



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

DESARROLLAR UN MÉTODO PARA DETERMINAR LAS
EXCEDENCIAS DE NIVELES CRÍTICOS DE OZONO
PARA ESTIMAR DAÑO A CULTIVOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

DULCE JAQUELIN ALVARADO GONZÁLEZ

MÉXICO, D.F.

2015





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara
VOCAL: Profesor: José Agustín García Reynoso
SECRETARIO: Profesor: Gema Luz Andraca Ayala
1er. SUPLENTE: Profesor: Sergio Adrián García González
2do. SUPLENTE: Profesor: Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO COMPARTIDO DE CROMATOGRFÍA
GRUPO DE FISICOQUÍMICA ATMOSFÉRICA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
UNAM**

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Gema Luz Andraca Ayala

SUPERVISOR TÉCNICO:

MC Bertha Eugenia Mar Morales

SUSTENTANTE:

Dulce Jaquelin Alvarado González

ÍNDICE

Introducción	1
Objetivos	3
Capítulo I. Generalidades	
1.1. La atmósfera y la química atmosférica	4
1.2. Contaminación del aire y riesgos a la salud humana	6
1.3. Clasificación de los contaminantes	7
1.4. Fuentes de los contaminantes	8
1.4.1. Fuentes puntuales	8
1.4.2. Fuentes móviles	8
1.4.3. Fuentes de área	8
1.4.4. Fuentes naturales	9
1.5. Ozono	9
1.6. Efectos del ozono sobre la vegetación	13
1.6.1. Daño ocasionado por el Ozono	13
1.7. Límite máximo permisible de O ₃	15
1.8. Método de medición de O ₃ en México	16
1.9. Calidad del aire	17
1.10. Monitoreo	17
1.11. Monitoreo pasivo	18
1.12. Modelos de la calidad del aire	19
1.12.1 Descripción del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM " <i>Multiscale Climatic Chemistry Model</i> "	20
1.13. AOT40 " <i>Acumulated Over a Threshold 40 ppb during daylight hours</i> "	21
1.14. Area de estudio y sitios de muestreo	22

Capítulo II. Metodología

2.1. Muestreo pasivo para O ₃	27
2.2. Base de datos obtenida del modelo MCCM	28
2.3. Comparación del muestreo pasivo y MCCM	29

Capítulo III. Resultados

3.1. Promedios de concentración de Ozono del modelo MCCM	32
3.2. Comparación de las concentraciones del monitoreo pasivo y del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica (MCCM)	35
3.3. Cálculo del factor de escalamiento para cualquier temporada	39
3.4. Ejemplo de Aplicación del factor de corrección para el cálculo de las excedencias AOT40	40

Capítulo IV. Conclusiones

Referencias	44
--------------------	----

Anexo I	46
----------------	----

INTRODUCCIÓN

En la actualidad son ampliamente reconocidos los problemas de contaminación ambiental, en particular del aire, que dan lugar a la acumulación de riesgos para la salud y bienestar de la población. Gran parte de esos problemas son consecuencia del rápido y desordenado crecimiento urbano y de la industrialización, fenómenos que muchas veces no van acompañados de programas cuyo objetivo es proteger el ambiente, (Lacasaña-Navarro, 1999).

El ozono es una forma de oxígeno altamente reactivo formado por tres átomos de oxígeno. En la estratosfera, el ozono nos protege de la peligrosa radiación ultravioleta del sol. Sin embargo, en la capa inferior de la atmósfera (troposfera), el ozono es un contaminante importante que afecta a la salud humana y a la naturaleza.

El ozono troposférico se forma mediante reacciones fotoquímicas entre gases precursores como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Es un contaminante potente y agresivo. En concentraciones elevadas corroe los materiales, edificios y los tejidos vivos. Reduce la capacidad de las plantas para realizar la fotosíntesis y les impide absorber el dióxido de carbono. En la salud humana provoca alteración funcional y anatómica del pulmón, incremento de infecciones respiratorias, exacerbación de enfermedades preexistentes, aumento de mortalidad por enfermedades pulmonares y cardíacas, (McGlade, 2013).

Para mejorar o aún preservar la calidad del aire se requiere de la medición de los contaminantes en la atmósfera. Tal medición sirve para:

- Proporcionar los datos necesarios sobre los cuales es posible determinar la relación de los efectos con los niveles de los contaminantes.
- Proveer un criterio cuantitativo sobre si los estándares de calidad del aire del aire se están logrando o superando y en qué grado.

- Determinar si algunos cambios nocivos en los niveles ambientales globales de los contaminantes están ocurriendo como resultado de las actividades del hombre.
- Determinar el destino de los contaminantes en la atmósfera y junto con la información meteorológica poder modelar y predecir la relación entre concentraciones, emisiones y condiciones climáticas.
- La medición de contaminantes en la fuente sirve para evaluar el cumplimiento de las normas de emisión, medir la eficacia de las tecnologías de control y para llevar a cabo investigaciones científicas, (Strauss, 1990).

Es importante la medida de las excedencias de ozono al AOT40 para protección de la vegetación debido a los efectos nocivos que tiene en las plantas como lo es el envejecimiento temprano de las hojas y un metabolismo acelerado que lleva a una rápida pérdida de las proteínas y de la clorofila. Como resultado disminuye el periodo de tiempo en el que se asimila el dióxido de carbono en la planta y por lo tanto se reduce la producción total. Así mismo debilita la reproducción y el crecimiento de las plantas, mermando las cosechas y el desarrollo de los bosques.

En este trabajo se determinaron las excedencias de ozono al AOT40 a partir de datos modelados y monitoreo ambiental en la zona sur de la corona del Valle de México.

OBJETIVOS GENERALES

- Desarrollar un método para determinar las excedencias al AOT40 en la zona central de México a partir del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM y mediante el monitoreo pasivo.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Comparar los métodos de muestreo ambiental de ozono con monitores pasivos y los resultados del modelo MCCM.
- Determinar el factor de escalamiento al modelo MCCM obtenido a partir de datos reales como resultado de monitoreo pasivo.
- Calcular las excedencias al AOT40 a partir del factor de escalamiento del modelo MCCM.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. LA ATMÓSFERA Y LA QUÍMICA ATMOSFÉRICA

La atmósfera es en una capa de gases que cubren la superficie de la Tierra. El aire atmosférico está constituido por 78.1% (en volumen) de nitrógeno, 21.0% de oxígeno, 0.9% de argón y 0.03% de dióxido de carbono. El comportamiento de la atmósfera es consecuencia de los gases que contiene, tanto procedentes de fuentes naturales como antropogénicas y de las fuerzas físicas que actúan en ella (Fishman, 2003).

En la atmósfera de nuestro planeta pueden distinguirse cuatro regiones, denominadas troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera o ionosfera y la exosfera.

Troposfera. Es la capa más próxima a la superficie de la Tierra y se extiende hasta una altitud de 15 km aproximadamente, en ella respiramos y se dan los fenómenos meteorológicos que determinan el clima. Es la capa más dinámica, siempre en movimiento, es donde se generan la mayoría de los fenómenos de contaminación atmosférica que pueden, entre otras cosas modificar el clima.

Su característica más importante es que la temperatura va descendiendo con la altura, a razón de 0.6°C cada 100 metros (atmósfera real), hasta unos 12 km de altitud, donde se estabiliza, marcando el final de la troposfera, altura a la que se alcanza el borde exterior o tropopausa. Dependiendo del lugar del planeta donde estemos, la tropopausa se alcanza a una altura diferente, unos 15 km en el Ecuador y unos 6 km en los polos.

Estratosfera. Llega hasta 50 km de altura y se caracteriza por una ausencia de corrientes verticales y escasa concentración de vapor de agua. Es donde se encuentra la mayor parte del ozono, entre los 25 y 30 km de altitud, en la llamada capa de ozono. La función más importante de la capa de ozono es la de absorber

la radiación ultravioleta procedente del espacio exterior, permitiendo así la existencia de la vida en la Tierra.

Mesosfera. A partir de 50 km el calentamiento atmosférico deja de ser efectivo y la temperatura de nuevo disminuye desde unos 0°C hasta los -80°C a una altura de 80 km, la mesopausa es la zona de transición con la siguiente capa atmosférica.

Termosfera o Ionosfera. Por encima de la Mesopausa la temperatura crece de nuevo con la altura, de forma que a los 500 km de altitud la temperatura alcanza los 1500°C. El aumento en este caso es debido a la absorción de la radiación solar más energética (rayos X, radiación gamma y ultravioleta de vacío) y a la baja densidad de la atmósfera a elevadas altitudes. Esta capa también recibe el nombre de Ionosfera debido a la formación de capas ionizadas que tienen la capacidad de reflejar las ondas radioeléctricas,(Martínez Ataz & Díaz De Mera Morales, 2004).

La atmósfera es la fuente de dióxido de carbono para la fotosíntesis de las plantas y de oxígeno para la respiración. Proporciona el nitrógeno que las bacterias fijadoras de nitrógeno y las plantas productoras de amoníaco emplean para producir el nitrógeno enlazado químicamente, es un componente esencial de las moléculas de los seres vivos. La atmósfera absorbe la mayoría de los rayos cósmicos del espacio exterior y protege a los organismos de sus efectos. También absorbe la mayoría de la radiación electromagnética del sol. La atmósfera filtra la radiación ultravioleta dañina que sería, por otra parte, muy perjudicial para los organismos vivos (Manahan, 2007).

En la figura 1.1. se representan las capas de la atmosfera antes descritas.

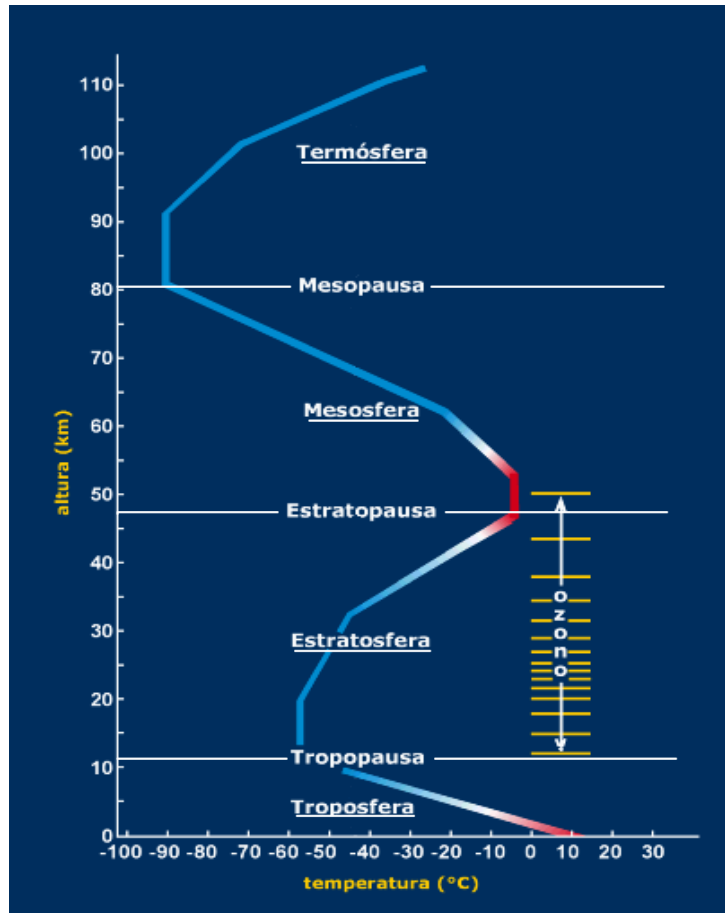


Figura 1.1. Capas de la atmósfera. Fuente:(MeteOlot).

La química atmosférica es la rama de la química ambiental que se dedica a estudiar la composición química de la atmósfera y los procesos químicos y fotoquímicos que ocurren en ella. Las reacciones aceleradas por la luz solar, procesos fotoquímicos, en las que se forman contaminantes secundarios y aquellas por las que se forman compuestos que participan en los ciclos biogeoquímicos, son de particular importancia para el estudio de la contaminación atmosférica, (Albert LA, 1994).

