



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

IDENTIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE EVENTOS DE QUEMAS AGRÍCOLAS E INCENDIOS FORESTALES EN LA CALIDAD DEL AIRE MEDIANTE EL MÉTODO DEL “INCREMENTO” DEL COCIENTE $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$. CASOS DE ESTUDIO: MÉRIDA, YUCATÁN Y MORELIA, MICHOACÁN

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

OSCAR ENRIQUE PÉREZ MARTÍNEZ

TUTOR: DR. RICARDO TORRES JARDÓN
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

DICIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Dr. Oscar Peralta Rosales	Presidente
Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant	Vocal
Dr. Ricardo Torres Jardón	Secretario
Dr. Luis Antonio Ladino Moreno	Suplente
M. en C. Daniel Humberto Rosas Sánchez	Suplente

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Oscar Enrique Pérez Martínez

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, en particular al Grupo de Físicoquímica Atmosférica por las facilidades para la realización de los estudios de maestría.

A CONACYT por la beca otorgada con número de CVU 857068 para la realización de mis estudios de maestría.

Al proyecto de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) por la disponibilidad de datos de las estaciones de monitoreo en Mérida, Yucatán y Morelia, Michoacán y al personal a cargo de las mismas en la Universidad Autónoma de Yucatán y la Escuela Nacional de Estudios Superiores Morelia, UNAM, respectivamente.

DEDICATORIAS

A mi *alma mater*, la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme brindado la oportunidad de crecimiento profesional y personal durante toda mi estancia.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera, así como al personal y colaboradores que me apoyaron y me permitieron concluir esta etapa en mi crecimiento académico.

Al Dr. Ricardo Torres Jardón, mi asesor y profesor de este trabajo y durante todas las experiencias vividas en el CCA, por su paciencia, sabiduría y sus enseñanzas profesionales y de vida, así como de las oportunidades recibidas. Mi más sincero agradecimiento, gran admiración y reconocimiento.

A cada uno de los integrantes del jurado asignado, por su tiempo y por cada una de sus correcciones, observaciones y sugerencias.

A mis compañeros y amigos, por su valiosa amistad, su apoyo incondicional y sus grandes consejos durante todo este trayecto.

A mi madre, mi padre y mi hermana por sus consejos y apoyo siempre.

A mi familia, mi esposa por sus consejos y cariño recibidos, así como su apoyo y motivación durante toda mi formación y a mi hijo por toda la motivación que me brinda.

Índice

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 La problemática de la emisión de partículas y otros contaminantes durante la quema de biomasa .1	
1.1.1 Características de aerosoles atmosféricos	3
1.1.2 Daño a la salud y efectos en el clima.....	4
1.1.3 Aerosoles y quema de biomasa	5
1.2 Importancia de las quemas agrícolas en el deterioro de la calidad del aire en México	6
1.3 Revisión de estudios de influencia de quemas de biomasa en la contaminación en México	8
1.4 Casos de estudio.....	11
1.4.1 Mérida, Yucatán	11
1.4.1.1 Estudios previos en Yucatán.....	14
1.4.2 Morelia, Michoacán.....	16
1.4.2.1 Estudios previos en Michoacán	18
1.5 Justificación del estudio	20
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo principal	23
2.2 Objetivos particulares.....	23
3. METODOLOGÍA	24
3.1 Estaciones de monitoreo	24
3.2 Método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$	28
3.3 Análisis de correlación “Reduced Major Axis (RMA)”	30
3.4 Validación y análisis de datos de calidad del aire	32
3.5 Criterios para selección de eventos	33
3.5.1 Rosas de vientos y de contaminantes.....	33
3.5.2 Construcción de trayectorias con HYSPLYT.....	33
3.5.3 Uso de imágenes de satélite: MODIS y VIIRS	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 Series de tiempo de $PM_{2.5}$ y CO	36
4.2 Análisis de correlación de cocientes $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ representativos de las zonas urbanas y de eventos de quemas agrícolas	41

4.3 Verificación de eventos	46
4.3.1 Rosas de vientos de contaminantes	54
4.3.2 Imágenes de satélite de eventos de incendios forestales.....	58
4.4 Uso potencial del método de del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ en estudios similares en México.....	65
5. CONCLUSIONES	67
6. REFERENCIAS	69

LISTA DE FIGURAS

Número	Descripción	Página
1.1	Efectos directos e indirectos de los aerosoles sobre el sistema climático. (Adaptado de Pöschl, 2005)	5
1.2	Mapa de distribución de actividades agrícolas en México. (SAGARPA, 2017)	6
1.3	Distribución de estados con mayor número de incendios en 2017 (Obtenido de CONAFOR, 2018)	7
1.4	Imagen de la trayectoria seguida por el avión instrumentado un día de muestreo en marzo de 2006 durante la campaña MILAGRO. La intensidad del color representa la altitud del vuelo y el cuadro azul es la zona delimitada por el estudio. (Tomado de Crouse, 2009)	10
1.5	Incendios detectados durante 2013. Los puntos representan el periodo sin lluvias mientras que las (x) representan el periodo de lluvias. Las líneas curvas en el centro muestran las trayectorias de retroceso obtenidas con HYSPLIT. El círculo central pequeño muestra la zona analizada en MILAGRO y el círculo mayor la zona analizada por Tzompa-Sosa. (Tomada de Tzompa-Sosa, 2016)	11
1.6	Distribución del uso de suelo en Yucatán y rosa de vientos anual para Mérida. (SEDUMA, 2018 y RUOA, 2018)	12
1.7	Series de tiempo de los promedios de 24 horas de PM ₁₀ y PM _{2.5} registrados en la estación RUOA-Mérida en 2016. Las líneas rojas representan las normas de calidad del aire mexicanas para promedios de 24 horas y las líneas azules la guía recomendada por la Organización Mundial de la Salud. (Santamaría-Islas, 2019)	15
1.8	Localización de la Zona Metropolitana de Morelia y la distribución de frecuencia de la proveniencia de los vientos. (Adaptado de WeatherSpark, 2016)	16
1.9	Distribución de uso de suelo en Michoacán. Las zonas marcadas con color blanco representan la actividad debida a la agricultura en el estado. (INEGI, 2017)	17
1.10	Gráficas de cajas y bigotes de la tendencia de las concentraciones en promedio horario de los contaminantes criterio O ₃ , CO, SO ₂ , NO ₂ , PM ₁₀ , y el estimado de PM _{2.5} , registrados por las estaciones de monitoreo de la SUMA en Morelia, Michoacán entre 2008 y 2015. Las gráficas incluyen la comparación con respecto a las normas de calidad del aire aplicables al tipo de promedio utilizado y resultante del gráfico (línea en rojo: NOM para promedio horario; línea en azul: NOM para promedio anual). (Correa-García, 2016)	19
1.11	Series de tiempo de los promedios horarios de ozono y de promedios de 24 horas de PM ₁₀ y PM _{2.5} registrados en la estación RUOA-Morelia entre octubre de 2015 y octubre de 2017. (López-Terreros, 2019)	20

1.12	Mapa de incendios en México entre octubre de 2016 y enero de 2017. Cada punto naranja representa un incendio forestal registrado por la NASA. (https://fires.globalforestwatch.org/)	21
3.1	Ubicación de la estación de monitoreo RUOA-MEDA y detalles de su instrumentación en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán. (Mapa descargado de Google Maps, 2019)	24
3.2	Ubicación de la estación de monitoreo RUOA-MORE y detalles de su instrumentación en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia de la UNAM. (Descargado de Google Maps, 2019)	25
3.3	Esquema de funcionamiento de un analizador de CO por infrarrojo no dispersivo/filtro de correlación. (INECC, 2019)	27
3.4	Esquema de funcionamiento de un monitor de partículas por atenuación de radiación beta. (Adaptado de Manual de equipo <i>Thermo Scientific-FH62C14</i> , 2010)	27
3.5	La regresión lineal por mínimos cuadrados solo minimiza el cuadrado de la desviación estándar $(y-Y)^2$ en la dirección y mientras que la regresión por RMA minimiza el producto de las desviaciones de x e y de la línea de tendencia. Figura adaptada de Ayers (2001) y Davis (1986).	30
3.6	Imagen obtenida con MODIS para el 28 de noviembre de 2016. Los puntos rojos representan incendios registrados para este día.	35
4.1	Series de tiempo en promedios horarios para CO y PM _{2.5} durante el periodo del 1 de octubre de 2016 al 1 de febrero de 2017 en Mérida, Yucatán.	36
4.2	Rosa de vientos para el periodo de muestreo de octubre de 2016 a enero de 2017 en Mérida, Yucatán.	37
4.3	Series de tiempo en promedio horarios para CO y PM _{2.5} durante el periodo del 1 de febrero de 2017 al 1 de septiembre de 2017 en Mérida, Yucatán.	38
4.4	Rosa de vientos para el periodo muestreado de febrero de 2017 a septiembre de 2017 en Mérida, Yucatán.	39
4.5	Series de tiempo en promedios horarios para CO y PM _{2.5} durante el periodo entre el 1 de febrero de 2017 y el 1 de septiembre de 2017 en Morelia, Michoacán.	40
4.6	Rosa de vientos para el periodo de muestreo que va de febrero a septiembre de 2017 en Morelia, Michoacán.	41
4.7	Gráfica de cajas y bigotes para ERs y NERs obtenidos en estudios anteriores para quemas de biomasa en distintos lugares. El punto rojo representa un dato atípico durante la investigación. (Adaptada de Wigder et al., 2013)	45

4.8	Gráfica de dispersión para los eventos ocurridos en Mérida, Yucatán entre octubre de 2016 y enero de 2017 (arriba-izquierda), Mérida entre febrero de 2017 y septiembre de 2017 (arriba-derecha) y Morelia, Michoacán entre febrero de 2017 y septiembre de 2017 (abajo-centro). Todos los puntos están en promedio horarios. Los puntos azules representan los promedios horarios del percentil 99 del periodo muestreado. <u>La línea azul</u> representa el AER de $PM_{2.5}/CO$ obtenido del periodo muestreado. <u>Las líneas punteadas naranjas</u> representan los NERs de $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ obtenidos de los eventos seleccionados.	47
4.9	Series de tiempo para CO y $PM_{2.5}$ los días 28 de noviembre de 2016 y 30 de abril de 2017 en Mérida. Los recuadros azules muestran el periodo en donde se aprecia una buena correlación entre ambas especies.	48
4.10	Series de tiempo para CO y $PM_{2.5}$ los días 1-2 de marzo de 2017 y 11-12 de abril de 2017 en Morelia. Los recuadros azules muestran el periodo en donde se aprecia una buena correlación entre ambas especies.	51
4.11	Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), $PM_{2.5}$ (arriba-derecha) y el cociente $PM_{2.5}/CO$ (abajo) para el 28 de noviembre de 2016 en Mérida, Yucatán.	54
4.12	Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), $PM_{2.5}$ (arriba-derecha) y el cociente $PM_{2.5}/CO$ (abajo) para el 30 de abril de 2017 en Mérida, Yucatán.	55
4.13	Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), $PM_{2.5}$ (arriba-derecha) y el cociente $PM_{2.5}/CO$ (abajo) para el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia, Michoacán.	56
4.14	Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), $PM_{2.5}$ (arriba-derecha) y el cociente $PM_{2.5}/CO$ (abajo) para el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia, Michoacán.	57
4.15	<u>Incendios registrados</u> por MODIS y VIIRS (arriba) el 28 de noviembre de 2016 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. <u>Trayectorias de retroceso</u> (abajo) durante 12 horas para el 28 de noviembre de 2016 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.	60
4.16	<u>Incendios registrados</u> por MODIS y VIIRS (arriba) el 30 de abril 2017 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. <u>Trayectorias de retroceso</u> (abajo) durante 12 horas para el 30 de abril de 2017 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.	61

- 4.17 Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) durante 13 horas para el 2 de marzo de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora. 63
- 4.18 Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 11 y 12 de abril de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) durante 15 horas para el 11 y 12 de abril de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora. 64

LISTA DE TABLAS

Número	Descripción	Página
1.1	Estudios realizados en México y su contribución sobre incendios forestales.	9
1.2	Inventario de Emisiones en Yucatán. (SEDUMA, 2018)	13
1.3	Inventario de Emisiones en Michoacán y la ciudad de Morelia, 2013 (Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán, 2013)	17
3.1	Instrumentos y métodos de monitoreo de las estaciones de monitoreo de calidad del aire RUOA-Mérida y Morelia.	26
4.1	Comparación de AERs de $PM_{2.5}/CO$ usando RMA y mínimos cuadrados para el percentil 99 de los datos para $PM_{2.5}$.	41
4.2	AERs de los cocientes de $PM_{2.5}/CO$ para el periodo de muestreo en 2016 y 2017 en Mérida y Morelia.	42
4.3	NERs para el cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ para los eventos seleccionados en Mérida y Morelia durante 2016 y 2017.	43
4.4	Inventario de Emisiones desglosado en fuentes especiales en Yucatán. (SEDUMA, 2018)	50
4.5	Inventario de Emisiones desglosado en fuentes especiales en Michoacán. (ProAire, 2015)	53

RESUMEN

Los incendios forestales, en México, son un tema preocupante debido a la contribución sobre las emisiones de regiones urbanas y su impacto en la calidad del aire. Es necesario encontrar alternativas para identificar este tipo de influencia, principalmente por el daño tan grave a la salud y al medio ambiente por la emisión de contaminantes como el material particulado ($PM_{2.5}$). El método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ representa una alternativa para evaluar las contribuciones de $PM_{2.5}$ en poblaciones urbanas debido a quemas de biomasa regionales en México.

Se presentan los resultados obtenidos usando el método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ usando datos típicos de calidad del aire para $PM_{2.5}$ y CO de dos estaciones de monitoreo de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ubicadas en Mérida, Yucatán y en Morelia, Michoacán. Debido al largo tiempo de vida de estas especies, éstas llegan desde zona rurales hasta zonas urbanas contribuyendo con la problemática de mala calidad del aire. El método del “incremento” considera que, debido al largo tiempo de vida de las especies medidas, los cocientes permanecen prácticamente constantes en el transporte y por lo tanto se puede observar una diferencia aparente en el cálculo de los incrementos en los cocientes (ERs). Estos resultados son comparados con trayectorias de retroceso de viento usando la herramienta HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) y con imágenes de satélite de incendios forestales, MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) y VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), de la NASA.

Los datos obtenidos se dividieron en 3 periodos, de octubre a enero de 2016 en Mérida, en donde existe una temporada baja en incendios, de febrero a septiembre de 2017 en Mérida, que coincide con la temporada de incendios en México y de febrero a septiembre de 2017 en Morelia en donde también hay una coincidencia con la temporada de incendios.

Los incrementos en los cocientes normalizados (NERs) obtenidos por regresión lineal usando el método del mayor eje reducido (RMA) parecen ser congruentes con la literatura existente ya que son muy cercanos entre sí para distancias menores a 200 km. Los eventos analizados y presentados durante este trabajo corresponden a los 4 eventos con mayor coeficiente de correlación en ambas ciudades. Estos eventos muestran que existe una diferencia aparente entre los NERs y el AER (incremento en el cociente ambiental). Además, usando las trayectorias de retroceso en conjunto con las rosas de vientos, se

encontró que sí existe relación entre las altas concentraciones de $PM_{2.5}$ y CO y la dirección de donde provienen las parcelas de aire, de igual manera parece existir una influencia de los eventos de incendios forestales detectados por MODIS y VIIRS sobre las ciudades estudiadas.

En el periodo de octubre a enero de 2016 en Mérida, los resultados muestran que hay una baja incidencia entre los incendios forestales, las trayectorias de viento y los cocientes obtenidos que son congruentes con la temporada baja de incendios forestales en la región. Por otro lado, en el periodo de febrero a septiembre de 2017 sí existe una incidencia alta en cuanto a incendios forestales, principalmente en los meses de abril y mayo. En el caso de Morelia, hay una cantidad considerable de eventos debido a la temporada de incendios, principalmente en el mes de mayo. Los resultados mostrados en los NERs, son muy cercanos a lo que se ha reportado en otros sitios anteriormente.

Los resultados obtenidos, así como las imágenes de satélite y trayectorias de retroceso en conjunto con la meteorología, parecen validar el método en ambas ciudades y su aplicación por primera vez en México. Sin embargo, existen muchos factores que afectan los resultados. El principal factor es la contribución debida a fuentes móviles, por lo cual los NERs pueden tener una correlación muy baja porque las emisiones de CO están influenciadas directamente por este tipo de fuentes. Al existir una contribución para CO, tanto de fuentes móviles como de incendios forestales, la correlación con $PM_{2.5}$ parece disminuir en gran medida. También la distancia y la ubicación de la zona de monitoreo representan un factor importante sobre el método, entre mayor es la distancia, los cocientes resultan ser más bajos. Por lo anterior, este método depende mucho de la fuente de las emisiones. Estos resultados permiten tener un mejor panorama sobre las emisiones debido a quemas agrícolas e incendios forestales, sobre todo en la toma de decisiones y las acciones para combatir este problema en México.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La problemática de la emisión de partículas y otros contaminantes durante la quema de biomasa

La quema de residuos agrícolas y los incendios forestales son una fuente importante de compuestos como el metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos diferentes al metano (NMHC) y partículas finas (PM_{2.5}) (Andreae y Merlet, 2001). Estas emisiones pueden afectar los ecosistemas y generar grandes cantidades de contaminantes que pueden a su vez afectar la calidad del aire, incluyendo la emisión de estos que son precursores de otros contaminantes como el Ozono (O₃) y aerosoles orgánicos secundarios (AOS). Las emisiones generadas por estas quemas pueden ser transportadas por la acción del viento desde zonas forestales y rurales con actividad agrícola a las zonas urbanas contribuyendo durante algunos meses del año a incrementar la problemática de contaminación del aire.

Uno de los problemas que enfrentan las autoridades de gestión de la calidad del aire de zonas urbanas es la dificultad para identificar cuándo domina la contribución debido a quemas de biomasa sobre las de origen urbano cuando existen altos niveles de contaminación. Esta dificultad impide identificar, en análisis de series de tiempo de datos de monitoreo de la calidad del aire, las temporadas y/o condiciones meteorológicas de mayor ocurrencia de este fenómeno para así implementar mejores planes para prevenir y/o enfrentar la situación en coordinación con otras autoridades federales.

Los contaminantes generados durante la combustión de biomasa son transportados por la acción del viento a través del desplazamiento de parcelas de aire. Cuando la distancia recorrida por estas parcelas de aire es muy grande y se ha presentado la oportunidad de que estas masas reciban suficiente radiación solar, gran parte de los precursores iniciales se han transformado en partículas parcialmente oxidadas de mayor potencial tóxico y en AOS, así como en productos como O₃ y otros radicales orgánicos (Lindaas et al., 2017). Así, al paso por zonas urbanas, estas masas de aire se mezclan con las emisiones locales urbanas y los contaminantes primarios, que son aquellos emitidos directamente a la atmósfera debido a una fuente, y los secundarios, que se forman en la atmósfera como resultado de la transformación y reacciones químicas de contaminantes primarios (SEMARNAT, 2013), lo cual contribuye sensiblemente en el aumento de los niveles de contaminación. Sin embargo, tanto el CO como el CO₂ no sufren transformación en su transporte debido a que su tiempo de vida es grande en comparación con otras especies. El CO tiene un tiempo de vida media en la atmósfera de hasta varios meses, dependiendo de la latitud (Khalil and

Rasmussen, 1990) mientras que el CO₂ puede tener un tiempo de vida de 50 a 100 años e incluso varios cientos de años (Archer et al., 2009).

Como resultado, las estaciones de monitoreo de calidad del aire en zonas urbanas pueden registrar incrementos súbitos en algunos de los contaminantes típicamente registrados. Sin embargo, es muy factible que estos incrementos no sean simultáneos y/o uniformes en aquellos contaminantes trazadores de emisiones de quema de biomasa debido a que en el transporte de estos trazadores pudieron ya haber sufrido una transformación y/o remoción química e incluso dilución por la acción del viento, además pueden ser confundidos con emisiones urbanas.

Por ejemplo, la mayor parte de los NO_x emitidos a escala regional son producto de la quema de combustibles fósiles, principalmente de la gasolina de los automóviles, por lo que diferenciar entre la contribución de quemas y de emisiones vehiculares es un tanto complejo. Generalmente los NO_x se convierten rápidamente en otros productos como el ácido nítrico (HNO₃) y otros compuestos nitrogenados como el PAN (nitrato de peroxiacilo), y llegar hasta aerosoles de nitrato (Lindaas et al., 2017). Sin embargo, cuando hay presencia de NO_x y con la radiación solar durante el día, se produce O₃ como resultado de la fotólisis de NO₂ (Pandis and Seinfeld, 2006). Por ello, es posible que los niveles de O₃ se incrementen por la suma del ozono generado localmente o el transportado a mediana y larga escala.

Otras especies empleadas para la evaluación de la calidad del aire son la concentración de PM_{2.5} y CO que ofrecen una oportunidad más factible para identificar diferentes contribuciones. Ambas constituyen indicadores de la calidad del aire, porque son emitidos de muchos procesos antropogénicos urbanos y en la quema de biomasa, además de que su tiempo de vida es del orden de días a meses (Archer et al., 2009; Pandis and Seinfeld, 2006). El CO y las PM_{2.5} son indicadores importantes de combustión incompleta en motores de combustión interna, así como en procesos de combustión externa, tanto de combustibles fósiles como de biomasa (Venegas, 2000). Ambos tienen norma de calidad del aire debido a su potencial de afectación a la salud. Respirar CO a niveles moderados, como avenidas y túneles congestionados, puede causar dolor de cabeza, mareo, sensación de desvanecimiento y cansancio. A niveles más altos de exposición a CO, como los que se pueden alcanzar al respirar cerca de chimeneas o en sitios donde se quema biomasa, puede causar somnolencia, alucinaciones, convulsiones y pérdida de conocimiento (Kampa, 2007).

El material particulado presenta especial interés por diversas cuestiones, es muy dañino a los seres humanos pues entra directamente a los órganos más sensibles (regiones alveolares). Las partículas, que son producto de la quema de biomasa, acarrean compuestos orgánicos policíclicos como el benzo-a-pireno que a grandes exposiciones es muy tóxico (Rodríguez-Trejo, 2005). Incluso, el carbón elemental (hollín), representa un peligro potencial en el equilibrio radiativo terrestre, interactuando de manera directa sobre éste, alterando la física de partículas de las nubes (Cortés, 2014). Además, su contribución a la problemática ambiental global es muy importante. Se ha citado que cerca del 40% del CO₂, 32% de CO, 20% de material particulado y 50% de compuestos aromáticos policíclicos, provienen directamente de la quema de biomasa a nivel mundial (Kambis et al., 1996).

1.1.1 Características de aerosoles atmosféricos

Como ya se ha mencionado, muchas partículas son emitidas por medios antropogénicos, pero también por medios naturales. Los aerosoles están definidos como partículas finas, sólidas o líquidas, suspendidas en una fase gaseosa (Pandis and Seinfeld, 2006), generalmente la palabra aerosoles se emplea para referirse a cualquiera de los componentes del material particulado.

Los aerosoles atmosféricos se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios se emiten directamente como partículas mientras que los secundarios se forman en la atmosfera a partir de procesos de conversión gas-partícula (Finlayson-Pitts and Pitts, 2000; Pandis and Seinfeld, 2006). Los aerosoles también pueden clasificarse de acuerdo a su tamaño de partícula. El diámetro de partícula puede ir desde nanómetros (nm) hasta unos cuantos micrómetros (μm). Una vez en el aire, las partículas pueden cambiar su tamaño y su composición por condensación de especies que se encuentran en fase vapor, coagulación con otras partículas, reacciones químicas o activación en presencia de agua para formar pequeños núcleos de condensación. Las partículas inferiores a 1 μm de diámetro generalmente tienen una concentración en la atmosfera que va desde 10 a algunos miles de ellas por cada cm^3 mientras que las partículas más grandes tienen concentraciones mucho más bajas por cada cm^3 (Pandis and Seinfeld, 2006).

Las partículas son removidas de la atmosfera por dos procesos fundamentales: Por asentamiento o sedimentación sobre superficies (deposición seca) o a partir de su incorporación como pequeñas gotas en el proceso de precipitación (deposición húmeda) (Whitby and Cantrell, 1976). Debido a estos procesos de remoción, el tiempo de vida de las partículas no es muy largo. Además, dado que existe una

composición no uniforme de material particulado que depende de la zona geográfica, el tiempo de vida de las partículas varía desde días hasta semanas (Pandis and Seinfeld, 2006).

1.1.2 Daño a la salud y efectos en el clima

Las partículas presentes en el aire, son una mezcla de pequeñas partículas sólidas y gotas que pueden tener distinto tamaño, composición y origen, pero solo las partículas más pequeñas llegan a los pulmones (Dockery et al., 1993). De acuerdo a la *US-EPA* (1987), las partículas inhalables por el ser humano son aquellas que tienen un diámetro de 10 μm o menos, siendo las partículas más finas las que tienen un diámetro menor a 2.5 μm .

Las $\text{PM}_{2.5}$ contienen típicamente mezclas que incluyen hollín, especies ácidas y partículas de nitratos y sulfatos. Estas tienen un riesgo mayor porque, por su tamaño, existe una probabilidad más grande de ser absorbidas por el cuerpo a través de los pulmones, llegar al torrente sanguíneo y hasta el cerebro (Miller et al., 1979).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que cada año mueren 4.2 millones de personas en todo el mundo debido a la contaminación de la atmósfera. La mayor parte de estas muertes se deben a la presencia de $\text{PM}_{2.5}$. Estas partículas causan enfermedades cardiovasculares, respiratorias como la bronquitis y cáncer, además se han incrementado los casos de alergias y se han agravado los casos de asma, principalmente entre la población infantil y de adultos mayores (Linares, 2008). La OMS ha fijado unos valores de referencia para $\text{PM}_{2.5}$ de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24h y de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual.

Además de los daños a la salud, también afectan de manera considerable el clima, tanto de manera directa como de manera indirecta. La figura 1.1 muestra un esquema de los efectos directos e indirectos sobre el sistema climático. Los aerosoles pueden afectar la temperatura terrestre a través de la absorción de la radiación terrestres por medio de los gases de efecto invernadero. También se puede propiciar la formación de nubes (formación de pequeñas gotas) y mediante la precipitación se da la deposición húmeda. Estos efectos impactan sobre el transporte de calor y masa en la atmósfera, afectan el ciclo del agua, así como los procesos biológicos en el ciclo del azufre y del carbono (Pöschl, 2005).

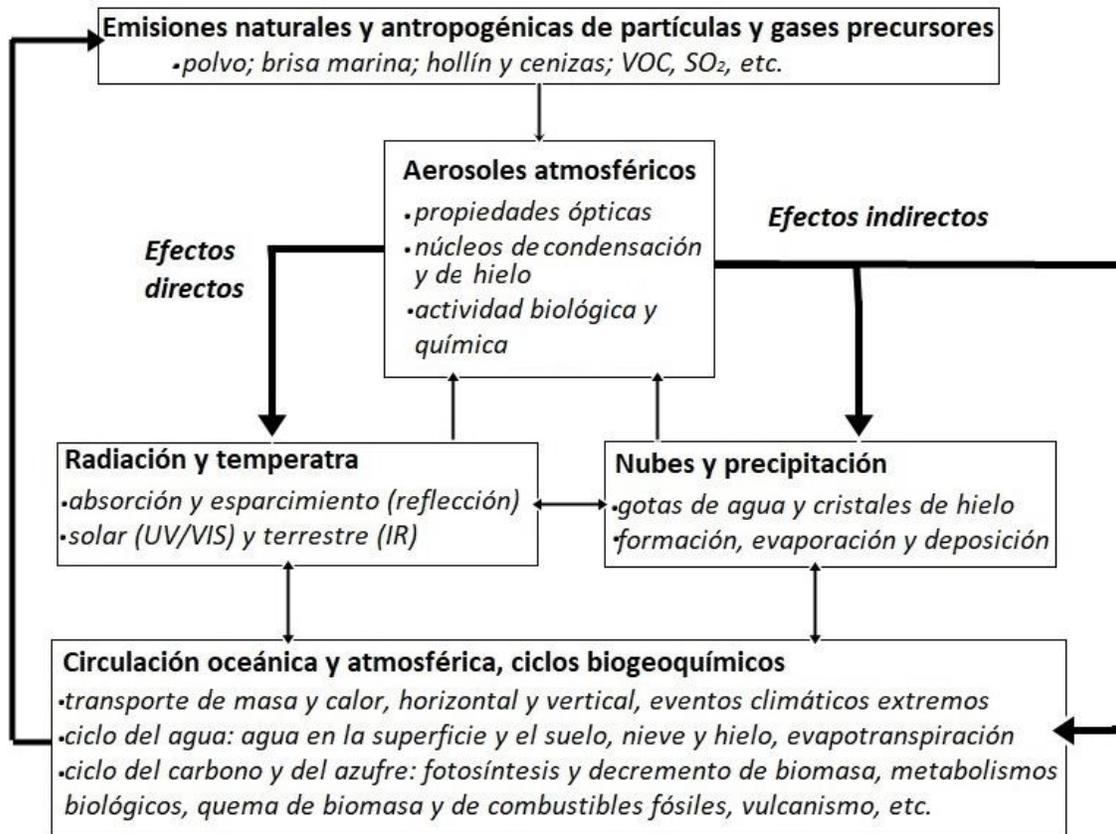


Figura 1.1. Efectos directos e indirectos de los aerosoles sobre el sistema climático. (Adaptado de Pöschl, 2005)

1.1.3 Aerosoles y quema de biomasa

Los incendios forestales y la quema de biomasa son una de las causas más importantes en la pérdida de vegetación natural por actividades agrícolas (Cortés et al., 2014). La quema de biomasa es una fuente global de emisión de gases que son química y radiativamente activos, además de contribuir con partículas que afectan el balance radiativo del sistema climático (Servine, 1995). La quema de biomasa genera emisiones de compuestos de diferentes tipos: Gases de efectos invernadero como el CO₂ y el CH₄; Gases químicamente activos como el NO, CO, CH₄; Aerosoles como los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP), compuestos de azufre y nitrógenos, carbono orgánico, carbono negro, sulfatos, nitratos y amoníaco (NH₃) (Gao et al., 2003; Reid et al., 2005). Las partículas que son emitidas por quema de biomasa se clasifican como ultrafinas (diámetro < 0.1 μm), finas (diámetro < 2.5 μm) y gruesas (d > 2.5 μm). La mayor parte de las partículas emitidas en la quema de biomasa son de tipo ultrafinas y finas, solo una pequeña fracción es de tamaño más grande (Morawska et al., 1999). En promedio se estima que las partículas emitidas por biomasa están compuestas en un 80% por material

orgánico particulado, de 5 a 9% de carbono negro (como el hollín) y de 12 a 19% de especies inorgánicas traza como potasio, sulfatos, cloruros y nitratos (Reid et al., 2005). El carbono negro, contiene entre otras especies al hollín, el cual contiene un albedo (capacidad para reflejar la radiación) muy bajo. Esto significa que puede absorber una gran cantidad de radiación proveniente del sol. El hollín puede depositarse sobre superficies logrando contribuir al aumento de la temperatura como ocurre en los casquetes polares (Bergman, 2011).

1.2 Importancia de las quemas agrícolas en el deterioro de la calidad del aire en México

En México, las actividades agrícolas constituyen una actividad sumamente importante. De acuerdo a la SAGARPA (2017) dentro del territorio nacional se tiene un gran comercio nacional, pero también en el mercado extranjero. Como se observa en la figura 1.2, las actividades agrícolas se encuentran dispersas por todo México, principalmente sobre la zona sureste, en donde se encuentran las zonas más abundantes en flora y fauna del país (SAGARPA, 2017).



Figura 1.2. Mapa de distribución de actividades agrícolas en México. (SAGARPA, 2017)

La consecuencia directa de las actividades agrícolas en México es la producción de una gran cantidad de desechos orgánicos que terminan por convertirse en biomasa (hojas, pastos, tallos, etc.). Históricamente, la manera más rápida y barata de deshacerse de este tipo de desechos ha sido a través de la quema de éstos (CCA, 2014), además de que los incendios forestales sin control son aparentemente eventos intencionales. Como consecuencia, cada año se genera una cantidad enorme de compuestos

contaminantes como el CO, CO₂, COVs y PM_{2.5} (Reid et al., 2005). A pesar de ser un peligro potencial al medio ambiente, se prefiere utilizar este tipo de prácticas porque además de deshacerse de los residuos se generan nuevos nutrientes en las zonas de cultivo, principalmente, aún y cuando quemas agrícolas industrializadas como la caña de azúcar podría usar otros métodos, (CCA, 2014).

En México el problema de contaminación ambiental asociado a las quemas agrícolas es citado frecuentemente y como ejemplo se mencionan incrementos en O₃ y PM_{2.5} (INECC, 2016). Además, existe una quema de la superficie muchas veces más grande debida a quemas agrícolas en comparación con incendios forestales de acuerdo a lo reportado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2018). Como resultado de esto, las emisiones de quemas de biomasa más las emisiones provenientes de fuentes vehiculares e industriales, existe un potencial incrementado del deterioro en la calidad del aire en México. Los estados con mayor incidencia a este tipo de eventos en 2017, según la CONAFOR (2018), fueron: Estado de México, Chihuahua, Michoacán, Jalisco y Ciudad de México (Figura 1.3). En general, en México el periodo de incendios forestales corresponde a enero-junio (Ríos and Raga, 2018), que coincide con la temporada seca, sin embargo, la temporada más crítica corresponde al periodo de marzo a mayo. Históricamente se ha mencionado que los problemas de incendios forestales masivos que ocurrieron en México y Centro América en 1998 llegaron a impactar zonas tan distantes como el este de Estados Unidos, donde se detectaron grandes niveles de partículas (Husar et al., 2000).

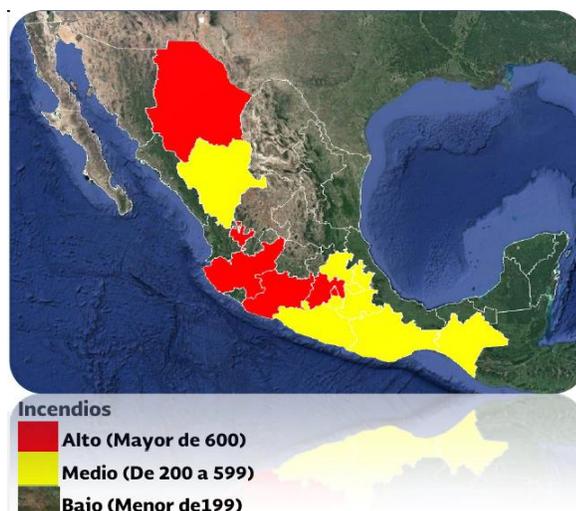


Figura 1.3. Distribución de estados con mayor número de incendios en 2017 (Obtenido de CONAFOR, 2018)

1.3 Revisión de estudios de influencia de quemas de biomasa en la contaminación en México

Las quemas agrícolas no son un tema de investigación que haya surgido en fechas recientes. Desde hace tres décadas, se han realizado muchos estudios sobre el impacto de incendios forestales en la calidad del aire, principalmente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), y esta investigación aún continúa, dado que no hay un total conocimiento de esta problemática en México. La Tabla 1.1 presenta un resumen de una revisión de estudios al respecto.

Ortiz et al., (2003) realizaron una investigación sobre la influencia de las quemas por incendios forestales sobre la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, principalmente en Puebla, aunque también en los estados de Veracruz y Oaxaca. También se analizaron distintos eventos de varias zonas del Estado de México. El estudio estuvo basado en el uso de imágenes de satélite de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para la identificación de plumas de humo en los distintos eventos. Durante una investigación sobre incendios forestales y su impacto en la Ciudad de México Bravo et al., (2002) determinaron que durante el año 1998 ocurrió una gran cantidad de incendios. Éstos autores correlacionaron las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) medidas en distintas estaciones de monitoreo en la Ciudad de México con reportes de incendios en la cercanía de la ciudad. Los autores concluyeron que las concentraciones de material particulado (PST mayormente y PM_{10}) están directamente influenciadas por los incendios forestales en temporada seca.

