Meteorología p* (276-277). Editorial Ceac, S.A.

Carl N. Skinner, 1996 US Forest Service Pacific Southwest Resear Station Redding, California. *Fires Regimens, Past and Present*.

Crutzen PJ. and Lelieveld. Human Impacts on Atmospheric Chemisty *Annu.Rev. Earth Planet. Sci.*2001.29:17-45.

Crutzen Paul J..The role of NO and NO<sub>2</sub> in the chemistry of the troposphere and stratosphere. *Ann Rev.EARTH Planet. Sci.*7 443-72. Copyright © 1979 by Annual Reviws Inc. All rights reserved.

Campos Ramos A. Aragon Piña A., Galindo Estrada. I. Querol Xavier Alastuey Andrés.Characterization of atmosfepheric aerosols by SEM in a rurales in the wester part of Mexico and its relation with different polluting sources. *Atmospheric Enviroment*, 2009.

CONANP,2000. Comisión Nacional de Área Naturales Protegida. Progama de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. Producido por el comité Técnico para la Administración del bosque La Primavera.

Cochrane Mark A.. Conservation Biology, Pages 1515-1521. Volume 15, No.6, December 2001.

Cochrane Mark A., 2002. incendios en Bosques Tropicales en América Latina y el Caribe Prevesión y Evaluación y Alerta Temprana. Editado para el Progre de las naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Cochrane Mark A.. *Nature*.VOL421. 27 FEBRUARY 2003.  
[www.nature.com/nature](http://www.nature.com/nature). FIRE SCIENCE FOR RAINFORESTS.

Daubenmire R.F, 2000. Ecología Vegetal. Tratado de Auto Ecología de Plantas. Editorial Limusa p (385-386).

Dudhia,J.,Guo, D:G:Y., Manning, K., Michalakes, J.; y WANG, W. 2001, PSU/NCAR Mesoescala Modeling System. Tutorial Class Notes and User's Guide. MM5 Modeling System version 3'. Mesoescala and Mirmicroescala Meteorology division, National Center for Atmospheric Research,Boulder.

Delmas R. J.P. Lacaux and Broacard.,1995. Determinationof biomass burning emission factos methods and results. Environmental monitoring and Assessment 38:181-204. Kluwer Academic Publishers,Printed in the Netherlands.

Drake Frances. Global warming The Science of climate change. School of geography, University of leeds Oxford University press Inc.198.Modison Avenve,New York, Ny/00/6©,2000.

EEPSEA/WWF, Economy and Enviroment Programme for South East Asiaand the World Wildlife Fund (WWF). The Indonesian Fires and Haze of 1997: The Economic Toll. Unpublished report, 1998b.

Figueruelo Dávila, Juan E. 2004 Química Física del medio ambiente y de los procesos medio ambientales. Editorial Reverte.

Flores Garnica José German, Esteban Talavera Zúñiga, Alfredo Martínez Moreno, Martín Mendoza Briceño y Jorge L. Flores Rodríguez, 2005. Clasificación de cobertura de suelo, en el bosque La primavera, basada en la definición de objetos. ISBN:970-27-0960-1.

Flores Garnica José German. Esteban Oscar Gerardo Rodríguez Chavez, oscar Gerardo Rosas Aceves y Ana Teresa Ortega Minakata, 2005. Evaluación del impacto del fuego en los combustibles forestales en el bosque La primavera. ISBN:970-27-0960-1.

Van der Werf, G.R. J.T. Randerson, L.Gilio, G.J. Collaz, P.S. Kasibhatla, and A.F. Arellano,2006. Interannual variability of global biomass burnig emissions from 1997 to 2004.

García Reynoso A.,2003. Manual del Multiscale Climatic Chemistry Model (MCCM), UNAM.

Gilbert Olmo Beatriz, 2005. Criterios e indicadores para la restauración del área de protección de flora y fauna la primavera, Jalisco, México. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de ciencias biológicas y Agropecuarias, División de Ciencias Agronómicas.Tesis de licenciatura.

Gallegos Rodríguez Agustin, Jesús Hernandez Alonso, Efraín Abundio Raminrez yJuan Espinisa Aréchiga, 2002. Variación en la tipología del cambio de uso del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Bosque La Primavera para el período 1980-2002. Proyecto CONAFOR.

García E. 1973 Modificaciones al sistema de clasificación climática de Copen. Univerisidad Nacional Autónoma de México, Mexico D.F. p(246).

Heidi Asbjornsen y Claudia Gallardo Hernandez. Impactos delos incendios de 1998 en el bosque mesofilo de montaña de los Chimalapas, Oaxaca. Department of Natural Resource Ecology & Managemen, Iowa State University, 253 Bessey Hall, Ames, IA, USA.

Helas Günter, 1995. Emissions of atmospheric trace gases from vegetation burning. Phil. Trans. R.Soc. Lond.A.351,297-312. Printed in Great Britain.

Jordi, 2004. Notas de Clase. Introduction to the Atmosphere. Wageningen University Meteology and air Quality.