1.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y LOS RIESGOS A LA SALUD HUMANA

La presencia o acumulación en la atmósfera de uno o más contaminantes como polvo, humos, gases, olores, nieblas o vapores, en cantidades y duración tales, que puedan causar daño a la salud humana, a sus bienes, a la flora, a la fauna y al ambiente en general se le conoce como contaminación del aire. Los efectos

negativos a los bienes humanos incluyen el impacto económico por daños a las cosechas o a la propiedad.

La contaminación del aire es en la actualidad uno de los mayores riesgos para la salud humana y el ambiente. La lista de problemas que ocasiona y agrava es muy amplia: problemas pulmonares, asma bronquial y gripe, que son muy comunes y persistentes en los lugares donde el grado de contaminación es muy alto. A la vegetación y a los cultivos los daña por la emisión de vapores ácidos generados en las industrias que se incorpora al ciclo hidrológico ocasionando el fenómeno conocido como lluvia ácida,(Arellano, 2002).

Los contaminantes atmosféricos que causan el deterioro de la atmósfera consisten en una gran variedad de gases, vapores y partículas. Algunos de los contaminantes más comunes del aire, consisten en gases inorgánicos, especialmente óxidos de nitrógeno, azufre y carbono. Vapores orgánicos de varios tipos, constituyen una clase importante de contaminantes atmosféricos, como por ejemplo los responsables de neblumo o smog fotoquímico. Las partículas atmosféricas emitidas directamente a la atmósfera o formadas por procesos químicos atmosféricos causan importantes problemas de contaminación. Además de gases y vapores, los contaminantes atmosféricos pueden consistir en partículas,(Manahan, 2007).

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

Los contaminantes del aire se pueden clasificar de acuerdo a su origen, composición química o estado de agregación molecular.

Por su origen: se clasifican en contaminantes *primarios* y *secundarios*: los contaminantes primarios como los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos (HC), son emitidos directamente de la fuente a la atmósfera, se miden y se encuentran en forma como fueron emitidos. Los contaminantes secundarios como el Ozono (O_3) son los que se forman en la atmósfera por reacciones fotoquímicas o por hidrólisis u oxidación. A su vez se clasifican en *antropogénicos*, *geogénicos* y *biogénicos*, los antropogénicos son los generados

por el hombre como la contaminación por gases industriales, los geogénicos son los que tienen su origen en fenómenos del subsuelo como los gases de volcanes y los biogénicos que son los que tienen su origen en organismos vivos como la materia fecal.(Arellano, 2002)

1.4. FUENTES DE LOS CONTAMINANTES

Una fuente de contaminación es aquella que da origen a la misma. En general se clasifican las fuentes de contaminantes en cuatro grupos: puntuales, móviles, de área y naturales.

1.4.1. Fuentes puntuales

Se refiere al origen, del contaminante, en un punto fijo o estacionario, como las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas, etcétera. Según la industria o proceso específico, las fuentes estacionarias pueden emitir uno o varios contaminantes criterio del aire además de otros contaminantes peligrosos.

1.4.2. Fuentes móviles

Son aquellas que incluyen a las diversas formas de transporte tales como automóviles, camiones y aviones, etcétera.

La principal fuente móvil de contaminación del aire es el automóvil, pues produce grandes cantidades de monóxido de carbono (CO) y cantidades menores de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs).

1.4.3. Fuentes de área

Se refiere a una serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que no pueden ser incluidas de manera eficiente en un intervalo de fuentes puntuales, pero que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región, por ejemplo: el uso de madera para cocinar o calentar la casa, las imprentas, las estaciones de servicio, y las tintorerías, etcétera,(Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014).

1.4.4. Fuentes naturales

A continuación se describen dos fuentes naturales significativas, que son comúnmente consideradas en los inventarios de emisiones atmosféricas.

Emisiones Biogénicas. Son aquellas que emiten compuestos a la atmósfera generados por procesos tanto bióticos como abióticos, que no tienen influencia directa de actividades humanas. Los primeros se encuentran presentes en todos los ecosistemas y procesos naturales, desde el fitoplancton de los océanos, que emite compuestos orgánicos volátiles, hasta la respiración de los seres vivos que aportan dióxido de carbono, así como diversos gases derivados de la actividad de los microorganismos y la liberación de fitohormonas por las plantas, por mencionar algunos. Por otro lado, los abióticos incluyen las fuentes geotécnicas, rayos, quema de biomasa, etcétera, (Velasco & Bernabé, 2004).

Emisiones de Suelos. El óxido nitroso (N_2O) es producido naturalmente en los suelos como parte de los procesos de desnitrificación (es decir, la reducción de nitritos y nitratos a nitrógeno gaseoso como N_2 o NO_x). Por su parte, los fertilizantes nitrogenados comerciales constituyen una fuente adicional de nitrógeno, lo cual incrementa las emisiones del suelo de N_2O . Se estima que las emisiones de NO_x provenientes de los suelos constituyen un 16% de la cantidad global de NO_x , en la tropósfera.

La erosión eólica es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones típicamente están asociadas con suelos perturbados, frecuentemente son tratadas como fuentes de área. Otras categorías más pequeñas de fuentes naturales incluyen a las termitas quienes emiten (CH_4), los relámpagos emisiones de NO_x , los volcanes y la actividad geotérmica emisiones de SO_x , (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014).

1.5. OZONO

El ozono es un gas incoloro, altamente reactivo, compuesto por moléculas de tres átomos de oxígeno (O_3). Es de naturaleza inestable y por ello muy reactivo; por

eso es un conocido oxidante fotoquímico. Al reaccionar, libera un átomo de oxígeno produciendo la oxidación. En la figura 1.2 se muestra la ficha técnica del ozono.

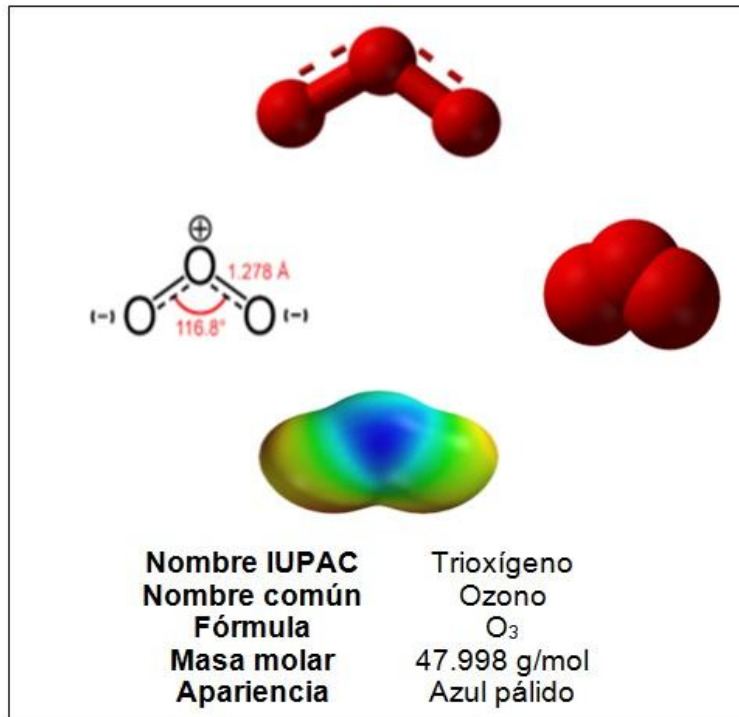


Figura 1.2. Ficha técnica del Ozono

Hay que diferenciar dos tipos de ozono en función de su localización en la atmósfera:

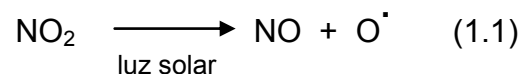
Por un lado, el ozono que se encuentra en la estratosfera se genera de forma natural, siendo beneficioso para la vida en la tierra. Su carácter beneficioso radica en que en su formación absorbe la radiación ultravioleta, muy perjudicial para los seres vivos, actuando de esta manera como un filtro. Además, esta alta concentración de ozono en la estratosfera evita la pérdida de vapor de agua localizada en las capas bajas de la atmósfera, (Palomares Palacios A. , 2010).

El ozono a nivel troposférico tiene varios efectos tóxicos. Es una molécula extremadamente reactiva que irrita los tejidos respiratorios y puede ocasionar daños pulmonares permanentes. También daña las plantas y reduce las

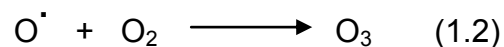
producciones agrícolas. El ozono es un contaminante secundario que se forma como un componente del smog fotoquímico.

El *smog fotoquímico* es una mezcla de contaminantes como el ozono, los aldehídos y los nitratos de peroxiacetilo que resultan de la interacción del dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles con la luz del sol. Los dos componentes más destructivos del smog fotoquímico son el ozono y los nitratos de peroxiacetilo. El ozono es en particular dañino debido a que destruye la clorofila en las plantas y el tejido pulmonar de los humanos y otros animales. Los nitratos de peroxiacetilo, además de ser agentes oxidantes, son irritantes oculares.

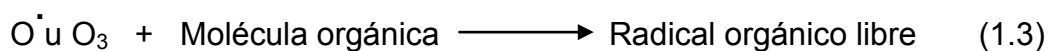
Para que el smog fotoquímico se forme, se necesitan varios componentes. Deben estar presentes: monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), y luz solar, que son importantes para mantener las reacciones químicas implicadas. En la mayoría de las áreas urbanas, el monóxido de nitrógeno, el dióxido de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles están presentes como resultado de los procesos industriales y de las emisiones de los automóviles. Con la presencia de la luz del sol, el dióxido de nitrógeno se descompone en monóxido de nitrógeno y oxígeno atómico:



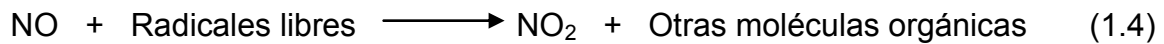
El oxígeno atómico es extremadamente reactivo y reaccionará con el oxígeno molecular del aire para formar el ozono:



Tanto el ozono como el oxígeno atómico reaccionarán con compuestos orgánicos volátiles para producir radicales orgánicos libres muy reactivos:



Los radicales libres son muy reactivos y provocan la formación de dióxido de nitrógeno adicional a partir del monóxido de nitrógeno:



Esta etapa es importante debido a que la presencia de NO_2 adicional provoca la producción adicional de ozono. Los radicales orgánicos libres también reaccionan con el dióxido de nitrógeno para formar nitratos de peroxiacetilo y aldehídos. El desarrollo del smog fotoquímico en un área comprende la interacción del clima, la hora del día y las emisiones de vehículos de motor de la siguiente forma: Durante las horas pico del tráfico de la mañana, las cantidades de monóxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles se incrementan, lo cual produce un incremento en la cantidad de los niveles de NO_2 y que los niveles de NO caigan al convertirse en el NO_2 . Mientras tanto, los niveles de ozono aumentan al descomponerse el NO_2 por la luz del sol y también crecen los niveles de nitratos de peroxiacetilo. Cuando el sol se pone, la producción de ozono disminuye. Además, el ozono y otros componentes del smog reaccionan con sus entornos y son destruidos, de manera que los componentes destructivos del smog disminuyen al anochecer.

Aunque el smog puede desarrollarse en cualquier área, algunas ciudades tienen problemas mayores debido a su clima, tráfico y características geográficas. Las ciudades que están localizadas junto a cadenas montañosas o valles enfrentan mayores complicaciones debido a que los contaminantes se pueden quedar atrapados por las inversiones térmicas. Normalmente, el aire se calienta en la superficie de la Tierra y se enfría a mayores altitudes. En algunos casos, una capa de aire más frío puede encontrarse por encima de una capa de aire más caliente en la superficie de la Tierra, esta condición se denomina inversión térmica.