Uno de los proyectos con más alcances científicos realizado en México hasta 2006 fue la campaña MILAGRO (*Megacity Initiative: Local and Global Research Observations*) durante la cual se llevaron a cabo varios estudios muy detallados del impacto de las quemas de biomasa e incendios forestales en México (Molina et al., 2010). En estos estudios se aplicaron distintos métodos analíticos, incluyendo el seguimiento de plumas de incendios con aviones instrumentados, como el ejemplo mostrado en la figura 1.4, el cual muestra la trayectoria de vuelo para un día de muestreo recorrida por dicho avión. Crouse et al., (2009) y Aiken et al., (2010) analizaron distintos compuestos emitidos al aire a partir de plumas de incendios forestales, como el caso de los aerosoles orgánicos, y utilizaron modelos avanzados de dispersión y química como FLEXPART (*Flexible Particle dispersion model*). En su estudio encontraron que, en 2006, existió una influencia menor de este tipo de compuestos sobre la calidad de aire. Como se observa en la figura 1.3, muchos de los estados que actualmente representan un gran porcentaje en cuanto a quemas por incendios forestales fueron considerados en el estudio, incluyendo el Estado de México y Michoacán.

Tabla 1.1. Estudios realizados en México y su contribución sobre incendios forestales.

Autores	Título	Contribución
Ortiz et al. (2003)	Evaluación de las plumas de humo de los incendios forestales de 1998 en México y la utilidad de las imágenes NOAA-AVHRR	<ul style="list-style-type: none"> • Se detectaron distintos incendios en estados vecinos de la Ciudad de México. • Se usaron imágenes de satélite para detectar plumas de humo de incendios.
Bravo et al. (2002)	Impact of wildfires on the air quality of Mexico City, 1992-1992	<ul style="list-style-type: none"> • Se observa la variación debida a la temporada estacional por quemas en la Ciudad de México. • Se correlacionan partículas suspendidas totales (PST) y PM₁₀. • Se encuentra el impacto de PM₁₀ sobre la calidad del aire por quemas de biomasa.
Crouse et al. (2009)	Biomass burning and urban air pollution over the Central Mexican Plateau	<ul style="list-style-type: none"> • Se analiza la presencia de cianuros y aerosoles orgánicos presentes en la quema de biomasa. • Se observa como estas especies impactan en la calidad del aire de la cuenca del valle de México. • Se observa el impacto de éstos sobre la química del ozono en la Ciudad de México.
Aiken et al. (2010)	Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)- Part 2: Analysis of the biomass burning contribution and the non-fossil carbon fraction	<ul style="list-style-type: none"> • Se analizan distintos aerosoles orgánicos usando un espectrómetro de masas de alta resolución (AMS) de la campaña MILAGRO. • Se realiza modelación usando FLEXPART para la predicción de incendios. • Se presenta el seguimiento de un trazador nuevo (carbono 14) a partir de quema de biomasa.
Lei et al. (2013)	Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City	<ul style="list-style-type: none"> • Se analiza la presencia de aerosoles de carbón y el impacto de los incendios sobre el ozono a nivel de suelo. • Se usan modelos de predicción de impacto de incendios (WRF-CHEM) en la variación de aerosoles orgánicos primarios.
Tzompa-Sosa et al. (2016)	Contribution of Biomass Burning to Carbonaceous Aerosols in Mexico City during May 2013	<ul style="list-style-type: none"> • Se analizan dos regímenes diferentes, con lluvia y sin lluvia. • Se usa un trazador para encontrar la influencia directa de quemas sobre la calidad del aire: Levoglucosano. • Se amplía la zona estudiada anteriormente alrededor de la Ciudad de México. • Se encuentra la relación entre incendios forestales y emisiones de PM_{2.5}.

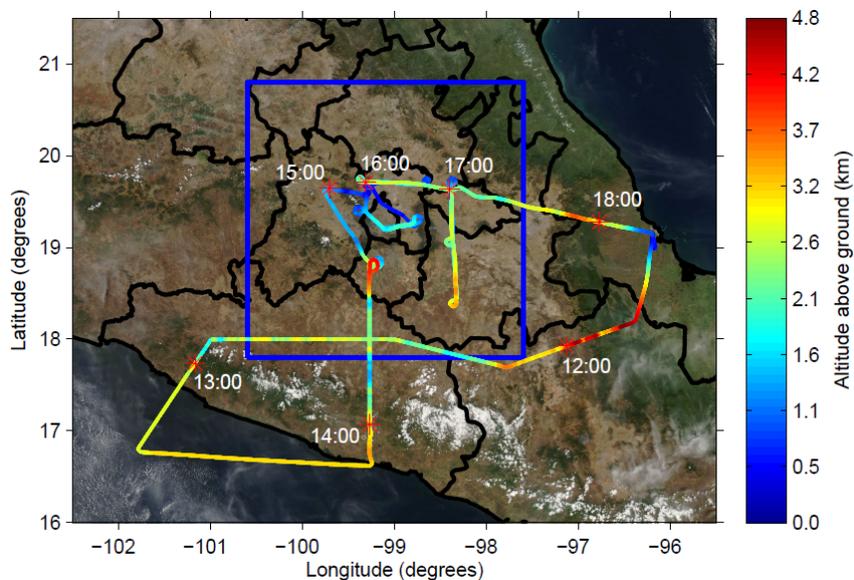


Figura 1.4. Imagen de la trayectoria seguida por el avión instrumentado un día de muestreo en marzo de 2006 durante la campaña MILAGRO. La intensidad del color representa la altitud del vuelo y el cuadro azul es la zona delimitada por el estudio. (Tomado de Crouse, 2009)

Otros estudios en MILAGRO fueron fundamentados en la modelación del impacto de compuestos emitidos por quema de biomasa. Lei et al., (2013) presentan un complemento al trabajo realizado en 2006 durante MILAGRO, en donde se usa WRF-CHEM (*Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry*) para modelar el impacto de aerosoles orgánicos primarios a partir de quema de biomasa, así como el uso de imágenes satelitales de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para complementar la modelación. Si bien existen limitantes en el método porque los sensores de los satélites como MODIS no siempre detectan con certeza incendios de menor magnitud, las nubes también interfieren y en ocasiones la duración de los eventos es muy corta (Wyedimyer et al., 2011), su utilidad permitió confirmar varios de los hallazgos de la modelación, uno de estos es la influencia de las quemas de biomasa y de basura sobre las emisiones de aerosoles orgánicos (AO).

Tzompa-Sosa et al., (2016) investigaron la ocurrencia de eventos de incendios forestales y el impacto de PM_{10} y $PM_{2.5}$ sobre la calidad del aire en la Ciudad de México en el mes de mayo de 2013. Para ello usaron trazadores como el levoglucosano ($C_6H_{10}O_5$), que se forma a partir de la pirolisis de compuestos de carbono presentes en biomasa como los almidones y la celulosa. Además, se realizó durante uno de los meses con mayor incidencia de incendios que se dividió en 2 partes, por un lado, un periodo en el que no hubo presencia de lluvia y por otro lado un pequeño periodo en el que sí la hubo. Los resultados de esta investigación mostraron que durante el periodo sin lluvias existe una relación muy estrecha entre los

eventos de incendios forestales y las concentraciones de $PM_{2.5}$. Además, utilizan trayectorias de retroceso realizadas con HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) para ampliar el rango de estudio de las emisiones potenciales. El estudio permite identificar otras regiones que contribuyen de manera directa sobre la calidad del aire en la ZMCM, como es el caso de Michoacán (figura 1.5).

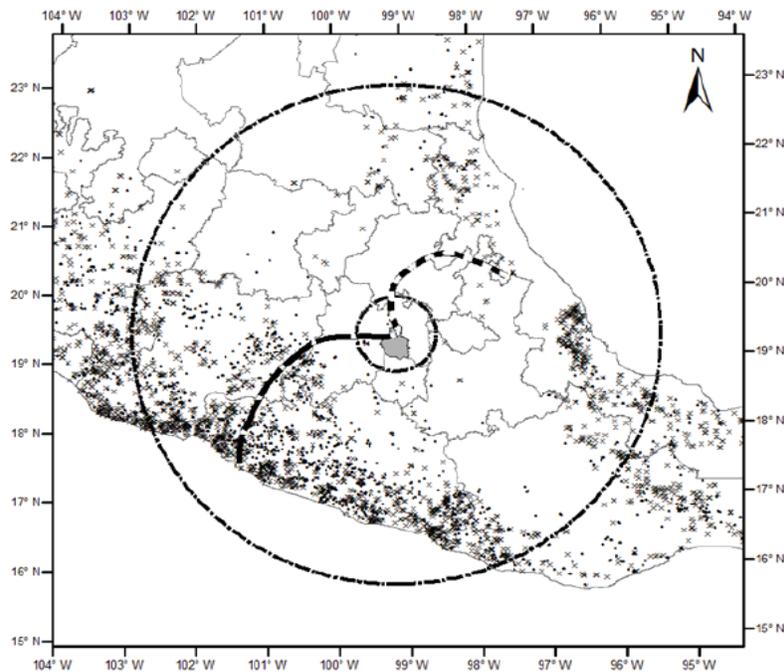


Figura 1.5. Incendios detectados durante 2013. Los puntos representan el periodo sin lluvias mientras que las (x) representan el periodo de lluvias. Las líneas curvas en el centro muestran las trayectorias de retroceso obtenidas con HYSPLIT. El círculo central pequeño muestra la zona analizada en MILAGRO y el círculo mayor la zona analizada por Tzompa-Sosa. (Tomada de Tzompa-Sosa, 2016)

1.4 Casos de estudio

1.4.1 Mérida, Yucatán

La península de Yucatán se encuentra al suroeste de México e incluye 3 estados, Campeche, Quintana Roo y Yucatán. La zona de Yucatán está conformada por una llanura muy extensa en donde la mayor parte existen selvas bajas caducifolias, pastizales, pastizal-agrícola y agrícola como se muestra en la figura 1.6. La Ciudad de Mérida se encuentra ubicada en el extremo sureste de México a menos de 50 km del Golfo de México en la parte noroeste del Estado de Yucatán. Las coordenadas de Mérida son $20^{\circ} 58' 04''$ N, $89^{\circ} 37' 18''$ W, teniendo una superficie de 858.41 kilómetros cuadrados. Ocupa el 2.36 % de la superficie del estado de Yucatán y limita al norte con los Municipios de Progreso y Chicxulub Pueblo; al sur con los Municipios Tecoh, Abalá y Timucuy; al este con los Municipios Conkal, Kanasín y Tixpéhual, y al

Oeste con los Municipios Ucú y Umán. Al Este colinda con el estado de Quintana Roo, al Oeste con el estado de Campeche y al Norte con Golfo de México (Ayuntamiento de Mérida, 2012).

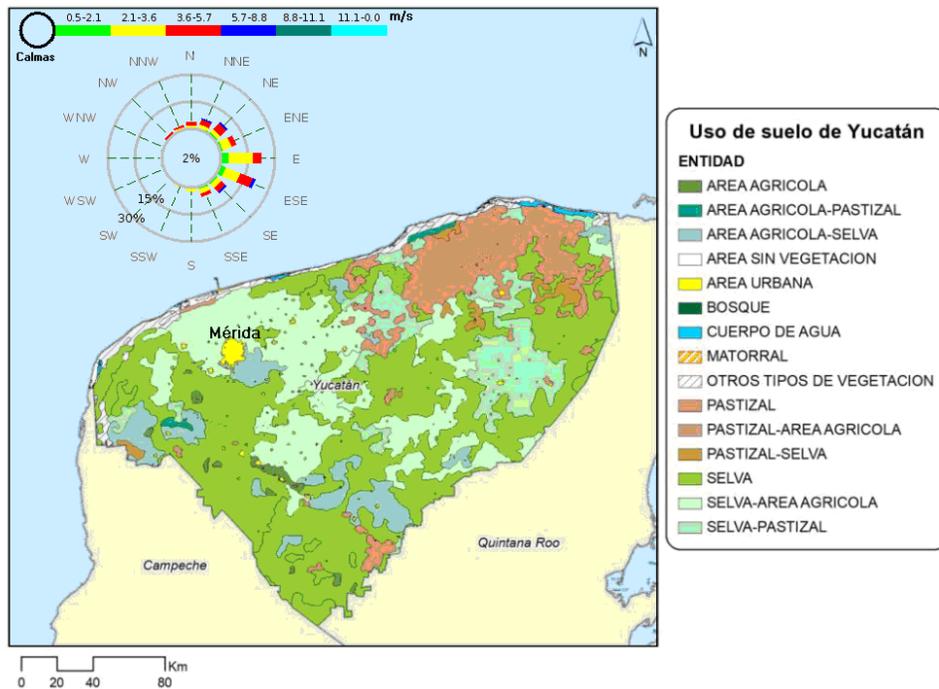


Figura 1.6. Distribución del uso de suelo en Yucatán y rosa de vientos anual para Mérida. (SEDUMA, 2018 y RUOA, 2018)

El clima de Mérida y en general de la península de Yucatán es de tipo "AwO" (cálido subhúmedo con lluvias durante el verano) con una temperatura promedio de 26.61°C (SEDUMA, 2018). La extensión de lluvias es larga y va desde mayo hasta enero, aunque no es raro que llueva durante los llamados meses secos como febrero, marzo y abril. Los meses más calurosos son abril y mayo, subiendo a veces la temperatura hasta cerca de 40° centígrados. La velocidad del viento típica varía de 0 m/s a 7 m/s (calma a brisa fresca), que raramente sobrepasan los 14 m/s (brisa fuerte). El viento promedio más alto es de 5 m/s y se registra en mayo, mientras que el viento promedio más bajo es de 3 m/s y ocurre en septiembre (RUOA, 2018). Los vientos dominantes en la Zona Metropolitana de Mérida provienen de Este (WeatherSpark, 2016). Más del 50% de los días al año son dominados por vientos del sector NE-E-SE. Estos vientos proceden de la parte continental de la Península de Yucatán y del Mar Caribe (Figura 1.6). En el invierno el viento con mayor porcentaje de incidencia es desde las direcciones SE, E y NE y el dominante es de la dirección E. En cambio, durante la primavera, el viento con mayor porcentaje de incidencia es desde la dirección SE, seguido por vientos del E y NE. Durante el verano el viento con mayor porcentaje de

incidencia es desde las direcciones SE y E. Para el otoño se registra que el viento con mayor porcentaje de incidencia es desde las direcciones E y NE (RUOA, 2018).

Un factor importante es el crecimiento en la población que se ha venido registrando durante las últimas décadas en este Estado. De acuerdo al INEGI (2017), de 1940 a 2015 el crecimiento de habitantes en el Estado de Yucatán fue de 418,000 a más de 2 millones. Para el año 2010 la población en el municipio de Mérida fue de poco más de 800,000 habitantes. Esta concentración de población puede tener repercusiones en la calidad del aire. Sin embargo, actividades como las quemas agrícolas y costumbres como la tala y quema de zonas boscosas que se realizan en Península de Yucatán generan emisiones que pueden estar sumándose a las propias de la zona urbana de Mérida con afectación de la calidad de aire. Más aún, en la zona de Mérida se ubican cuatro termoeléctricas cuyas emisiones también pueden ser determinantes. El más reciente inventario de emisiones para Yucatán (Tabla 1.2) indica que las emisiones de CO son considerables, así como las emisiones de NOx, lo que sugiere que las fuentes por combustión son importantes. La tabla 1.2 muestra las emisiones para Yucatán de donde se observa que éste Mérida es la principal fuente de emisión de CO, NOx, SO₂ y COV de todo el estado.

Tabla 1.2. Inventario de Emisiones en Yucatán. (SEDUMA, 2018)

Fuente	Contaminante (Mg/año)						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NOx	COV	CO	NH ₃
Área	18,300	9,712	417	4,125	67,388	61,404	14,614
Fijas	2,013	1,842	21,142	11,412	268	2,490	207
Móviles	1,598	1,188	698	26,984	12,480	132,107	199
Móviles no carreteras	143	137	620	1,925	156	802	NS
Naturales (erosión)	66,813	10,022	NA	49,709	492	NA	NA
Total	88,869	22,901	22,879	94,157	80,785	196,805	15,021
Mérida	10,847	5,642	16,188	23,070	38,514	109,709	4,913

NA=No Aplica; NS=No Significativo.

La tabla 1.2 muestra que la principal fuente de emisión de partículas en Yucatán son los polvos naturales por erosión: 75% del total de PM₁₀ y 47% del total de PM_{2.5}. La segunda fuente de emisión de PM₁₀ y PM_{2.5} son las fuentes tipo área, que son todas aquellas que son dispersas y numerosas como para ser incluidas en las fuentes puntuales, con un 20.6% de las PM₁₀ y 42.4% de las PM_{2.5}. Si se comparan las

emisiones del Municipio de Mérida con respecto al total del Estado y quitando las emisiones de polvos, resulta que este municipio emite cerca de la mitad de las PM_{10} y $PM_{2.5}$ de Yucatán.

1.4.1.1 Estudios previos en Yucatán

La problemática de las quemas agrícolas de biomasa y de incendios forestales, muchas veces intencionales, es un problema cultural que por muchos años sigue realizándose en el sureste de México (Xolocotzi, 1988). La intensidad de estos incendios y el transporte de las plumas de partículas de las quemas ha sido motivo de interés y preocupación por parte de los Estados Unidos debido a que son generalmente transportadas a gran escala alcanzando a llegar hasta los estados del sureste de ese país, por lo que son incluso monitoreadas por sensores remotos montados en satélites (Rogers y Bowman, 2001; Wang et al., 2009). Se ha sugerido que además del impacto potencial en la calidad del aire, los aerosoles como los sulfatos y nitratos pueden tener un efecto importante en la meteorología, especialmente en la formación de nubes y la precipitación (NASA, 2018).

El primer estudio para estimar las emisiones de contaminantes por quemas de biomasa en la Península de Yucatán por su potencial de ser transportadas muchos kilómetros viento arriba fue realizado por Coffey et al., (1993) a principios de los años 1990's. En este estudio, los autores utilizaron una avioneta equipada con sensores de medición de CO , CO_2 , H_2 , CH_4 y $NMHC$ con la que realizaron varios trayectos de vuelo a través de plumas de quemas de pastizales en dos sitios de Quintana Roo. Los autores usaron cocientes de las mediciones de CO , H_2 , CH_4 y $NMHC$ normalizados con respecto al CO_2 ($\Delta X/\Delta CO_2$, donde X es la especie medida) y reportaron que los cocientes para $NMHC$ y H_2 fueron altos, aunque los de CO y CH_4 estuvieron dentro de lo esperado para quemas similares realizadas en Brasil.

Posteriormente y producto de la ocurrencia de un evento de quemas de biomasa masivo observado en 1998 cuyo impacto alcanzó el sur de los Estados Unidos (Rogers y Bowman, 2001) se realizó la campaña MILAGRO. Durante esta campaña en marzo de 2006 se incluyeron varios aviones instrumentados con el propósito de hacer trayectos de medición y seguimiento de plumas de contaminantes tanto de la Ciudad de México (CDMX) como del sureste de México. Yokelson et al., (2009) publican los resultados de la investigación sobre la Península de Yucatán donde el principal interés fue estimar las emisiones de contaminantes emitidos directamente de quemas de biomasa y el posible destino de las plumas de contaminantes resultantes. La investigación identificó un gran número de quemas de

biomasa e incendios forestales en todo el sureste de México cuyas emisiones se dispersaron y cubrieron toda la península y alcanzaron a llegar a la parte continental del norte del Golfo de México.

Yokelson et al., (2009) realizaron un estudio de las trayectorias que las plumas de humo de estos incendios pudieron seguir en el tiempo y encuentran que podrían haber circulado en torno a Mérida y subir incluso hasta el sur de los Estados Unidos. En este estudio no se reportan concentraciones de las especies medidas durante la investigación.

Recientemente, Santamaría-Islas (2019) presenta un diagnóstico de la calidad del aire para la ciudad de Mérida para el año 2016 utilizando datos de la estación de Monitoreo de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ubicada en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). De acuerdo a este diagnóstico, la calidad del aire de Mérida es en la mayor parte del tiempo buena, siendo las PM_{10} el único contaminante que ocasionalmente rebasa la respectiva Norma Mexicana de Calidad del Aire (NOM) (NOM-025-SSA1-2014) y con mayor frecuencia la respectiva guía de calidad del aire recomendada por la OMS. No obstante, sólo encuentra ocasionales “picos” de $PM_{2.5}$ que no llegan a rebasar la respectiva NOM, aunque sí logran rebasar la recomendación de la OMS para $PM_{2.5}$ (Figura 1.7)

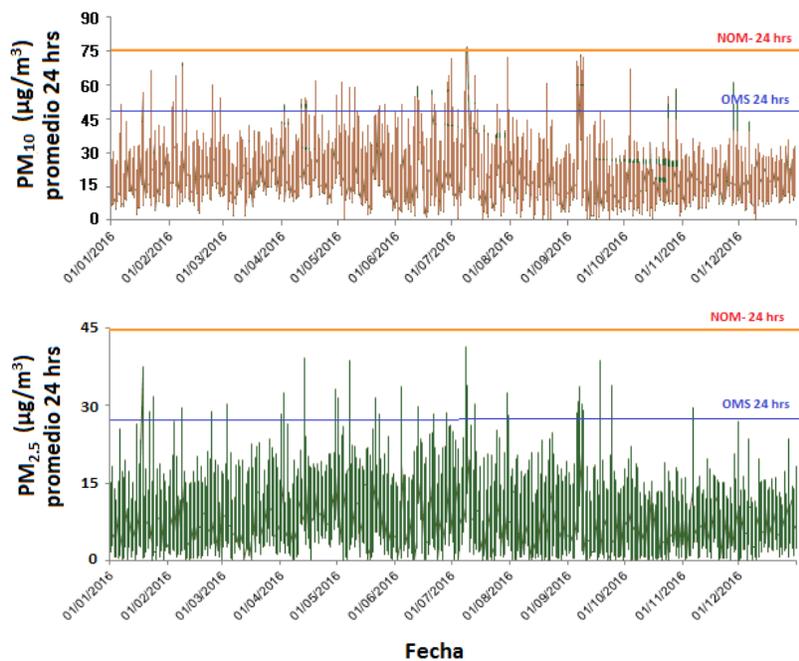


Figura 1.7. Series de tiempo de los promedios de 24 horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ registrados en la estación RUOA-Mérida en 2016. Las líneas rojas representan las normas de calidad del aire mexicanas para promedios de 24 horas y las líneas azules la guía recomendada por la Organización Mundial de la Salud. (Santamaría-Islas, 2019)

1.4.2 Morelia, Michoacán.

Uno de los estados que registra una cantidad considerable de incendios forestales y quemas agrícolas es Michoacán (Figura 1.3). El estado de Michoacán se encuentra localizado en la zona centro-oeste de la República Mexicana. La ciudad de Morelia se localiza en la zona norte-centro de Michoacán en el valle de Guayangareo, formado por un repliegue del Eje Neovolcánico Transversal y se encuentra rodeada de montañas que influyen directamente la dinámica del viento en la zona (figura 1.8). Los vientos dominantes proceden del SSO en la temporada seca caliente (marzo a junio) y del NNE, al finalizar la temporada seca fría (octubre a marzo), siendo variables en julio y agosto. La intensidad promedio del viento es de alrededor de 2 m/s. Además, el clima de la región (templado subhúmedo) favorece muchas actividades agrícolas, principalmente el cultivo de árboles frutales (SAGARPA, 2017). Morelia, además de ser la capital del estado, es cabecera del municipio homónimo. También es la más extensa del estado de Michoacán, con un área de 1,335.94 kilómetros cuadrados y una población de 784,776 habitantes según los resultados del Censo de Población y Vivienda 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Su Zona Metropolitana contaba con 911,960 habitantes en ese mismo año, ocupando el lugar 19 entre las mayores zonas metropolitanas del país (INEGI, 2017).

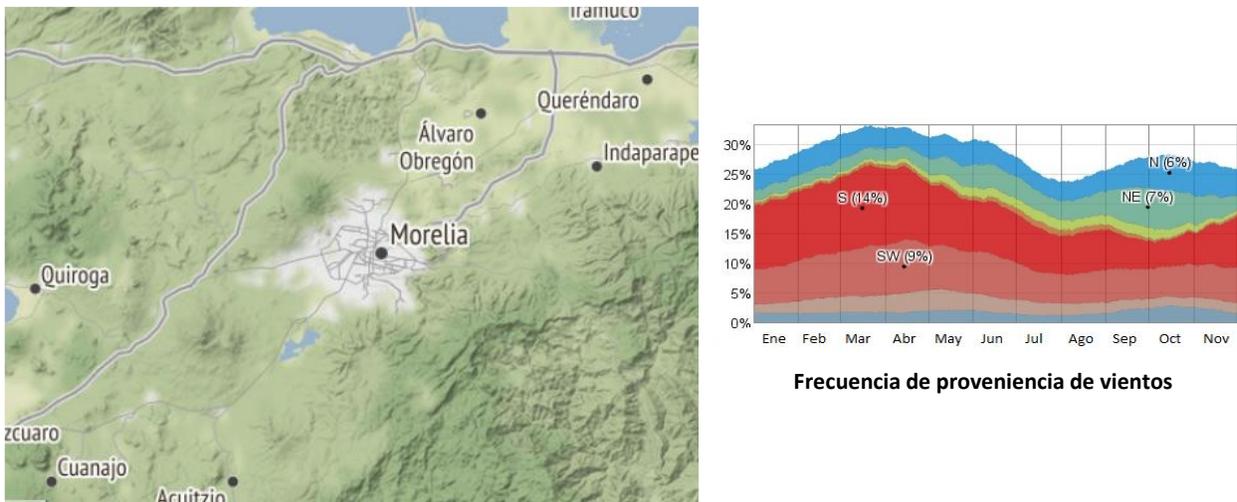


Figura 1.8. Localización de la Zona Metropolitana de Morelia y la distribución de frecuencia de la proveniencia de los vientos. (Adaptado de WeatherSpark, 2016)

De acuerdo al Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Michoacán 2015-2024, una de las actividades más importantes en Michoacán generadora de contaminación es la flota vehicular (ProAire, 2015). Según el Inventario de Emisiones de 2013 en Michoacán (tabla 1.3) existe una mayor emisión de NO_x y CO de las fuentes móviles.

Tabla 1.3. Inventario de Emisiones en Michoacán y la ciudad de Morelia, 2013 (Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán, 2013)

Fuente	Contaminante (Mg/año)						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	COV	CO	NH ₃
Área	24,420	17,328	1,232	16,692	135,030	116,453	53,115
Fijas	6,125	3,945	13,140	4,483	7,462	3,008	1,689
Móviles	2,887	2,743	3,104	103,665	82,123	895,868	1,481
Móviles no carreteras	<1	<1	9	249	27	291	NS
Total	33,433	24,017	17,486	125,360	224,643	1,015,622	56,286
Morelia	2,039	1,417	4,004	17,801	26,822	151,327	1,970

NS=No Significativo.

De acuerdo a este inventario, el Municipio de Morelia emite aproximadamente un 6% del total de las PM₁₀ y de las PM_{2.5} de todo el Estado, mientras que cerca del 14% del CO es asignado a Morelia.

Por otro lado, según la SAGARPA, Michoacán es el principal estado en el que la agricultura reditúa de forma favorable en la economía del país (SAGARPA, 2017). Michoacán es un estado con fuerte actividad agrícola como se muestra en la figura 1.9.

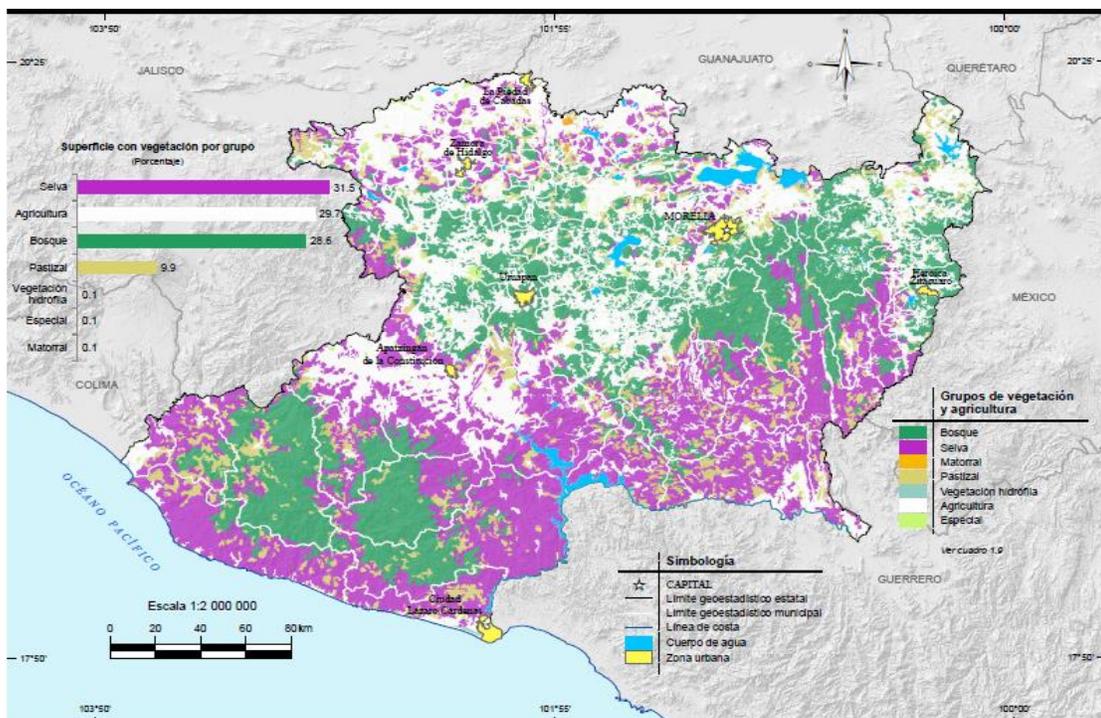


Figura 1.9. Distribución de uso de suelo en Michoacán. Las zonas marcadas con color blanco representan la actividad debida a la agricultura en el estado. (INEGI, 2017)

1.4.2.1 Estudios previos en Michoacán

El impacto que las emisiones generadas en la Zona Metropolitana de Morelia han tenido sobre la calidad del aire local ha sido monitoreado desde 2005 por parte de Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán (SUMA, 2016). En los años recientes, el Programa de Monitoreo Atmosférico para Morelia, Michoacán, opera dos estaciones de monitoreo atmosférico, ubicadas en el Centro Histórico y Ciudad Universitaria. Ambas estaciones de monitoreo miden los siguientes contaminantes: PM_{10} , O_3 , CO, bióxido de azufre (SO_2) y NO_2 , así como variables meteorológicas. La primera de estas estaciones fue establecida en el año 2005 y está ubicada en el primer cuadro de la ciudad de Morelia, y la segunda inició operaciones en agosto del 2013 y está ubicada en Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Como parte del programa, la UMSNH es quien está encargada de informar a la población, mediante página web, el estado de la calidad del aire en Morelia (<http://bios.biologia.umich.mx/monitoreo.html>).

Por otro lado, en 2016 el CCA de la UNAM en convenio con la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia, también de la UNAM, instaló dentro de este campus ubicado en la periferia sur de la ciudad una estación de monitoreo de calidad del aire como parte de la RUOA. Esta estación mide los cinco contaminantes criterio: O_3 , CO, SO_2 , NO_2 , PM_{10} , y $PM_{2.5}$, incluyendo intensidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar. Las estaciones de la RUOA tienen el propósito de contribuir al desarrollo de actividades académicas en el tema de la calidad del aire y cambio climático, así como apoyar actividades de investigación en estos temas. La estación es controlada vía remota por el CCA y los datos son disponibles al público en general a través de <https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=estaciones&st=more&id=9>.

De acuerdo a información de la SUMA, sus estaciones han tenido operaciones intermitentes debido a una serie de problemas operacionales, lo que ha limitado un seguimiento continuo de todos los parámetros de calidad del aire (SUMA, 2016). La Figura 1.10 muestra en forma gráfica la tendencia de las concentraciones de los cinco contaminantes criterio entre 2008 y 2015 para los cuales, de acuerdo a la SUMA, se cumplió con los criterios de suficiencia de datos excepto PM_{10} . En esta figura se incluye la tendencia hipotética que pudieron haber seguido las $PM_{2.5}$ que no son medidas por las estaciones de la SUMA, pero que se aproximaron asumiendo que la fracción de las $PM_{2.5}$ en las PM_{10} es de aproximadamente el 50% para el centro de México, excluyendo la CDMX (Navarro-Medina, 2018).

De la Figura 1.10 se identifica que han existido problemas de calidad del aire por O_3 , pues no se cumplió la Norma de calidad del aire de este contaminante (NOM-020-SSA1-2014), siendo 2011 el año con mayor problema. En lo que respecta al SO_2 , la NOM promedio anual para este contaminante no es rebasada en los años que se tuvieron datos, mientras las medias anuales de PM_{10} son menores a la respectiva NOM (NOM-022-SSA1-2010), de 2010 a 2015, en tanto que las $PM_{2.5}$ teóricas en sus promedios anuales parecen estar por arriba de la respectiva NOM anual (NOM-025-SSA1-2014).

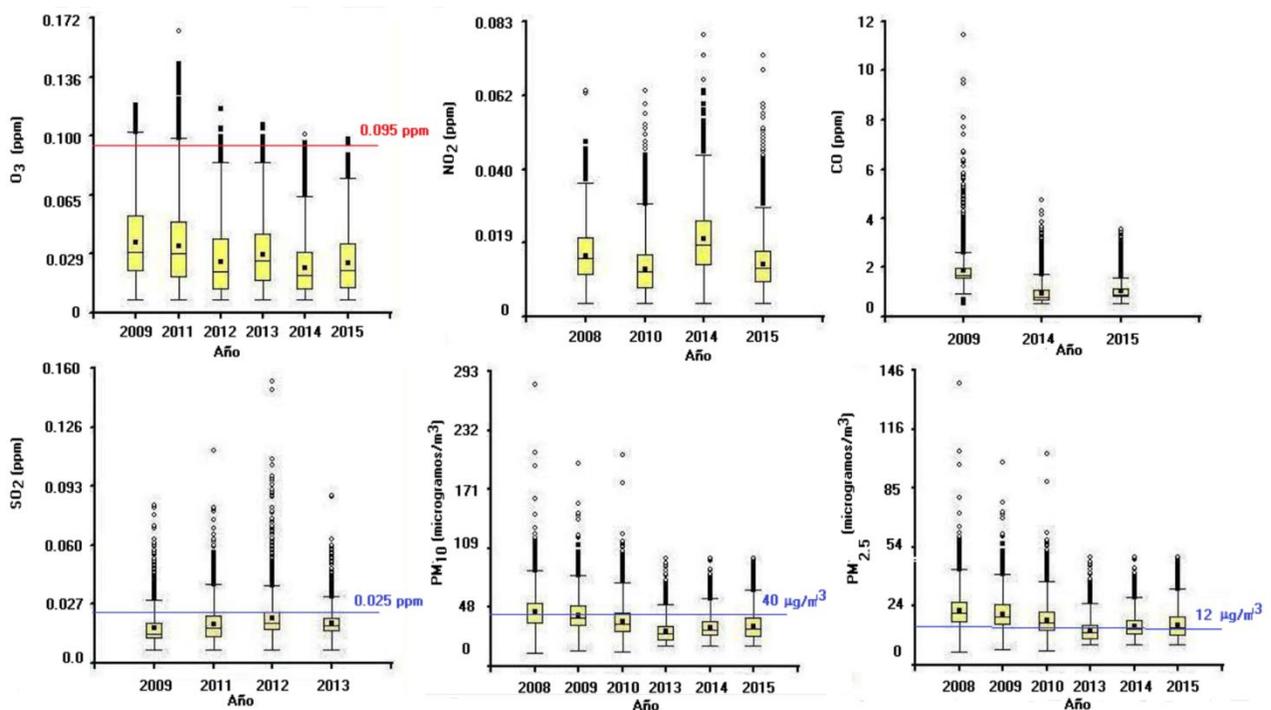


Figura 1.10. Gráficas de cajas y bigotes de la tendencia de las concentraciones en promedio horario de los contaminantes criterio O_3 , CO , SO_2 , NO_2 , PM_{10} , y el estimado de $PM_{2.5}$, registrados por las estaciones de monitoreo de la SUMA en Morelia, Michoacán entre 2008 y 2015. Las gráficas incluyen la comparación con respecto a las normas de calidad del aire aplicables al tipo de promedio utilizado y resultante del gráfico (línea en rojo: NOM para promedio horario; línea en azul: NOM para promedio anual). (Correa-García, 2016)

Otro estudio más reciente del diagnóstico de la calidad del aire con datos de la ENES Morelia en la zona sur de la ciudad muestra que precisamente el O_3 y las $PM_{2.5}$ siguen siendo los contaminantes con los niveles más altos. La Figura 1.11 presenta la serie de tiempo de los promedios horarios de ozono y los promedios de 24 horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidos en esta estación entre octubre de 2015 y octubre de 2017 (López-Terreros, 2019).