Jürgen M. Lobert, Dieter H. Scharffe, Wei-Min Hao, Thomas A. Kulhbusch,, Ralph Seuwen. Peter Warneck, and Paul J. Crutzen (1991). Experimental Evaluation of biomass Burning Emissions: Nitrogen and carbon Containing Compunds.

Keeling Ralph F., 2004. The Atmosphere Treatise on geochemistry. Volumen 4. Yale University, New Haven, CT, USA y Harvard University, Cambridge, MA USA.

Pineda Martinez Luis Felipe, 2005. Climate description and numeric modeling of meteorological phenomenon in San Luis Potosí, México. Tesis de maestría. Instituto Potosino de investigación Científica y Tecnológica, Departamento de Ingenieria Ambiental y Manejo de recursos Naturales.

Levine Joel S., 1999. Atmospheric Sciences Division NASA Langley Research Cente, Hampton, U S A. Wildland Fires and the Environment a Global Synthesis.

Levine Joel S., 1991. Atmospheric Sciences Division NASA Langley Research Center, Hampton, U S A. Biomass Burning: The Cycling of Gases and Particulates from the Biosphere to the Atmosphere.

Levine Joel, S., 1994. Atmospheric Sciences Division NASA Langley Research Center, Hampton, U S A. Biomass burning and the production of greenhouse gases.

Magaña Rueda Víctor (Editor) (2004). *Los impactos del niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p.

Michel.C.C.Liousse, J.M.Grégoire,K.Tanssey,G.R.Carmichael, and J.H.Woo,2005Biomass burning emission inventory from burnt area.Data given by the Spot-Vegetation system in the frame of TRACE-P and ACE-Asia. Canpings,J.Geophys.Res,110.D09304,doi.10.1029/2004/D0055461.

Noyola Medrano María Cristina, Hinojosa Corona y Barajas Martín Arturo. Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm.2, 2005, p.229-245.

PI-CONAFOR, 2008. Programa Institucional Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) 2007-2012.

Peter G.H. Frost Incendios en los bosques de África meridional: orígenes, impactos, efectos y control Instituto de Estudios sobre el Medio Ambiente, Universidad de Zimbabwe, P.O. Box MP 167, Mount Pleasant, Harare,

Zimbabwe. Producido por el departamento de Montes. Serie: Estudio FAO - 138,1998.

Richard W.Boubel; Donald L. Fox; D.Bruce Turner, and Arthur C.Stern.Fundamentals of air Pollution, 1994. P ((40-54), (72-95) y( 99-135)). THIRD EDITION. ACADEMIC PRESS.

Rzedowski J., 1981. Vegetación de México. Editorial: Limusa, p(21-25).

R Luévano Escobedo, Karla O. Luévano de La Cruz, Gerardo de la Lira reyes, Walter Ritter Ortiz, Guztavo A. Martinez turanzas, Humberto Rodríguez Fuentes y Emilio Olivares Saenz,. El índice Ka: un nuevo algoritmo para analizarlos componentes de la superficie terrestre en imágenes de satélite. CIENCIA UANL / VOL. IX, No. 2, ABRIL-JUNIO 2006.

REPDEAPFFLP, 2005. Reporte Emitido Por la Dirección Ejecutiva del Área de Protección de Flora y Fauna la primavera.

SHI-CONAFOR (Serie Histórica de Incendios- Comisión Nacional Forestal), 2007.

Suppan. P., R. Forkel and E. Haas, 2007. The online coupled mesoscale climate-chemistry model MCCM - a modelling tool for short episodes as well as for climate periods. Institute for Meteorology and Climate Research (IMK-IFU), Forschungszentrum Karlsruhe.

Stull Roland B.,.Meteology scientists and Engineers. Second edition. The University of British Columbia copyright© 2006 by Brooks (Cole Adivision of Thomson learning).

Villers Ruiz Lourdes y López Blanco Jorge (Editores) (2004). *Incendios forestales en México. Métodos de evaluación*. Centro de Ciencias de la

Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 164 p. ISBN 970-32-1843-1.

Wark Kenneth. LECIL.F Warner-wayne T.Davis. Air Pollution its Origen and Control Third edition. Copyright© 1998 by Addison Wesley Longman.

# ANEXO I

## Normas Oficiales Mexicanas para evaluar la calidad del aire

A continuación, se resumen las Normas Oficiales Mexicanas vigentes para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a ozono (O<sub>3</sub>), bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros (PM10) y plomo (Pb).

Tabla 1. Valores normados para los contaminantes del aire en México

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica (Para protección de la salud de la población susceptible)	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable		
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.11 ppm (1 Hora)	1 vez cada 3 años	-	NOM-020-SSA1-1993
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 Horas)	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24 Horas)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)	NOM-022-SSA1-1993
Bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm (1 Hora)	1 vez al año	-	NOM-023-SSA1-1993
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m <sup>3</sup> (24 Horas)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)	NOM-024-SSA1-1993
Partículas menores a 10µm (PM10)	150 µg/m <sup>3</sup> (24 Horas)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)	NOM-025-SSA1-1993
Plomo (Pb)	-	-	1.5 µg/m <sup>3</sup> (prom. arit. en 3 meses)	NOM-026-SSA1-1993

Fuente: Diario Oficial de la Federación del 23 de diciembre de 1994.