En las ciudades ubicadas en valles, cuando la superficie de la Tierra se enfría por la noche, el aire más frío a los lados del valle puede fluir hacia abajo y al interior del valle y crear una inversión térmica. Cuando el aire frío fluye al interior de esos valles, empuja el aire caliente hacia arriba. En cualquier caso, el aire caliente se queda atrapado entre dos capas de aire frío y actúa como una tapa del valle. La

capa de aire caliente no se puede elevar debido a que está cubierta por otra capa de aire más frío y más denso que la empuja hacia abajo. Además, estas capas no se pueden mover del área debido a las montañas. Sin la circulación normal de aire, el smog se acumula. La concentración de los compuestos químicos dañinos continúa incrementándose hasta que un cambio importante en el clima provoque que la tapa de aire caliente se eleve y se mueva hacia las montañas. Entonces, el aire frío subyacente comenzará a circular, y el aire contaminado se podrá diluir.

Los problemas de smog disminuyen al reducir las emisiones de NO_x y de COV, esto se lograría eliminando el uso de motores de combustión interna o trasladando las ciudades fuera de los valles en los que se presentan las inversiones térmicas. Es prácticamente imposible que las ciudades se puedan mover, sin embargo, sí es posible reducir las moléculas de plomo, la reformulación de la gasolina y la instalación de dispositivos en los automóviles que reducen la cantidad de NO_x y COV. A pesar de que la emisión de COV se ha reducido de una manera importante y los niveles de NO_x se han disminuido en una cantidad mínima, los niveles de ozono no han descendido. Dado que el ozono es producido como resultado de las interacciones de COV y NO_x , será necesario reducir los niveles de estos dos componentes para disminuir su producción. En particular, será necesario disminuir los niveles de NO_x , y esto requerirá cambios en la forma en que los automóviles están diseñados o son alimentados, (Enger, 2006).

1.6. EFECTOS DEL OZONO SOBRE LA VEGETACIÓN

1.6.1 Daño ocasionado por el Ozono

En la actualidad se considera que el ozono es el contaminante más relevante para cultivos y bosques. Los efectos del ozono sobre las plantas han sido bien documentados en diferentes estudios realizados en condiciones controladas. Estos estudios se han realizado en cámaras de techo descubierto, OTC en sus siglas en inglés, donde se aumentan artificialmente los niveles de ozono. El ozono entra en la hoja a través de los estomas y produce una serie de efectos que van

desde alteraciones fisiológicas a daños visibles o reducciones en el crecimiento de las plantas.

Estudios han demostrado que uno de los primeros efectos del ozono es una alteración en los procesos fotosintéticos: se produce una reducción en la asimilación de CO₂, no necesariamente unida a la presencia de daños visibles en las hojas. Diversas evidencias apuntan a que la Rubisco, el enzima responsable de la fijación del carbono en la fase oscura de la fotosíntesis, se ve afectada por el ozono. Posteriormente, se detectan alteraciones también en los pigmentos y una destrucción de la clorofila. El intercambio de gases se produce casi exclusivamente a través de los estomas; las hojas afectadas por el ozono ven reducido este intercambio (conductancia estomática), como es característico de las hojas viejas o senescentes. Puede verse también reducida la eficiencia del uso del agua de las hojas de plantas que han crecido bajo niveles altos de ozono. Estas alteraciones a nivel fisiológico son en parte semejantes a los procesos naturales de senescencia de las hojas, como también lo son en parte las alteraciones anatómicas.

En plantas sensibles, el ozono causa alteraciones anatómicas características, descritas a continuación:

Cuando las plantas se exponen a niveles elevados de ozono, la zona más alterada suele ser la parénquima en empalizada. Algunas de estas alteraciones son comunes a los procesos de senescencia, se produce una degeneración de los cloroplastos y el tonoplasto de las vacuolas se altera. Otras pueden ser interpretadas como una consecuencia del estrés oxidativo, como es el caso de la acumulación de sustancias pécticas a las paredes celulares, formando pequeñas gotas. Finalmente, hay un grupo de alteraciones que son mecanismos de defensa, como es el caso de la acumulación de taninos u otras sustancias antioxidantes o de calosa, una sustancia que también se acumula como respuesta a daños mecánicos o afecciones por insectos u hongos.

En un estudio más avanzado, las células del parénquima en empalizada se colapsan, aumentan los espacios intercelulares, y los daños son visibles externamente. Hay también alteraciones secundarias en el floema de los haces vasculares: la forma de las células de este tejido se modifica y se depositan sustancias que dificultan la circulación de la savia.

El ozono también altera la partición de biomasa entre la parte aérea y las raíces, de forma que hay una reducción relativa de las raíces con respecto a la parte aérea de la planta. En varias especies se ha descrito una disminución en el crecimiento. Estas reducciones en el crecimiento pueden producirse sin que haya daños visibles en las hojas.

Finalmente, en vegetación natural el estrés crónico producido por el ozono podría favorecer el ataque por diferentes patógenos sobre las plantas más sensibles. También puede favorecer la predominancia de los genotipos más resistentes de las diferentes especies, e incluso potenciar cambios en las comunidades a favor de las especies más resistentes.

A pesar de que no hay una relación clara entre la presencia de daños visibles en las hojas y reducciones en el crecimiento, los daños visibles representan una herramienta muy útil para detectar zonas de impacto del ozono en el campo y especies potencialmente vulnerables. Hay unos patrones generales en los daños causados por el ozono. Las hojas jóvenes están siempre menos afectadas. En plantas de hoja ancha, el ozono típicamente produce pequeñas punteadas necróticas (“stipling”, de color amarillo, marrón o rojizo) que normalmente afectan solo al haz de la hoja, y no se presentan en el dorso excepto en casos de daño severo. Las punteaduras están relativamente mal delimitadas, al contrario que las manchas causadas por insectos o hongos. Los nervios permanecen verdes y no son atravesados por estas punteaduras,(Palomares Palacios A. , 2010).

1.7. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE O₃

En México la NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014 contempla dos valores para efectos de protección a la salud de la población más susceptible:

- a) La concentración de ozono, como contaminante atmosférico, debe ser menor o igual a 0.095 ppm (partes por millón) promedio horario, para no ser rebasado una vez al año. Para determinar el cumplimiento del límite de 0.095ppm en cada sitio de monitoreo del aire ambiente, se tomarán en cuenta los días que tengan al menos 75% de los valores horarios del día (18 horas). Un sitio cumplirá con la norma cuando cada uno de los valores sea menor o igual a 0.095 ppm. En el caso en el que se cuente con menos del 75% de los valores horarios, se incumplirá la norma cuando uno de los valores horarios sea mayor a 0.095 ppm.
- b) La concentración del promedio de ocho horas de ozono, como contaminante atmosférico, debe ser menor o igual a 0.070 ppm, tomado como máximo, en un periodo de un año. Para cada día de muestreo se obtendrán 24 valores, uno por cada hora. Un día será considerado válido cuando cuente con al menos 75% de los valores posibles (18 valores). En caso de tener menos de 75% de los valores, cuando el promedio máximo de ocho horas sea mayor al valor del límite de 0.070 ppm, el día se considerará como válido aun cuando se cuente con menos de 75% de los valores. Para determinar el cumplimiento del límite en cada sitio de monitoreo del aire ambiente se tomarán únicamente los promedios máximos diarios. Para un año calendario, se obtendrán 365 valores (366 para años bisiestos). Un sitio cumplirá con la norma cuando cuente con más de 75% de los datos válidos (275 datos) y el valor del máximo del año sea menor o igual a 0.070 ppm,(Secretaría de Gobernación, 2014).

La Organización Mundial de la Salud recomienda un valor de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.051 ppm de la media anual y de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.061 ppm de la media de una hora,(Organización Mundial de la Salud, 2005).

1.8. MÉTODO DE MEDICIÓN DE O₃ EN MÉXICO

La Norma Oficial Mexicana NOM-CCAM-003-ECOL/1993, establece el método de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente.

El método de referencia para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente, es la luminiscencia química. Se basa en la capacidad que tiene el ozono en emitir luz al reaccionar con etileno. En este método se hace entrar simultáneamente aire y etileno a la cámara de mezclado del analizador. Ahí, el ozono presente en el aire reacciona con el etileno emitiendo una luz, que se detecta a través de un tubo fotomultiplicador. La fotocorriente resultante se amplifica y puede leerse directamente o mostrarse en un registrador.

Para la aplicación del método de referencia se requiere de un analizador para ozono que maneje la técnica de luminiscencia química que consta de un conjunto de dispositivos instrumentales necesarios para medir la concentración del contaminante, (Secretaría de Gobernación, 1993).

1.9. CALIDAD DEL AIRE

El término calidad del aire se utiliza para describir las funciones que se requieren para controlar la calidad de la atmósfera mediante un programa de estrategias de regulación y control, con la debida autoridad legal para implementar el programa, los inventarios de emisiones, una red de vigilancia atmosférica, un sistema de manejo de información, un sistema para el análisis de cumplimiento y estrategias de monitoreo.

1.10. MONITOREO

Con la finalidad de mejorar la calidad del aire, es necesario realizar un buen monitoreo de los contaminantes, ya que éste es primordial en cualquier programa de control, porque nos ayuda a determinar, dónde, cuáles son y en qué concentraciones se encuentran los contaminantes, así como para determinar la efectividad de los programas. Existen dos áreas básicas donde el monitoreo actual tiene lugar: en el ambiente y en la fuente. Los contaminantes en el ambiente se encuentran en forma diluida. En la fuente de emisión, ya sea estacionaria o móvil, se encuentran más concentrados y en la medida que se van moviendo de la fuente, se diluyen más. El monitoreo también nos ayuda a visualizar la tendencia de la calidad del aire todo el tiempo. Con esto se conforma una base de datos que

nos puede ayudar a desarrollar modelos matemáticos que después nos permiten predecir el curso que tomará la concentración de los contaminantes o para identificar los episodios potenciales de altas concentraciones de contaminantes para responder a situaciones de emergencia, así como también nos permite realizar investigaciones científicas, encontrando la correlación de altas concentraciones de un contaminante determinado con sus efectos en la salud humana y al medio ambiente.

1.11. MONITOREO PASIVO

Es un método económico para medir la calidad del aire que se basa en el principio de difusión de contaminantes del aire hacia un medio de absorción donde la fuerza principal es el gradiente de concentración entre el aire circulante y la superficie de absorción, donde la concentración inicial del contaminante es cero.

Este sistema no requiere energía, haciéndolo una herramienta excelente para hacer muestreos en regiones que son alejadas o locales. Una ventaja adicional al diseño simple pero eficaz del dispositivo de muestreo es la facilidad con la cual se despliega y opera. Estas características permiten además el muestreo simultáneo de un gran número de puntos, lo que posibilita disponer de información sobre la distribución espacial de la contaminación del aire.

Sin embargo, el tiempo de resolución de esta técnica es limitado, por lo que sólo puede proveer información de concentraciones promedio de contaminantes, esta no funciona para la detección de valores pico o cuando se requieran valores a tiempo real.

El monitoreo pasivo representa una técnica alternativa de medición de la distribución espacial de contaminantes que permite la validación del desempeño de los modelos de calidad del aire, es una herramienta potente para definir con mayor precisión sitios potenciales de monitoreo atmosférico, así como para identificar zonas de mayor concentración acumulada,(Barrera Huertas, 2010).

1.12. MODELOS DE LA CALIDAD DEL AIRE

Los modelos de la calidad del aire son una herramienta de gran utilidad en la planeación y gestión de la política ambiental, pues permiten predecir los cambios en las concentraciones ambientales de distintas especies químicas a lo largo de un día o periodos mayores, como resultado de cambios en los patrones de emisión. Como consecuencia de ello ofrecen la posibilidad de evaluar la efectividad de diferentes medidas de control de emisiones antes de su aplicación y constituyen un paso metodológico intermedio en la evaluación de los efectos a la salud y al medio ambiente.

Los modelos de la calidad del aire usan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes en su dispersión y transformación en la atmósfera. Basados en los datos meteorológicos e información de las fuentes de emisión tales como tasas de emisión y parámetros de chimenea, estos modelos caracterizan la dispersión de los contaminantes primarios que son emitidos directamente en la atmósfera y en algunos casos también las reacciones químicas que ocurren en ésta para formar contaminantes secundarios. Finalmente, generan como resultado una concentración ambiental del contaminante simulado.