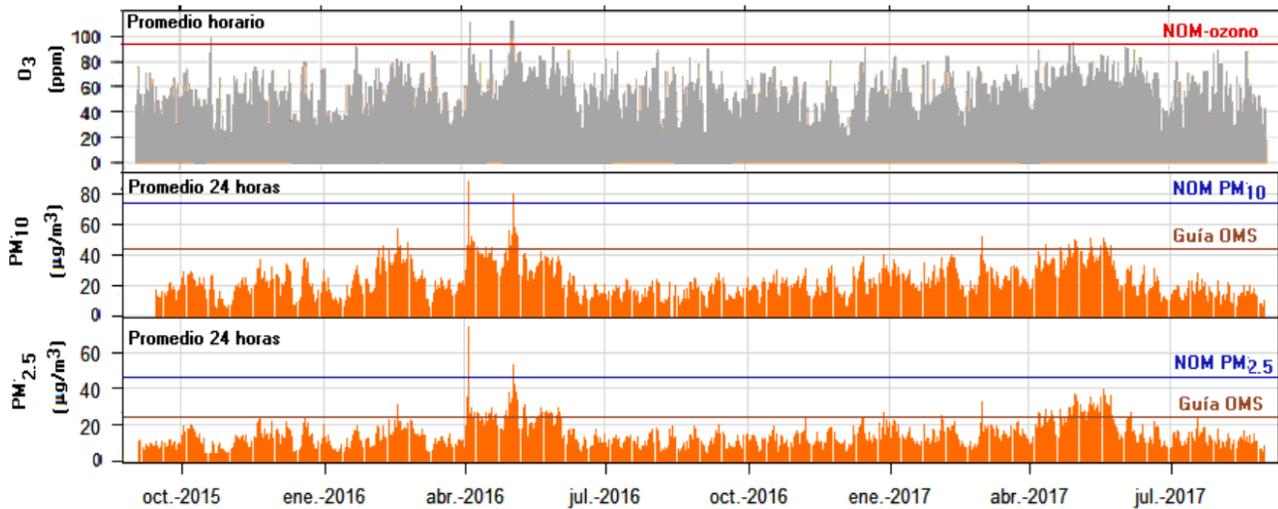


Figura 1.11. Series de tiempo de los promedios horarios de ozono y de promedios de 24 horas de PM₁₀ y PM_{2.5} registrados en la estación RUOA-Morelia entre octubre de 2015 y octubre de 2017. (López-Terreros, 2019)

De esta última figura se aprecia que en la temporada caliente (marzo-abril-mayo) los niveles de O₃ y de PM_{2.5} se incrementan notablemente llevando a exceder las respectivas NOM de calidad del aire, e incluso a rebasar en forma muy importante las guías de calidad del aire recomendadas por la OMS. La revisión de las rosas de vientos para esta temporada muestra que los vientos dominantes provinieron del sector S-SO (zona forestal y rural de Michoacán) y que los mayores niveles de estos contaminantes estuvieron asociados a la misma dirección (López-Terreros, 2019). Considerando que la formación de O₃ y de aerosoles secundarios de partículas (fracción fina) en plumas de quemas masivas de biomasa es el principal origen de estos contaminantes en zonas rurales (Yokelson et al.,2009), se puede inferir que el impacto en la calidad del aire por estos contaminantes en Morelia se debe precisamente al incremento en incendios forestales y quemas agrícolas que ocurre en esta temporada en Michoacán.

1.5 Justificación del estudio

Las quemas agrícolas de biomasa y los incendios forestales son una fuente importante de gases de efecto invernadero, afectan los ecosistemas y emiten grandes cantidades de otros contaminantes que pueden afectar la calidad del aire de zonas urbanas ubicadas en la dirección dominante de zonas de quemas e incendios. Se ha observado que en México ocurren una gran cantidad de incendios forestales y quemas agrícolas que se presentan en la temporada secas-calientes (marzo a junio). A la fecha, el impacto de estos incendios forestales y quemas de biomasa en la calidad del aire urbano ha sido evaluado con interés particular en la ZMCM, salvo algunos casos de interés más internacional que nacional, la magnitud

de este impacto ha sido prácticamente ignorado hacia otras poblaciones urbanas grandes y medias del país. La figura 1.12 muestra los incendios registrados en el periodo de octubre de 2016 a enero de 2017 y puede observarse que, a pesar de que la temporada fría-seca (octubre a marzo) no es cuando mayor número de incendios se registra, la región del Bajío y la Península de Yucatán registran una cantidad notable de incendios forestales y quemas agrícolas sin control.

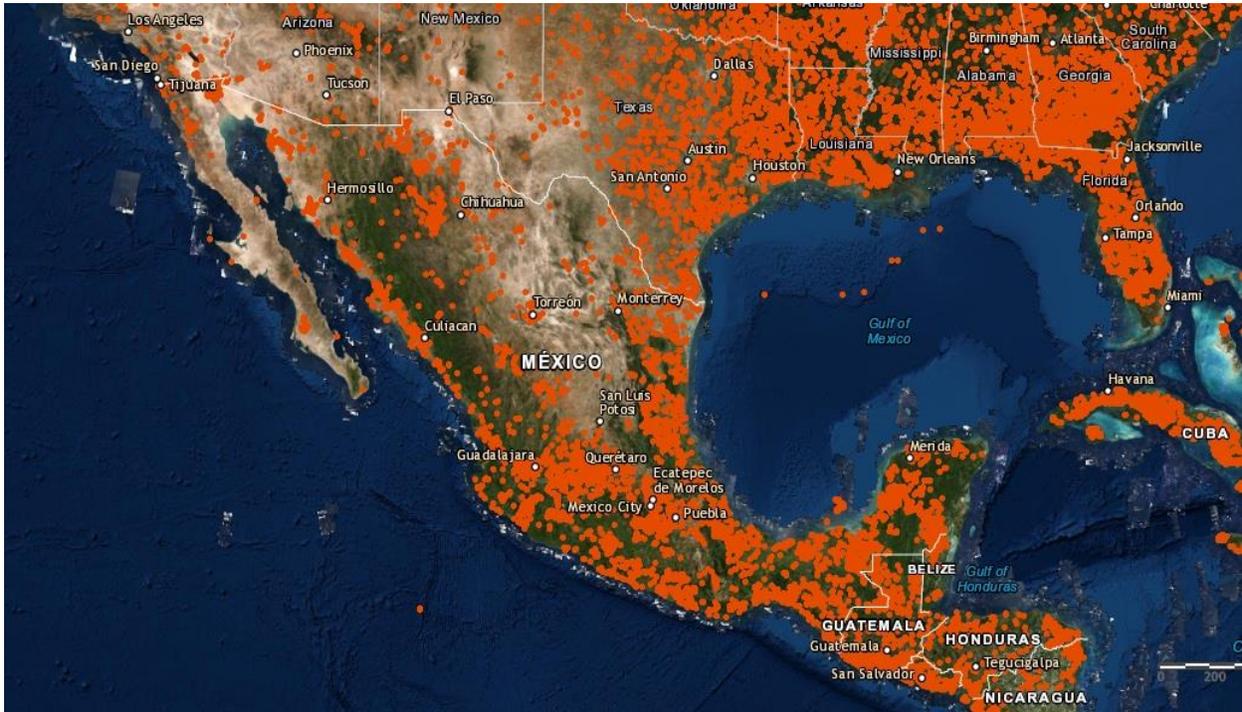


Figura 1.12. Mapa de incendios en México entre octubre de 2016 y enero de 2017. Cada punto naranja representa un incendio forestal registrado por la NASA. (<https://fires.globalforestwatch.org/>)

Por otro lado, la RUOA del CCA de la UNAM, cuenta con una red de varias estaciones de monitoreo en México donde a partir de 2016 se vienen realizando mediciones continuas de contaminantes como el CO, NOx y PM_{2.5}, entre otros, además de variables meteorológicas, lo que ofrece una oportunidad única para investigar que tan importante es la contribución de incendios forestales y quemas de biomasa en la calidad del aire de ciudades de tamaño mediano y que hasta la fecha es desconocido.

Sin embargo, una dificultad que enfrentan tanto las autoridades de gestión de la calidad del aire como investigadores sobre el tema es como identificar la contribución directa de las emisiones de estas quemas en la calidad del aire, así como su temporalidad y magnitud a partir del análisis de series de tiempo de datos de monitoreo de estaciones típicas en estas poblaciones.

Dada la magnitud de quemas agrícolas e incendios forestales en México, resulta importante investigar herramientas alternativas para identificar y verificar cuándo eventos de este tipo han contribuido al incremento de niveles de contaminación urbana con sólo el análisis de datos de monitoreo. De esta forma, se propone el método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ como primer diagnóstico para dos ciudades representativas de México: Mérida en Yucatán y Morelia en Michoacán.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

- Evaluar el uso del método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ en la identificación de eventos de contribuciones de $PM_{2.5}$ generadas por quemas de biomasa regionales en la calidad del aire típica de poblaciones urbanas medias: estudios caso: Mérida, Yucatán y Morelia Michoacán.

2.2 Objetivos particulares

- Obtener y validar la base de datos de $PM_{2.5}$ y CO de la estación de calidad del aire de la RUOA-MEDA para la ciudad de Mérida y la estación RUOA-MORE para la ciudad de Morelia.
- Obtener las series de tiempo y análisis de CO y $PM_{2.5}$ para Mérida y Morelia.
- Buscar correlaciones entre CO y $PM_{2.5}$ para la identificación de contribuciones de eventos de quemas de biomasa en las dos ciudades.
- Confirmar los eventos identificados con imágenes de satélite mediante MODIS, VIIRS y trayectorias de retroceso con HYSPLIT.
- Obtener los AERs (incrementos de los cocientes ambientales típicos $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$) de Mérida y Morelia para el periodo de estudio y los NERs (incrementos del cociente normalizados $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$) para los eventos identificados mediante el método de “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$.
- Correlacionar los resultados obtenidos del cálculo de NERs y AERs con las imágenes de satélite y la meteorología (rosas de contaminantes).
- Establecer un diagnóstico de la problemática en Mérida y en Morelia con la información obtenida.

3. METODOLOGÍA

3.1 Estaciones de monitoreo

La estación de monitoreo en Mérida, Yucatán, se encuentra ubicada dentro de la Facultad de Química de la UADY y forma parte de las estaciones de medición de la RUOA de la UNAM. La figura 3.1 muestra la ubicación de la estación de monitoreo. La estación en Mérida (RUOA-MEDA) cuenta con distintos equipos de medición continua para NO_x , O_3 , SO_2 , CO , CO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CH_4 , así como de meteorología. Se pueden obtener datos en tiempo real del monitoreo de contaminantes en diferentes resoluciones de tiempo, cada minuto, cada 5 minutos y cada hora.

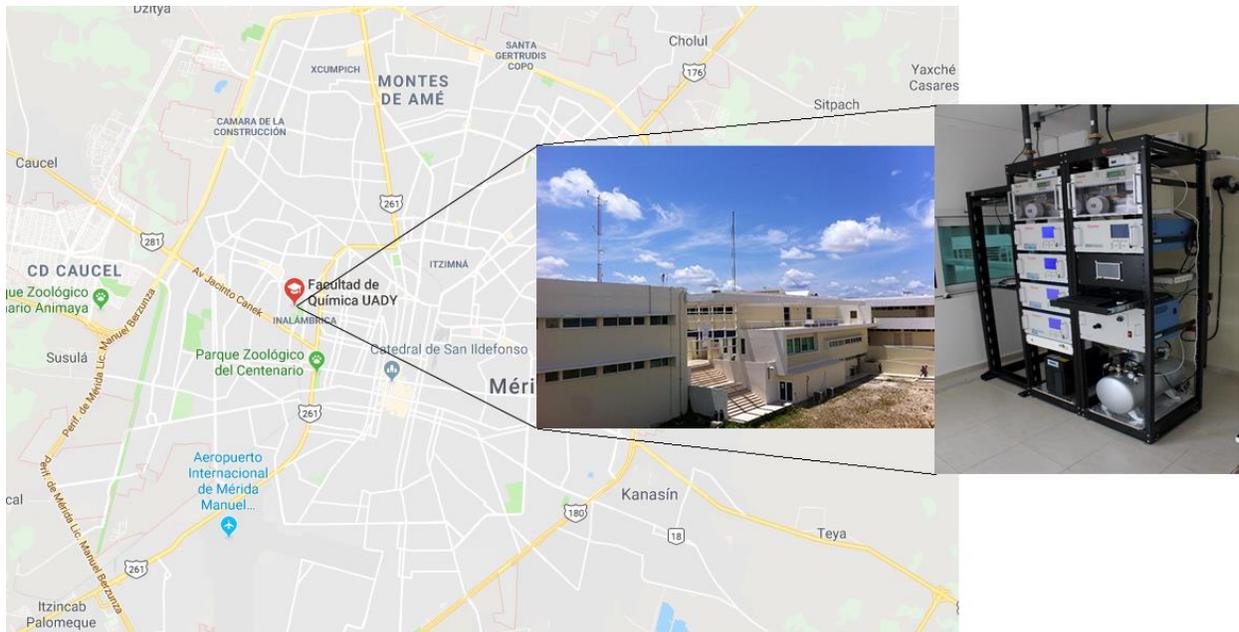


Figura 3.1. Ubicación de la estación de monitoreo RUOA-MEDA y detalles de su instrumentación en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán. (Mapa descargado de Google Maps, 2019)

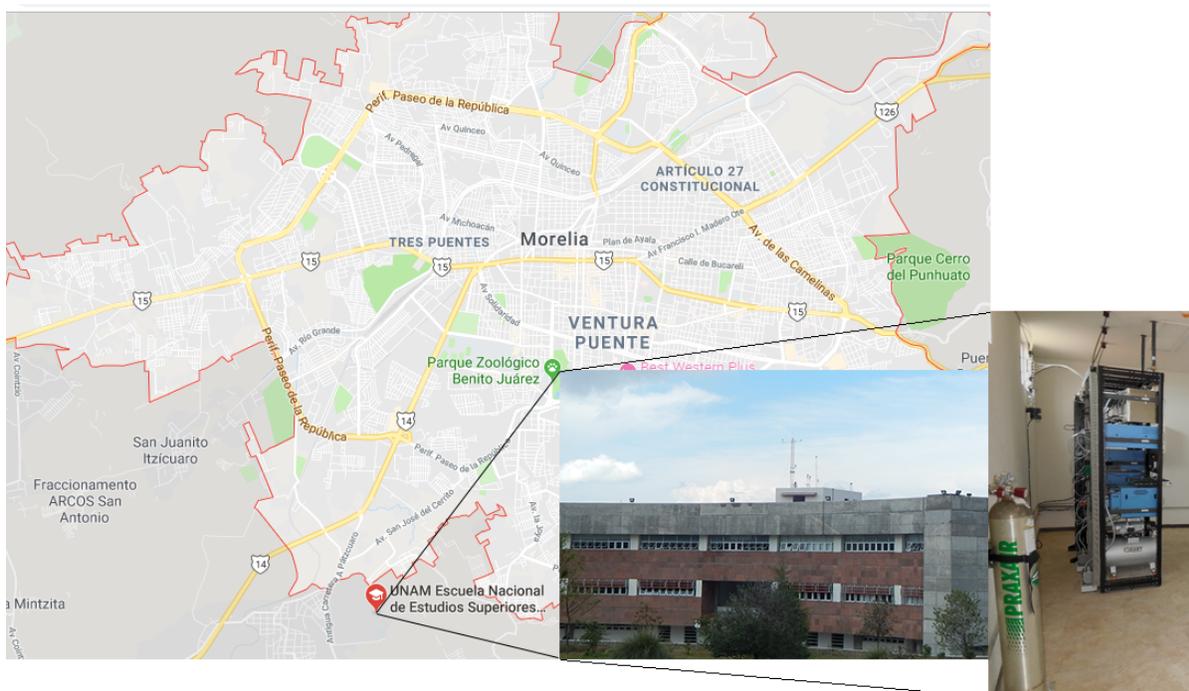


Figura 3.2. Ubicación de la estación de monitoreo RUOA-MORE y detalles de su instrumentación en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia de la UNAM. (Descargado de Google Maps, 2019)

La estación de la RUOA en Morelia (RUOA-MORE) se localiza dentro de la ENES Unidad Morelia justo al suroeste de la ciudad. La estación cuenta el mismo tipo de analizadores de gases criterio, O_3 , NO_2 , NO , SO_2 y CO y de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ así como de meteorología en tiempo real. Además, también se pueden obtener los datos en distintas resoluciones, 1 minuto, 5 minutos y datos horarios. La Tabla 3.1 presenta una descripción resumida de la instrumentación en ambas estaciones.

Los equipos de monitoreo empleados en ambas estaciones para $PM_{2.5}$ y CO resultan ser el mismo modelo. El analizador de CO (*Thermo Scientific Model 48i*) opera por el principio de infrarrojo no dispersivo (Figura 3.3), el cual considera que el CO absorbe radiación en el infrarrojo a una longitud de onda de $4.6 \mu m$. Se introduce la muestra a una cámara de reacción en donde se refleja un haz de luz infrarroja a través de espejos colocados dentro de ésta, logrando que la muestra absorba parte de la energía. Se mide la diferencia entre la señal detectada cuando la muestra absorbe energía y la señal de referencia. Dado que esta técnica no es una medición lineal, se tiene que transformar la señal de salida en una medición lineal, para ello se usa un modulador de la señal recibida por el detector. Con una curva de calibración que se encuentra almacenada internamente puede convertirse la señal eléctrica en relación de mezcla (*Thermo Scientific, 2007*).

Tabla 3.1. Instrumentos y métodos de monitoreo de las estaciones de monitoreo de calidad del aire RUOA-Mérida y Morelia.

Parámetro	Unidades de Medición	Método	Equipo/Referencia
Gases			
O ₃	ppb	Fotometría de absorción en UV (límite de detección 0.03 ppb)	Thermo Scientific
CO	ppm	Infrarrojo no-dispersivo (límite de detección 0.04 ppm)	Thermo Scientific
NO, NO ₂	ppb	Quimioluminiscencia (límite de detección 0.4 ppb)	Thermo Scientific
SO ₂	ppb	Fluorescencia en ultravioleta (0.5 ppb)	Thermo Scientific
Partículas			
PM _{2.5}	µg/m ³	Separación de tamaño con cabezal EPA y medición por atenuación de radiación beta (< 4 µg/m ³ @ promedio 1-hora)	Thermo Scientific
PM ₁₀	µg/m ³	Separación de tamaño con cabezal EPA y medición por atenuación de radiación beta (< 4 µg/m ³ @ promedio 1-hora)	Thermo Scientific
Parámetros meteorológicos:			
Presión atmosférica	hPa	Medición de la diferencia de potencial existente entre las placas de un capacitor (silicón) y la carga eléctrica almacenada (resolución: 0.1 hPa).	Lufft Model WS600
Dirección de viento	°	Anemómetro ultrasónico con tres transductores en plano horizontal (exactitud: <3°)	Lufft Model WS600
Intensidad de viento	m/s	Anemómetro ultrasónico (límite mínimo de activación: 0.3 m/s)	Lufft Model WS600
Temperatura	°C	Medición de la resistencia al cambio de temperatura de un metal por un termistor (resolución: 1°C).	Lufft Model WS600

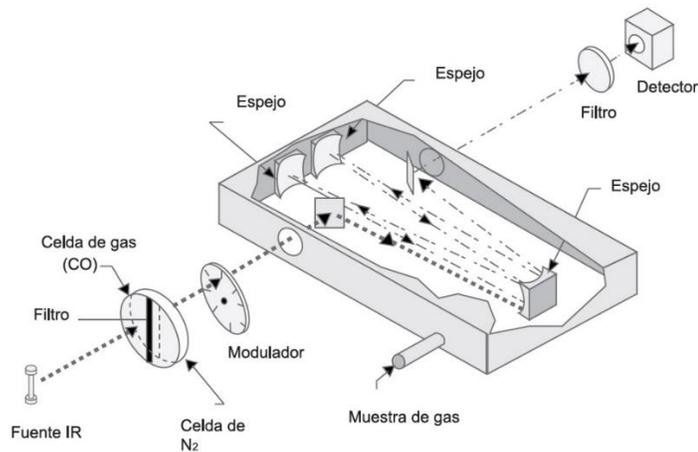


Figura 3.3. Esquema de funcionamiento de un analizador de CO por infrarrojo no dispersivo/filtro de correlación. (INECC, 2019)

En el caso de monitoreo de $PM_{2.5}$ se usó un monitor de partículas (*Thermo Scientific Model-FH62C14*) que opera bajo el principio de atenuación de radiación beta (Figura 3.4). La muestra introducida se deposita en un filtro de fibra de vidrio continuamente y de manera intermitente, esto significa que la muestra se recolecta en intervalos de tiempo establecidos previamente. Se hace pasar un haz de radiación beta continuamente sobre el área de la muestra recolectada, lo que reduce la intensidad de dicho haz. La señal detectada debido a la disminución del haz de radiación es medida por una cámara de ionización como detector, esta señal es transformada en una señal eléctrica y como resultado se obtiene una cantidad de masa de la muestra. El equipo es capaz de medir el volumen de la muestra y las condiciones de presión y temperatura, con estas variables, el equipo muestra concentraciones de partículas en tiempo real (*Thermo Scientific, 2010*).

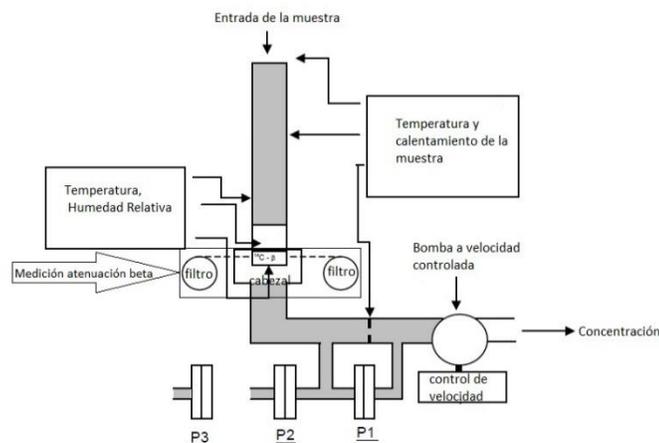


Figura 3.4. Esquema de funcionamiento de un monitor de partículas por atenuación de radiación beta. (Adaptado de Manual de equipo *Thermo Scientific-FH62C14*, 2010)

Los analizadores en ambas estaciones son sometidos a continuas verificaciones y/o en su caso recalibraciones por personal académico del sitio local de acuerdo a los lineamientos de la US-EPA y del CCA de la UNAM. Los datos son recuperados vía remota del *datalogger* (adquisidores de datos) donde se almacena la información y son validados siguiendo métodos también definidos por el CCA-UNAM.

3.2 Método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$

De acuerdo a Laing et al., (2017), cuando existen eventos de quemas forestales y agrícolas es posible que las plumas de estas quemas contribuyan en la calidad del aire de zonas urbanas y cuya influencia puede hasta cierto punto, ser identificada. Para ello se propone el método del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ a partir de mediciones obtenidas en zonas urbanas. Este método considera la obtención de tres cocientes: los NERs (incrementos de los cocientes normalizados, por sus siglas en inglés: *Normalized Enhancement Ratios*), los AERs (incrementos de los cocientes ambientales, por sus siglas en inglés: *Ambient Enhancement Ratios*) y los ERs (incremento en los cocientes, por sus siglas en inglés: *Enhancement Ratios*).

Los NERs se obtienen a partir de mediciones obtenidas en la zona de estudio en donde se sospecha ocurrió un evento contribuyente de plumas de emisiones de quema de biomasa (Andreae and Merlet, 2001; Briggs et al., 2016). Cuando existe un evento de quema de biomasa, dos especies X e Y pueden aumentar sustancialmente con respecto a la concentración de fondo. Los NERs representan el exceso en el aumento de una especie X tomando como referencia una especie Y, por tanto, los NERs pueden representarse como:

$$NER = \frac{\Delta X}{\Delta Y} \quad (E1)$$

La expresión E1 representa el cociente entre las especies X e Y. El Δ corresponde al exceso o el “incremento” entre la concentración de fondo y la obtenida debido a la quema de biomasa.

El cálculo de AERs resulta a partir del cociente de las dos especies X e Y, pero estos solo consideran la influencia de zonas urbanas, y su expresión es similar a la de los NERs. En ambos casos este cociente se obtiene del gráfico de X vs Y, con algunas consideraciones.

La secuencia de pasos que se sigue durante este método es la siguiente:

- I. Se seleccionan los posibles eventos, que pueden definirse como aquellos en los que existe una ocurrencia de concentraciones altas de algún contaminante (PM_{2.5} por ejemplo) y sospecha de incendios por quema de biomasa, a partir de las series de datos obtenidas en el periodo de monitoreo. Generalmente se correlacionan dos especies X e Y porque van ligadas en eventos donde hay quemados de biomasa como en el caso de CO y PM_{2.5}. La selección de los posibles eventos puede hacerse a partir de la detección de concentraciones elevadas anómalas observadas en las series de tiempo de las especies X e Y seleccionadas, en conjunto con los valores de referencia como criterio de selección, de las normas oficiales (límites máximos permisibles), las indicaciones de la OMS o de valores atípicos en los datos.
- II. Se pueden obtener los NERs de dos maneras (Yokelson, 2013): 1) a partir de la diferencia entre las especies medidas directamente en la pluma o en la fuente y la concentración de fondo como se muestra en E2; 2) La obtención de la pendiente de una regresión entre las especies X e Y durante el evento.

$$NER = \frac{X_{pluma} - X_{conc-fondo}}{Y_{pluma} - Y_{conc-fondo}} \quad (E2)$$

- III. Los AERs se obtienen a partir de la pendiente de la regresión entre las especies X e Y para datos horarios. El periodo representativo para este parámetro puede ser de una temporada o hasta 1 año y se usa solo el percentil 99 de los datos para mitigar la influencia de los posibles eventos locales.
- IV. Adicionalmente se pueden obtener los ERs pero estos solo son calculados a partir de inventarios de emisiones. Evidentemente muchos sitios no cuentan con estos, o incluso, pueden no estar bien validados, por lo que es difícil obtener este parámetro de comparación.
- V. Finalmente, los eventos que resulten con un incremento en los NERs razonablemente significativos se pueden verificar con una combinación entre imágenes de satélite y trayectorias de retroceso de masas de aire en donde pueden observarse si para un evento en particular existe ocurrencia de quema de biomasa.

3.3 Análisis de correlación “Reduced Major Axis (RMA)”

Algunos autores mencionan que los NERs y AERs, se pueden obtener por diferencias o por una regresión entre las especies. La regresión lineal por mínimos cuadrados es un método común para obtener una correlación entre series de datos x_i e y_i en los que cada medición y_i es una medición dependiente de x_i . En el caso de datos de calidad del aire esto no ocurre así porque cada serie x e y de datos son obtenidos de manera independiente, y en general estos datos siguen distribuciones de frecuencia sesgadas, por lo que este tipo de regresión no genera una línea de regresión realmente representativa sobre los datos monitoreados (Ayers, 2001).

Una regresión lineal involucra una minimización entre el cuadrado de la desviación estándar de la variable dependiente y la línea de tendencia $(y-Y)^2$. Esto significa que la desviación ocurre solo en esa dirección y como se muestra en la figura 3.5. Sin embargo, existe una regresión lineal llamada RMA (*Reduced Major Axis*) en donde se considera tanto la desviación que ocurre en x como en y .

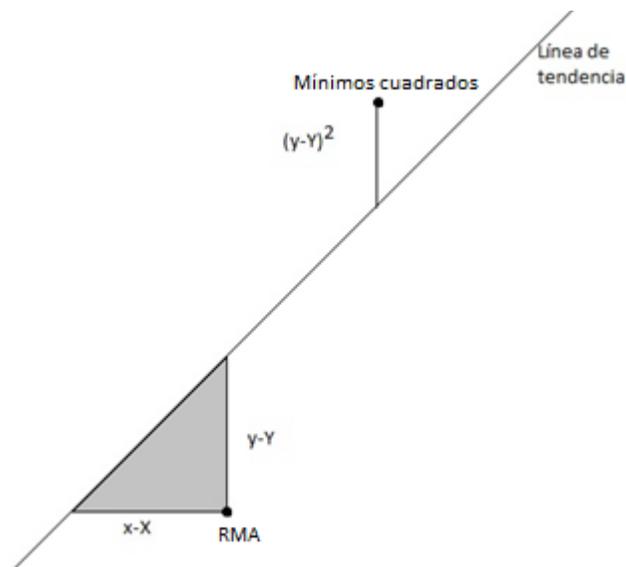


Figura 3.5. La regresión lineal por mínimos cuadrados solo minimiza el cuadrado de la desviación estándar $(y-Y)^2$ en la dirección y mientras que la regresión por RMA minimiza el producto de las desviaciones de x e y de la línea de tendencia. Figura adaptada de Ayers (2001) y Davis (1986).

La regresión por RMA considera que existe error en la medición entre las variables medidas X y las variables medidas Y por lo que hace la consideración de que son mediciones independientes. Este modelo de regresión es empleado para calidad del aire porque representa de mejor manera el comportamiento sobre todo de los datos obtenidos por mediciones independientes (Ayers, 2001). El análisis RMA se obtiene

al minimizar el área generada por el producto de la desviación en los ejes x e y , $(x-X)(y-Y)$, de un punto de los datos y la línea de tendencia, como se observa en la figura 3.5. Esto permite que la manipulación a partir de datos conocidos sea equivalente, es decir, si se requiere calcular x o y dentro de la ecuación de regresión (Smith, 2009).

El método de mínimos cuadrados da como resultado, pendientes mucho menores a 1 y ordenadas al origen mayores que cero mientras que RMA da como resultado, pendientes muy cercanas a uno y ordenadas al origen cercanas a cero (Ayers, 2001).

El modelo de regresión RMA es definido por una ecuación lineal ordinaria del tipo:

$$y_i = b_0 + b_1x_i \quad (\text{E3})$$

Donde b_0 es la ordenada al origen y b_1 es la pendiente. La pendiente b_1 para RMA (Davis, 2002), puede obtenerse por la expresión E4:

$$b_1 = \sqrt{\frac{SS_y}{SS_x}} \quad (\text{E4})$$

Donde SS_y y SS_x representan la suma de los cuadrados de las variables x e y . Estas sumas de cuadrados pueden obtenerse como:

$$SS_x = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (\text{E5})$$

$$SS_y = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (\text{E6})$$

La pendiente en RMA se representa como el cociente del cuadrado de las sumas de x e y mientras que en regresión por mínimos cuadrados se obtiene a partir del cociente de la suma del producto de la variable x por la variable y dividido por la suma en x o en y .

La ordenada al origen b_0 para RMA se obtiene como de manera similar que en mínimos cuadrados:

$$b_0 = y_i - b_1x_i \quad (\text{E7})$$

Por otra parte, el coeficiente de determinación para RMA puede obtenerse mediante la expresión siguiente:

$$r^2 = \frac{SS_{xy}}{SS_x SS_y} \quad (\text{E8})$$

Donde el producto de la suma de las variables x e y se puede obtener como:

$$SS_{xy} = \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \quad (\text{E9})$$

3.4 Validación y análisis de datos de calidad del aire

Se puede disponer de las bases de datos de monitoreo en cualquier momento por medio de los *dataloggers*. Por muchas cuestiones los datos crudos obtenidos de los *dataloggers* no siempre representan adecuadamente el comportamiento real. Esto se debe a muchas cuestiones: errores electrónicos en el analizador, errores de calibración, errores derivados de la operación de los analizadores (flujo, presión, temperatura, etc.) o incluso de manipulación de los mismos. Derivado de esto, se tienen errores comunes en las bases de datos. Éstos van desde variaciones en la pendiente, valores muy por arriba o por debajo de la línea base o datos faltantes.

Adicionalmente a estas correcciones, se eliminan los valores atípicos que corresponden a eventos aislados y que no representan la tendencia de los datos obtenidos. Estas correcciones fueron realizadas de acuerdo a lo establecido por las normas vigentes y a los criterios del departamento de Físicoquímica de la Atmósfera del CCA (FQ-CCA).

Una vez corregidos los errores se realiza un análisis exploratorio de datos (AED) que consiste en un análisis de los datos previo a un análisis estadístico más profundo con la finalidad de tener un entendimiento básico de los datos y de las posibles correlaciones entre las variables que se van a analizar. Dentro de este primer análisis se incluyen las series de tiempo de los datos, cálculo de percentiles, rosas de vientos y de algunos parámetros estadísticos.

3.5 Criterios para selección de eventos

Existen 3 periodos de estudio para las dos ciudades seleccionadas. En el caso de Mérida existe un periodo de octubre de 2016 a enero de 2017 en donde se tienen temporadas bajas en incendios. Por otra parte, se cubre el periodo de febrero de 2017 a septiembre de 2017, tanto para Mérida, así como para Morelia. Este periodo corresponde a la temporada alta de incendios forestales y termina justo antes de la temporada de lluvias en México. Se sabe que existe una correlación muy grande entre CO y PM_{2.5} (Laing, 2017) por lo que se observaron las series de tiempo correspondientes a estos dos compuestos y donde existen comportamientos similares se puede obtener un posible evento de quema de biomasa con los datos que se encuentran disponibles hasta este momento.

3.5.1 Rosas de vientos y de contaminantes

Adicionalmente se elaboraron rosas de contaminantes y rosas de vientos para CO, PM_{2.5} y PM_{2.5}/CO para observar la dirección de la que provienen estos contaminantes, así como la frecuencia de las concentraciones de los mismos. Las rosas de vientos muestran la dirección, la velocidad e incluso la concentración de un contaminante en el viento. Pero éstas solo representan, en general, de donde dominan los vientos durante un periodo en particular, es decir, solo hacen referencia de donde vino el viento mayormente durante ese periodo. No se puede obtener más información y para efectos de esta investigación se requiere conocer desde donde viene el viento incluso horas antes del evento analizado,

3.5.2 Construcción de trayectorias con HYSPLYT

Las trayectorias de viento representan el movimiento del viento de un periodo en particular. Existen muchos modelos que pueden construir este tipo de trayectorias. Para efectos de esta investigación se usó el modelo de HYSPLIT de la NOAA. Este modelo tiene la facilidad de calcular trayectorias tanto simples como de dispersión de contaminantes y simulaciones de depósito.

HYSPLIT es un modelo Lagrangiano que emplea una derivada total como solución del sistema en donde se permite estimar una solución sobre una trayectoria. Esto se logra por la contribución de pequeñas masas de contaminantes o de aire que se transportan en una zona, éstas se van sumando y se va realizando una pequeña contribución hasta que se genera una trayectoria del avance de dichas masas de aire o de partículas. Esto se realiza mediante el supuesto de que una partícula se deja llevar pasivamente por el aire.

El modelo de HYSPLIT está disponible a través de la NOAA *Air Resources Laboratory* en línea (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

El modelo de meteorología empleado para el cálculo de trayectoria en HYSPLIT es NAM-12km (*The North American Mesoscale Forecast System*) el cual se emplea en muchos centros de predicción ambiental ya que cuenta con una amplia base de datos y es uno de los modelos mejor representativos de América del Norte. Este modelo permite realizar trayectorias a diferentes alturas durante los periodos de tiempo analizados. La altura empleada durante esta investigación es de 50 m sobre el nivel suelo. Esta altura considera la influencia y el movimiento del viento en la superficie. Los periodos de las trayectorias varían según el evento analizado, estos van a partir de 12 horas en promedio y hasta 48 horas (Anexo I). Las trayectorias se realizaron contemplando cada periodo de duración y para cada hora se realizó una nueva trayectoria sobre el punto de interés.

3.5.3 Uso de imágenes de satélite: MODIS y VIIRS

Además de las trayectorias de viento y de las rosas de vientos, existe otra herramienta que es muy útil en la identificación de eventos de incendios forestales. MODIS es un sensor lanzado a la plataforma *Terra* y *Aqua* del observatorio de la Tierra de la NASA (EOS). Esta herramienta observa la superficie de la Tierra de norte a sur en la mañana y de sur a norte por la tarde. Se obtienen datos en 36 bandas del espectro o grupos de longitudes de ondas. Estos datos son procesados y ayudan a entender los procesos que ocurren en la Tierra (NASA, 2019).

Debido a su construcción MODIS puede identificar muchos eventos y representarlos en imágenes de satélite de todo el mundo. Muchas de las herramientas son empleadas en calidad del aire porque incluyen el comportamiento de contaminantes atmosféricos, de variables meteorológicas o de propiedades como el calor. MODIS posee una extensa base de datos que se actualiza diariamente. Dentro de estas bases de datos se encuentran registros de incendios forestales los cuales se detectan a partir del efecto térmico que se produce en la Tierra y que el sensor es capaz de ver. Estos eventos son representados por puntos en un mapa y en la ubicación establecida, donde cada punto rojo corresponde a un posible incendio (figura 3.6).