La aplicación de un modelo es una tarea compleja que demanda la integración sistemática de una gran cantidad de información generada por diferentes fuentes, tales como: inventario de emisiones, meteorología, topografía, uso de suelo, etc. Sin embargo, es una potente herramienta de análisis, que tiene un amplio espectro de aplicación que va desde la evaluación de estrategias de control de emisiones y su impacto en la calidad del aire para apoyar la toma de decisiones, hasta la generación de información científica valiosa para comprender mejor la dinámica de la atmósfera y la contaminación en un lugar o región determinada, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014).

1.12.1 Descripción del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM "Multiscale Climatic Chemistry Model"

El modelo químico y climático de multiescala (MCCM por sus siglas en inglés), es un sistema de modelación desarrollado en el Instituto Fraunhofer de Alemania con el que es posible simular la evolución de las concentraciones de ozono y otros compuestos durante el día y permite obtener una descripción de los perfiles de concentración de diferentes contaminantes.

El MCCM es un modelo que:

- Acopla directamente los procesos meteorológicos y químicos
- Incluye la química de la fase gaseosa, deposición, emisiones antropogénicas y biogénicas.
- Incorpora una descripción explícita de los procesos de precipitación de nubes
- Posee la capacidad de anidamientos múltiples

Debido a la complejidad de los procesos no lineales involucrados en la fotoquímica de los contaminantes, especialmente en regiones con terreno complejo es útil que el transporte de contaminantes pueda reaccionar directamente a los cambios en corto plazo de las condiciones meteorológicas, lo cual es sólo posible en un modelo como el MCCM. Debido a su capacidad intrínseca de predicción de clima regional y a que se encuentra directamente acoplado a procesos químicos, el MCCM se puede aplicar en tiempo real a la predicción regional y urbana de la calidad del aire.

El MCCM se basa en el modelo a mesoescala de quinta generación de NCAR (National Center for Atmospheric Research)/Penn State, MM5. El MM5 incluye la capacidad de anidamiento múltiple, dinámica no hidrostática y la asimilación de datos en cuatro dimensiones así como también otras opciones de modelación de procesos microfísicos. Adicionalmente, posee dos mecanismos detallados de fase gaseosa (RADM2, Rain Acid Deposition Model versión 2, y RACM, Regional Atmospheric Chemistry Mechanism) con 39 y 47 especies químicas

respectivamente y se incluye material particulado (PM_{10}) como un trazador pasivo. En asociación con la química de la fase gaseosa se encuentran los submodelos que contienen 21 y 23 frecuencias de fotólisis y se calculan de acuerdo a la cobertura de nubes, ozono temperatura y presión en la atmósfera del modelo. Las emisiones biogénicas se calcula con base en los datos de uso de suelo, temperatura superficial y radiación. El modelo calcula simultáneamente los cambios meteorológicos y químicos en el dominio del modelo y genera las distribuciones tridimensionales dependientes del tiempo de las principales especies orgánicas e inorgánicas relevantes a la formación de oxidantes. Una ventaja del acoplamiento en línea de la meteorología y la química es que provee resultados consistentes sin la interpolación de datos en contraste con modelos no acoplados de química y transporte.(Forkel & García Reynoso, 2003)

1.13. AOT40“*AcumulatedOver a Threshold 40 ppb during daylight hours*”

El AOT40, es una medida utilizada para la protección de la vegetación, no es una concentración media sino un valor acumulado para un periodo de crecimiento de las plantas. El AOT40 es la suma de la diferencia entre las concentraciones horarias superiores 40 ppb entre las 7 y 19 horas,(Palomares Palacios A. , 2010).

El AOT 40 se define por sus siglas en inglés como “Acumulated Over a Threshold 40 ppb [$=80 \mu\text{g}/\text{m}^3$] during day hours”, es decir, es el valor acumulado de las excedencias horarias sobre 40 ppb de ozono desde las 7:00 a 19:00 horas.

Para vegetación en general se recomienda el AOT40 con una excedencia de 3000 ppb h. Se considera que hay efecto adverso cuando se presenta una disminución de 5% en el rendimiento del cultivo o la productividad,(Mills, Buse, Bermejo, Holland, Emberson, & Pleijel, 2007).

Para grandes altitudes y orografía compleja, como en el centro de México se pueden usar correcciones al método con que se construyen mapas de excedencias. El AOT40 y el umbral de 3000 ppb h, fueron establecidos para Europa, sin embargo las condiciones del país, o de algunas regiones, son diferentes.En México no se tiene una red de monitoreo rural de calidad del aire y

no hay investigación sistemática sobre la sensibilidad de especies vegetales de interés a la exposición al ozono. Para este tipo de casos, el AOT40 es el índice recomendado para construir los niveles críticos basados en niveles de concentración. En ausencia de una red rural de monitoreo de ozono, se pueden construir mapas de excedencias utilizando modelos regionales de calidad del aire. (García Reynoso, Ruíz Suárez, & García Escalante, 2009)

1.14. ÁREA DE ESTUDIO Y SITIOS DE MUESTREO

El área de estudio se sitúa en la zona centro-sur de la República Mexicana comprendiendo el sur del Distrito Federal y el norte del estado de Morelos, delimitada por el cuadro de coordenadas mostrado en las figuras 1.3.a y 1.3.b y citadas en la tabla 1.1. (Referencia Espacial: *North America Lambert Conformal Conic* y DATUM ITRF92).

Estos sitios fueron elegidos ya que no se tiene un monitoreo continuo en la zona además por contar con una seguridad para los equipos durante el tiempo de exposición. El monitoreo fue realizado en:

- *Parres el Guarda*

Parres el Guarda, se localiza en el kilómetro 40 de la carretera federal México-Cuernavaca. Su localización genérica es Parres Delegación Tlalpan con coordenadas geográficas entre los paralelos 19.13° de latitud, -99.16° de longitud, a una altura de 2964m sobre el nivel del mar (msnm). Con un clima semifrío, Parres es uno de los principales productores de cereal para ganado. El uso de suelo es rural.

- *Tres Marías*

Este se encuentra dentro del municipio de Huitzilac, el cual está situado dentro de las coordenadas 19.05° latitud, -99.24° de longitud sobre una altura de 2900 msnm a nivel del mar con un registro de temperatura media durante el año de 11.8°C. Su principal actividad económica es el comercio y actividades de tipo agrícola. Con un uso de suelo semirural.

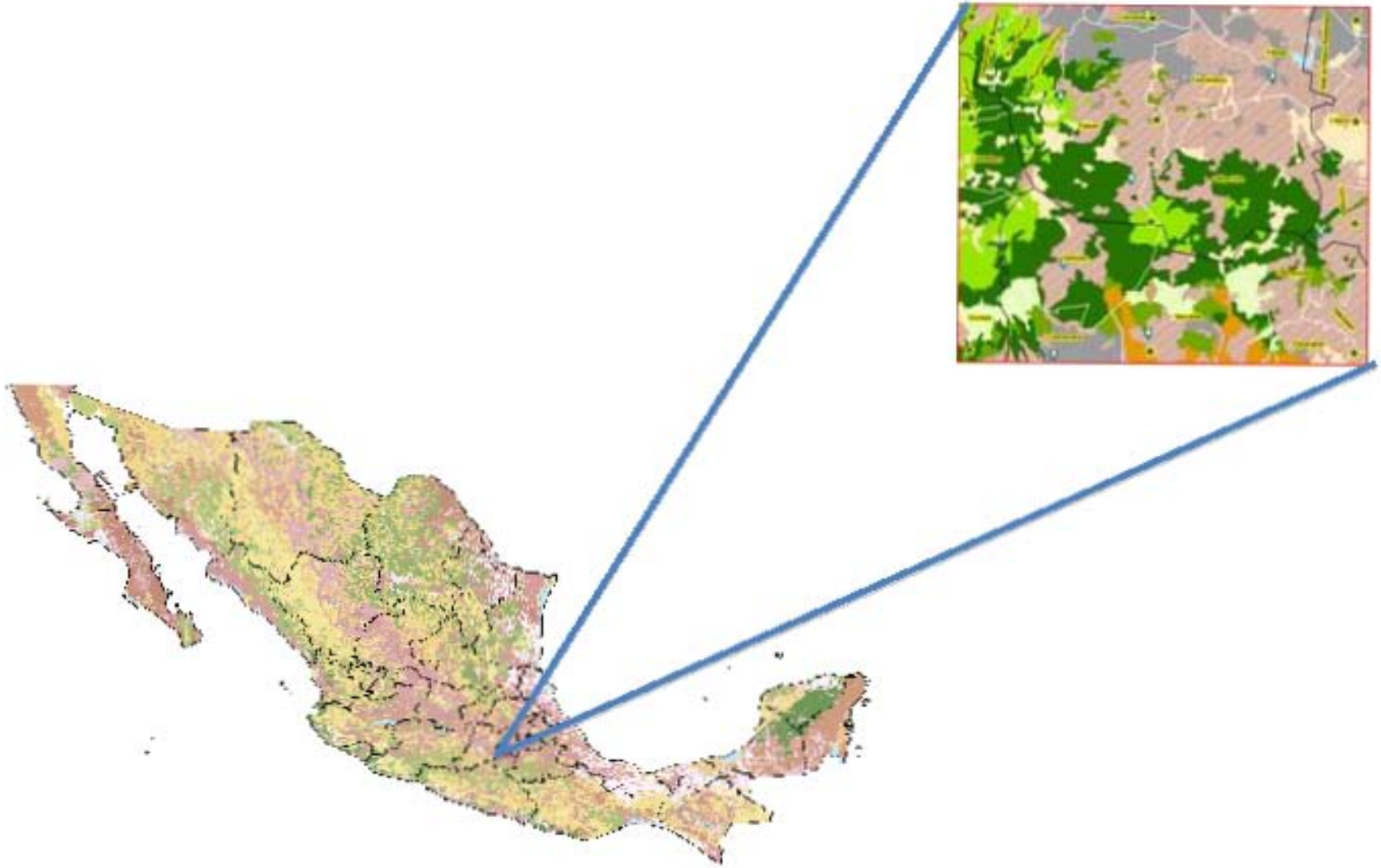


Figura 1.3a. Ubicación del área de estudio.

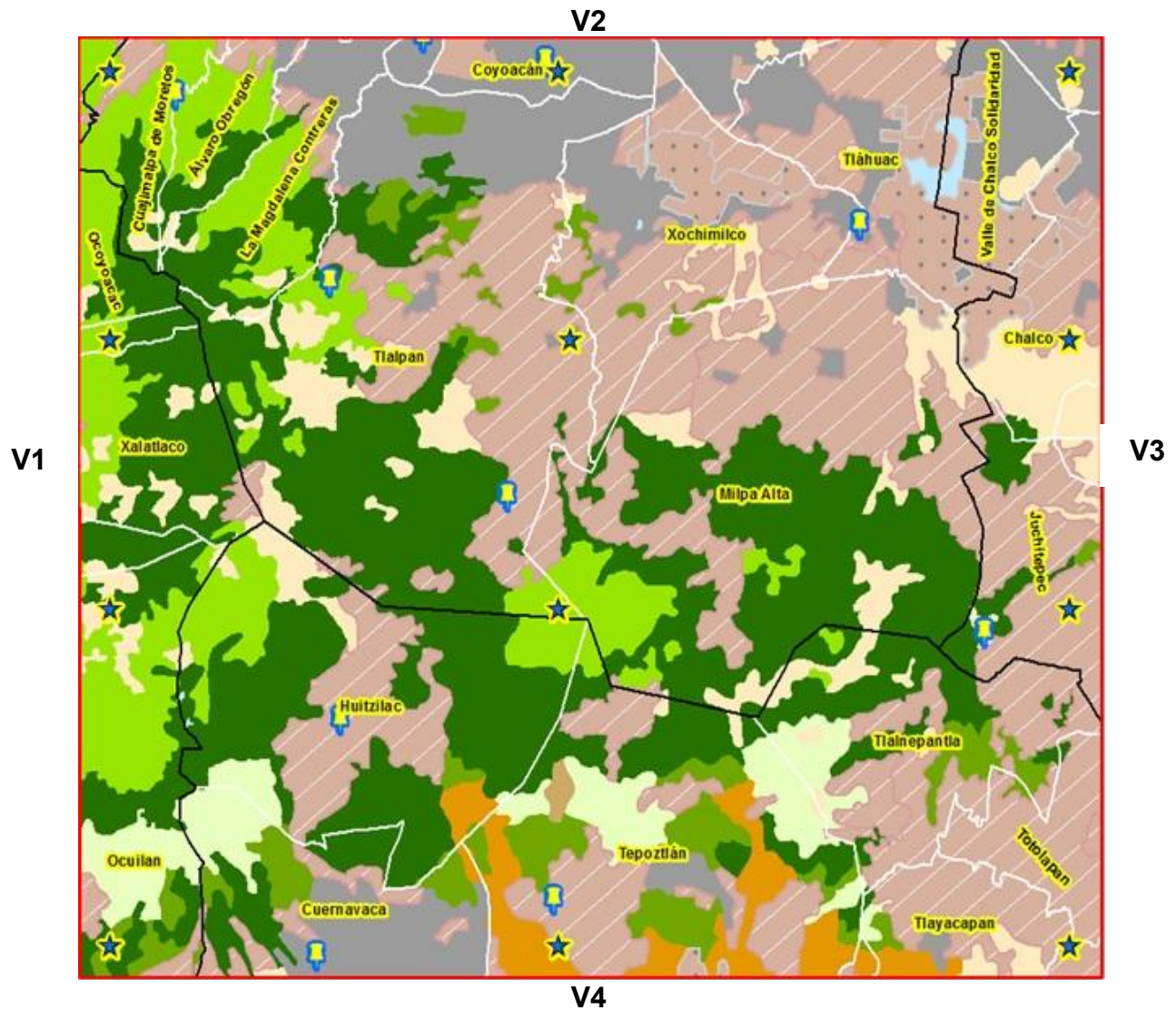


Figura 1.3b. Mapa de uso de suelo, sitios de muestreo (alfileres indicadores) y sitios modelados (estrellas), dentro del área de estudio.

Tabla 1.1. Coordenadas área de estudio de pasivos.

Vértice	Coordenadas	
	x	y
V1 – V2	-99.358173	19.328795
V2 - V3	-98.900221	19.320092
V3 - V4	-98.908858	18.939791
V4 - V1	-99.365535	18.948466

- *Lomas de Ahuatlán*

Se encuentra dentro del municipio de Cuernavaca, Morelos, con coordenadas geográficas 18.96° latitud, -99.25° de longitud sobre una altura de 1909msnm. Se ubica dentro del Eje Neovolcánico y la sierra madre del sur (sierra y valles guerrerenses). La temperatura promedio anual es de 21.1°C. La clase de área es urbana donde la temperatura aumenta en los meses de abril y mayo y desciende en los meses de diciembre y enero.

- *Santa Catarina*

Este sitio está dentro del municipio de Tepoztlán geográficamente entre los paralelos latitud 18.97°, -99.15° longitud a una altura de 1600 msnm, presentando climas semicálidos, húmedos y templados. Este sitio de muestreo presenta un uso de suelo semirural.

- *Centro Interdisciplinario de Ciencias de la Salud, CICS*

Este sitio está ubicado dentro de los estados de Morelos, Estado de México y el Distrito Federal. El tipo de clima es semifrío sub húmedo, registra una temperatura media anual de 15.3°C. La mayor parte de su territorio, es decir, en las laderas de la sierra, el clima semifrío subhúmedo, con abundantes despoblada y cubierta por bosques de pinos y oyameles. El valle de Milpa Alta es ligeramente más seco que las laderas serranas, pero de cualquier manera es de las más húmedas del valle de México. La región más húmeda y fría de Milpa Alta es la cumbre del volcán Chichinautzin y el volcán Tláloc. Las lluvias son muy abundantes y la temperatura promedio es de 8°C, en tanto que para Villa Milpa Alta es de 14°C.

- *San Nicolás Totoloapan*

Se ubica en el Suroeste de la Ciudad de México, con una extensión de 1900 hectáreas de bosque templado, donde predominan el oyamel, pinos y encinos, con elevaciones que oscilan entre los 2,700 y 3,740m sobre el nivel del mar, el clima de la región es templado con temperaturas que oscilan entre los 5° y 18°C, con lluvias en verano. Este sitio de muestreo es un área boscosa y el sitio exacto de

colocación de los captadores está geográficamente ubicado en las coordenadas latitud 19.23°, -99.24° longitud del meridiano de Greenwich a una altura de 3200m sobre el nivel del mar.

- *Desierto de los Leones*

Comprende partes de las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón en el Distrito Federal. La superficie que comprende este se encuentra ubicada dentro de dos cadenas montañosas que cierran la parte Sureste del Valle de México y que forman parte del Eje Neovolcánico, y así mismo presentan en general en el lugar unas alturas que van de los 2,600 a 3,700m sobre nivel del mar.

El clima de esta reserva ecológica se divide en dos los cuales está: semifrío sub húmedo con lluvias en verano. Localizado en la zona Norte y Centro del parque. El otro clima que presenta es semifrío húmedo. Ubicado en la porción Sur.

La ubicación geográfica del sitio de muestreo esta dado por las coordenadas latitud 19.30°, -99.16° longitud con una altura de 3053 msnm.

Tabla 1.2. Coordenadas de los sitios de monitoreo pasivo.

Sitio	Coordenadas	
	X	Y
Parres el Guarda	-99.16	19.13
Tres Marías	-99.24	19.05
Lomas de Ahuatlán	-99.25	18.96
Santa Catarina	-99.15	18.97
San Nicolás	-99.24	19.23
Desierto de los Leones	-99.31	19.30
CICS	-98.96	19.08

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

A continuación se describirá el método utilizado para escalar los datos obtenidos del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM y así obtener las excedencias al AOT40 a partir de estos resultados modelados y del monitoreo ambiental en la región seleccionada.

2.1. MUESTREO PASIVO PARA O₃

Se realizaron campañas de monitoreo pasivo para O₃ en diferentes sitios de la región seleccionada, Figura 1.3.a, 1.3.b, durante los años 2010 a 2012. Los mapas presentados en las figuras fueron realizados por la MC Bertha Mar Morales con ayuda del software ArcGis v.10.2. Los periodos de muestreo pasivo fueron cada dos semanas.

Para llevar a cabo el monitoreo, se utilizaron muestreadores pasivos capaces de capturar ozono presente en el aire, con una velocidad controlada por un proceso físico como la difusión a través de una capa de aire estático, o de permeación a través de una membrana, sin la intervención de un movimiento activo de aire a través del dispositivo (Ruiz Suárez, Andraca Ayala, & Mar Morales, 2013).

Estos equipos de toma de muestra, generalmente en forma de tubo o disco, colectan un contaminante específico por medio de su quimiabsorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un período apropiado de muestreo, que varía desde un par de horas hasta un mes, la muestra regresa al laboratorio, donde se realiza la desorción del contaminante y después se analiza cuantitativamente, en este caso por cromatografía iónica.

Se utilizaron dispositivos de captación tipo Ogawa, para la preparación del muestreador, se impregnaron con una solución de nitrito de sodio NaNO₂ y carbonato de potasio K₂CO₃ filtros de celulosa. (Ruiz Suárez, Andraca Ayala, & Mar Morales, 2013)

Las muestras fueron analizadas por cromatografía de iones acoplada a un detector de conductividad. Los resultados se encuentran reportados en el Informe

Monitoreo Pasivo en proyecto: CALIDAD DEL AIRE EN LA *CORONA REGIONAL* DE CIUDADES DEL CENTRO DE MÉXICO: CLIMATOLOGÍA QUÍMICA DE ESPECIES OXIDANTES, ÁCIDAS Y SUS PRECURSORES, 2008-2011.

2.2. BASE DE DATOS OBTENIDA DEL MODELO MCCM

Los sitios de muestreo fueron siete, para obtener una información más detallada sobre la calidad del aire de la región, fue necesario hacer uso de los datos de concentración del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM. Este modelo considera la emisión de contaminantes, los procesos de transporte, dispersión, transformación en la atmósfera y deposición.

Para realizar un mejor detalle de las concentraciones de ozono en la región se obtuvieron valores proporcionados por el modelo, agregándose doce sitios más localizados en el área de estudio. Las coordenadas para obtener la base de datos se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Coordenadas para obtener la base de datos de los doce sitios agregados.

	Longitud	Latitud
1	-99.35100	18.96180
2	-99.15118	18.95815
3	-98.92282	18.95366
4	-99.34836	19.09761
5	-99.14834	19.09396
6	-98.91976	19.08947
7	-99.34624	19.20628
8	-99.1406	19.20262
9	-98.91730	19.19813
10	-99.34413	19.31496
11	-99.14379	19.31130
12	-98.91484	19.30680

El protocolo de comandos a seguir para obtener la base de datos necesaria del modelo MCCM se muestra en el anexo I.

La información de la base de datos del modelo MCCM, nos proporciona las concentraciones de O₃, por horas y días, en los sitios donde se realizaron previamente los muestreos. Por lo tanto, fue necesario obtener un promedio por cada campaña realizada. Para los doce sitios agregados, se calcularon los promedios directamente del modelo (ver Anexo I).

2.3. COMPARACIÓN MUESTREO PASIVO Y MCCM

Mediante los resultados obtenidos en las campañas realizadas con los monitores pasivos se realizó una calibración de los datos de la simulación con el modelo MCCM. La forma de realizar la calibración es la siguiente:

Se realizaron cuatro años de muestreos por periodos de 15 días. Se dividieron los muestreos por periodos de secas-frías (meses octubre-febrero), secas-calientes (marzo-mayo), lluvias (junio-septiembre) se obtuvo la concentración promedio por periodo. Se hace la comparación de los mismos periodos con los datos obtenidos del modelo de simulación atmosférica en las mismas coordenadas de los muestreos con monitores pasivos. Para poder comparar los resultados entre el monitoreo pasivo y los del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica (MCCM), se debe considerar lo siguiente: El modelo proporciona un dato cada hora, sin embargo en el monitor pasivo, los resultados obtenidos son de masa acumulada durante un periodo determinado, lo que no permite visualizar el perfil del comportamiento del ozono en el periodo de muestreo. Para la determinación del daño a la agricultura es necesario calcular el AOT40 (valor acumulado de las excedencias horarias sobre 40ppm de ozono desde las 7:00 a 19:00 horas). Por lo que es necesario utilizar los datos del modelo MCCM que nos da una información detallada durante todo el lapso de luz solar. Es entonces cuando se usan los perfiles de periodo secas-frías y secas-calientes obtenidos con los monitoreos pasivos para realizar la verificación de los datos de modelo y en caso necesario calibrar los resultados. Para realizar la comparación se determinó

la concentración promedio (C_p) de las concentraciones obtenidas de los monitoreos pasivos para el periodo de tiempo utilizando la ecuación (2.1).

$$C_p = \frac{\sum C_i}{n_i} \quad (2.1)$$

Donde:

C_i es la concentración obtenida por un monitoreo pasivo durante un periodo de 15 días naturales.

n_i es el número de muestreos durante una campaña, secas-frías, secas-calientes, lluvias.