Por otra parte, se encuentra VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) que trabaja en conjunto con MODIS para proveer imágenes de satélite en la detección de incendios forestales. Mientras MODIS tiene una resolución mínima de distancia a 1 km con respecto a la toma de satélite, VIIRS puede generar imágenes con una resolución de hasta 375 m (Schroeder et al., 2014). Esto permite que VIIRS tenga resultados más fieles sobre áreas más pequeñas y provee un mejor mapeo sobre áreas de gran longitud.

Los productos finales obtenidos, tanto de MODIS como de VIIRS, son las imágenes de los sitios de muestreo en las que se observan los posibles incendios detectados por ambos sensores, estos son representados con puntos rojos o naranjas sobre mapas obtenidos de la NASA.

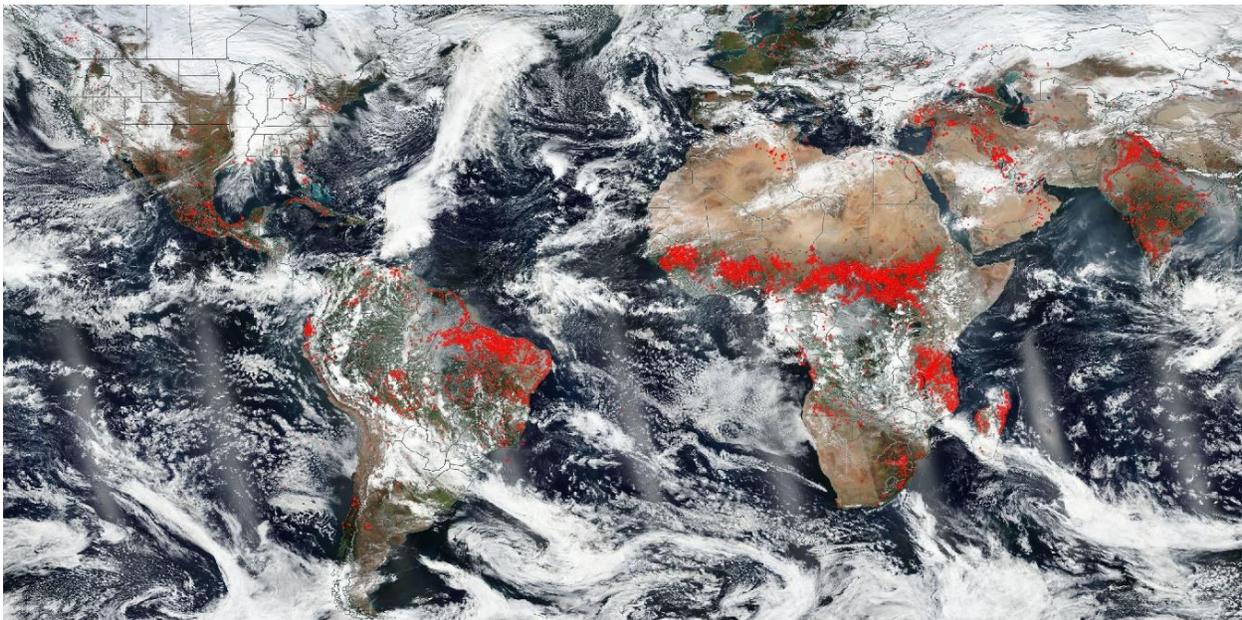


Figura 3.6. Imagen obtenida con MODIS para el 28 de noviembre de 2016. Los puntos rojos representan incendios registrados para este día.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Series de tiempo de PM_{2.5} y CO

Las figuras siguientes muestran las series de tiempo para CO y PM_{2.5} en promedios horarios y las rosas de vientos de los 3 periodos monitoreados en ambas ciudades, así como las rosas de vientos de cada periodo. Los datos de CO son mostrados en ppbv para observar de mejor manera la tendencia de éste en comparación con PM_{2.5}.

Mérida octubre de 2016 a enero de 2017

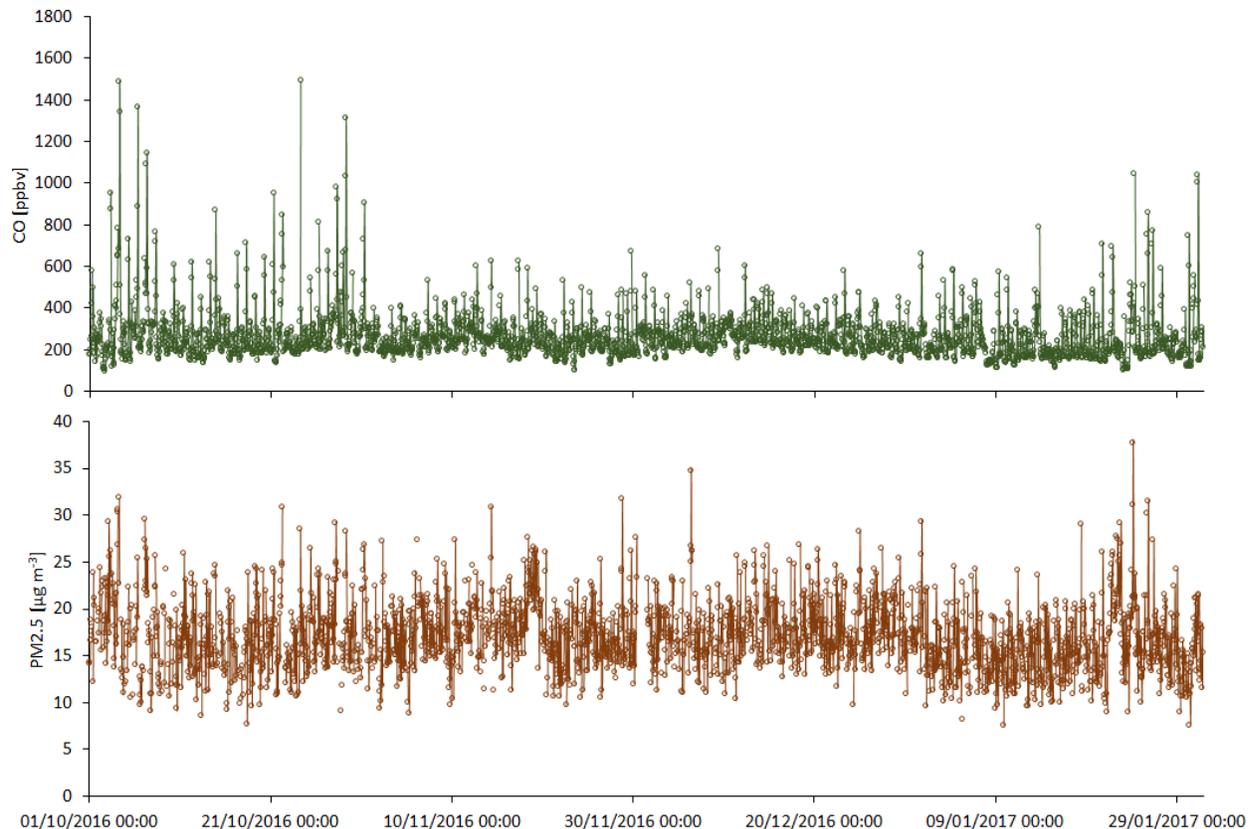


Figura 4.1. Series de tiempo en promedios horarios para CO y PM_{2.5} durante el periodo del 1 de octubre de 2016 al 1 de febrero de 2017 en Mérida, Yucatán.

La figura 4.1 muestra las series de tiempo para los datos obtenidos del 1 de octubre de 2016 al 1 de febrero de 2017 en Mérida, Yucatán para CO y PM_{2.5}. Como puede observarse hay un incremento de CO durante los últimos meses de 2016, esto es, durante octubre, noviembre y diciembre toda vez que en octubre y noviembre parece haber un aumento en la concentración de PM_{2.5}. Durante la mayor parte de enero se aprecian valores por abajo de las 800 ppb mientras que para PM_{2.5} la tendencia parece no cambiar mucho. Finalmente, para la última parte del mes de enero de 2017 se aprecia un ligero incremento en la concentración de CO a la vez que se observa un incremento para PM_{2.5}. Este periodo corresponde a una

temporada en donde se ha registrado la menor cantidad de incendios forestales. Esta temporada puede ser considerada como referencia en donde la influencia de quemas agrícolas es casi nula con respecto a otras épocas del año o a otros sitios.

La figura 4.2 muestra la rosa de vientos para el periodo de muestreo que va de octubre de 2016 a enero de 2017 en Mérida. Se puede observar que existe una dominancia de los vientos que provienen del arco NE-ENE-E. Aunque los vientos más fuertes parecen venir del arco N-NNE-NE que corresponden con el límite con el Golfo de México.

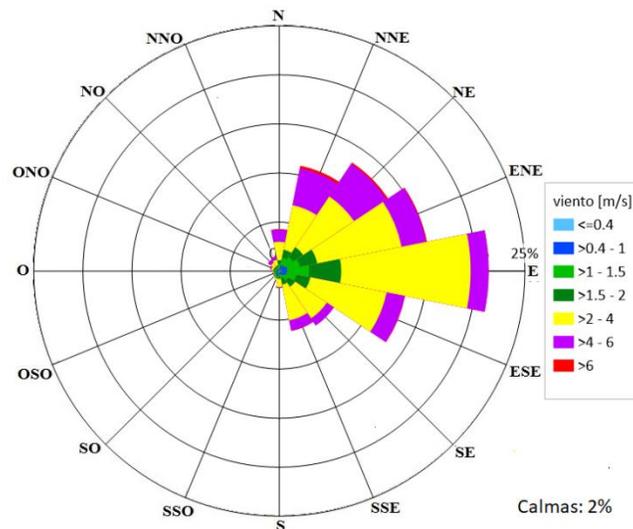


Figura 4.2. Rosa de vientos para el periodo de muestreo de octubre de 2016 a enero de 2017 en Mérida, Yucatán.

Mérida febrero de 2017 a septiembre de 2017

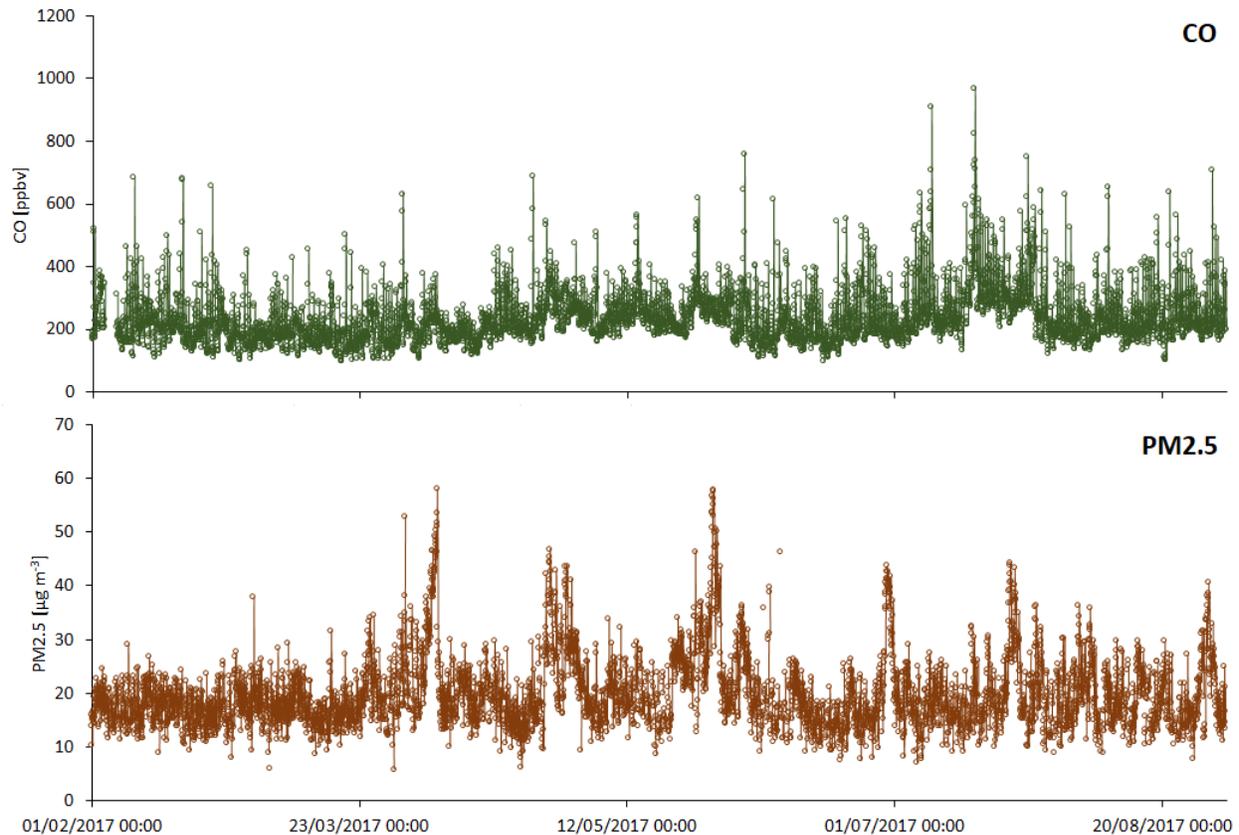


Figura 4.3. Series de tiempo en promedio horarios para CO y PM_{2.5} durante el periodo del 1 de febrero de 2017 al 1 de septiembre de 2017 en Mérida, Yucatán.

La figura 4.3 muestra las series de tiempo para CO y PM_{2.5} en el periodo que corresponde de febrero a septiembre de 2017, la temporada en la que se observan más incendios en México. Para CO, puede observarse que los primeros meses del año se observan relaciones de mezcla relativamente bajas, apenas por abajo de 800 ppbv, sin embargo, durante la última parte de mayo y hasta septiembre hay un incremento considerable, logrando alcanzar 1000 ppbv. Si bien las concentraciones son relativamente bajas, este comportamiento puede deberse a un evento aislado, de hecho, comparando este día con los datos de NO_x de la misma estación, se encontró que no hay una correlación entre estas especies (NO_x y CO), por lo que parece que este pico no está asociado a una quema, además no hubo precipitación durante este día. En el caso de PM_{2.5}, los primeros dos meses existe una tendencia a la baja mientras que durante abril, mayo y junio se observa un incremento considerable, de donde se pueden observar los picos más altos en cuanto a la concentración de partículas finas. Durante los meses de junio y julio, se observa un decremento con respecto a los dos meses anteriores, aunque la concentración de PM_{2.5} se mantiene un

tanto elevadas y son congruentes con CO. Se observa un comportamiento diferente al periodo de octubre a enero, en donde las concentraciones de $PM_{2.5}$ son más bajas al igual que ocurre para CO.

En el caso de la rosa de vientos (figura 4.4) se observa una dominancia del viento, para el periodo muestreado, del arco NNE-NE-E-ESE dónde los vientos más fuertes parecen provenir del arco NNE-NE y del sector ESE. Esto es congruente con estudios que se han realizado en la región, hay una influencia muy fuerte tanto del Golfo de México como del Caribe.

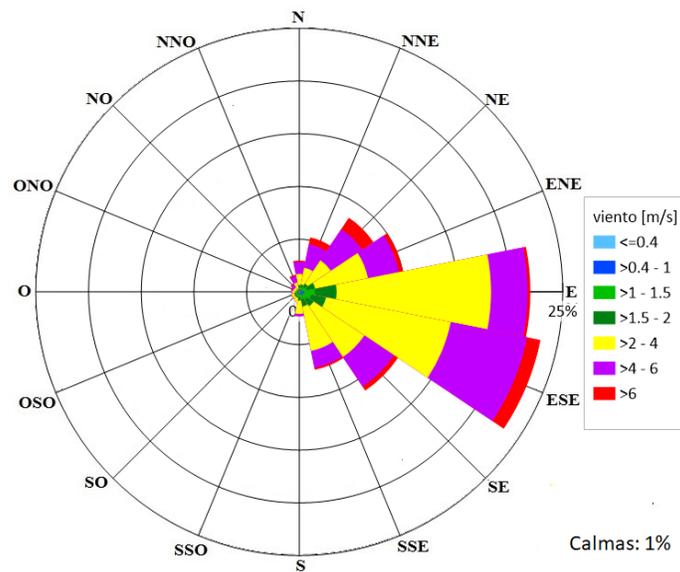


Figura 4.4. Rosa de vientos para el periodo muestreado de febrero de 2017 a septiembre de 2017 en Mérida, Yucatán.

Morelia febrero de 2017 a septiembre de 2017

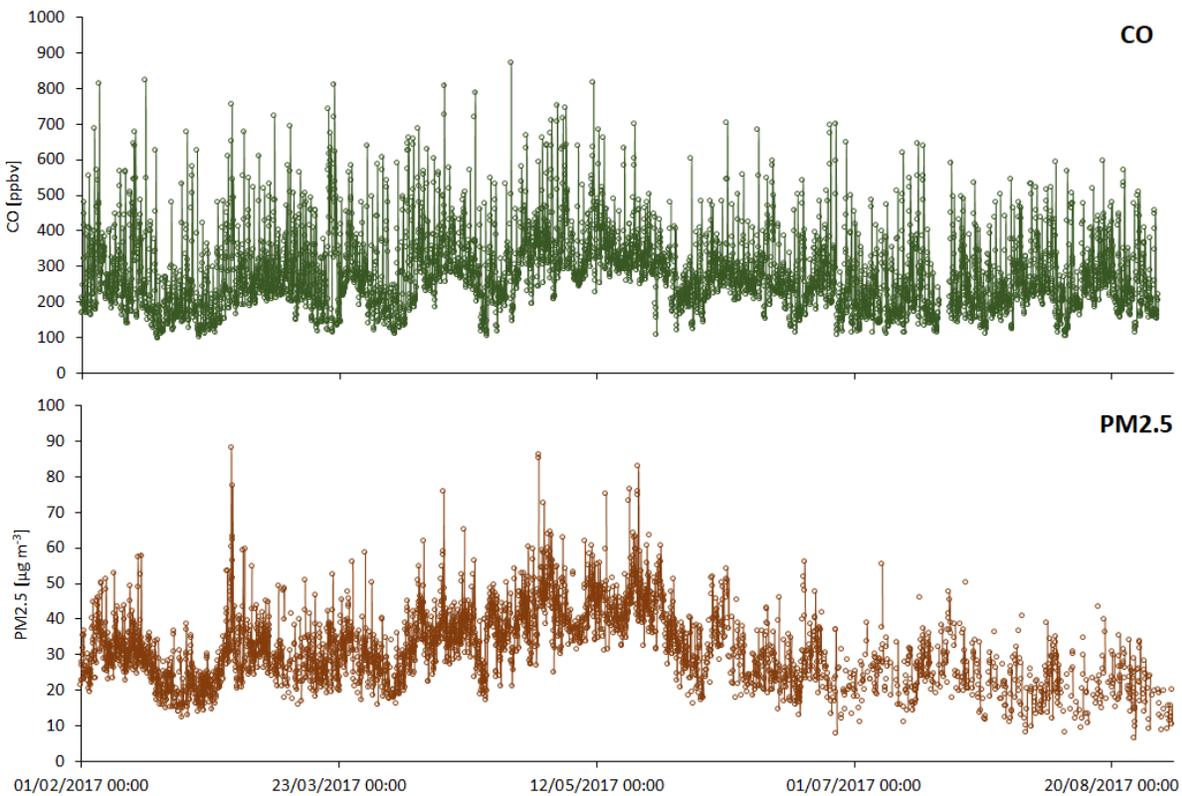


Figura 4.5. Series de tiempo en promedios horarios para CO y PM_{2.5} durante el periodo entre el 1 de febrero de 2017 y el 1 de septiembre de 2017 en Morelia, Michoacán.

La figura 4.5 muestra las series de tiempo para CO y PM_{2.5} durante los meses que van de febrero a septiembre de 2017 en Morelia. Para CO, puede observarse que la primera mitad del año (febrero a junio) existe una tendencia en incremento toda vez que para PM_{2.5}, durante el mismo periodo, también existe un incremento en la concentración de partículas finas. En el mes de mayo se observa, tanto para CO como para PM_{2.5}, un incremento mayor en la serie de tiempo mientras que para junio y julio existe una tendencia a disminuir. Morelia se caracteriza por ser una zona muy influenciada por quemas de biomasa la mayor parte del año, como se observa en la serie de tiempo de CO, a pesar que existen picos altos en la primera parte del año, a partir de la segunda mitad la tendencia no parece disminuir en gran medida.

En el caso del viento parece haber una gran influencia de las zonas que rodean la ciudad de Morelia. La figura 4.6 muestra la rosa de vientos del periodo de muestreo. Puede observarse que hay una gran influencia que provino del sector SSO-S, pero también del arco NNO-N-NNE. Este comportamiento se debe a la influencia que existe por las grandes zonas montañosas que rodean a Morelia hacia la región E y O y también de la influencia de los vientos que provienen de la zona S desde el pacífico.

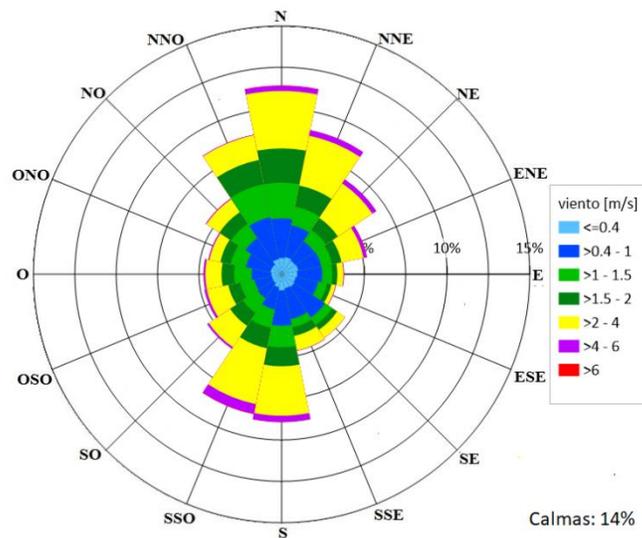


Figura 4.6. Rosa de vientos para el periodo de muestreo que va de febrero a septiembre de 2017 en Morelia, Michoacán.

4.2 Análisis de correlación de cocientes $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ representativos de las zonas urbanas y de eventos de quemas agrícolas

Durante el análisis de los datos obtenidos del monitoreo y del análisis estadístico previo, no puede determinarse un primer criterio de selección para todos los casos porque tanto Mérida como Morelia son dos zonas completamente diferentes en cuanto a actividades agrícolas. Para poder realizar un primer criterio, se hace una selección del percentil 99 de los datos en promedio horarios de $PM_{2.5}$ con el propósito de mitigar la influencia de estos eventos sobre el AER. Mientras tanto los eventos por arriba del percentil 99, al ser una cantidad considerable en el caso de Morelia, se han analizado con el método del incremento del cociente de $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$.

Tabla 4.1. Comparación de AERs de $PM_{2.5}/CO$ usando RMA y mínimos cuadrados para el percentil 99 de los datos para $PM_{2.5}$.

Método	Lugar	Sitio de muestreo	$PM_{2.5}/CO$ AER ($\mu g\ m^{-3}\ ppbv^{-1}$)	
			Pendiente	R^2
RMA	Yucatán	Mérida	0.0294	0.4044
Mínimos Cuadrados	Yucatán	Mérida	0.0077	0.0695

La tabla 4.1 muestra una comparación en el cálculo del AER mediante RMA y mínimos cuadrados. Puede verse, que el valor de la pendiente resulta mayor para RMA. Lo que sugiere que, en efecto, el método por RMA resulta ser una mejor aproximación a los resultados comparado con mínimos cuadrados. Incluso la ordenada al origen resulta ser mejor en el caso de RMA que en mínimos cuadrados, mientras en RMA se obtiene una ordenada de $9.04 \mu\text{g m}^{-3}$, para mínimos cuadrados se obtuvo una ordenada de $14.82 \mu\text{g m}^{-3}$ que resulta más alejada de cero. El parámetro que muestra que, RMA es mejor método que mínimos cuadrados, es el coeficiente de correlación, mientras que para RMA es de 0.4044, para mínimos cuadrados es caso cero (0.0695), esto muestra que se tiene una correlación muy buena entre $\text{PM}_{2.5}$ y CO por RMA y no por mínimos cuadrados.

Considerando valores de referencia arbitrarios representativos de eventos anormales de $\text{PM}_{2.5}$ de las 3 bases de datos, Mérida (octubre-enero), Mérida (febrero-septiembre) y Morelia (febrero-septiembre) se han elegido los valores de 30, 40 y $60 \mu\text{g m}^{-3}$ respectivamente para cada periodo, estos representan el límite superior del percentil 99 de cada base de datos y con ellos se han encontrado los datos siguientes para los AERs:

Tabla 4.2. AERs de los cocientes de $\text{PM}_{2.5}/\text{CO}$ para el periodo de muestreo en 2016 y 2017 en Mérida y Morelia.

Lugar	Sitio de muestreo	Periodo de muestreo	$\text{PM}_{2.5}/\text{CO}$ AER ($\mu\text{g m}^{-3}$ ppbv ⁻¹)	
			Pendiente	R ²
Yucatán	Mérida	octubre de 2016-enero de 2017	0.0294	0.4044
Yucatán	Mérida	febrero de 2017-septiembre de 2017	0.0705	0.3582
Michoacán	Morelia	febrero de 2017-septiembre de 2017	0.0847	0.4902

La tabla 4.2 muestra los AERs obtenidos para Mérida y Morelia. Se observa que la pendiente más grande corresponde a Morelia, así como como el coeficiente de correlación. En el caso de Mérida, para la temporada de incendios (febrero-septiembre), se observa que la pendiente no es tan baja en tanto que el coeficiente de correlación si lo es. En el caso de Mérida para el periodo octubre-enero, la pendiente es muy pequeña, aunque el coeficiente de correlación es más alto que para la otra temporada. La ordenada al origen que corresponde a Mérida (octubre-enero) es de $9.04 \mu\text{g m}^{-3}$, para Mérida (febrero-septiembre) es de $2.78 \mu\text{g m}^{-3}$ y para Morelia es de $6.69 \mu\text{g m}^{-3}$, de estos 3 datos el peor resulta ser Mérida para el periodo octubre-enero. Analizando los datos anteriores, la mejor correlación es la correspondiente a Morelia mientras que para Mérida en el periodo octubre-enero no se obtuvo una buena correlación.

Tabla 4.3. NERs para el cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ para los eventos seleccionados en Mérida y Morelia durante 2016 y 2017.

Sitio	Fecha	PM _{2.5} /CO NER ($\mu\text{g m}^{-3}$ ppbv ⁻¹)	
		Pendiente	R ²
Mérida	13/11/2016 20:00-14/11/16 23:00	0.0380	0.4350
Mérida	28/11/2016 05:00-29/11/16 05:00	0.0420	0.5950
Mérida	31/03/2017 00:00-01/04/2017 00:00	0.1430	0.4538
Mérida	27/04/2017 00:00-27/04/2017 25:55	0.1656	0.4682
Mérida	30/04/2017 00:00-01/05/2017 00:00	0.1807	0.7797
Mérida	24/05/2017 00:00-24/05/2017 23:00	0.0947	0.3418
Mérida	09/06/2017 00:00-09/06/2017 23:00	0.0883	0.3608
Morelia	01/03/2017 16:15-03/03/2017 00:00	0.0858	0.5107
Morelia	04/03/2017 08:00-04/03/2017 23:00	0.0859	0.4671
Morelia	08/04/2017 09:00-09/04/2017 00:00	0.0984	0.4652
Morelia	11/04/2017 14:00-12/04/2017 23:00	0.0741	0.6142
Morelia	15/04/2017 19:00-16/04/2017 16:00	0.1050	0.4277
Morelia	28/04/2017 15:00-29/04/2017 02:00	0.1425	0.3954
Morelia	29/04/2017 13:00-30/04/2017 06:00	0.1296	0.3410
Morelia	30/04/2017 08:00-03/05/2017 15:00	0.0865	0.4400
Morelia	13/05/2017 08:00-14/05/2017 08:00	0.1101	0.3455
Morelia	18/05/2017 04:00-20/05/2017 06:00	0.1189	0.4240

La tabla 4.3 muestra los NERs obtenidos por RMA para Mérida y Morelia. Para los NERs obtenidos en noviembre de 2016 en Mérida, parece no haber una relación tan estrecha entre CO y PM_{2.5}, las pendientes obtenidas parecen ser muy bajas en comparación a los demás NERs aunque los coeficientes de correlación no son tan bajos. El rango de los NERS obtenidos en ambas ciudades es de 0.038-0.1807 $\mu\text{g m}^{-3}$.

En el caso de Mérida en 2017, parecen haber varios eventos en los que se tienen pendientes más altas y coeficientes de correlación no tan bajos. Incluso, existe un evento que tiene un coeficiente de correlación por arriba de 0.65, una pendiente de 0.1807 $\mu\text{g m}^{-3}$ ppbv⁻¹ y una ordenada de 18.56 $\mu\text{g m}^{-3}$. Esto muestra que a pesar de que los datos obtenidos de CO y PM_{2.5} son altos, parecen tener una excelente correlación y que, de las tres bases de datos, en Mérida (febrero-septiembre) se obtuvo el coeficiente de correlación más alto.

En Morelia, la mayoría de los eventos parecen tener un coeficiente de correlación cercano a 0.4. Aun así, existe un evento en el que se tiene una muy buena correlación con un coeficiente de 0.61 mientras que la pendiente es de 0.0741 $\mu\text{g m}^{-3}$ ppbv⁻¹ y la ordenada al origen es de 14.91 $\mu\text{g m}^{-3}$ para este evento.

Puede observarse un segundo caso en el que existe un evento que dura aproximadamente 3 días, en cuyo caso la correlación ($R^2=0.5107$) parece disminuir por ello, pero la pendiente parece ser mayor que en el primer evento con un valor de $0.0858 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$.

La figura 4.7 muestra gráficas de cajas y bigotes para NERs y ERs obtenidos por autores anteriormente. Akagi et al., (2011) obtuvieron ERs $\Delta\text{PM}_{2.5}/\Delta\text{CO}$ de quemas de biomasa con un promedio de $0.16 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$ para climas templados. En 2012, Akagi presenta una investigación en la que determinan ERs para varios compuestos, además de $\text{PM}_{2.5}$, y el NER de una pluma de quema de biomasa en la que se encontró que existe una disminución de $\text{PM}_{2.5}$ en parcelas envejecidas después de 4 horas, aunque éstas partículas incrementan su tamaño debido a la incorporación de compuestos sobre éstas (Akagi et al., 2012). En ambos resultados se observan resultados en un radio no mayor a 140 km. En este trabajo el rango de distancia entre los incendios y las zonas de monitoreo es de 100-200 km. Esto resulta ser interesante porque parece existir una relación aparente en cuanto a la distancia de los incendios y los resultados dentro del método, de acuerdo a lo presentado en otros resultados (Wigder et al., 2013). En esta investigación no parece observarse lo encontrado por Wigder en su investigación en 2013 porque los resultados con mejores coeficientes de correlación (Tabla 4.3) se encuentran a distancias menores a 200 km. Wigder et al., (2013) analizaron diferentes ERs a distancias mayores a 740 km encontrando ERs muy bajos y mejores resultados a distancias más cercanas, sin embargo, este estudio estuvo centrado en partículas menores a $1 \mu\text{m}$ (PM_1). Weiss et al., (2007) obtuvieron resultados similares a los de Wigder en donde se analizaron PM_1 y se obtuvieron ERs promedio de $0.17 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$ en distancias menores a 140 km mientras que en distancias mayores a 740 km se obtuvieron ERs muy pequeños.

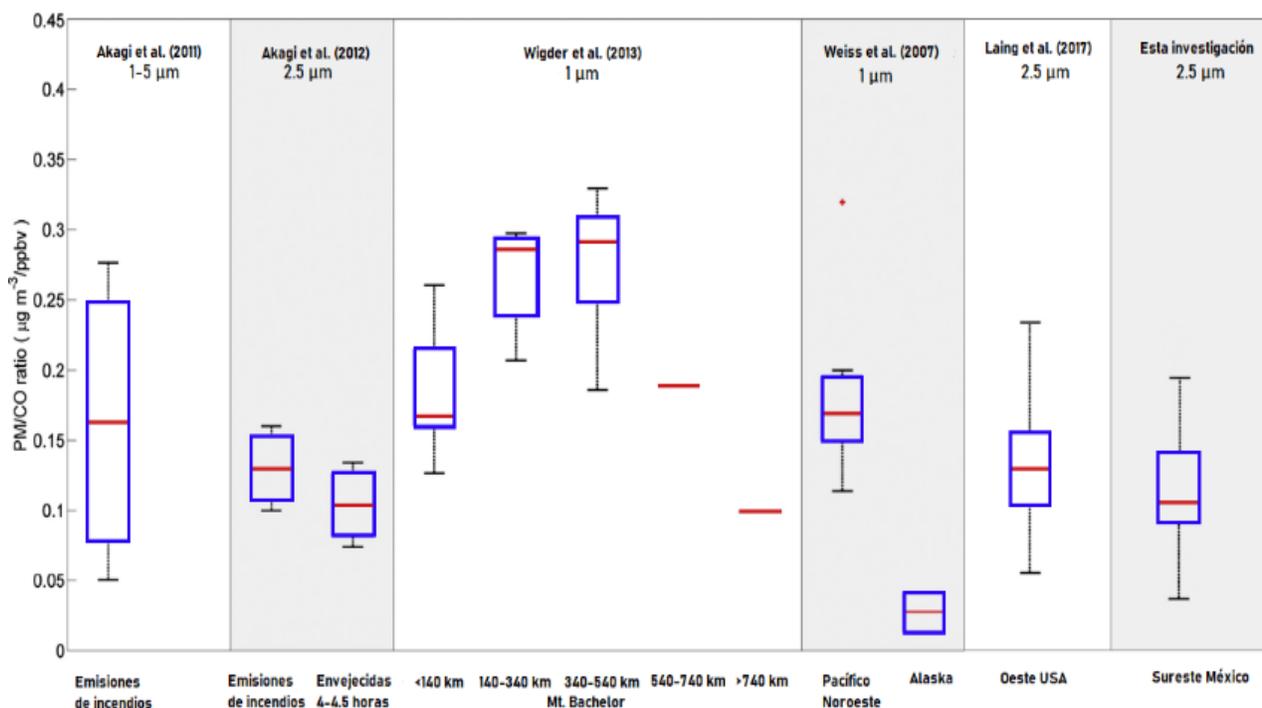


Figura 4.7. Gráfica de cajas y bigotes para ERs y NERs obtenidos en estudios anteriores para quemas de biomasa en distintos lugares. El punto rojo representa un dato atípico durante la investigación. (Adaptada de Wigder et al., 2013)

Laing et al., (2017) obtuvieron NERs muy cercanos a los resultados presentados en este trabajo, sin embargo, dicho estudio no contempla la distancia como factor importante sobre los resultados porque la mayor parte de ellos se obtuvieron a distancias muy cercanas de las zonas de monitoreo.

En el caso de esta investigación, las zonas de monitoreo no suelen estar tan alejadas de los incendios como es el caso de Morelia. Los resultados presentados para los NERs obtenidos por Laing en 2017 tienen un promedio de $0.125 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$ toda vez que el promedio de los NERs presentados en esta investigación es de $0.1 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$, ambos en el caso de $\text{PM}_{2.5}$.

Observando los resultados presentados en la figura 4.7 puede observarse que casi todos los NERs obtenidos se encuentran dentro del mismo rango, en el caso de investigaciones centradas en $\text{PM}_{2.5}$, el rango de valores de los ERs y NERs va de 0.1 a $0.15 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$, principalmente en distancias menores a 200 km por lo que esta investigación muestra buenos resultados tanto Mérida como en Morelia. Estos valores también son comparables con otros estudios en los que se usó el mismo método en quemas de biomasa (DeBell et al., 2004; Briggs et al., 2016; Dutkiewicz et al., 2011).

4.3 Verificación de eventos

La figura 4.8 muestra la gráfica de dispersión para los eventos de Mérida y Morelia en 2016 y 2017, en ella se observan los AERs y los NERs de ambas ciudades.