De la misma manera se calculó la concentración promedio de las concentraciones obtenidas de los datos del modelo MCCM (C_m) durante el periodo de tiempo similar al tiempo de monitoreo pasivo utilizando la ecuación (2.2).

$$C_m = \frac{\sum C_f}{n_f} \quad (2.2)$$

Donde:

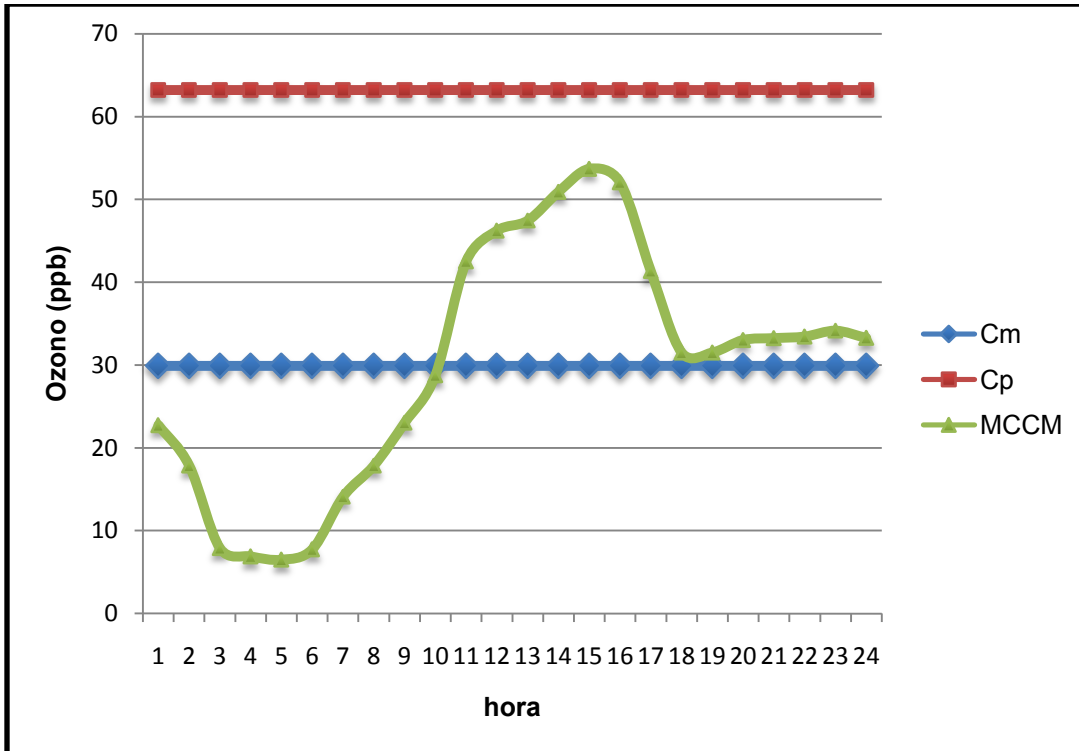
C_f es las concentraciones obtenidas del modelo de simulación durante todo el día.

n_f es el número de datos por periodo obtenidos por el modelo.

Finalmente se puede comparar mediante la relación de un cociente entre ambas concentraciones obtenidas (ecuación 2.3).

$$X = \frac{C_p}{C_m} \quad (2.3)$$

La gráfica 2.1 muestra el perfil horario, en un día, de la concentración promedio de ozono obtenidos del monitoreo pasivo (C_p), la concentración promedio de los datos generados por el modelo (C_m) y el perfil de la concentración de ozono, por hora, generada por el modelo (MCCM).



Gráfica 2.1. Escalamiento de resultados del modelo MCCM para preservar el perfil horario.

Con este procedimiento se obtiene en forma general un cociente de escalamiento que se le aplica a los resultados del modelo. Con los datos de 12 sitios seleccionados en forma uniforme dentro del área de estudio se obtienen los perfiles diarios de escalamiento por sitio, de esta forma se obtuvo la suma de las excedencias diarias al AOT40 por sitio seleccionado y por temporada.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

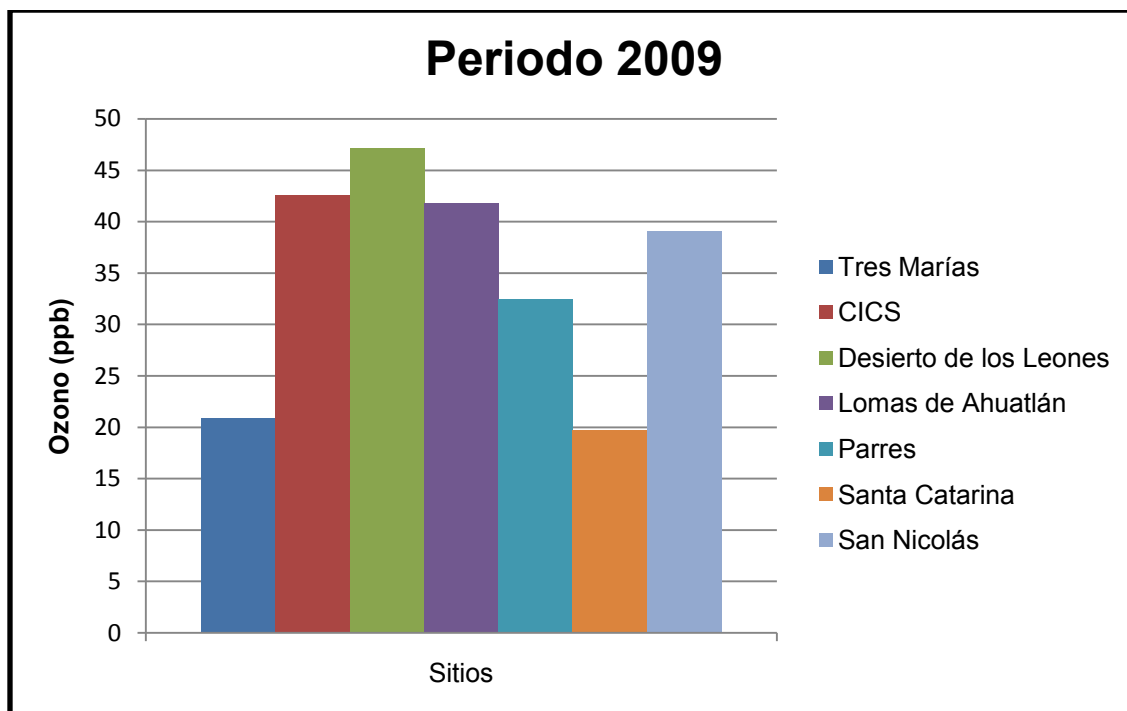
En este capítulo se presentan los resultados de los promedios de las concentraciones de ozono, para los siete sitios de monitoreo pasivo, obtenidas por el modelo MCCM. Posteriormente, utilizando dichos promedios se compararon con las concentraciones del monitoreo pasivo para calcular los coeficientes de correlación, con la finalidad de corregir los valores de concentración de ozono generados por el modelo.

3.1 PROMEDIOS DE CONCENTRACIÓN DE OZONO DEL MODELO MCCM

En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los promedios de concentración de ozono por campaña, para los sitios de muestreo mencionados anteriormente, los cuales fueron obtenidos del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM para los años 2009, 2010, 2011 respectivamente.

Tabla 3.1. Promedios de concentración de Ozono generados por el modelo MCCM para el año 2009.

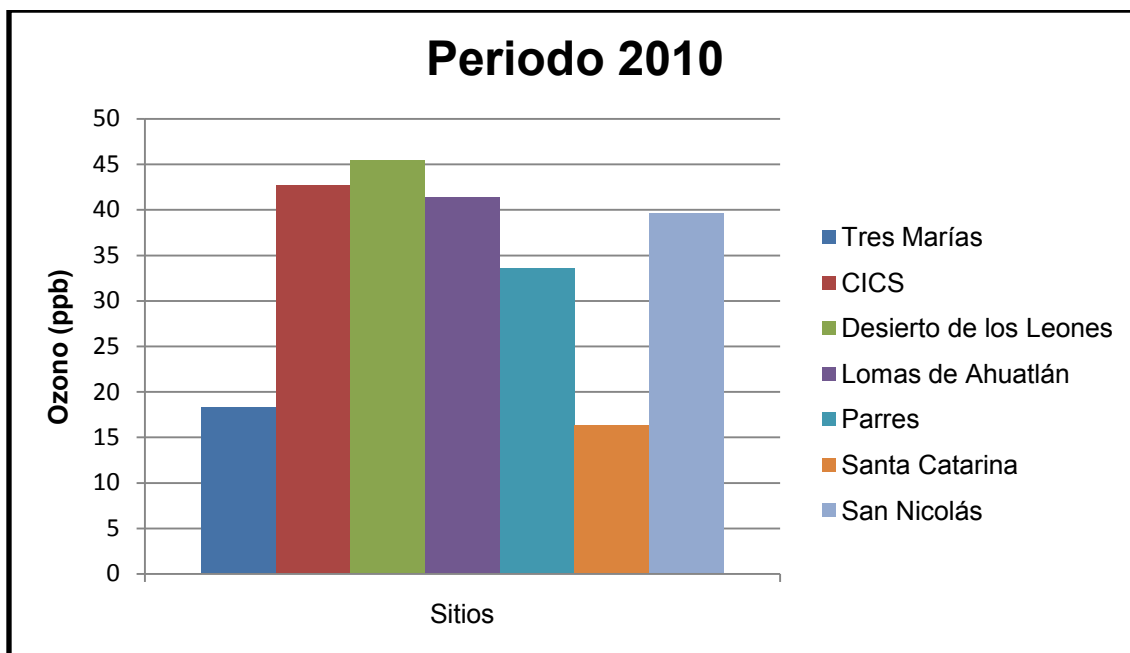
Ozono (ppb)	Promedio						
	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Periodo 2009							
1 abril - 22 abril	21.2	42.8	44.8	40.3	31.1	19.7	38.3
22 abril - 13 mayo	20.0	43.6	53.0	42.7	33.1	19.0	43.5
20 mayo - 10 junio	20.1	43.2	49.1	43.4	33.3	19.1	41.3
10 junio -1 julio	22.3	42.5	48.0	40.6	33.4	22.2	39.0
1 julio - 16 julio	22.3	41.4	47.2	42.3	34.2	21.5	40.0
22 julio - 12 agosto	19.9	41.3	50.1	42.0	34.9	19.3	41.5
12 octubre - 2 nov	22.4	43.0	43.4	41.8	30.7	21.15	35.5
2 nov - 21 dic	18.7	42.4	41.3	41.0	28.7	15.5	33.6



Gráfica 3.1. Concentración de ozono generados por MCCM en los sitios de monitoreo para el periodo 2009.

Tabla 3.2. Promedios de concentración de Ozono generados por el modelo MCCM para el año 2010.

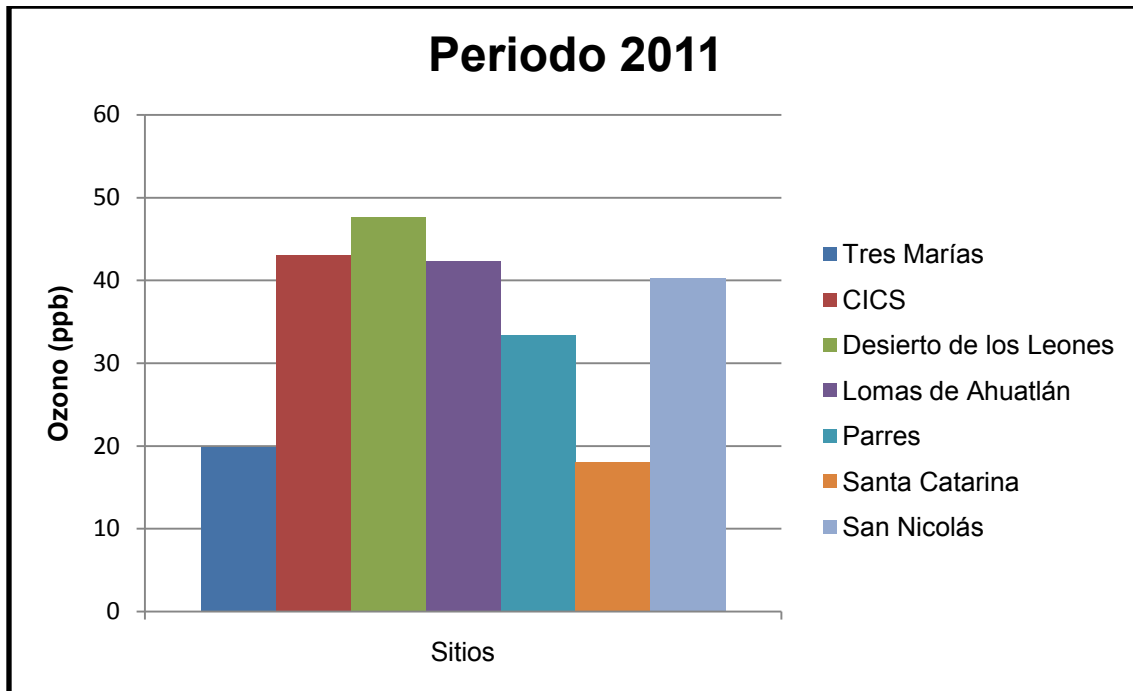
Ozono (ppb)	Promedio						
	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Periodo 2010							
29 enero - 19 febrero	17.9	41.2	40.3	40.0	34.6	13.0	37.2
19 febrero - 7 marzo	13.5	43.5	45.1	41.7	31.9	12.3	39.2
18 marzo - 2 abril	19.0	42.4	45.5	41.2	31.3	16.7	39.4
2 abril - 23 abril	17.9	42.9	43.5	40.9	33.3	16.3	38.7
23 abril - 14 mayo	19.3	42.3	45.5	40.4	33.5	16.9	39.9
14 mayo - 4 junio	19.0	45.2	50.0	43.6	36.6	18.9	42.7
4 junio - 25 junio	21.5	41.3	47.8	41.8	34.2	20.0	40.6



Gráfica 3.2. Concentración de ozono generados por MCCM en los sitios de monitoreo para el periodo 2010.