La figura correspondiente a Mérida (octubre-enero) parece mostrar que los eventos asociados caen dentro del método porque estos se encuentran ligeramente por encima del AER a pesar de que de la correlación es un tanto baja. En Mérida (febrero-septiembre) parece ocurrir lo mismo con los eventos seleccionados en dónde la pendiente parece estar por encima del AER. Los eventos con mejor correlación (marcados en negro en la tabla 4.3) son los que se emplearan en el análisis. Aunque exista una baja correlación en el método, se observa que éste funciona adecuadamente, aunque este método es sensible debido a contribuciones sobre las concentraciones de fondo, principalmente en el caso de CO, por lo que la ubicación podría implicar una dificultad en el caso de Mérida porque la estación de monitoreo se encuentra dentro de la ciudad. Las concentraciones de fondo se ven afectadas principalmente por las emisiones vehiculares y las correlaciones obtenidas pueden ser menores por este efecto, sobre todo para datos obtenidos de lugares cercanos a vías terrestres como carreteras.

En el caso de Morelia, parece que el método funciona de manera adecuada para los eventos presentados en la figura 4.8. En este sitio se tuvo uno de los eventos con mayor correlación ($R^2=0.61$) que parecen coincidir con el AER. Otro punto de interés es que, los meses de abril y mayo, resultan ser los más afectados por este tipo de eventos de quemados de biomasa y corresponden a la temporada de incendios en México (CENAPRED, 2019). Además, puede observarse que a pesar de que el evento con mejor correlación en Morelia es muy cercano comparado con el de Mérida, la pendiente parece ser muy diferente, lo que sugiere la influencia de otros factores, como las emisiones vehiculares o la ocurrencia de eventos de quemados de biomasa en exceso y que pueden provenir de distintos sectores del país (como en el caso de Morelia) generando una dificultad para diferenciar entre las emisiones por quemados de biomasa y las que provienen de procesos derivados de las actividades diarias. Incluso, en Morelia no se aprecia de manera obvia una diferencia significativa entre las líneas (figura 4.8) de los NERs y el AER a pesar de que los resultados obtenidos son similares a otros estudios. Esto sugiere que el sitio representa un factor interesante en este método porque en Morelia existe mucha actividad forestal que proviene de varios sectores alrededor de la ciudad. Esto se ve reflejado en las series de tiempo de Morelia (Anexo I) porque en general, todas tienen picos de concentraciones de partículas por arriba de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ y una tendencia similar con CO.

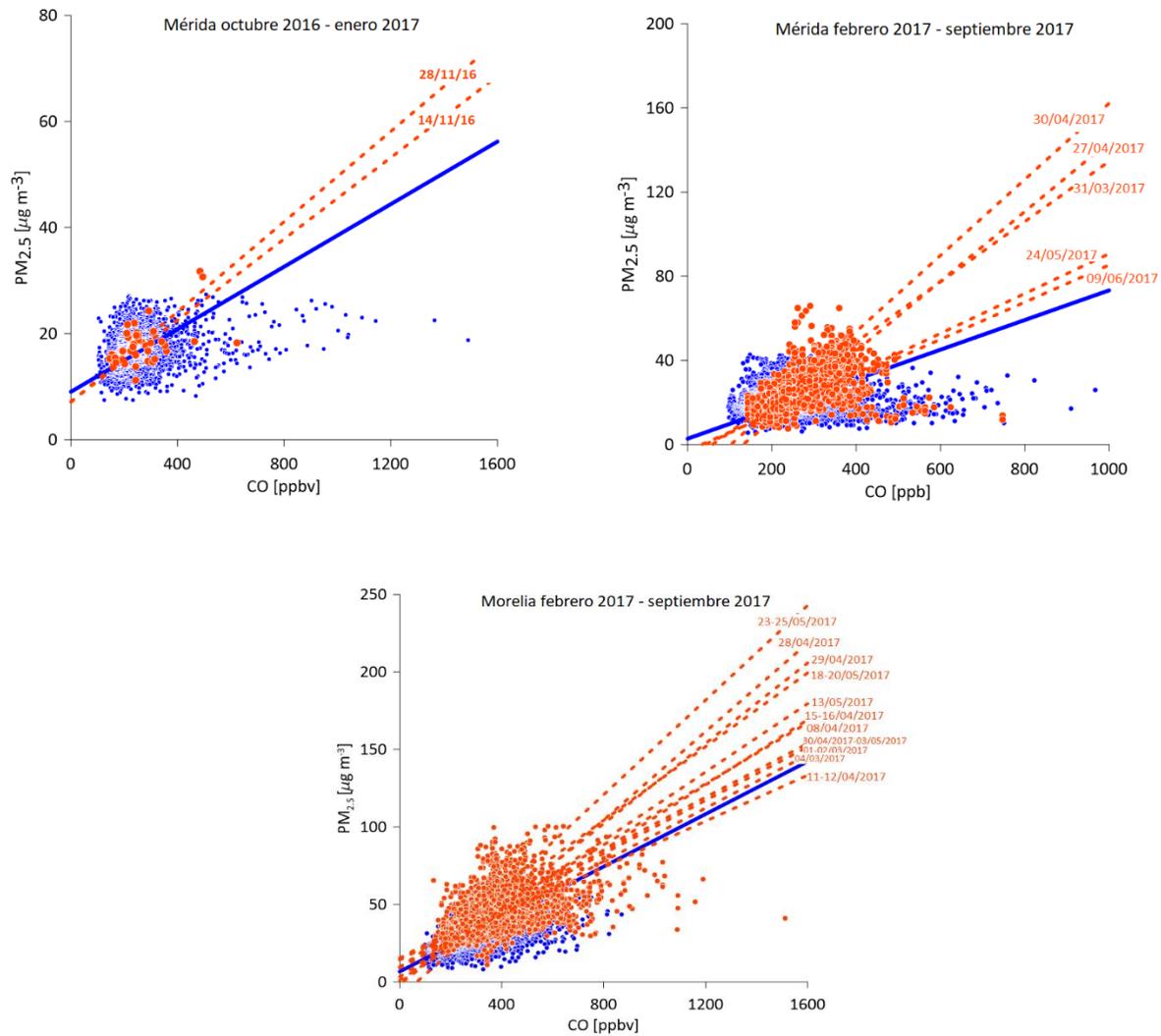


Figura 4.8. Gráfica de dispersión para los eventos ocurridos en Mérida, Yucatán entre octubre de 2016 y enero de 2017 (arriba-izquierda), Mérida entre febrero de 2017 y septiembre de 2017 (arriba-derecha) y Morelia, Michoacán entre febrero de 2017 y septiembre de 2017 (abajo-centro). Todos los puntos están en promedio horario. Los puntos azules representan los promedios horarios del percentil 99 del periodo muestreado. La línea azul representa el AER de $PM_{2.5}/CO$ obtenido del periodo muestreado. Las líneas punteadas naranjas representan los NERs de $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ obtenidos de los eventos seleccionados.

Si se comparan las series de tiempo de los eventos con mejor correlación tanto en Mérida como en Morelia, se puede obtener un mejor panorama sobre los resultados obtenidos en la figura 4.8. Se escogieron los mejores 4 eventos representativos de ambos sitios para este trabajo, los demás eventos son mostrados en el Anexo I. Los eventos corresponden al 28 de noviembre de 2016 y 30 de abril de 2017 en Mérida mientras que en Morelia corresponden a los días 1-3 de marzo de 2017 y 11 de abril del mismo año.

Mérida

La figura 4.9 muestra las series de tiempo de CO (verde) y PM_{2.5} (café) de los días 28 de noviembre de 2016 y 30 de abril de 2017 en Mérida.

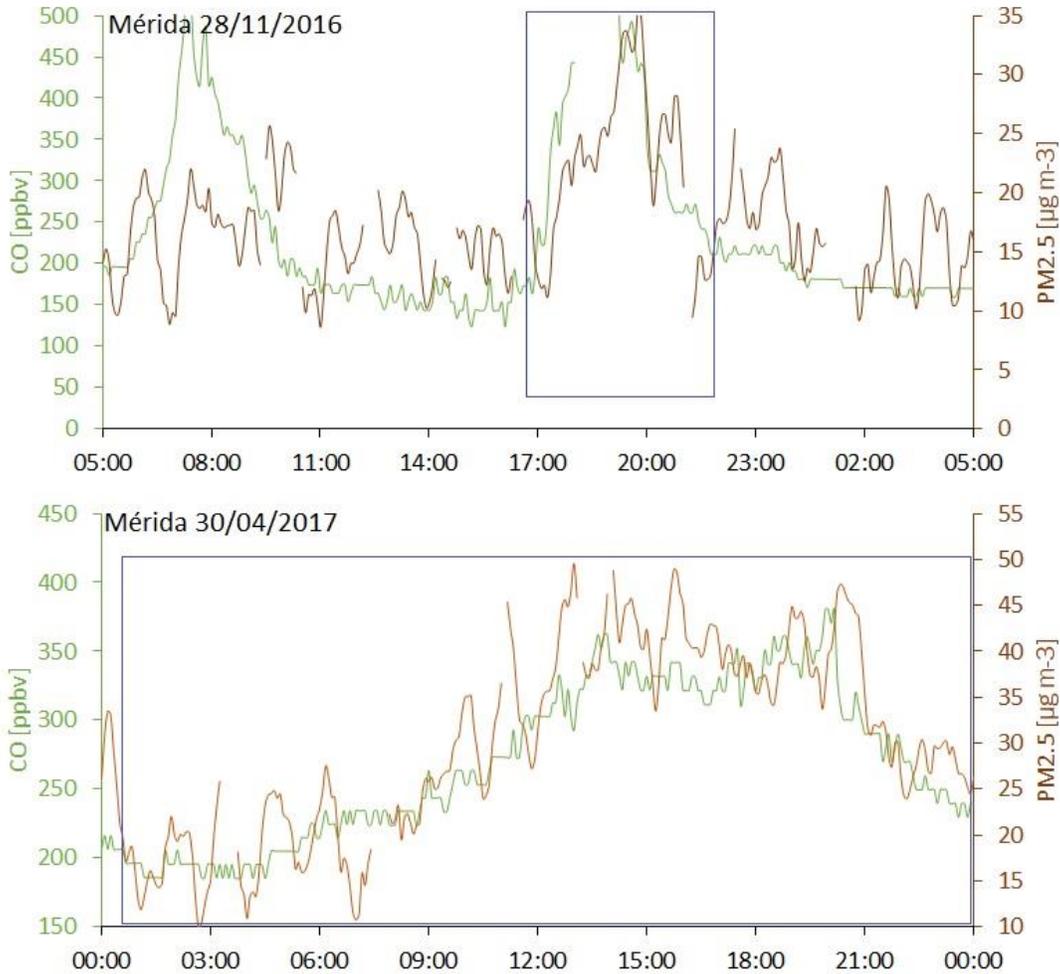


Figura 4.9. Series de tiempo para CO y PM_{2.5} los días 28 de noviembre de 2016 y 30 de abril de 2017 en Mérida. Los recuadros azules muestran el periodo en donde se aprecia una buena correlación entre ambas especies.

El 28 de noviembre de 2016 en Mérida ocurre que, durante la noche, existe un comportamiento similar en la serie de tiempo tanto para CO como para PM_{2.5}, mientras que la relación de mezcla de CO aumenta considerablemente, la concentración de partículas finas aumenta de la misma manera. Esto sugiere que pueden provenir de una misma fuente. Sin embargo, la mayor parte del día las concentraciones de PM_{2.5} se mantienen bajas mientras que para CO solo se observa un incremento durante la mañana. Esto sugiere que la influencia de las emisiones sobre la concentración de fondo puede interferir en el NER de este día. La pendiente para este día es de 0.0420 µg m⁻³ ppbv⁻¹. Este valor es un

tanto bajo lo que sugiere que hay una influencia mayor de CO sobre PM_{2.5}, esto puede deberse a que estas emisiones son influenciadas por otro tipo de contribuciones ajenas a la quema de biomasa, como por ejemplo la quema de combustibles fósiles.

El día 30 de abril de 2017 en Mérida es un caso muy particular. De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 4.3, el mejor coeficiente de correlación ocurre en este día. Observando la serie de tiempo de CO y PM_{2.5} puede notarse que ambos presentan la misma tendencia durante todo el periodo muestreado. Durante la mañana hay niveles bajos de CO y partículas finas toda vez que incrementan conforme aumentan las horas, logrando registrar concentraciones de PM_{2.5} muy altas, por arriba de 40 µg m⁻³ y además de que éstas se mantienen durante todo el día. El valor de la pendiente para este día es de 0.1807 µg m⁻³ ppbv⁻¹ el cual resulta ser el más alto de todos los eventos. Además, el valor del coeficiente de correlación ($R^2=0.77$) para este día es muy alto por lo que existe una correlación muy estrecha entre PM_{2.5} y CO, esto significa que ambos provinieron de la misma fuente.

Dentro del inventario de emisiones de la SEDUMA en 2018 (tabla 4.4) se observa que Mérida tiene una contribución importante de CO, PM_{2.5} y NOx. Esto sugiere que las emisiones vehiculares son muy importantes en la calidad del aire de Mérida. De acuerdo a los datos presentados en la tabla 4.4 del inventario de emisiones especiales de la SEDUMA en 2018, puede observarse que las emisiones de PM_{2.5} y CO a partir de incendios forestales son muy considerables también. El 13.5 % del total de las PM₁₀ de Yucatán son emitidas por incendios forestales, quemas de residuos y quemas agrícolas mientras que para PM_{2.5} el porcentaje es del 25%. Por otro lado, las contribuciones por emisiones de termoeléctricas de PM₁₀ y PM_{2.5} son del orden del 94% y del 96% respectivamente.

Lo anterior indica que Mérida está bajo la influencia de: (a) emisiones locales de CO y NOx principalmente de fuentes móviles; (b) emisiones locales y vecinales de partículas por las termoeléctricas; y (c) emisiones regionales de PM_{2.5} por incendios forestales, quemas agrícolas y de residuos. Sin embargo, dada la orografía plana de la Península y el paso constante de viento, hay una dilución asegurada de las emisiones en esta ciudad, aunque también hay un alto potencial de transporte de emisiones generadas viento arriba de Mérida que ocasionalmente puede afectar la calidad del aire de esta conurbación (Salazar et al., 2015).

Tabla 4.4. Inventario de Emisiones desglosado en fuentes especiales en Yucatán. (SEDUMA, 2018)

Fuente	Contaminante (Mg/año)						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	COV	CO	NH ₃
Incendios forestales	1,270.0	1,077.5	133.5	12,208.3	428.9	853	121.2
Quema de residuos	1,005.1	920.5	26.5	2,248.3	158.7	226.3	NA
Quemas agrícolas	205.2	197.2	6.9	1,338.7	59.7	146.5	26.8
Subtotal Incendios y quemas	2,480.3	2,195.2	166.9	15,795.3	647.3	1,225.8	148.0
Generación de energía eléctrica	1,912.0	1,780.6	18,838.6	2,400.8	10,841.1	259.9	184.6

Morelia

La figura 4.10 muestra las series de tiempo para CO (verde) y PM_{2.5} (café) para los eventos de los días 1-2 de marzo de 2017 y 11-12 de abril de 2017 en Morelia.

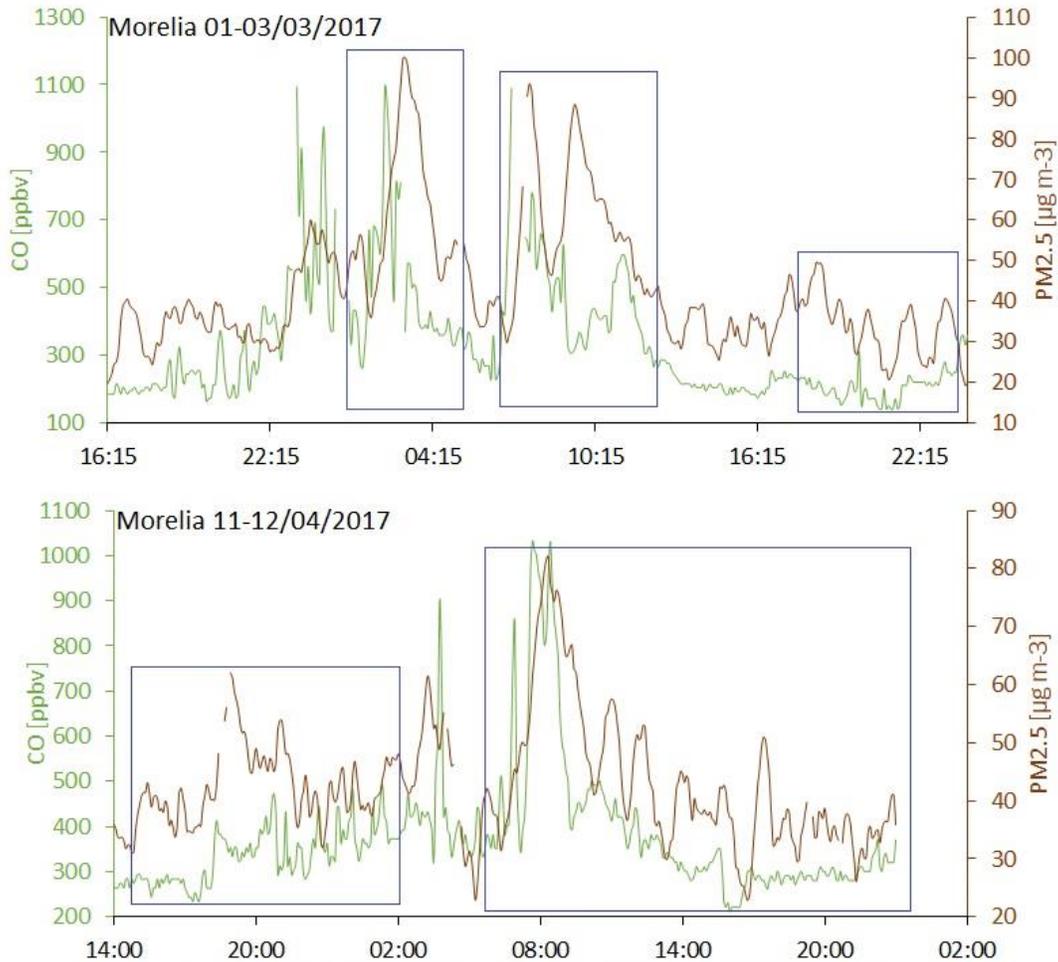


Figura 4.10. Series de tiempo para CO y PM_{2.5} los días 1-2 de marzo de 2017 y 11-12 de abril de 2017 en Morelia. Los recuadros azules muestran el periodo en donde se aprecia una buena correlación entre ambas especies.

Los días 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia, PM_{2.5} y CO parecen tener una relación muy estrecha. A partir de la tarde del 1 de marzo la concentración de partículas finas parece incrementar y luego disminuir al igual que el CO. Los picos de PM_{2.5} registrados durante los dos días parecen coincidir con los picos de CO que llegan a superar 1000 ppbv. Aunque el coeficiente de correlación no es tan alto como se esperaría ($R^2=0.5107$), ambas especies parecen tener una relación muy estrecha. El valor de la pendiente durante este evento es de $0.0858 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$, el cual es bajo en comparación con Mérida, esto puede

deberse a que existen periodos donde hay un aumento de CO, pero no de PM_{2.5} lo que aumenta la concentración de fondo de CO, además este evento tuvo una duración de varios días, por lo que las variaciones entre las especies afectan de manera significativa sobre el NER calculado. Pero en este periodo puede observarse que la mayor parte del tiempo ambas especies tienen la misma tendencia por lo que el coeficiente de correlación es bueno.

Para el caso del 11 y 12 de abril de 2017 en Morelia parece haber nuevamente una correlación muy buena. Las series de tiempo de CO y PM_{2.5} muestran que se presenta la misma tendencia tanto para el 11 de abril en donde se registran grandes picos de CO y de PM_{2.5} como para el 12 de abril que registró los picos más elevados de PM_{2.5} y CO. En este evento se obtuvo el mayor coeficiente de correlación en Morelia ($R^2=0.6142$) mientras que la pendiente es de $0.0741 \mu\text{g m}^{-3} \text{ppbv}^{-1}$ el cual es ligeramente más bajo que en el caso anterior. Este evento tuvo varios días de duración en donde pueden observarse picos de CO y bajas concentraciones de PM_{2.5} por lo cual el valor de la pendiente resultó ser más bajo, no obstante, tanto CO y PM_{2.5} presentan una tendencia similar la mayor parte del tiempo, esto también ocurre en las gráficas del Anexo I aunque no ocurre para Mérida.

Morelia es una región con fuerte actividad agrícola, ciertas actividades tienen gran impacto sobre la calidad del aire, sobre todo en el proceso de quemas en la preparación de tierras e incendios forestales. La Tabla 4.5 presenta un desglose de las emisiones por quemas de biomasa y residuos en el estado, comparando con las emisiones totales en Michoacán. De acuerdo a la tabla 4.5, cerca del 7% de las emisiones de PM₁₀ en el Estado son producto de la combustión de biomasa y de residuos, mientras que el 8% de las PM_{2.5} de Michoacán tienen este mismo origen y sólo cerca del 2% del total de CO es producto de estas combustiones incompletas. De hecho, se emiten más PM₁₀ y PM_{2.5} por quema de biomasa que en toda la Zona Metropolitana de Morelia. Esto muestra que, en efecto, Morelia siempre está influenciada por emisiones de PM_{2.5} lo cual puede resultar difícil durante este método porque la mayor parte de lo que se mide en la estación de monitoreo está relacionado a quemas de biomasa principalmente y no se observa la influencia de emisiones vehiculares.

Tabla 4.5. Inventario de Emisiones desglosado en fuentes especiales en Michoacán. (ProAire, 2015)

Fuente	Contaminante (Mg/año)						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	COV	CO	NH ₃
Incendios forestales	1,306.3	1,085	124.7	401.2	897.5	12,851.5	128.6
Quema de residuos	17.7	16.2	0.5	2.8	4	39.7	NA
Quemas agrícolas	910.5	869.3	34.9	257.1	614.5	6,525.3	103.1
Subtotal Incendios y quemas	2,234.5	1,970.5	160.1	661.1	1,516	19,416	231.7

4.3.1 Rosas de vientos de contaminantes

28 de noviembre de 2016, Mérida

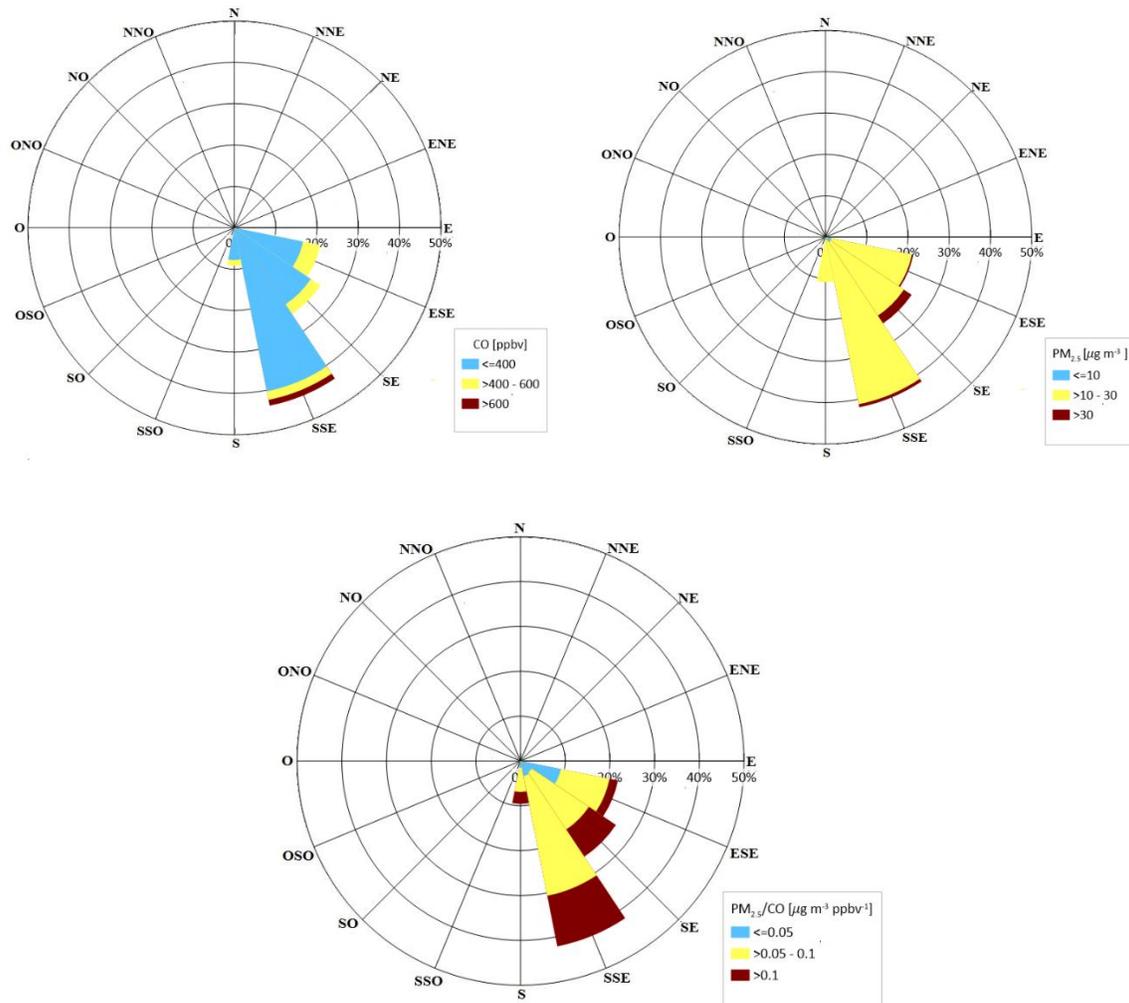


Figura 4.11. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 28 de noviembre de 2016 en Mérida, Yucatán.

Las rosas de contaminantes (figura 4.11) muestran que para CO se obtuvieron concentraciones mayores a 600 ppbv que provinieron del arco ESE-SSE. Por otro lado, para PM_{2.5} se observa que se tienen las mayores concentraciones provenientes de la zona norte y del arco ESE-SSE. En el sector SSE parece haber una similitud en cuanto a dirección, pero también en concentración de ambas especies pues la mayor frecuencia para provenir de ese sector toda vez que hay una gran frecuencia de concentraciones altas de PM_{2.5} en el sector SE. En el caso del cociente PM_{2.5}/CO se observa una dominancia del sector SSE.

30 de abril de 2017, Mérida

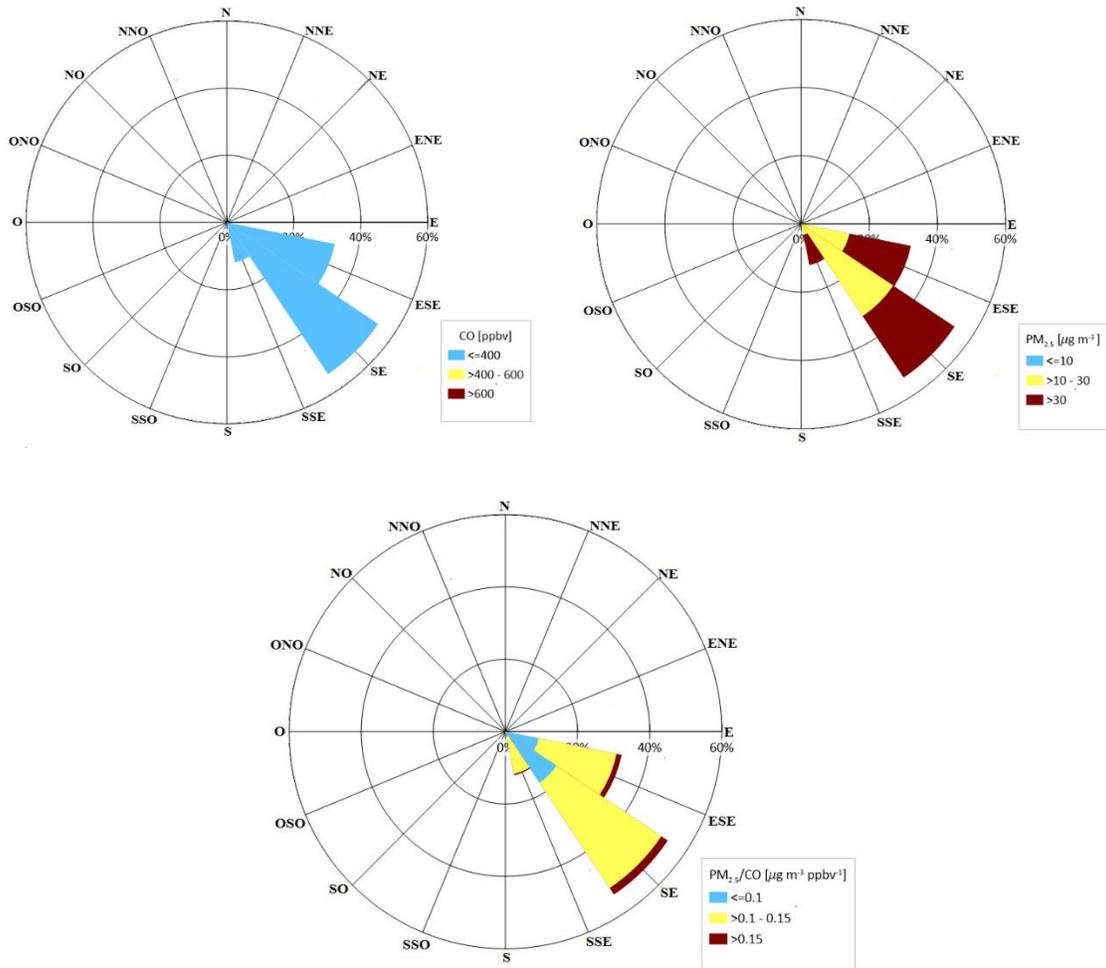


Figura 4.12. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 30 de abril de 2017 en Mérida, Yucatán.

Las rosas de contaminantes de la figura 4.12 muestran el comportamiento de CO, PM_{2.5} y PM_{2.5}/CO para el 30 de abril en Mérida. Puede observarse que, para CO, se tienen concentraciones relativamente bajas que no logran superar 400ppbv y provienen mayormente de la zona SE. En el caso de PM_{2.5} se observan concentraciones por arriba de 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ que provienen del arco ESE-SE. Finalmente, para la relación PM_{2.5}/CO también existe una dominancia del arco ESE-SE. La mayor frecuencia de valores de CO parece provenir de la región SE por lo que pudiera existir una gran influencia de ese sector.

1 y 2 de marzo de 2017, Morelia

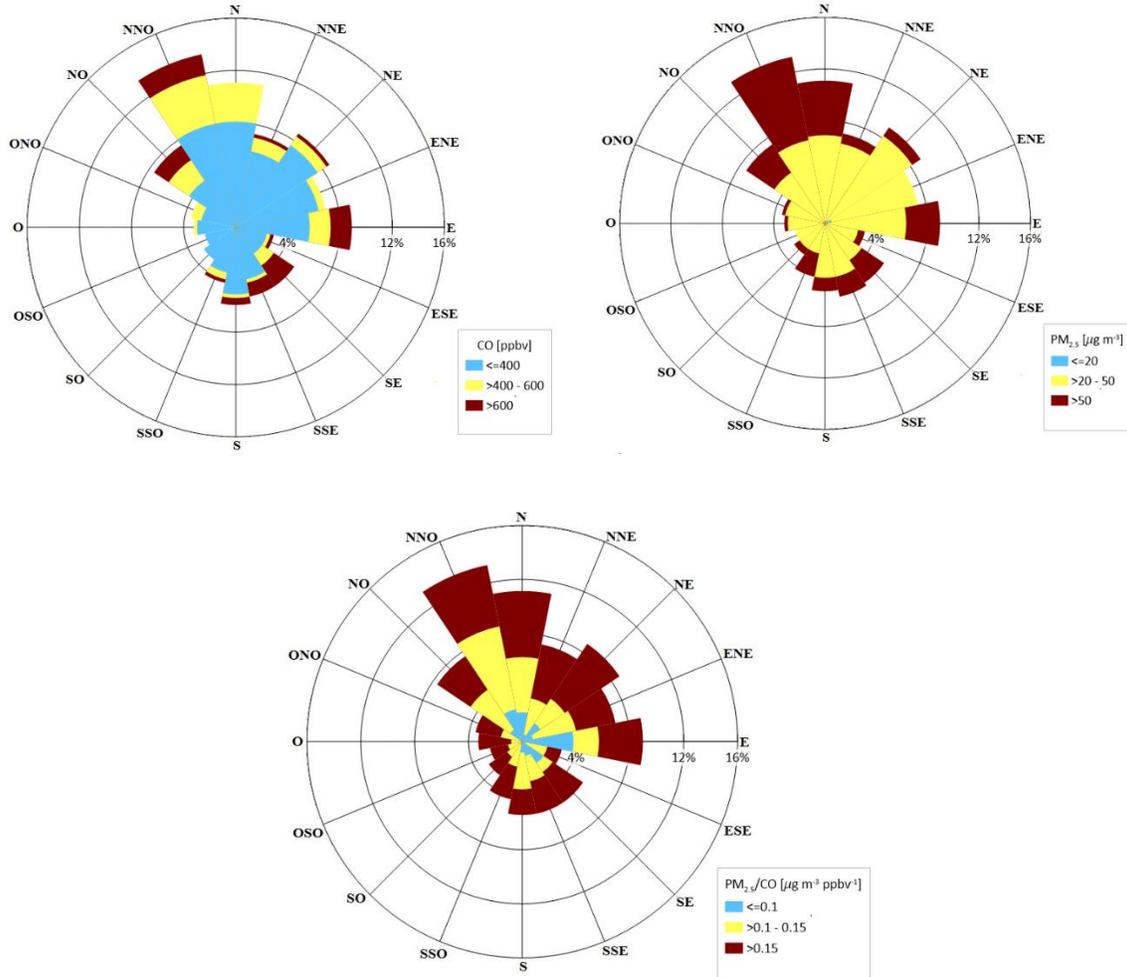


Figura 4.13. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia, Michoacán.

En el caso de Morelia, las rosas de contaminantes (figura 4.13) muestran un comportamiento distinto al de Mérida. Para CO parece haber una mayor frecuencia de concentraciones por arriba de 600 ppbv de la zona NNO. Para PM_{2.5} hay una dominancia en la frecuencia de concentraciones por arriba de 50 µg m⁻³ del arco NO-NNO-N y de la zona E. En el caso del cociente PM_{2.5}/CO, la dominancia va del arco NO-NNO-N-NNE-NE-ENE-E. La discrepancia entre estos resultados ocurre porque Morelia está influenciada directamente por el viento que proviene del sur, del océano pacífico, pero también del viento que proviene del norte, además está rodeada por grandes altitudes montañosas que favorecen el movimiento del viento. La zona NNO parece ser en donde se tiene una concordancia mayor entre CO y PM_{2.5}.

11 y 12 de abril de 2017, Morelia

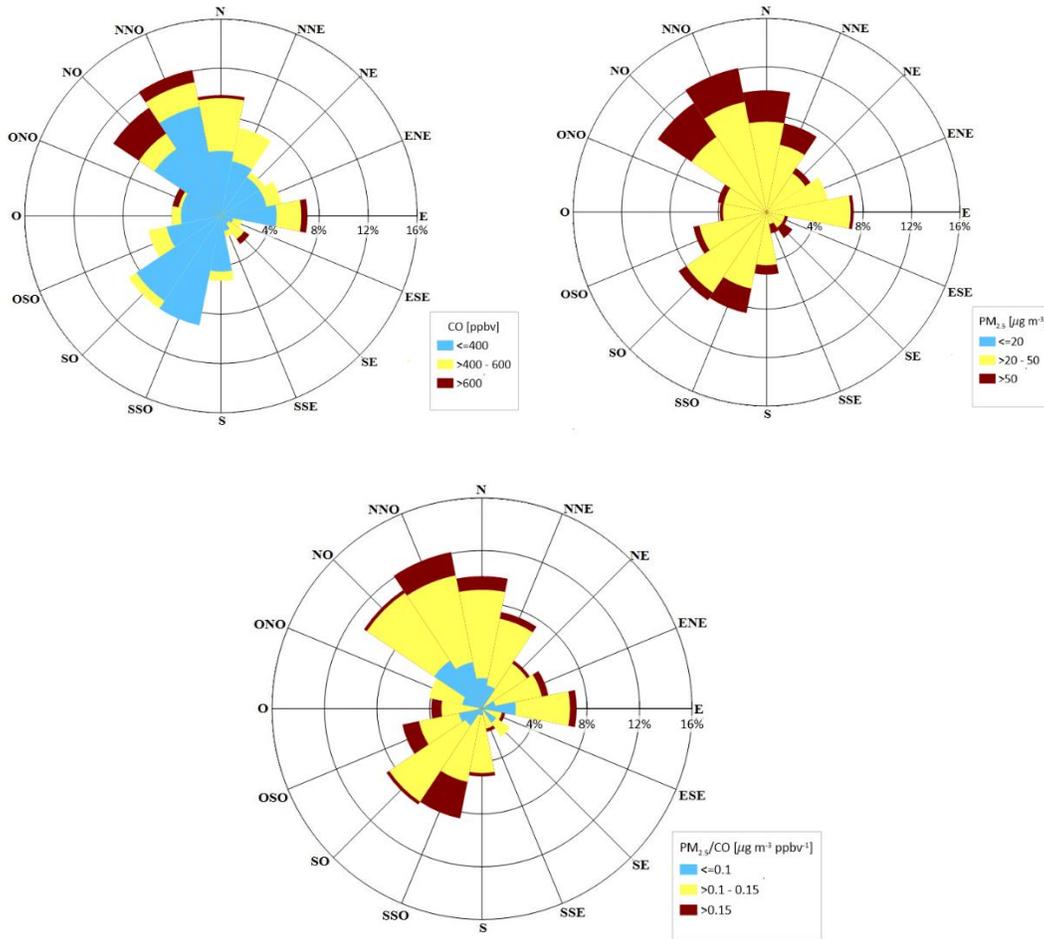


Figura 4.14. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), $PM_{2.5}$ (arriba-derecha) y el cociente $PM_{2.5}/CO$ (abajo) para el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia, Michoacán.

La figura 4.14 muestra que para el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia se tienen concentraciones para CO, por arriba de 600 ppbv, principalmente del arco NO-NNO-N. Para $PM_{2.5}$ las concentraciones más elevadas provinieron del arco NO-NNO-N-NE y del sector SO. La mayor frecuencia del cociente $PM_{2.5}/CO$ parece provenir del mismo sector que $PM_{2.5}$. Puede observarse que ambas especies parecen tener una frecuencia mayor de la región NO pero también de la región SSO a pesar de que, de ese sector, se tiene bajas concentraciones de CO no así para $PM_{2.5}$, de donde provienen grandes emisiones.

4.3.2 Imágenes de satélite de eventos de incendios forestales

Las figuras siguientes presentan los eventos de incendios forestales registrados por los sensores MODIS y VIIRS, así como las trayectorias de retroceso de cada evento seleccionado, obtenidas en HYSPLIT. Para cada evento se obtuvieron todas las trayectorias de retroceso que pasaron por el punto de interés durante todo el periodo de duración de cada evento, cada línea representa una trayectoria de retroceso cada hora desde el inicio hasta el final del mismo. En este análisis sólo se muestran los resultados con los coeficientes de correlación más altos mientras que las imágenes de los demás resultados pueden ser consultadas en el Anexo I adjunto a este trabajo.

Mérida, 28 de noviembre de 2016

La figura 4.15 muestra, por un lado, los eventos de incendios registrados durante el 28 de noviembre de 2016 así como las trayectorias de retroceso del mismo día. Puede observarse que hay una ocurrencia muy baja de incendios en la península de Yucatán. La mayor parte de los eventos encontrados se encuentran en la región NE y SO mientras que solo unos cuantos se localizaron en la región SE. Sin embargo, existe un evento muy cerca de Mérida, casi a las afueras de la ciudad ubicado al SO. Observando las trayectorias de retroceso puede verse que existe una influencia de parcelas de aire del arco NE-E-SE, que corresponden con los incendios mostrados por MODIS. Aunque no parece haber una gran influencia sobre Mérida de incendios forestales para este día, existió un evento de menor magnitud. Los incendios detectados por MODIS y VIIRS parecen ser congruentes con lo mostrado en las rosas de contaminantes (figura 4.11) puesto que la mayor frecuencia detectada (concentraciones altas de $PM_{2.5}$) durante este día parece ser de la región SE. En el caso del coeficiente de correlación se tiene un valor apenas por debajo de 0.6 y solo un pequeño periodo en la serie de tiempo para CO y $PM_{2.5}$ parece correlacionar. Este evento sirve como referencia porque dicho evento fue seleccionado en una temporada baja en incendios forestales en México, lo cual sirve como punto de partida para corroborar el método aun cuando la incidencia de quemas de biomasa sea baja. La distancia promedio entre la zona de monitoreo y los incendios observados por MODIS y VIIRS es de aproximadamente 200 km.

Mérida, 30 de abril de 2017

El 30 de abril de 2017 se obtuvieron los mejores resultados en el método. La figura 4.16 muestra una gran ocurrencia de eventos de incendios forestales, principalmente de las regiones SO, SE y NE. Parece ser que hay una gran cantidad de incendios forestales registrados durante ese día en las zonas aledañas a Valladolid, Chichen Itzá y los pueblos Ticul, Tecax y Peto. Las trayectorias de retroceso muestran que los

vientos predominaron en la zona SE y que además provinieron desde el Caribe con gran intensidad por lo que puede observarse que, en efecto, para este día existió una influencia constante sobre Mérida debido a incendios forestales durante todo el evento del sector SE. Las rosas de contaminantes (figura 4.12) mostraron que en la zona SE, se tuvo una gran influencia de $PM_{2.5}$ llegando a rebasar $40 \mu\text{g m}^{-3}$ toda vez que las concentraciones de CO se mantuvieron por debajo de 300 ppbv. Las series de tiempo (figura 4.9) para este día mostraron que existe una correlación excelente entre ambas especies mientras que los resultados obtenidos del método mostraron la mejor correlación durante este evento para ambos sitios. La distancia promedio entre los eventos detectados por los sensores remotos es de 150 km aproximadamente.

28 de noviembre de 2016, Mérida

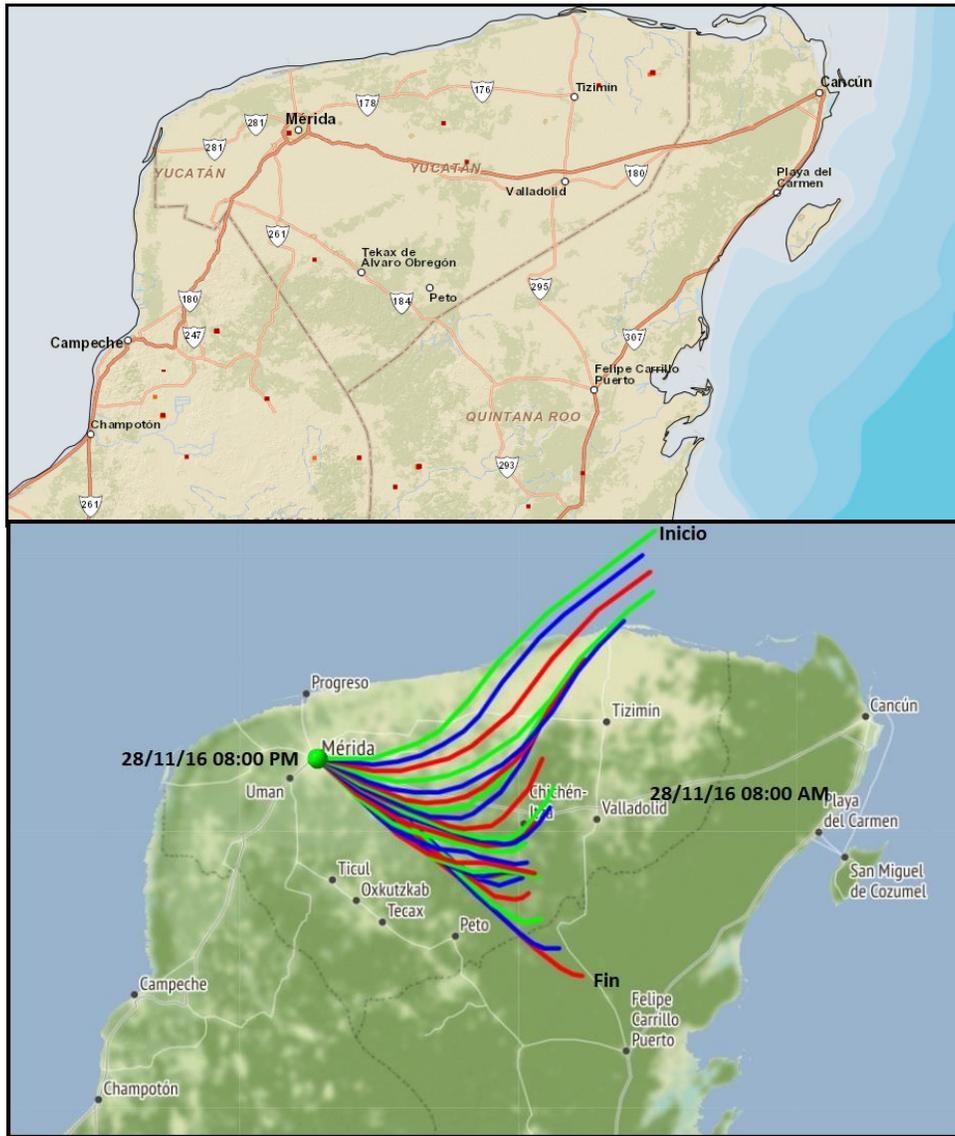


Figura 4.15. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 28 de noviembre de 2016 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) durante 12 horas para el 28 de noviembre de 2016 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

30 de abril de 2017, Mérida

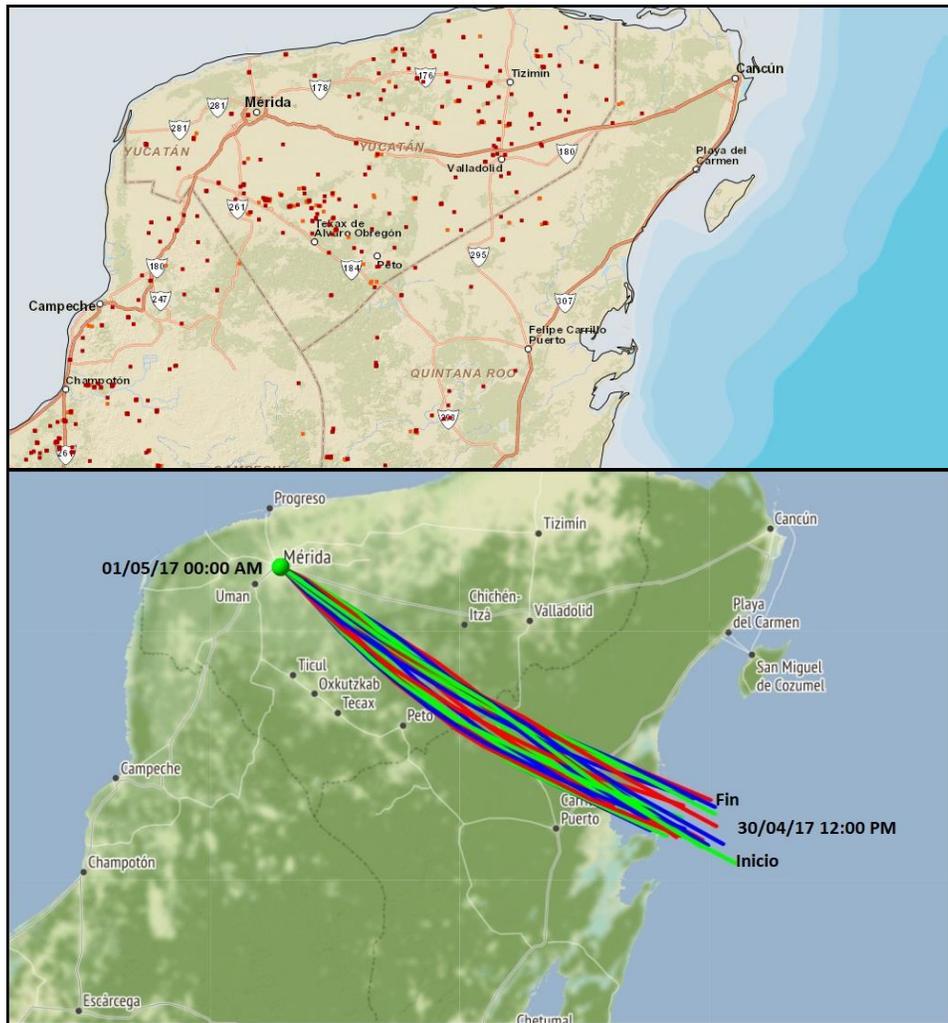


Figura 4.16. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 30 de abril 2017 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) durante 12 horas para el 30 de abril de 2017 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

Morelia, 1 y 2 de marzo de 2017

El evento ocurrido durante el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia parece ser interesante. La figura 4.17 muestra que existen varios eventos de quemados de biomasa alrededor de Morelia. Sin embargo, parecen estar muy dispersos alrededor de Michoacán. La mayor concentración de incendios registrados por MODIS y VIIRS parece provenir del sector E de Michoacán, inclusive, parecen ser de manera regional desde el Estado de México. Las trayectorias de retroceso muestran, por otro lado, que los vientos provinieron de la zona NE principalmente, justo desde la misma zona en la que se registró una cantidad grande de incendios en el límite del Estado de México además de contribuciones de las regiones S y NO en menor medida. Puede observarse que las trayectorias para las 13 horas hacia atrás mostradas en la figura 4.17, parecen mostrar que el viento presentó una gran intensidad. Las series de tiempo para CO y PM_{2.5} para este evento, mostraron una correlación buena solo en pequeños periodos durante los dos días, en la madrugada del 2 de marzo, y hasta la madrugada del 3 de marzo. La rosa de contaminantes (figura 4.13) parece mostrar que la frecuencia de concentraciones es congruente con las trayectorias, la mayor influencia se obtuvo de la región N mientras que se obtuvieron contribuciones de los sectores NE, E y SSE en menor medida. Si se observa la imagen de incendios forestales puede verse que hay una gran incidencia de quemados de biomasa que ocurren en el arco NO-N-NE-E (figura 4.17). Estas imágenes sugieren que existe una influencia debido a incendios de manera constante sobre la zona de monitoreo. La distancia promedio de este evento desde la zona de monitoreo hasta los incendios es de 150 km aproximadamente.

Morelia, 11 y 12 de abril de 2017

La figura 4.18 muestra la incidencia de eventos de incendios forestales durante el 11 de abril y el 12 de abril. Puede observarse que existen pequeñas concentraciones de eventos registrado por MODIS y VIIRS de los cuales, los más grande provinieron de las zonas NO, SO y SE en Michoacán. Este evento parece registrar un comportamiento de manera local al final del evento mientras que al inicio se registraron parcelas de aire de manera regional de la zona SE. Las series de tiempo de CO y PM_{2.5} mostraron una gran correlación durante el día 12 de abril. Los eventos encontrados por MODIS parecen coincidir con las rosas de contaminantes (figura 4.14) porque las frecuencias de concentraciones más altas mostradas, para ambas especies, parecen indicar que la predominancia es de la zona NO y SE. Este comportamiento lo explican las trayectorias de retroceso porque el viento provino de la región SO inicialmente, hasta la región SE con respecto a la estación de monitoreo, y luego hacia la región N, finalmente los vientos regresaron por la región NO. Esto muestra que, en Morelia, se tuvo influencia de incendios de manera local y regional, estos resultados son congruentes con los calculados por el método empleado pues se obtuvo la mejor

correlación en Morelia, apenas por arriba de 0.6. En ambos eventos en Morelia parece observarse una influencia constante de incendios forestales en distintos sectores. La distancia promedio de la zona de monitoreo a los incendios es de 80 km.

1 y 2 de marzo de 2017, Morelia

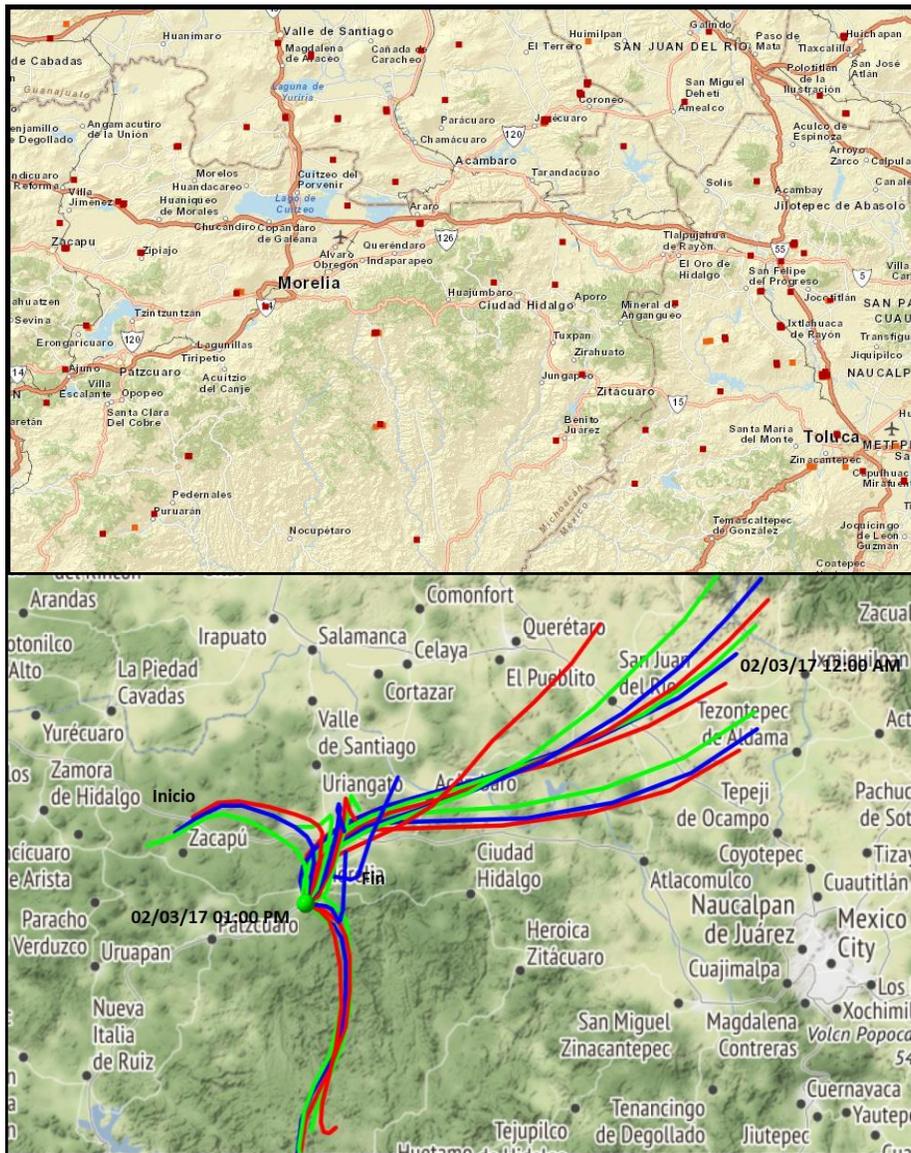


Figura 4.17. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 1 y 2 de marzo de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) durante 13 horas para el 2 de marzo de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

11 y 12 de abril de 2017, Morelia

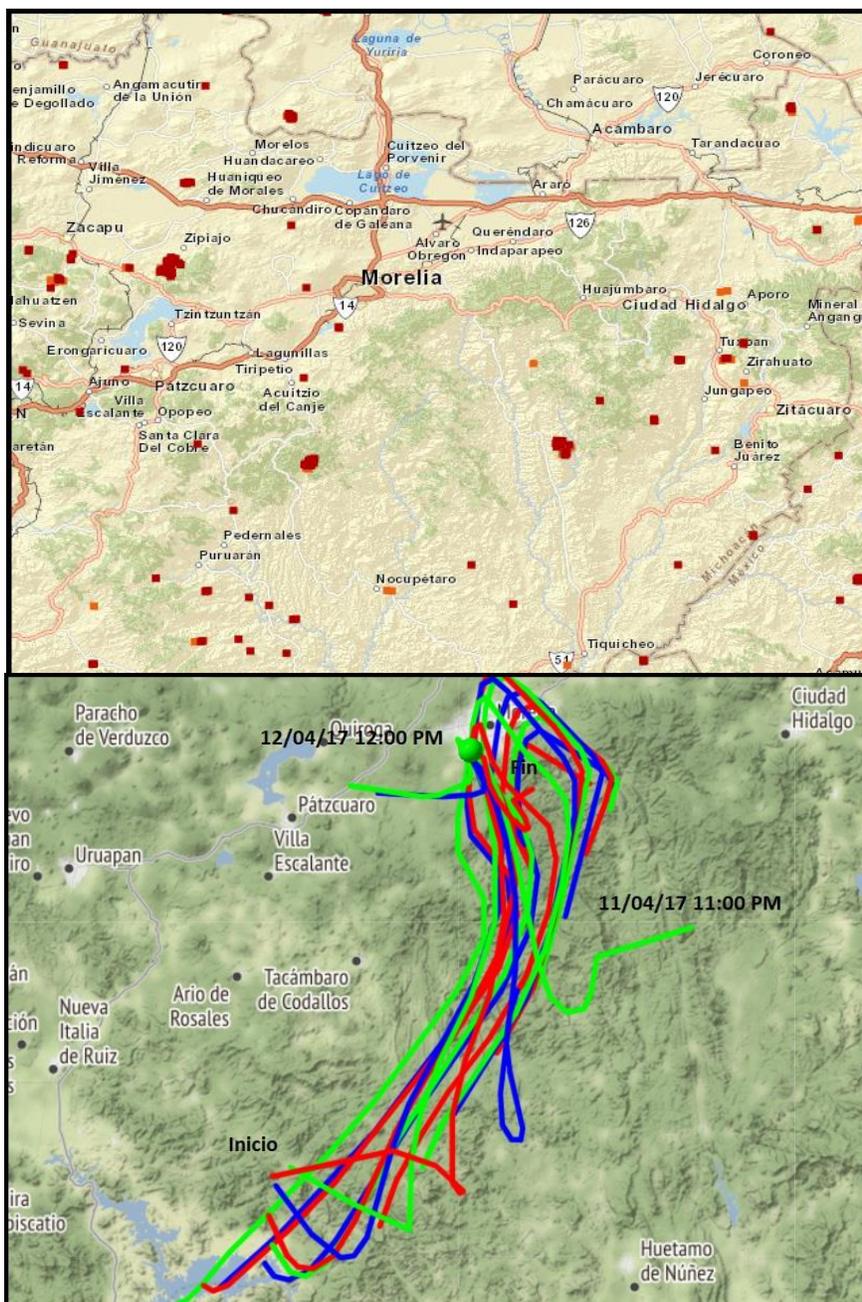


Figura 4.18. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 11 y 12 de abril de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) durante 15 horas para el 11 y 12 de abril de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 metros sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

4.4 Uso potencial del método de del “incremento” del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ en estudios similares en México

A partir de los resultados obtenidos, parece haber sido una buena primera aproximación en el uso del método del incremento del cociente $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ en comparación con otras investigaciones previas. En efecto, la Península de Yucatán es una zona importante en cuanto a actividades agrícolas, pero no representa las condiciones ni el comportamiento de este tipo de actividades en todo el país, aunque la zona esta favorecida en el uso del suelo agrícola a diferencia del norte del país. En Morelia, al ser una zona con muchos incendios forestales, que no necesariamente son de origen agrícola, parece ser una buena representación del método, sin embargo, debido a la ubicación de la ciudad pudiera llegar a ser complicado diferenciar entre emisiones por quemas de biomasa y de otro tipo. En México no existe un estudio que valide el uso de este método en incendios forestales, pero parece ser una primera investigación con buenos resultados. En países como Estados Unidos, donde se tienen condiciones parecidas a México, si existe evidencia en la prueba de este método, dando como resultado que es favorable aplicarlo en el caso de incendios forestales (Laing et al., 2017).

Si bien la península de Yucatán ha sido motivo de estudio en cuanto a incendios forestales en algunas ocasiones, existe poca investigación sobre la aplicación de este método incluso cuando se tienen registros muy grandes sobre este tipo de quemas e incendios forestales. En Morelia existe menos trabajo de investigación a pesar de ser una zona con más influencia en cuanto a quemas por incendios forestales (CONAFOR, 2018). En algunos casos se ha trabajado con modelos de incendios forestales (Millones et al., 2017) aunque se ha tratado de ampliar esto a todo el país.

Los resultados parecen ser buenos porque los valores obtenidos durante esta investigación son similares a los obtenidos por otros autores, de hecho, la mayoría de ellos son muy similares, sin embargo, hace falta realizar un estudio muy profundo en el que se contemplen muchos factores que pueden afectar la aplicación del método. Muchos de ellos tienen que ver con la temporada y el sitio, porque los incendios no siempre son de origen agrícola y evidentemente, este método contempla la quema de biomasa, que puede ser de origen natural. Otro factor importante es la distancia, en investigaciones previas se ha encontrado que la distancia afecta en el cálculo de los cocientes de emisión porque éstos resultan ser más bajos entre más lejos esté la zona de monitoreo respecto a un incendio (Weiss et al., 2007; Wigder et al., 2013). Además, las condiciones de muchos sitios en México parecen cambiar drásticamente, mientras en el norte del país parece haber un clima mucho más seco, en el sur parece haber un clima más húmedo lo

que afecta las condiciones de uso de suelo y climatológicas (SEMARNAT, 2009). También parece haber un factor muy importante sobre los resultados obtenidos por el método y es el aumento sobre la concentración de fondo de CO por otra fuente distinta a las quemas de biomasa, como pueden ser las emisiones vehiculares, lo cual dificulta correlacionar a dos especies que van de la mano como es CO y PM_{2.5}. Hace falta complementar el uso de métodos alternativos durante la validación del método, como el uso de trazadores de quemas de biomasa (glucosano, por ejemplo), en adición a lo que se muestra en las imágenes de satélite.

Finalmente, con esta investigación se pretende introducir este método para discernir en las emisiones de la influencia de quemas de biomasa sobre la calidad del aire de muchas zonas urbanas y semi-urbanas, que permitan generar una legislación en materia ambiental para el control y mitigación de problemas ocasionados por quemas agrícolas e incendios forestales en México.

5. CONCLUSIONES

Se pudo validar en Mérida el uso del “incremento” del cociente de $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$. Se detectaron varios eventos que fueron congruentes con las imágenes de satélite y las trayectorias de retroceso, así como con las rosas de vientos.

Dos eventos en Mérida tuvieron buenos resultados, los días corresponden al 28 de noviembre de 2016 y 30 de abril de 2017, los coeficientes de correlación para estos eventos fueron de 0.59 y 0.77. Este último fue el mejor evento de los dos sitios de muestreo con la mejor correlación y la pendiente más grande. Las pendientes encontradas fueron de 0.04 y 0.18 $\mu g m^{-3} ppbv^{-1}$ respectivamente.

En Morelia, los resultados validaron el método de igual manera. Se detectaron dos eventos los días 1 y 2 de marzo de 2017 así como el 11 y 12 de abril del mismo año. En este sitio el mejor evento resultó ser el correspondiente a abril. Los coeficientes de correlación resultaron cercanos a 0.6 en ambos casos y las pendientes de 0.08 y 0.07 $\mu g m^{-3} ppbv^{-1}$ respectivamente. Se encontró que la ubicación de Morelia puede representar un problema en el método puesto que en todo hay influencia de emisiones por quemas de biomasa.

La distancia entre la zona de monitoreo y las quemas por incendios forestales, es importante. Estudios previos han mostrado que entre mayor es la distancia, se obtienen NERs más bajos. Los resultados en esta investigación se encuentran en el mismo rango de otros estudios para distancias menores a 200 km.

La regresión por RMA es un buen método cuando se analizan datos de calidad del aire, se encontró una mejor representación en la tendencia de los datos por este método respecto a mínimos cuadrados con coeficientes de correlación más cercanos a 1 y ordenadas al origen más bajas.

Los eventos encontrados validaron el método del incremento de los cocientes $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ tanto en Mérida como en Morelia. Los valores de NERs están por encima con respecto al AER lo que permite comprobar gráficamente que el método funcionó adecuadamente en ambos sitios. Se necesita profundizar la aplicación del método en más zonas del país a pesar de los resultados obtenidos.

La actividad forestal durante los últimos meses del año es baja como se observó en las imágenes de satélite. Las series de tiempo para CO y PM_{2.5} son congruentes y correlacionan bien durante los eventos encontrados en 2017 en temporada de incendios forestales en contraste con los resultados en 2016 en temporadas bajas de incendios forestales.

Los resultados obtenidos presentan un buen primer diagnóstico sobre este método y su aplicación en México. Se pretende obtener una mejor investigación sobre incendios forestales para poder plantear mejores decisiones en la legislación ambiental en México.

6. REFERENCIAS

- Aiken, A. C., de Foy, B., Wiedinmyer, C., DeCarlo, P. F., Ulbrich, I. M., Wehrli, M. N., Szidat, A. S., Prevot, H., Noda, J., Wacker, L., Volkamer, R., Fortner, E., Wnag, J., Laskin, A., Shutthanandan, V., Zheng, J., Zhang, R., Paredes-Miranda, G., Arnott, W. P., Molina, L., Sosa, G., Querol, X. and Jimenez, J.L. (2010). Mexico city aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) – Part 2: Analysis of the biomass burning contribution and the non-fossil carbon fraction. *Atmos. Chem. Phys.*, 10:5315-5341.
- Andreae, M. O. and Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cyc. Vol. 15*: 955-966.
- Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., Caldeira, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A. and Tokos, K. (2009). Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *A. Rev. of E. and Plan. Sci.*, 37(1),117-134.
- Ayers, G. P. (2001). Comment on regression analysis of air quality data. *Atmos. Env.* 35:2423-2425.
- Bergman, J. (2011). Carbón negro. *Ventanas al Universo*. Recuperado de https://www.windows2universe.org/earth/climate/black_carbon.html&lang=sp.
- Bravo, A., Sosa, E., Sánchez, A., Jaimes, R. and Saavedra, R. (2002). Impact of wildfire on the air quality of Mexico City. *Environ. Pollution*, 117: 243-253.
- Briggs, N., Jaffe, D., Gao, H., Hee, J., Baylon, P., Zhang, Q., Zhou, S., Collier, S., Sampson, P., and Cary, R. (2016). Particulate matter, ozone and nitrogen species in aged wildfire plumes observed at the Mount Bachelor Observatory. *Aerosol Air Qual. Res.* 16:3075-3087.
- CCA (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas. Comisión para la Cooperación Ambiental. Montreal, Canadá, 6pp.
- CENAPRED (2019) En México Tenemos dos temporadas de incendios forestales. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/en-mexico-tenemos-dos-temporadas-de-incendios-forestales?idiom=es>
- Chen, Y. and Xie, S.D. (2014). Characteristics and mechanism of a heavy air pollution episode caused by biomass burning in Chengdu, Southwest China. *Sci. Total Environ.* 473: 507–517.
- Cofer III, W. R., Levine, J. S., Winstead, E. L., Stocks, B. J., Cahoon, D. R., & Pinto, J. P. (1993). Trace gas emissions from tropical biomass fires: Yucatan peninsula, Mexico. *Atmos. Environ. Part A. General Topics*, 27(12), 1903-1907.
- CONAFOR (2018). Reporte Final de Resultados de Incendios Forestales 2017. Programa Nacional de Prevención de Incendios Forestales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México.

Correa-García, A. (2016) Tendencia del O₃ en la Ciudad de Morelia. Presentado en: 6º. Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático. Programa General Centro Occidente. Universidad de Colima, Colima, Colima. 17-21 octubre.

Cortés, V. E., Aparicio, J. (2014). Caracterización de Aerosoles por Quema de Biomasa en el Sureste de México. *Ciencias del Agua. Vol. V. núm. 1.*

Crouse, J. D., DeCarlo, P. F., Blake, D. R., Emmons, L. K., Campos, T. L., Apel, E. C., Clarke, A. D., Weinheimer, A. J., McCabe, D. C., Yokelson, R. J., Jimenez, J. L. and Wennberg, P. O. (2009). Biomass burning and urban air pollution over the Central Mexican Plateau. *Atmos. Chem. Phys.*, 9:4929-9444.

Davis, J. C. (2002). *Statistics and Data Analysis in Geology*. Wiley, Tercera Edición, New York. Pp 191-217.

DeBell, L.J., Talbot, R.W., Dibb, J.E., Munger, J.W., Fischer, E.V. and Frolking, S.E. (2004). A major regional air pollution event in the northeastern United States caused by extensive forest fires in Quebec, Canada. *J. Geophys. Res.* 109: D19305.

Dockery, D., Pope, C., Xu, X., Spengler, J., Ware, J., Fay, M., Ferris, B., Speizer, F. (1993). An association between air pollution and mortality in six U. S. cities. *N. Engl. J. Med.* 329:1753-1759.

Dutkiewicz, V.A., Husain, L., Roychowdhury, U.K. and Demerjian, K.L. (2011). Impact of Canadian wildfire smoke on air quality at two rural sites in NY State. *Atmos. Environ.* 45: 2028–2033.

Environmental Protection Agency. (1987). Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for particulate matter. *Fed. Reg.*: 52:24634-69.

Finlayson-Pitts, B. and Pitts, J. (2000). *Chemistry of the upper and lower atmosphere*. Academic Press, 2000, San Diego, United States.

Gao, S., Hegg, D., Hobbs, P., Kirchstetter, T., Magi, B. and Sadilek, M. (2003). Water-soluble organic components in aerosols associated with savanna fires in southern Africa: Identification, evolution and distribution. *J. Geoph. Res.*; Vol. 108, 8491.

Grell, G., Freitas, S. R., Stuefer, M. and Fast, J. (2011) Inclusion of biomass burning in WRF-Chem: impact of wildfire on weather forecasts. *Atmos. Chem. Phys.*, 11:5289-5303.

Husar, R. B., Schichtel, B. A., Falke, C. R., Wilson, W. E. (2000). Dust and smoke eventes over the USA in the 1998. Proceedings of PM 2000-Particulate Matter and Health (Session 10AS). *Air and Waste Man. Assoc.*, Charleston, SC, pp. 22-23.

INECC (2016). Informe Nacional de Calidad del Aire 2015, México. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. Dirección de investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta. Ciudad de México.

INECC (2019). Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire. *Manuales de monitoreo atmosférico en México*. México.

INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017. Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Michoacán, México.

Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F. and Kaufman, Y. (2002). The MODIS fire products. *Remote Sens. Environ.* 83: 244–262.

Kambis, A. D. and Levine, J. S. (1996). Biomass Burning and production of carbon dioxide: A numerical study. In: *Biomass burning and global change*, Vol. 2, edited by J.S. Levine. MIT Press, Cambridge, 170-177.

Kampa, M. and Castanas, E. (2007). Human health effects of air pollution. *Environ. Poll.* 151: 362-367.

Khalil, M and Rasmussen, R. (1990). The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance. *Chem.* 20(1-2), 227-242.

Laing, J. R., Jaffe, D. A., Slavens, A. P., Li, W. and Wang, W. (2017). Can $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ and $\Delta NO_y/\Delta CO$ Enhancement Ratios Be Used to Characterize the Influence of Wildfire Smoke in Urban Areas? *Aerosol and Air Qual. Res.*, 17: 2413-2423.

Lei, W., Li, G. and Molina, T. (2013). Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.*, 13:2299-2319.

Linares, C. and Díaza, J. (2008) Las PM2.5 y su impacto sobre la salud. El caso de la ciudad de Madrid. *Eco.*, 35:32-37.

Lindaas, J., Farmer, D., Pollack, I., Abeleira, A., Flocke, F., Roscioli, R., Herndon, S. and Fischer, E., (2017) Changes in ozone and precursors during two aged wildfire smoke events in the Colorado Range in summer 2015. *Atmos. Chem. Phys.*, 17:10691-10707.

López, D. H. (2019). Diagnóstico de la calidad del aire en un sitio receptor de Morelia, Michoacán. Tesis de licenciatura. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. (En desarrollo).

Miller, F., Gardner, D., Graham, J., Lee, R., Wilson, W. and Bachman, J. (1979). Size considerations for establishing a standard for inhalable particles. *J. Air. Poll. Control Assoc.*; 29-610-5.

Millones, M., Rogan, J., Turner, B. L., Parmentier, B., Harris, R. C. and Griffith, D. A. (2017). Fire Data as Proxy for Anthropogenic Landscape Change in the Yucatán. *Land.* 6: 61.

Molina, L. T., Madronich, J. S., Gaffney et al. (2010). An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: México City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(18): 8697-8760.

Morawska, L., Thomas, S., Jamriska, M. and Johnson, G. (1999). The modality of particle size distributions of environmental aerosols. *Atmos. Environ.*, Vol. 33, 4401-4411.