Tabla 3.3. Promedios de concentración de Ozono generados por el modelo MCCM para el año 2011.

Ozono (ppb)	Promedio						
	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Periodo 2011							
4 marzo – 18 marzo	19.4	43.9	44.7	42.1	30.8	17.5	35.8
1 abril – 15 abril	20.2	43.2	46.8	42.2	32.3	18.5	40.3
29 abril – 13 mayo	18.6	43.4	50.7	42.6	35.7	16.7	43.2
27 mayo – 18 junio	21.1	41.9	48.5	42.2	35.0	19.5	41.8



Gráfica 3.3. Concentración de ozono generados por MCCM en los sitios de monitoreo para el periodo 2011.

Como se puede apreciar en las gráficas 3.1, 3.2 y 3.3 el sitio que tuvo mayor concentración de ozono fue Desierto de los Leones, esto se debe a que se encuentra ubicado dentro de la ciudad por lo que al haber mayor afluencia vehicular, se producirán niveles altos de ozono. Por el contrario, el sitio con menor concentración de ozono fue Santa Catarina, al ubicarse en una zona rural la afluencia vehicular es menor y la generación de ozono se ve disminuida.

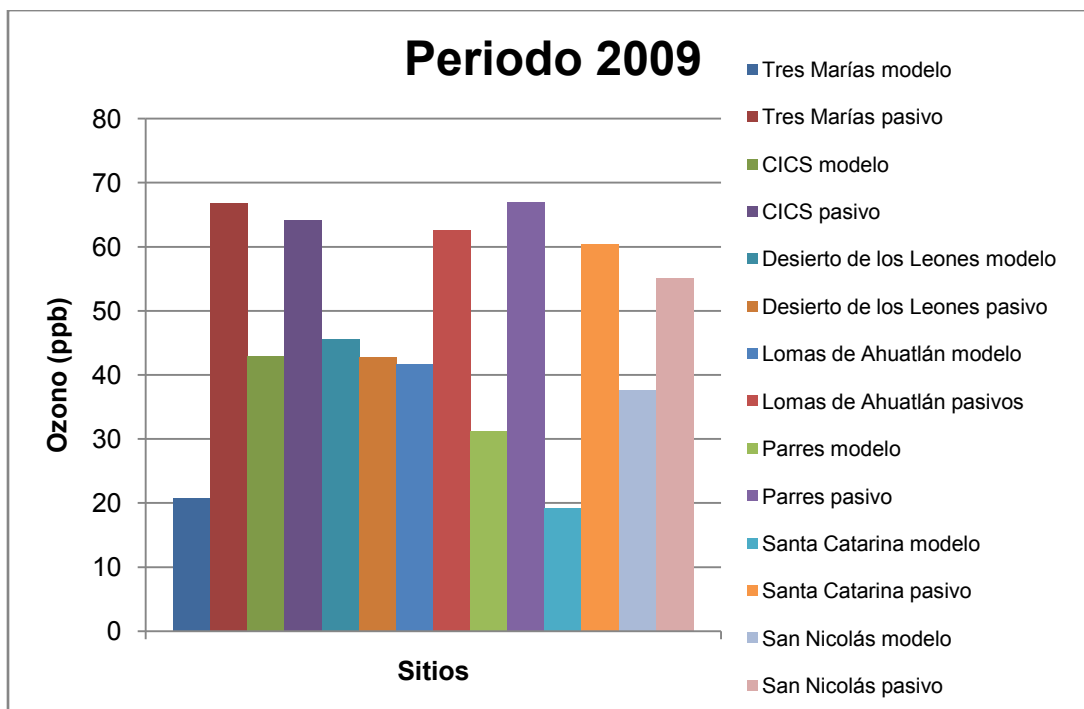
3.2 COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DEL MONITOREO PASIVO Y DEL MODELO ACOPLADO DE METEOROLOGÍA Y QUÍMICA ATMOSFÉRICA MCCM

Se realizaron cocientes de comparación entre los promedios de las concentraciones obtenidas del monitoreo pasivo y los valores del modelo. Para esto, se clasificaron los periodos de muestreo por temporadas: secas calientes y secas frías. En el caso del monitoreo pasivo, solo se tienen los valores de las concentraciones de ozono para el año 2011, se puede hacer uso de los datos de este año para comparar 2009 y 2010 debido a que presentan un comportamiento

similar cada año, por lo que no existe una variación significativa que impida calcular los cocientes de comparación utilizando un valor de un año diferente al que se va analizar. En las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 se presentan los cocientes de comparación para Ozono.

Tabla 3.4. Concentración del modelo, concentración pasivo y cocientes de comparación monitoreo pasivo/MCCM para el año 2009.

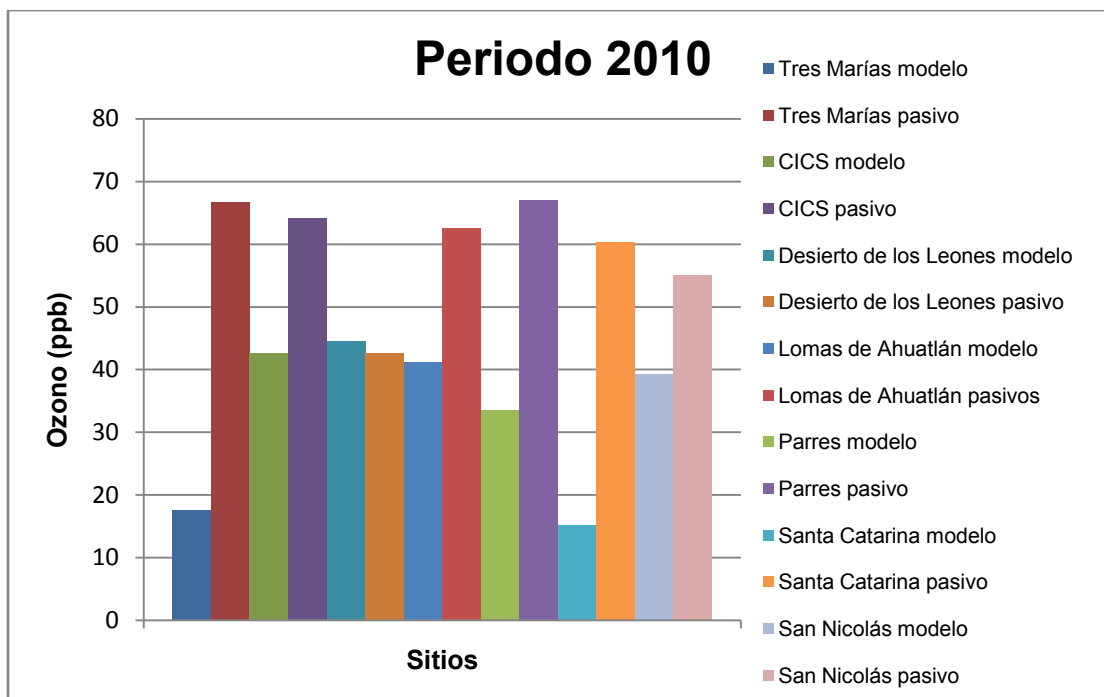
Modelo 2009	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	20.5	42.7	42.4	41.4	29.7	18.3	34.6
Secas calientes	20.9	43.0	48.7	41.8	32.7	20.0	40.5
Pasivos 2011	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	65.9	69.6	48.5	61.2	68.0	55.4	58.0
Secas calientes	67.6	58.7	36.9	63.9	66.0	65.3	52.2
Cocientes de comparación 2009	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	3.2	1.6	1.1	1.5	2.3	3.0	1.7
Secas calientes	3.2	1.4	0.8	1.5	2.0	3.3	1.3



Gráfica 3.4. Comparación entre concentración del modelo y concentración de pasivos.

Tabla 3.5. Concentración del modelo, concentración pasivo y cocientes de comparación monitoreo pasivo/MCCM para el año 2010.

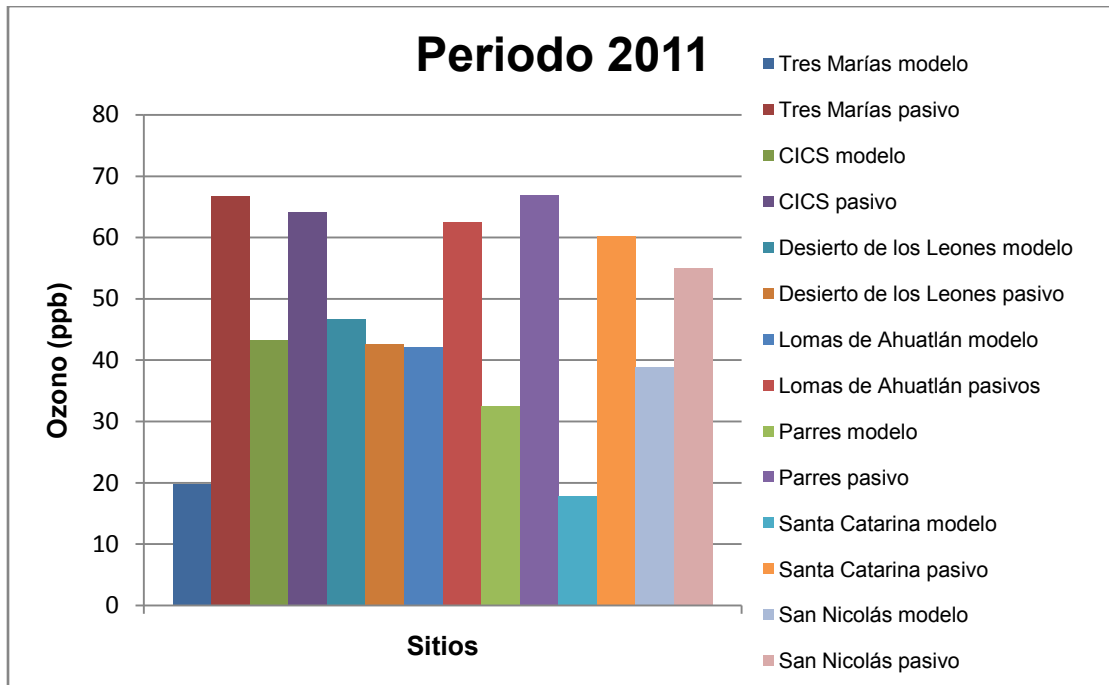
Modelo 2010	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	15.7	42.4	42.7	40.9	33.2	12.7	38.2
Secas calientes	19.4	42.8	46.5	41.6	33.8	17.7	40.2
Pasivos 2011	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	65.9	69.6	48.5	61.2	68.0	55.4	58.0
Secas calientes	67.6	58.7	36.9	63.9	66.0	65.3	52.2
Cocientes de comparación 2010	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	4.2	1.6	1.1	1.5	2.1	4.4	1.5
Secas calientes	3.5	1.4	0.8	1.5	2.0	3.7	1.3



Gráfica 3.5. Comparación entre concentración del modelo y concentración de pasivos.