Navarro-Medina, A. (2018) Estudio sobre la variabilidad de PM10, PM2.5 y la fracción gruesa (PM10-PM2.5) en Juriquilla, Querétaro y su relación con variables meteorológicas. Tesis Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, UNAM. México D.F. Mayo.

NASA (2018). NASA study untangles smoke, pollution effects on clouds. California Institute of Technology. California, EU. From: <https://climate.nasa.gov/>

NOM-021-SSA1. (1993). Norma Oficial Mexicana. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. México.

NOM-025-SSA1. (2014). Norma Oficial Mexicana. Salud Ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. México.

ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed December 5, 2018. Subset obtained for MYD14 product at 20.9779, -89.601521, time period: 2016-11-28 to 2016-11-28, and subset size: 100.25 x 100.25 km.

ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed December 5, 2018. Subset obtained for MYD14 product at 20.9779, -89.601521, time period: 2017-04-30 to 2017-04-30, and subset size: 100.25 x 100.25 km.

ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed April 1, 2019. Subset obtained for MYD14 product at 19.6493, -101.2221, time period: 2017-03-01 to 2017-03-02, and subset size: 100.25 x 100.25 km.

ORNL DAAC. 2018. MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accessed April 1, 2019. Subset obtained for MYD14 product at 19.6493, -101.2221, time period: 2017-03-11 to 2017-03-12, and subset size: 100.25 x 100.25 km.

Ortiz, M. I., Vidal, R., Gómez, G. and Álvarez, R. (2003). Evaluación de las plumas de humo de los incendios forestales de 1998 en México y la utilidad de las imágenes NOAA-AVHRR. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense.*, pp. 103-114.

Pandis, S. and Seinfeld, J. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc.

Pöschl, U. (2005). Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health effects. *Angew. Chem. Int. Ed.*; 44, 7520-7540.

ProAire. (2015). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Michoacán 2015-2024. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Michoacán de Ocampo.

Reid, J., Eck, T., Christopher, S., Koppman, R., Dubovik, O., Eleuterio, D., Holben, B., Reid, E. and Zhang, J. (2005). A review of biomass burning emissions part III: intensive optical properties of biomass burning particles. *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 5, 827-849.

Ríos, B. and Raga, G. (2018) Spatio-temporal distribution of burned areas by ecoregions in Mexico and Central America. *Int. Journ. Of Rem. Sens.*, 39:4; 949-970.

Rodríguez-Trejo, D. A., Tchikoué, H., Cíntora, C., Contreras, R., De la Rosa, A. (2011). Modelaje del Peligro de Incendio Forestal en las Zonas Afectadas por el Huracán Dean. *Agro.*, 45: 593-608.

Rodríguez, D. A., Tchikoué, H. and Santillán, J. (2005). Emisiones Contaminantes Durante la Temporada 2003 de Incendios en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.*, 13 (1): 33-39.

Rolph, G., Stein, A., and Stunder, B., (2017). Real-time Environmental Applications and Display system: READY. *Environ. Modell. & Softw.*, 95, 210-228.

Rogers, Ch. M. and Bowman, K. P. (2001). Transport of smoke from the Central American fires of 1998. *J. of Geoph. Res.*, Vol. 106. Pages 28,357-28,368.

SAGARPA (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Subsecretaría de Agricultura. Ciudad de México.

Salazar, K., Arias, E. and Alatríste, M. (2015) Índice de calidad del aire de la Zona Metropolitana de Mérida. Servicios de Ingeniería y Consultoría Ambiental. 2° Congreso Nacional AMICA 2015.

Santamaría Islas, E. (2019) Diagnóstico integral de la contaminación del aire en Mérida, Yucatán. Tesis de Licenciatura. Proyecto de Investigación Curricular. Licenciatura en Ingeniería en Sistema Ambientales, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. IPN. México, D. F. (En desarrollo).

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. *R. Sens. of Environ.*, 143, 85-96.

SEDUMA (2018). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Yucatán. *Pro Aire. SEMARNAT.*

SEMARNAT (2009). Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. *Serie ¿Y el medio ambiente?* Ciudad de Mexico.

Sevine, J. (1995). The Global Impact of Biomass Burning: An Interview with EPA's Robert Huggett. *Env. Sci. and Tech.*, Hampton, USA: NASA Langley Research Center, 12.

SIAP. (2017). Infografía Agroalimentario 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Michoacán de Ocampo.

Smith, R. J. (2009). Use and Misuse on the Reduced Major Axis for Line-Fitting. *American Journal of Physical Anthropology* 140:476-496.

Stein, A.F., Draxler, R.R, Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077.

Sokal, R. R and Rohlf, F. J. (1995) Biometry. 3d Edition. Freeman. New York. Pp 451-541.

Thermo Scientific (2007). Model 48i. *Instruction Manual. Thermo Fisher Scientific Inc.* Air Quality Instruments. United States.

Thermo Scientific (2010). FH62C14. *Instruction Manual. Thermo Fisher Scientific Inc.* Air Quality Instruments. United States.

Tzompa-Sosa, Z., Sullivan, A. P., Retama, A. and Kreindenweis, S. M. (2016). Contribution of Biomass Burning Carbonaceous Aerosols in Mexico City during May 2013. *Aerosol and Air Quality Res.*, 16:114-124.

Venegas, L. and Mazzeo, N. (2000) Carbon Monoxide Concentration in a street canyon of Buenos Aires City (Argentina). *Environ. Mon. and Ass.* 65: 417-424.

Wang, J., Van den Heever, S. C., and Reid, J. S. (2009). A conceptual model for the link between Central American biomass burning aerosols and severe weather over the south central United States. *Environ. Res. Lett.*, 4(1), 015003.

WeatherSpark (2016). El clima promedio en Mérida. México. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/>

Whitby, K. and Cantrell, B. (1976). Fine particles. *Proc. Int. Confe. Environ. Sens. and Ass.*, Las Vegas, NV, Institute of Electrical and Electronic Engineers.

Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., and Soja, A. J. (2011). The Fire Inventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning, *Geosci. Model Dev.*, 4, 625-641, doi:10.5194/gmd-4-625-2011.

Xolocotzi, E. H. (1998). Aspectos de la domesticación de plantas en México: una apreciación personal. En: *Diversidad Biológica de México (compiladores) T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa.* Instituto de Biología. Universidad Autónoma de México. Pp. 715-735.

Yokelson, R. J., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Toohey, D. W., Alvarado, E. C., Crouse, J. D., Wennberg, P. O., Fisher, M. E., Wold, C. E., Campos, T. L., Adachi, K., Buseck, P. R. and Hao, W. M. (2007). Emissions from forest fires near Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.*, 7:5569-5584.

Yokelson, R. J., Crouse, J. D., DeCarlo, P.F, Karl, T., Urbanski, S., Atlas, E., Campos, T., Shinozuka, Y., Kapustin, V., Clarke, A. D., Weinheimer, A., Knapp, D. J., Montzka, D. D., Holloway, J., Weibring, P., Flocke, F., Jimenez, J. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Hall, S. R. and Shetter, R. (2009). Emissions from biomass burning in the Yucatan. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 5785-5812.

Yokelson, R. J., Burling, I. R., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Toohey, D. W., and Wold C.E. (2011). Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico. *Atmos. Chem. Phys.*, 11:6787-6808.

Yokelson, R. J., Andreae, M.O. and Akagi, S.K. (2013). Pitfalls with the use of enhancement ratios or normalized excess mixing ratios measured in plumes to characterize pollution sources and aging. *Atmos. Meas. Tech.* 6: 2155–2158

Anexo I

Las imágenes presentadas en este anexo son el complemento de los eventos seleccionados durante los tres periodos en Mérida y Morelia presentados en la figura 4.7, en la gráfica de dispersión, así como en los resultados presentados en la tabla 4.3. Se presentan todas las series de tiempo para CO y PM_{2.5} de todos los eventos analizados durante esta investigación, así como las rosas de contaminantes y las imágenes obtenidas a partir de los resultados de MODIS y VIIRS en conjunto con las trayectorias de retroceso obtenidas en HYSPLIT.

En la mayoría de los eventos, incluso en aquellos con baja correlación, puede observarse que los resultados mostrados son congruentes entre las imágenes de satélite y los datos de monitoreo. Esto resultados son similares a los presentados en la sección de Resultados por lo cual el método resulta ser adecuado en ambas ciudades.

13 y 14 de noviembre de 2016, Mérida

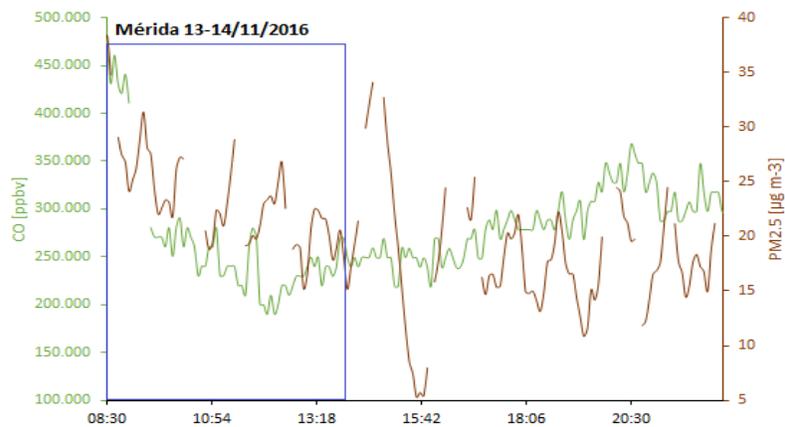


Figura A1. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 13 y 14 de noviembre de 2016 en Mérida. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

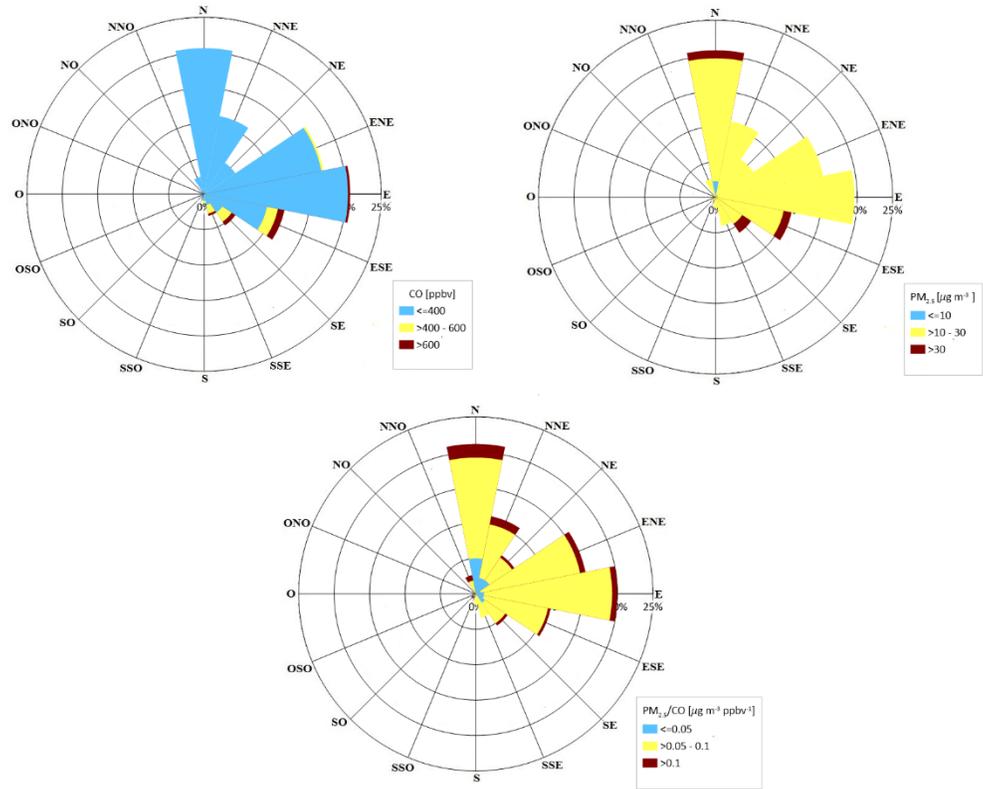


Figura A2. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 13 y 14 de noviembre de 2016 en Mérida, Yucatán.

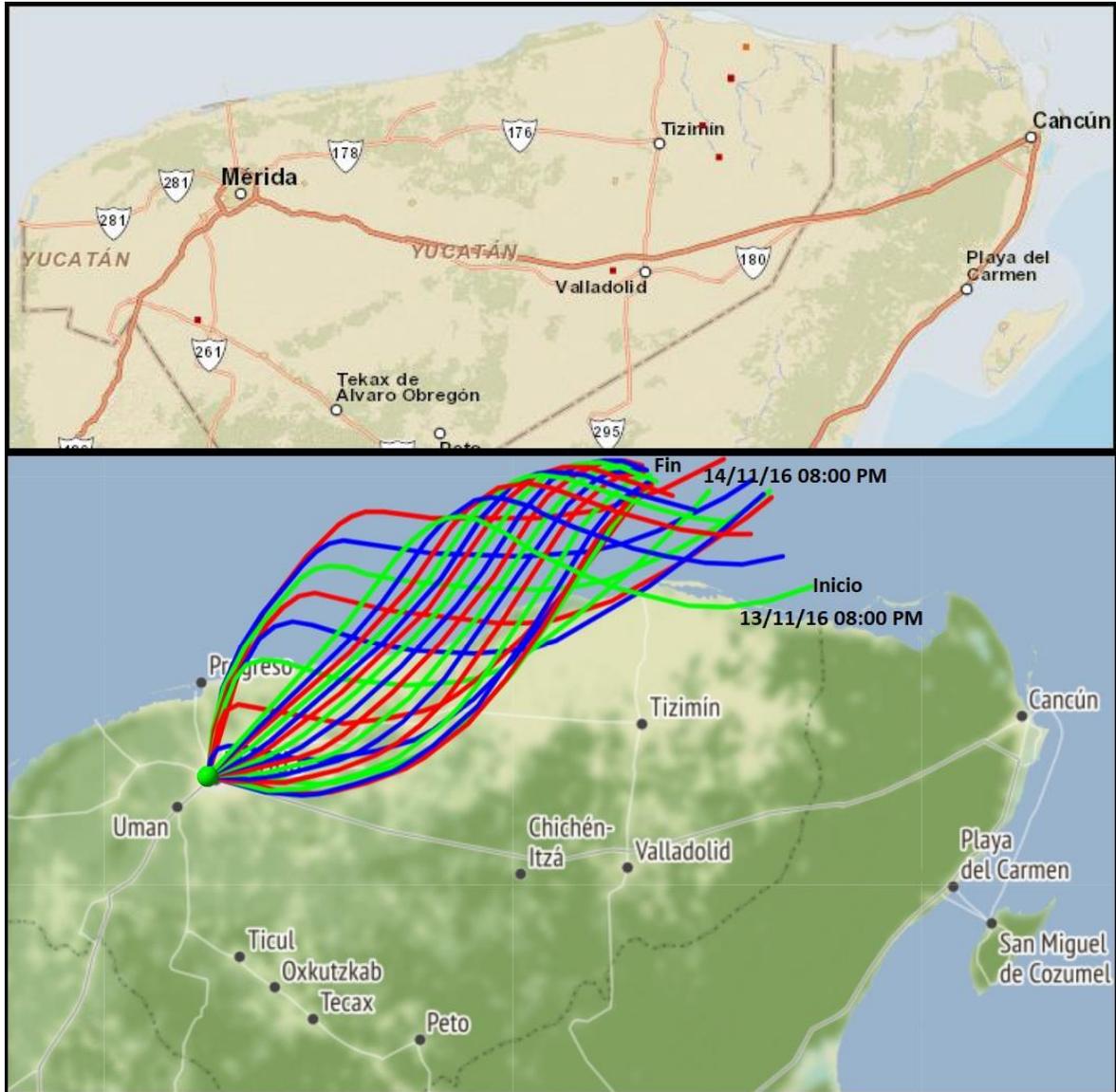


Figura A3. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 13 y 14 de noviembre de 2016 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 24 horas para el 14 de noviembre de 2016 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

31 de marzo de 2017, Mérida

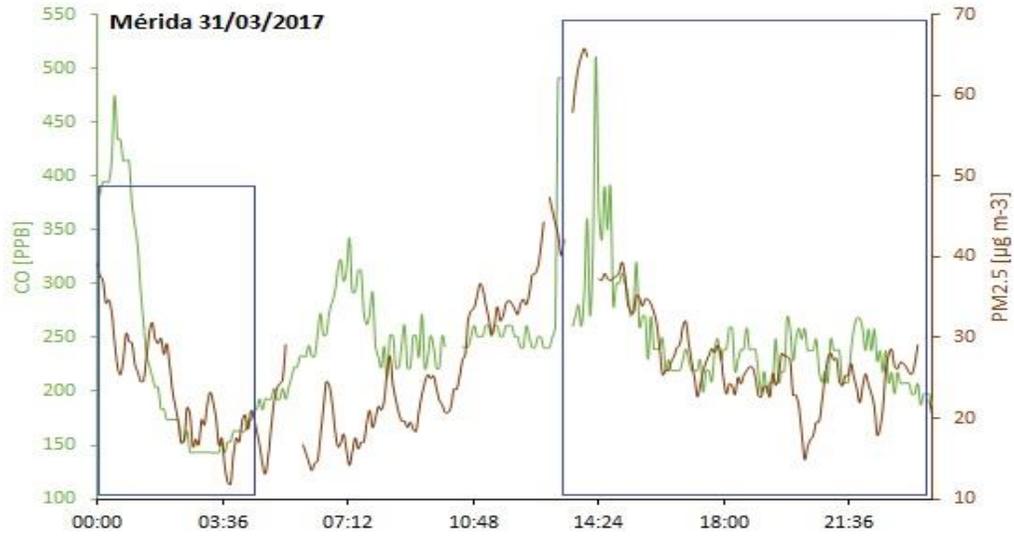


Figura A4. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 31 de marzo de 2017 en Mérida. Los recuadros azules representan el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

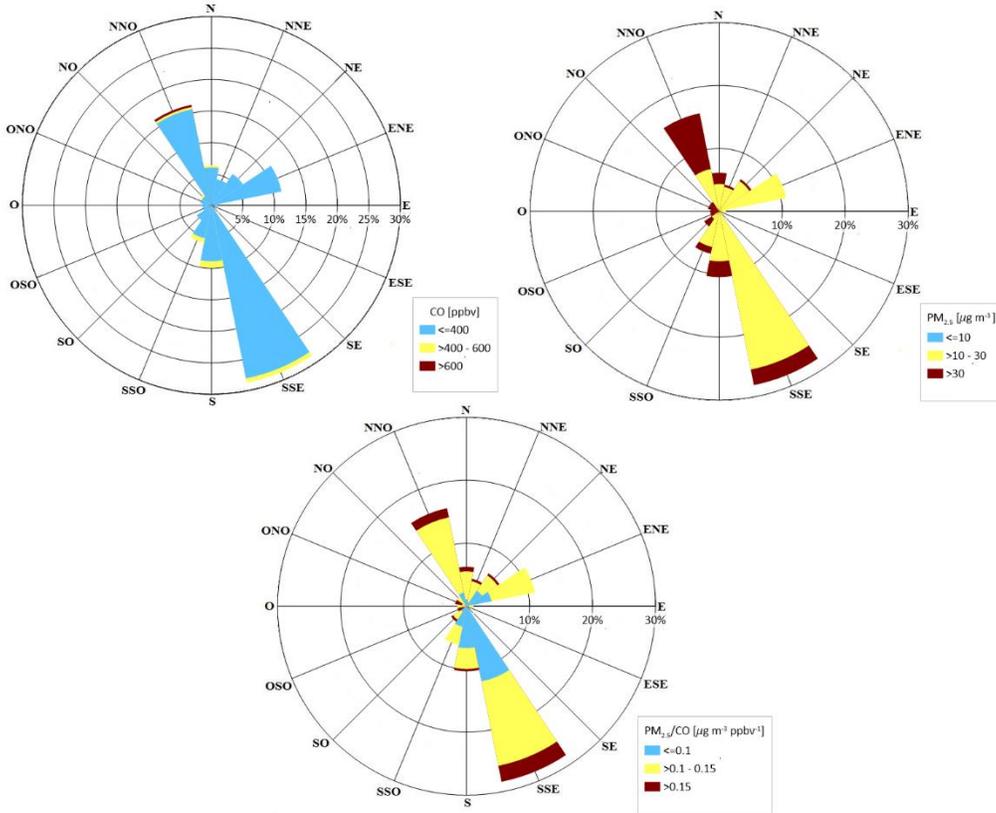


Figura A5. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 31 de marzo de 2017 en Mérida, Yucatán.

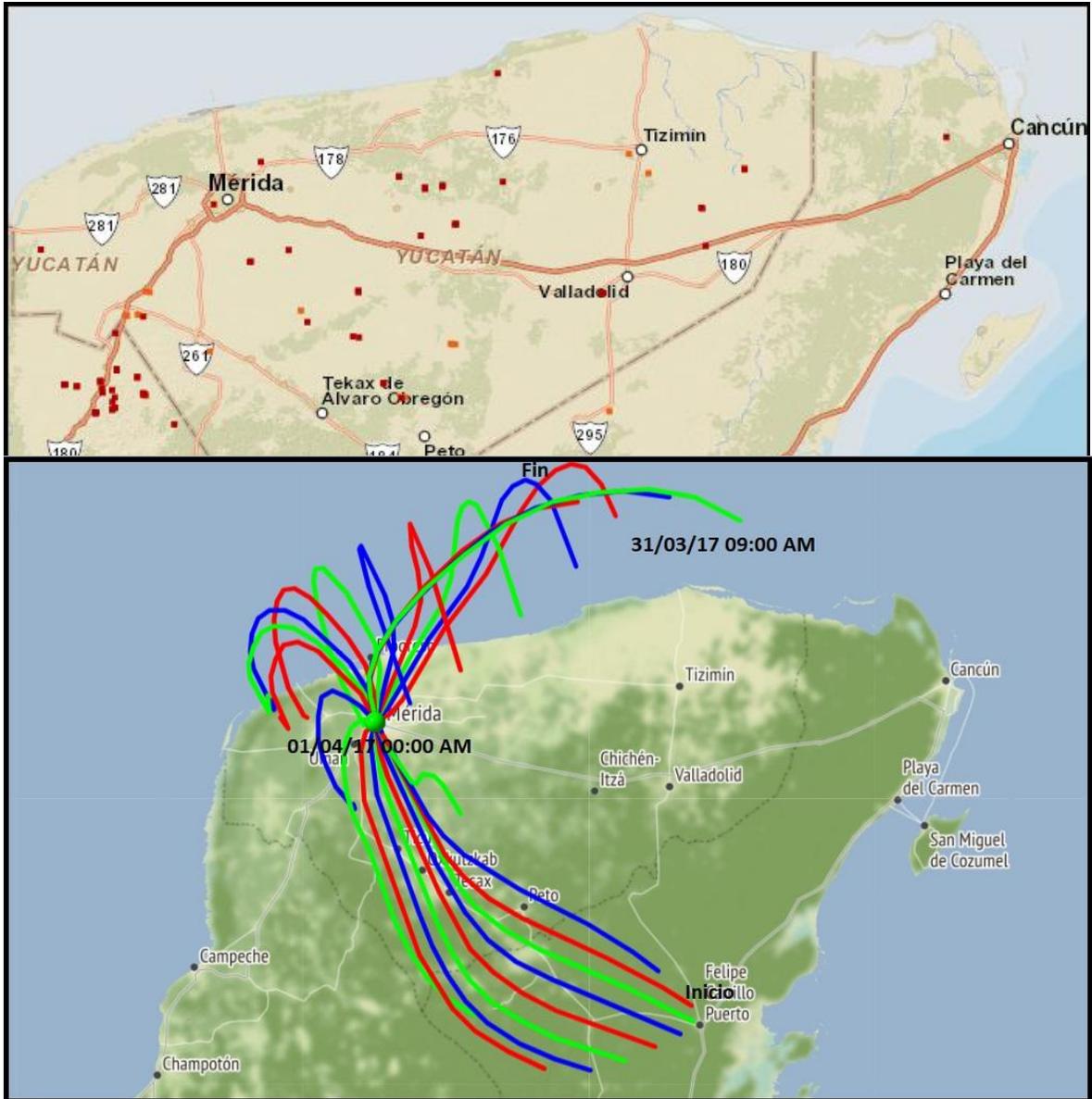


Figura A6. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 31 de marzo de 2017 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 15 horas para el 31 de marzo de 2017 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

27 de abril de 2017, Mérida

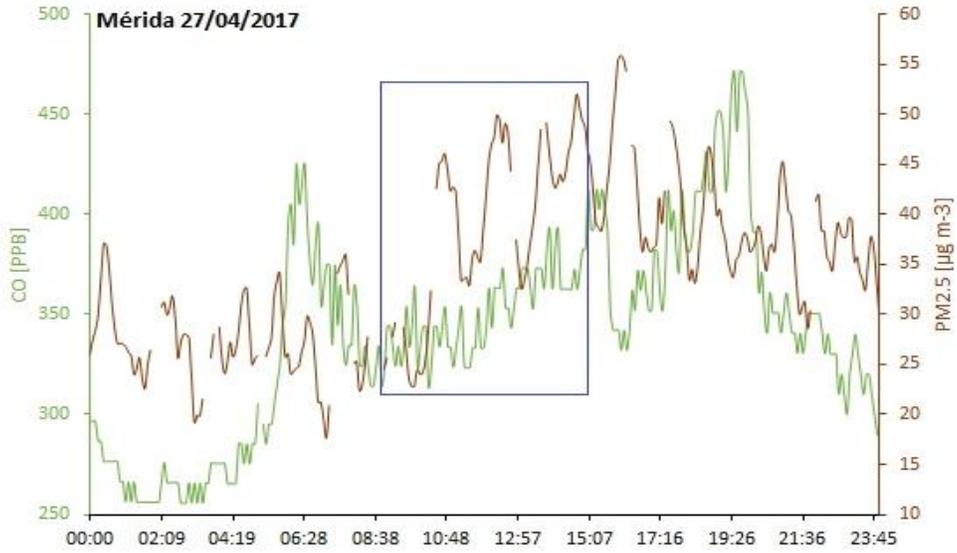


Figura A7. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 27 de abril de 2017 en Mérida. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

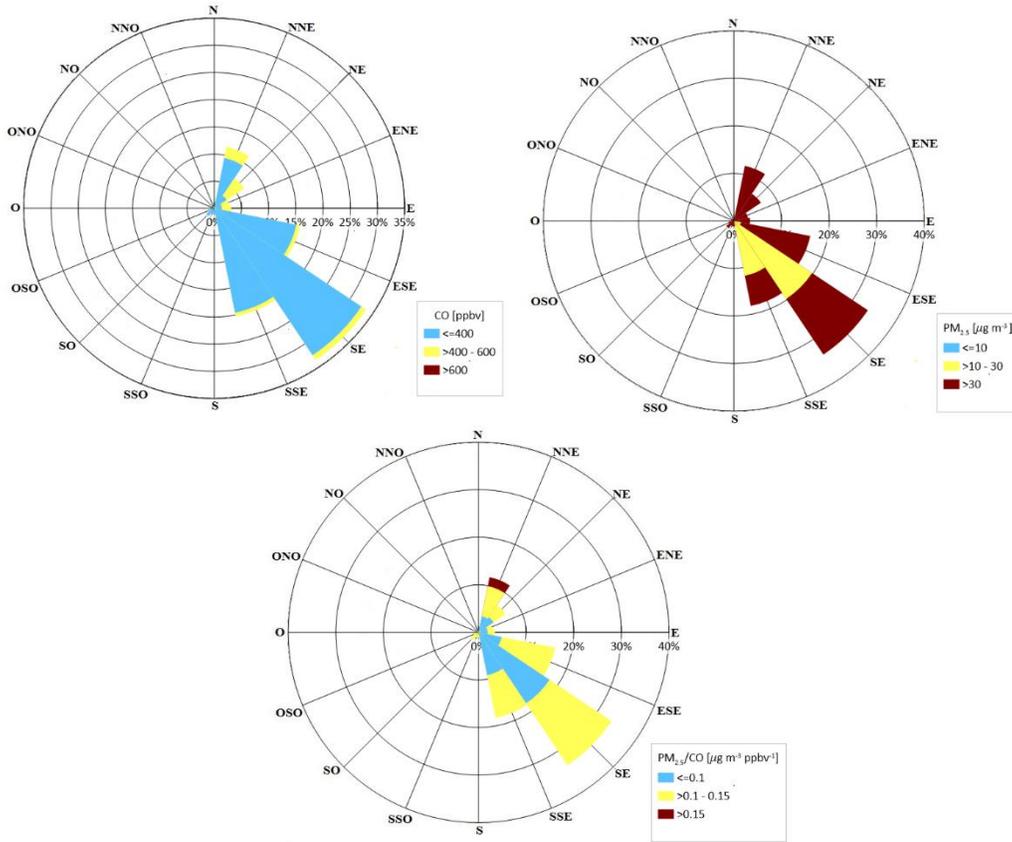


Figura A8. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 27 de abril de 2017 en Mérida, Yucatán.

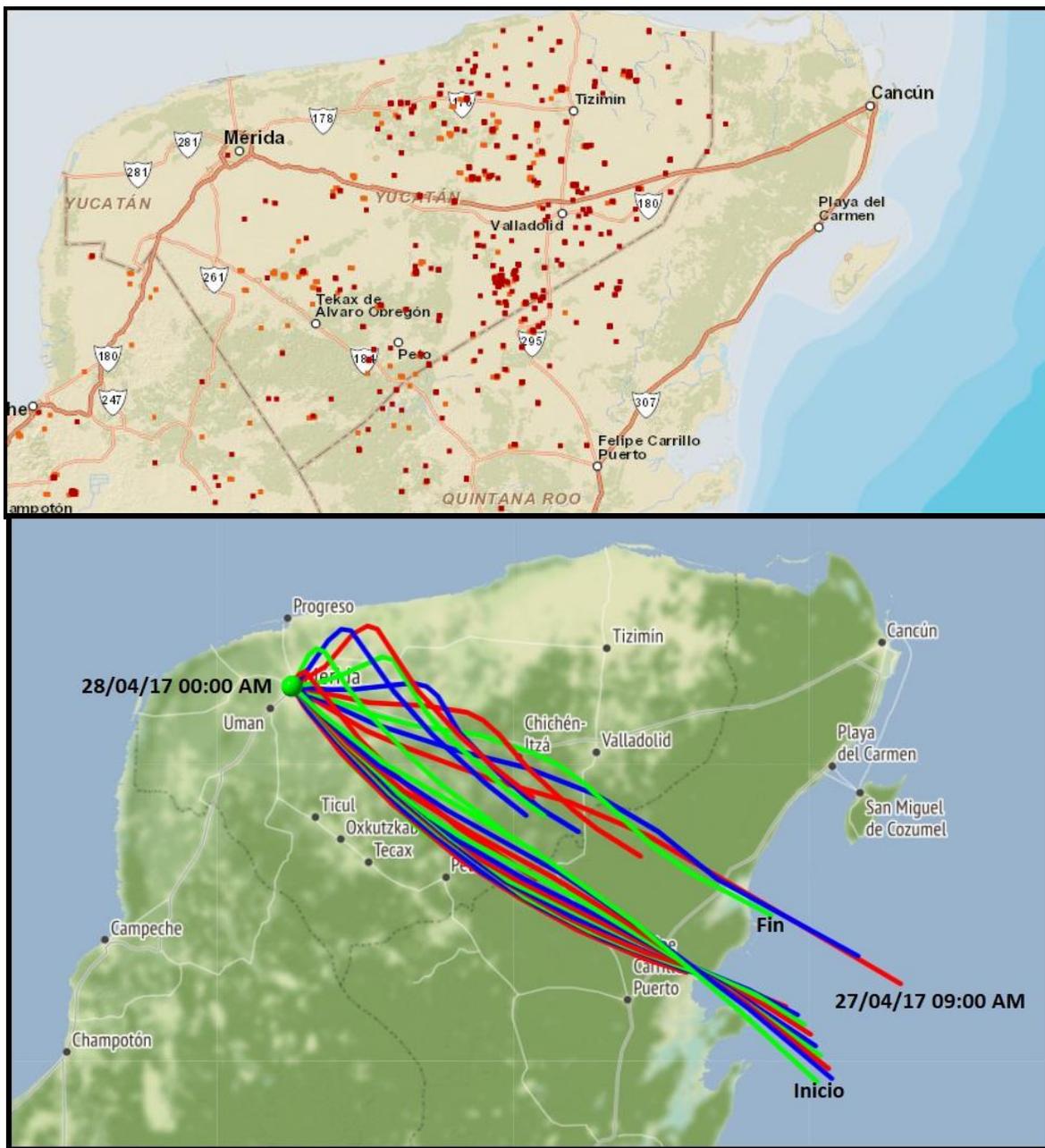


Figura A9. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 27 de abril de 2017 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 15 horas para el 27 de abril de 2017 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

24 de mayo de 2017, Mérida

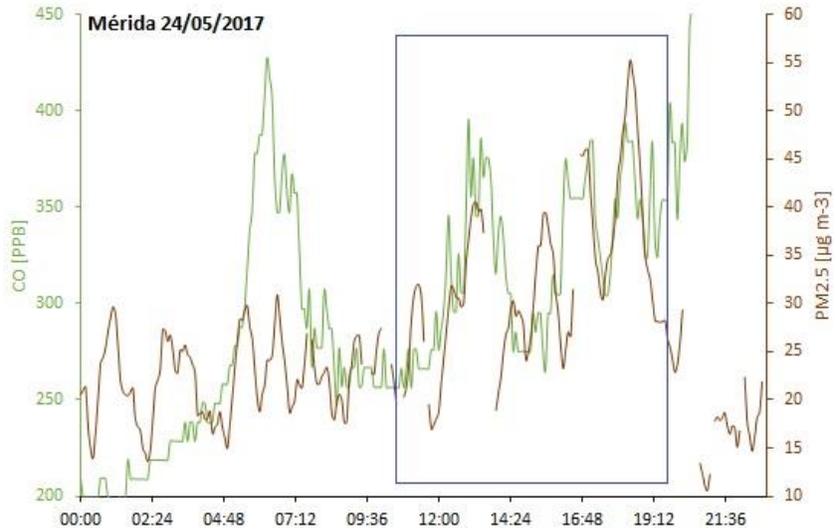


Figura A10. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 24 de mayo de 2017 en Mérida. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

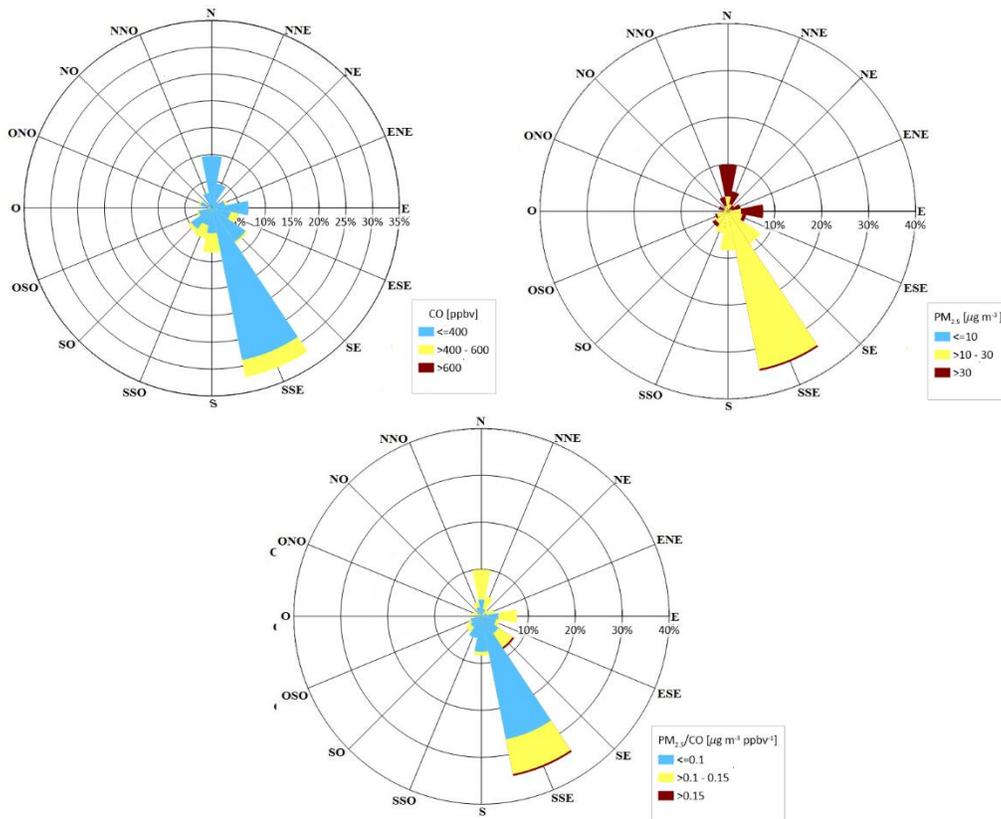


Figura A11. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 24 de mayo de 2017 en Mérida, Yucatán.