Tabla 3.6. Concentración del modelo, concentración pasivo y cocientes de comparación monitoreo pasivo/MCCM para el año 2011.

Modelo 2011	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	19.4	43.9	44.7	42.1	30.8	17.5	35.8
Secas calientes	20.0	42.8	48.7	42.3	34.3	18.2	41.8
Pasivos 2011	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	65.9	69.6	48.5	61.2	68.0	55.4	58.0
Secas calientes	67.6	58.7	36.9	63.9	66.0	65.3	52.2
Cocientes de comparación 2011	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	3.4	1.6	1.1	1.5	2.2	3.2	1.6
Secas calientes	3.4	1.4	0.8	1.5	1.9	3.6	1.3



Gráfica 3.6. Comparación entre concentración del modelo y concentración de pasivos.

Como se puede apreciar en las gráficas 3.4, 3.5 y 3.7 los datos del modelo están por debajo de los resultados del monitoreo pasivo, es importante tener en cuenta que el error sistemático es relativamente constante y se puede reducir mediante un factor de escalamiento. Se considera que el monitor pasivo mide el valor exacto y sin desviación.

3.3 CÁLCULO DEL FACTOR DE ESCALAMIENTO PARA CUALQUIER TEMPORADA

Para poder obtener el factor de escalamiento, es necesario calcular el promedio final de los tres años de los cocientes de cada temporada. Finalmente, se obtuvo el promedio de ambas temporadas y utilizando los valores de todos los sitios de monitoreo se determinó el factor de corrección. Los resultados se muestran en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7. Promedios de cocientes monitoreo pasivo/MCCM de los tres años muestreados por temporada.

Promedio final tres años	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás
Secas frías	3.6	1.6	1.1	1.5	2.2	3.5	1.6
Secas calientes	3.4	1.4	0.8	1.5	2.0	3.5	1.3

Tabla. 3.8. Factor de escalamiento para cualquier temporada.

Factor de escalamiento	Tres Marías	CICS	Desierto de los Leones	Lomas de Ahuatlán	Parres	Santa Catarina	San Nicolás	Promedio
Para cualquier temporada	3.5	1.5	0.9	1.5	2.0	3.5	1.4	2.06

Finalmente, se obtuvo el factor de escalamiento del modelo fue de 2.0, este factor se utiliza para escalar los datos proporcionados por el modelo.

3.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL FACTOR DE ESCALAMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LAS EXCEDENCIAS AL AOT40

Aplicando el factor de escalamiento a los datos generados por el modelo MCCM, y utilizandocomo fuente el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), se determinaron las excedencias al AOT40.

Tomando como referencia los cultivos de maíz de la zona de Milpa Alta, se analizó la influencia de las concentraciones de Ozono que afectan a la vegetación. Por lo tanto, secalculó la cantidad de cultivo que se disminuye, a causa de la exposición a altas concentraciones de Ozono, utilizando la ecuación (3.1), (Mills, Buse, Bermejo, Holland, Emberson, & Pleijel, 2007) específica para maíz:

$$y = -0.0036x + 1.02 \quad (3.1)$$

Donde x es la concentración de ozono de exposición a la vegetación, representa la dosis acumulada sobre el valor umbral de 40 ppb, AOT40. Este dato se obtiene a partir de los datos del modelo MCCMaplicando el cociente de escalamiento.

Donde y es el porcentaje máximo de rendimiento de maíz expuesto a la concentración de ozono (x). En la tabla 3.9 se muestra el valor resultado del cálculo de AOT40.

Tabla 3.9. Cálculo de AOT40

Nombre de la entidad	Área del Estado (ha)	Delegación	Área de cultivo de Maíz(ha)	Área de cultivo de Maíz(m ²)	AOT 40 (ppmh) x	Rendimiento máximo maíz (ppmh)
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.2	0.93
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.2	0.93
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.3	0.93
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.3	0.93
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.3	0.93
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	0.9	9379.8	26.5	0.92
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.5	0.92
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.7	0.92
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	26.8	0.92
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	1.0	10000.0	27.0	0.92
Distrito Federal	148646	Milpa Alta	0.9	8483.4	27.0	0.92

De esta forma se puede obtener el promedio del rendimiento máximo en la zona dando un valor de 0.92, lo que quiere decir que es probable que se haya tenido una pérdida del 7.6% atribuible a la exposición al ozono de los cultivos durante su crecimiento.

CAPÍTULO IV

Conclusiones

1. Los modelos de la calidad del aire son de gran utilidad para tener un perfil detallado sobre el comportamiento de contaminantes a lo largo del día en un sitio específico.
2. Para el cálculo de las excedencias al AOT40, es importante considerar el uso de modelos de la calidad del aire que complementen los monitoreos experimentales, en este caso pasivos, ya que sin ellos solo se tendría información sobre el comportamiento de contaminantes durante periodos largos de tiempo, sin embargo con los modelos se obtiene información horaria.
3. Es necesario escalar las concentraciones del modelo, conservando el perfil horario, haciendo uso de la información obtenida de cualquier monitoreo experimental. Esto con la finalidad de generar datos similares a los medidos con monitoreo pasivo para futuras simulaciones.
4. El aplicar el cálculo de las excedencias al AOT40 como parámetro de protección a cultivos y recursos ambientales es cuantificable mientras no se cuente con una legislación en el país.
5. Para lograr el objetivo de este trabajo fue necesario aplicar un factor de escalamiento a los datos generados por el modelo. De este modo, se obtuvieron valores de concentración similares a los del monitoreo pasivo considerando que no hay desviación en los resultados de éste. Por consiguiente, se lograron determinar las excedencias al AOT40 a partir del modelo acoplado de meteorología y química atmosférica MCCM.

Recomendaciones

- Este método puede ser aplicado para determinar excedencias de niveles críticos de otros contaminantes en cualquier punto geográfico y estimar daños a cultivos y recursos ambientales.
- Es necesario realizar monitoreos pasivos en otras zonas para poder elaborar un mapa de factores de escalamiento del modelo y emplear el método a zonas más extensas.
- Es posible calcular la pérdida económica a cultivos a partir del daño por excedencias de niveles críticos de ozono y de otros contaminantes.
- Es necesario realizar un monitoreo experimental en temporada de lluvias ya que el monitoreo pasivo resulta poco confiable al no funcionar cuando hay humedad relativa alta.

Referencias

Albert LA, L. (1994). *Diccionario de la contaminación*. México, D.F.: Centro de Ecología y Desarrollo.

Ambiente, A. E. (n.d.). *Agencia Europea de Medio ambiente*. Recuperado el 24 de noviembre de 2013, de www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/5es.pdf

Arellano, D. J. (2002). *Introducción a la Ingeniería Ambiental*. México, D.F.: Alfaomega.

Barrera Huertas, H. A. (2010). *Evaluación de las concentraciones ambientales en Tula Hidalgo, mediante mediciones pasivas, activas y un modelo de calidad del aire*. México, D.F.: Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis Maestría en Ciencias de la Tierra.

Enger, E. D. (2006). *Ciencia Ambiental*. China: Mc Graw Hill.

Fishman, J. (2003). Overview: Atmospheric Chemistry. En T. D. Colman, *Handbook of Weather, Climate and Water* (págs. 3-28). Hoboken, NJ, EUA: John Wiley & Sons.

Forkel, R., & García Reynoso, A. (2003). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado el 08 de junio de 2015, de http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/rep_fin_proy_mccm.pdf

García Reynoso, J. A., Ruíz Suárez, L. G., & García Escalante, S. (Septiembre de 2009). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2013, de Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso: http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/2009_inf_cuencas2.pdf

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (12 de mayo de 2014). Recuperado el 6 de junio de 2014, de <http://www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/537-calair-fuentes>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (12 de Mayo de 2014). Recuperado el 25 de julio de 2014, de <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/557-calair-modelos>

Lacasaña-Navarro, M. (1999). Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *Salud Pública de México* , 203-215.

Manahan, E. S. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. España: Reverté.

Martínez Ataz, E., & Díaz De Mera Morales, Y. (2004). *Contaminación Atmosférica*. España: Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha.

McGlade, J. (2013). Cada vez que respiramos. *Cada vez que respiramos: Mejorar la calidad del aire en Europa* , 9-16.

MeteOlot, E. M. (s.f.). *MeteOlot*. Recuperado el 12 de octubre de 2014, de <http://www.meteolot.com/enciclopedia-meteorologica.html>

Mills, G., Buse, A., Bermejo, V., Holland, M., Emberson, L., & Pleijel, H. (2007). A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. *Atmospheric Environment* , 2630-2643.

Organización Mundial de la Salud. (2005). Recuperado el 20 de julio de 2014, de http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf

Palomares Palacios, A. (2010). *Niveles de ozono y riesgos para la vegetación en la Comunidad Valenciana*. Gandía, España: Escuela Politécnica de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Ingeniería Técnica Forestal.

Ruiz Suárez, L. G., Andraca Ayala, G. L., & Mar Morales, B. E. (2013). *CALIDAD DEL AIRE EN LA CORONA REGIONAL DE CIUDADES DEL CENTRO DE MÉXICO: CLIMATOLOGÍA QUÍMICA DE ESPECIES OXIDANTES ÁCIDAS Y SUS PRECURSORES*. D. F., México: Centro de Ciencias De La Atmósfera.

Secretaría de Gobernación. (18 de octubre de 1993). Recuperado el 20 de julio de 2014, de Diario Oficial de la Federación: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794240&fecha=18/10/1993

Secretaría de Gobernación. (19 de agosto de 2014). Recuperado el 7 de marzo de 2015, de Diario Oficial de la Federación: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014

Strauss, W. (1990). *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*. México, D. F.: Trillas.

Velasco, E., & Bernabé, R. M. (2004). *Emisiones biogénicas*. México, D. F.: Instituto Nacional de Ecología.

Anexo I

```
#!/bin/csh
#
# otro      18.96180      -99.35100
#
#
cd /Volumes/Funes/output/2009
set InFiles = (2009_04_13)
cd /Users/gemaluz/Desktop/Extraccion
foreach fecha ($InFiles)
setenv file /Volumes/Funes/output/2009/$fecha/MMOUT_DOMAIN3sfc
setenv ofile1 {$fecha}_S1.txt

# Para la estacion otro
ln -sf $ofile1 fort.13
cat >input.tmp << EOF
3
19
1
T
NO2
SO2
NO
O3
END
EOF
./read_time.exe $file <input.tmp> sal
echo $fecha ' Sitio 1'
rm fort.13 input.tmp sal
ln -sf $ofile2 fort.13
cat >input.tmp << EOF
end
```

Figura A.1. Script en csh para extraer datos del modelo MCCM (otorgado por el usuario del MCCM).

```

#!/bin/csh
# Script para juntar archivos 25/sep/2013
# genera la lista
@ n = 1
# Aqui se edita la siguiente linea para cada sitio
set InFiles = ( 2011_??*S1.txt )
foreach file ( $InFiles)
    echo $file $n
    if( $n == 1) then
        head -44 $file | tail -24 > temp
        awk 'BEGIN {print "Fecha  SO2  NO2  NOx  O3  Ndatos"}'>S1_2011_01.txt
        echo $file >> S1_2011_01.txt
        awk -f promedio temp >> S1_2011_01.txt
        rm temp
    else
        head -44 $file | tail -24 > temp
        echo $file >> S1_2011_01.txt
        awk -f promedio temp >> S1_2011_01.txt
        rm temp
    endif

    @ n++
end
# termina

```

Figura A.2. Protocolo para obtener promedios (otorgado por el usuario del MCCM)