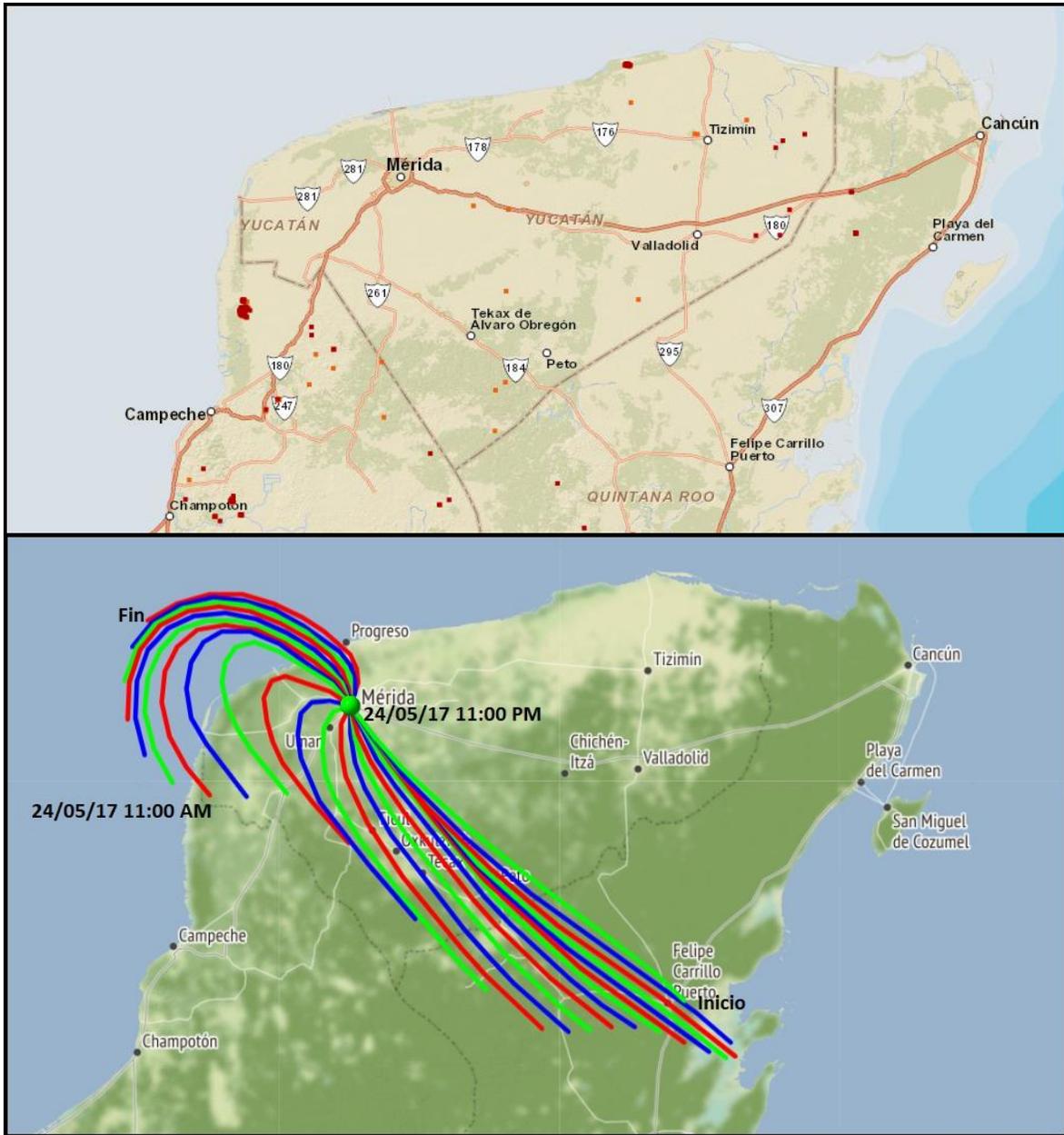


Figura A12. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 24 de mayo de 2017 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 12 horas para el 24 de mayo de 2017 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

9 de junio de 2017, Mérida

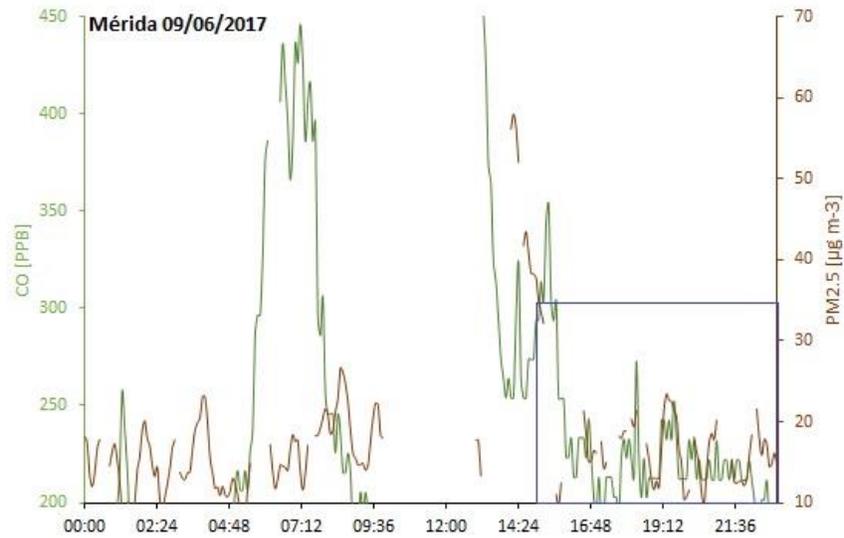


Figura A13. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 9 de junio de 2017 en Mérida. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

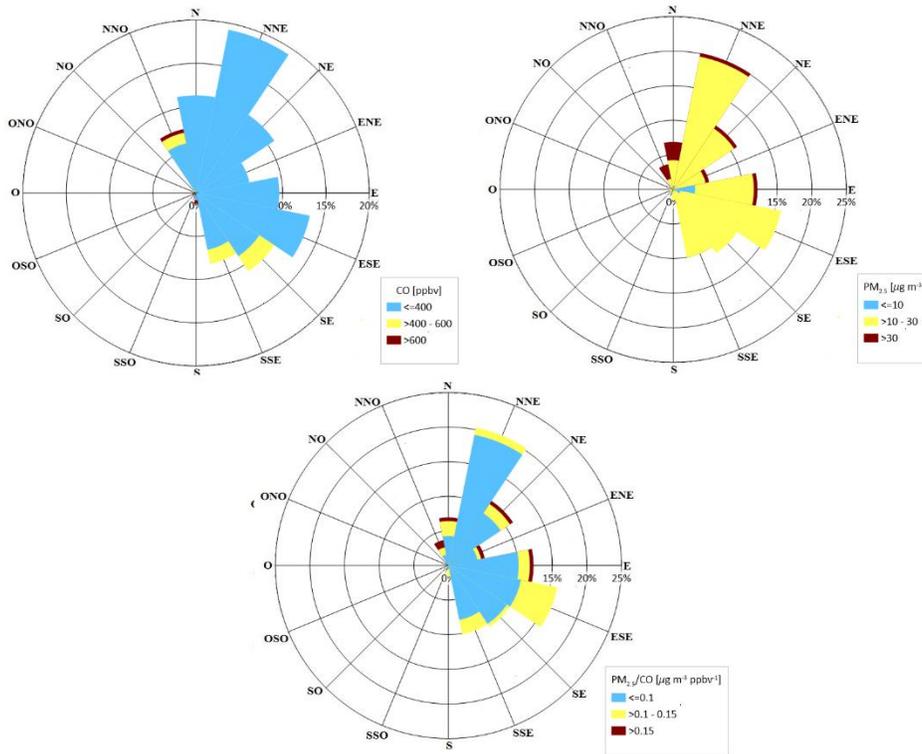


Figura A14. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 9 de junio de 2017 en Mérida, Yucatán.

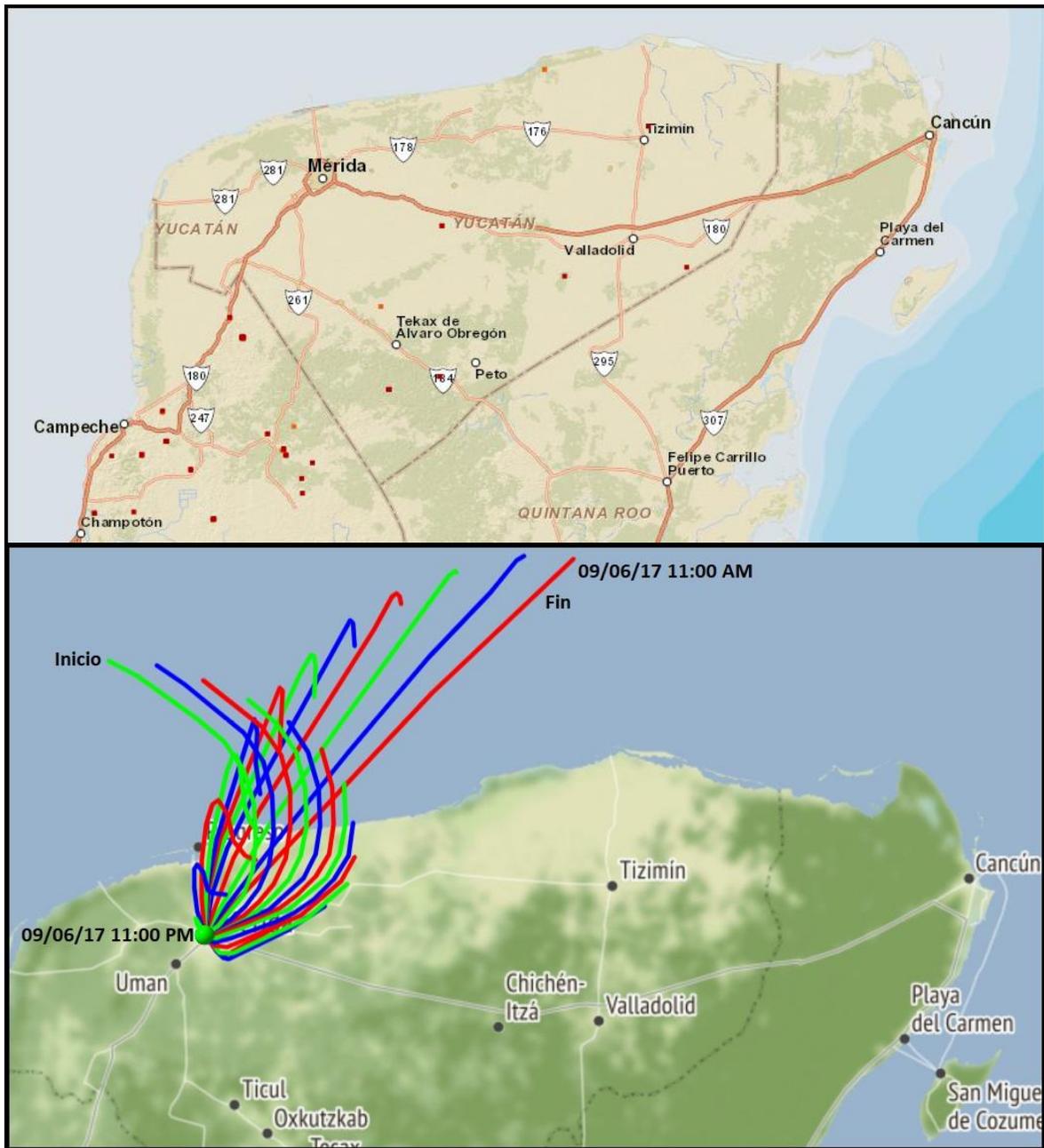


Figura A15. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 9 de junio de 2017 en Mérida. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 12 horas para el 9 de junio de 2017 en Mérida obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

4 de marzo de 2017, Morelia

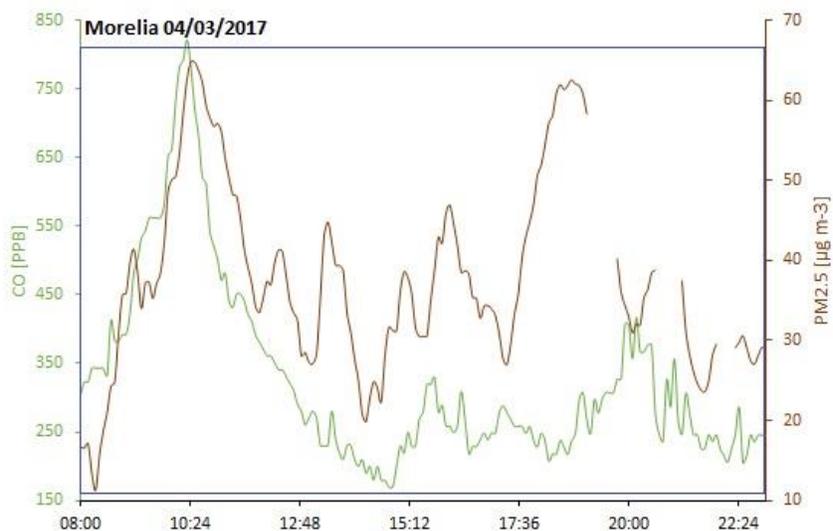


Figura A16. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 4 de marzo de 2017 en Morelia. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

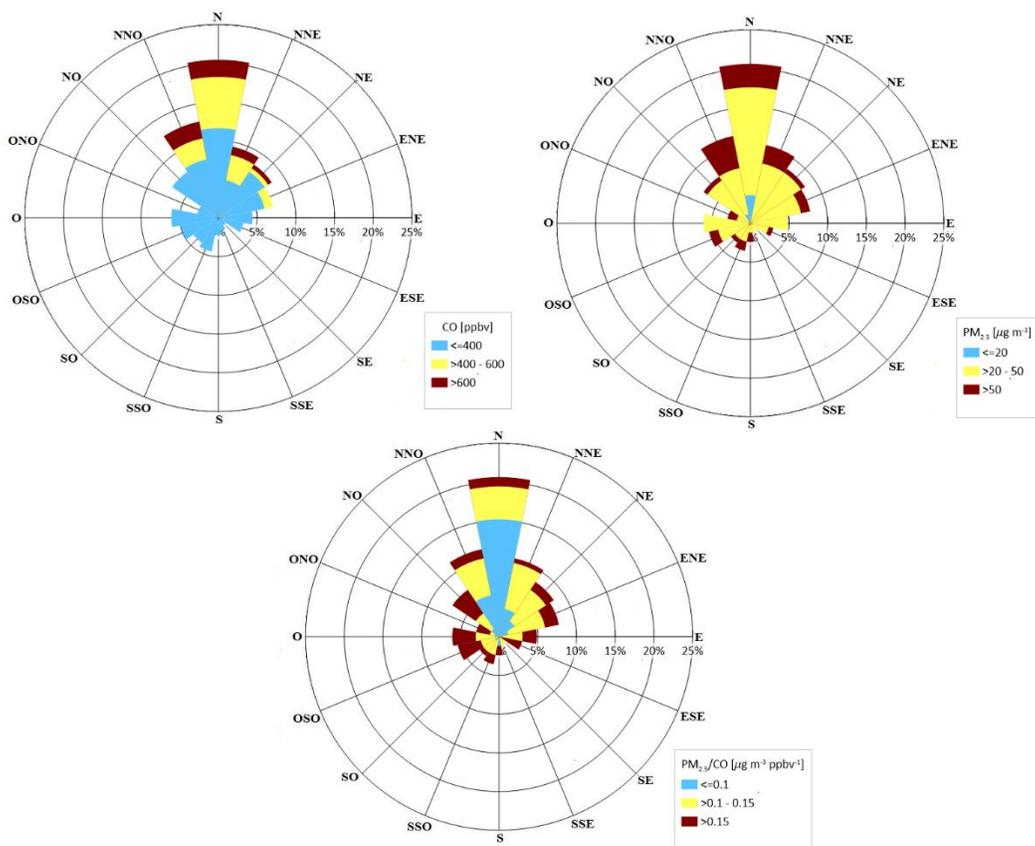


Figura A17. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 4 de marzo de 2017 en Morelia, Michoacán.

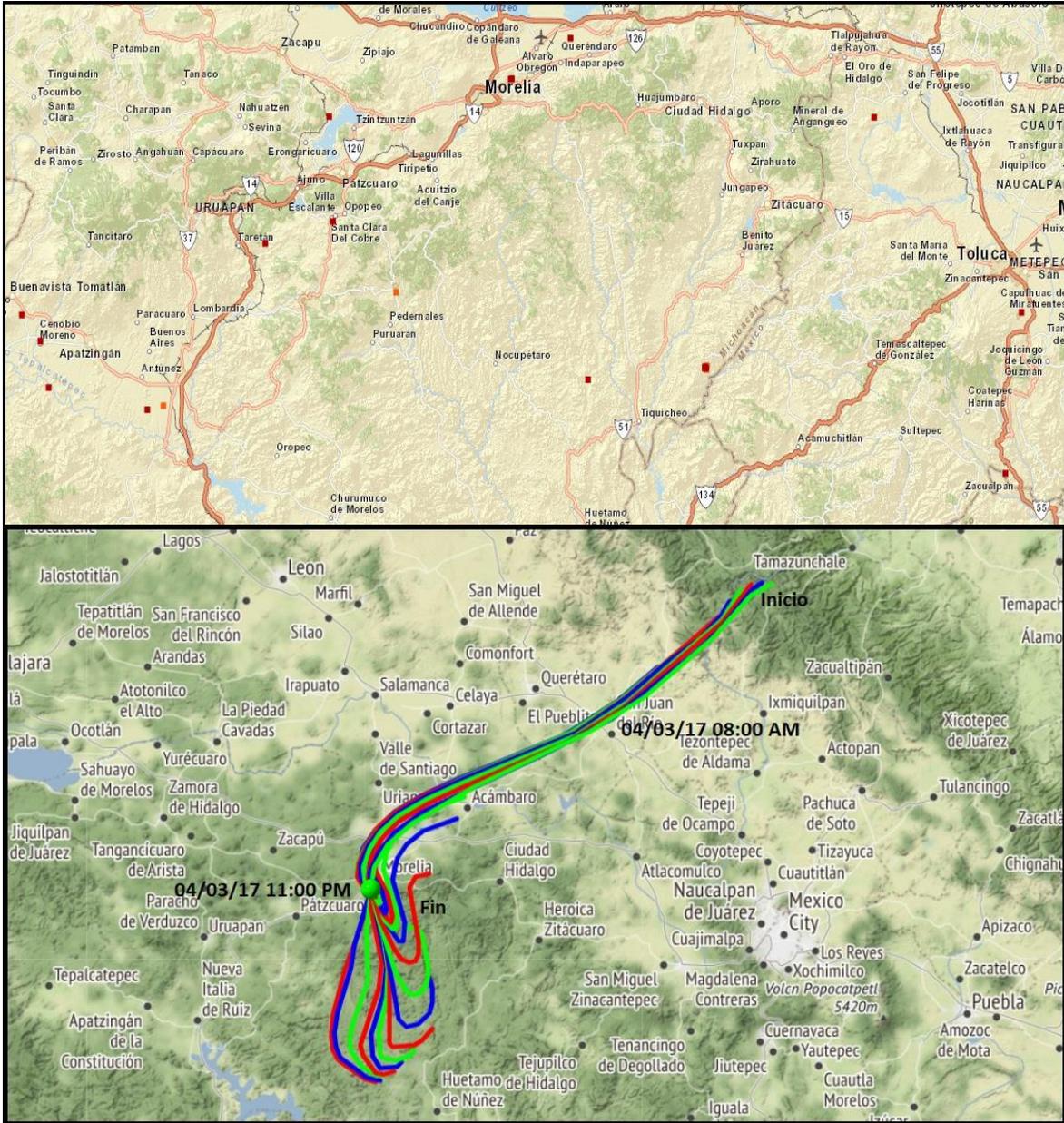


Figura A18. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 4 de marzo de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 15 horas para el 4 de marzo de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

8 de abril de 2017, Morelia

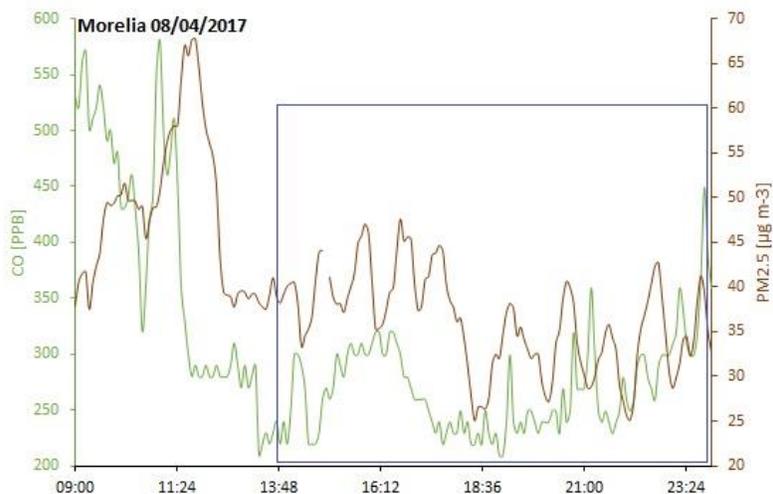


Figura A19. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 8 de abril de 2017 en Morelia. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

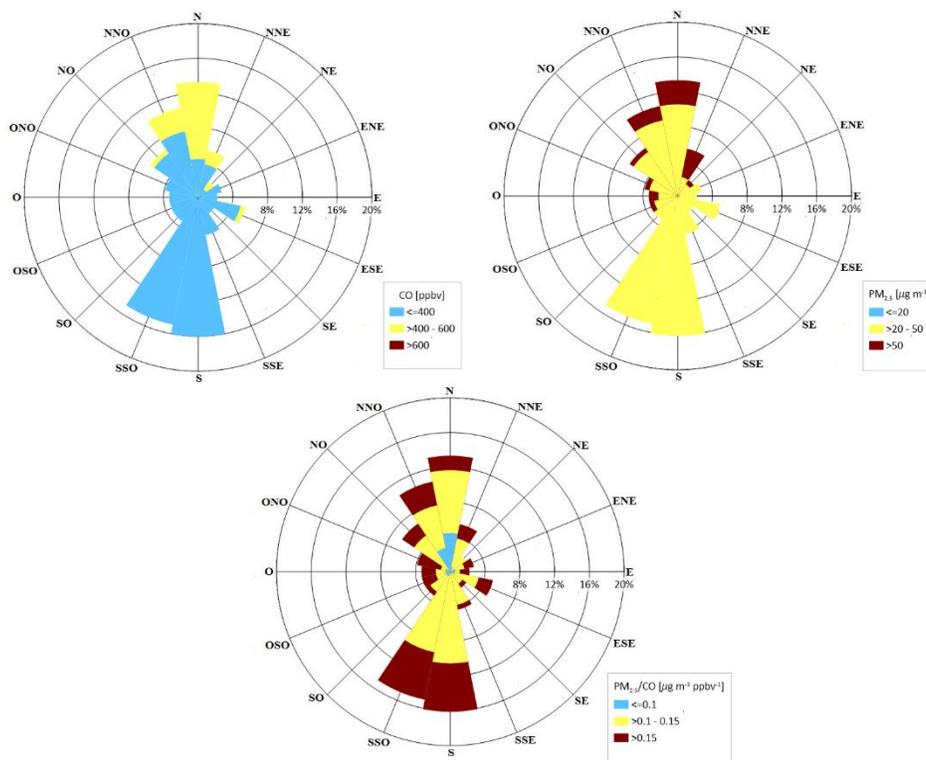


Figura A20. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 8 de abril de 2017 en Morelia, Michoacán.

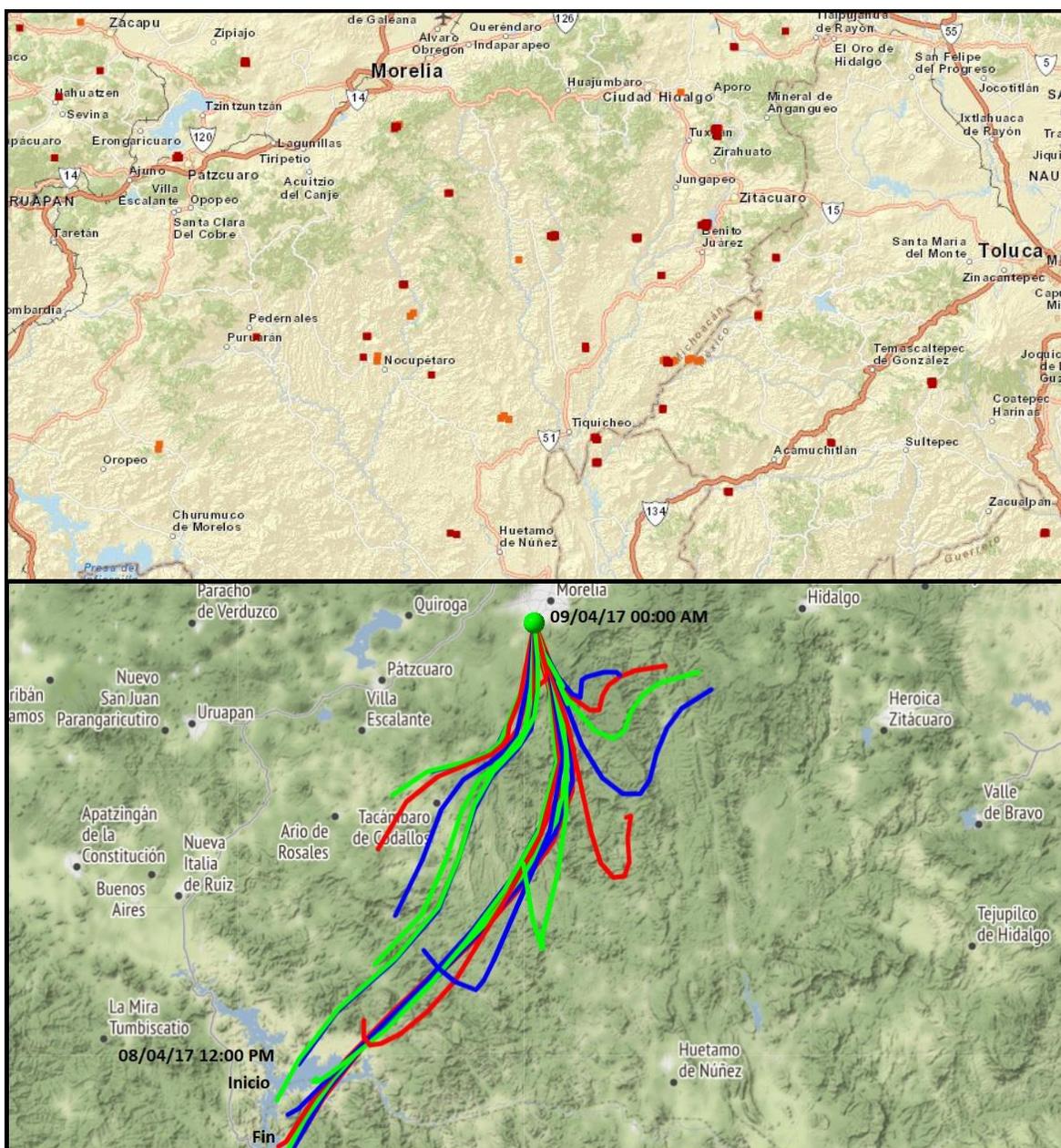


Figura 21. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 8 de abril de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 12 horas para el 8 de abril de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

15 y 16 de abril de 2017, Morelia

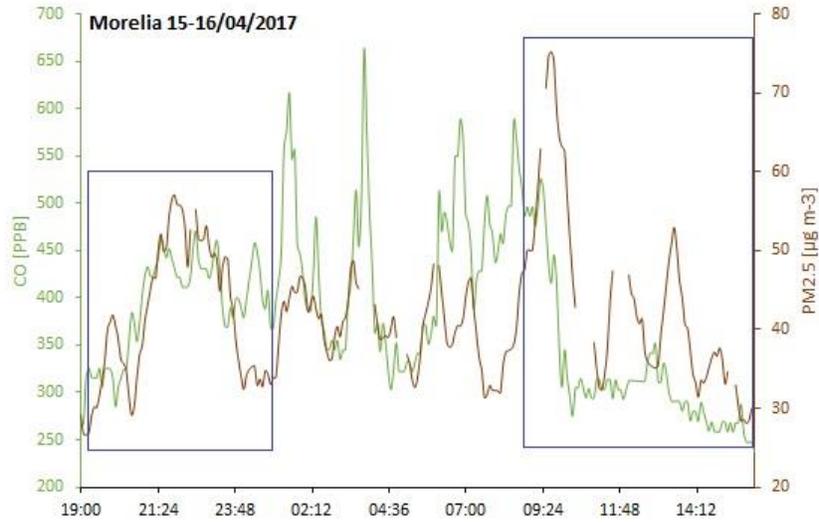


Figura A22. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 15 y 16 de abril de 2017 en Morelia. Los recuadros azules representan el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

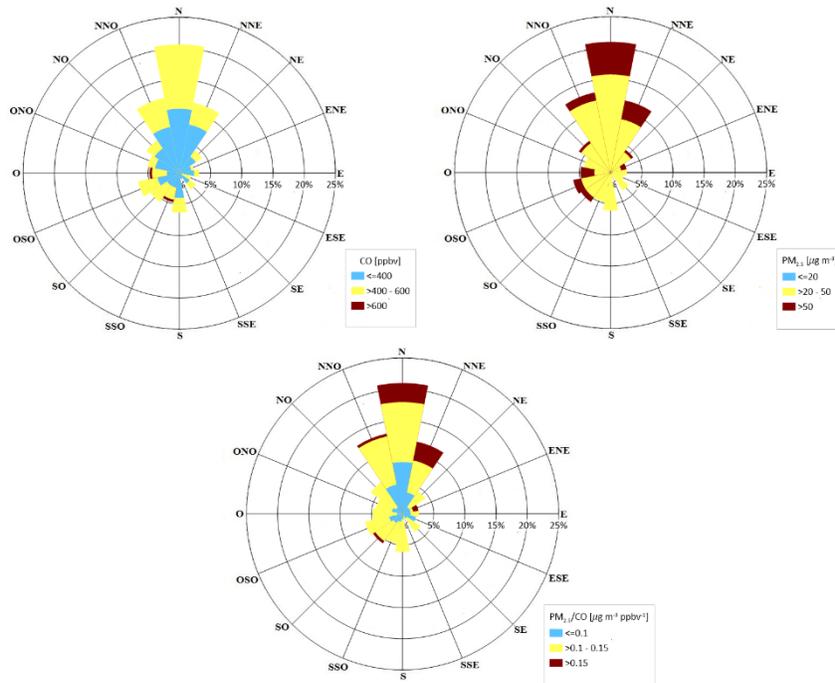


Figura A23. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 15 y 16 de abril de 2017 en Morelia, Michoacán.

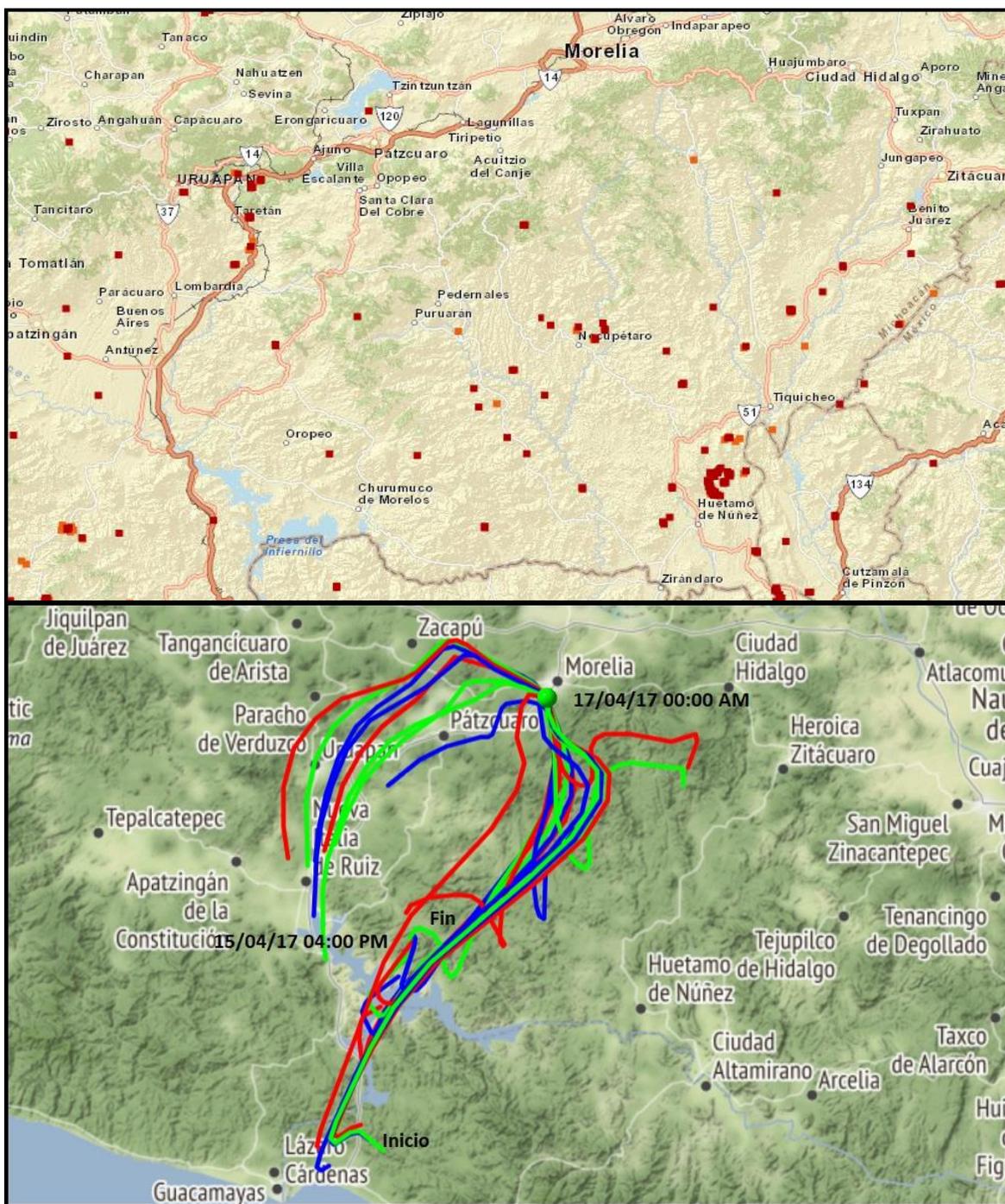


Figura A24. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 15 y 16 de abril en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 21 horas para el 15 y 16 de abril en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

28 de abril de 2017, Morelia

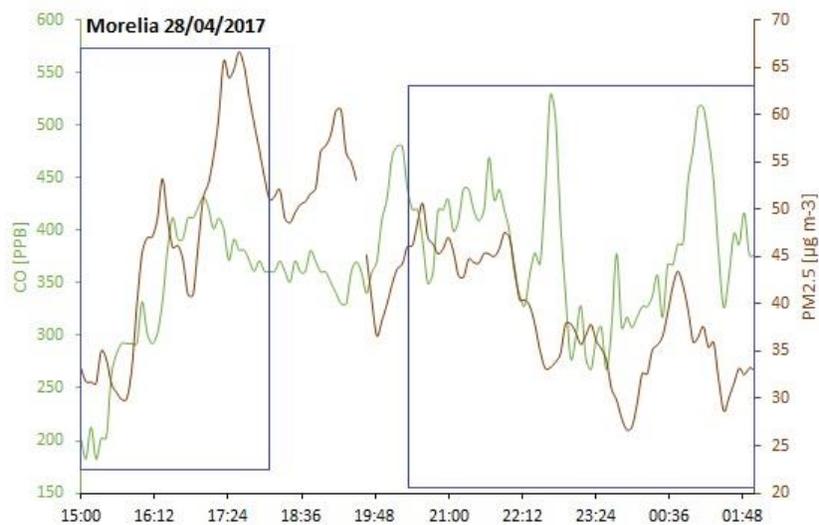


Figura A25. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 28 de abril de 2017 en Morelia. Los recuadros azules representan el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

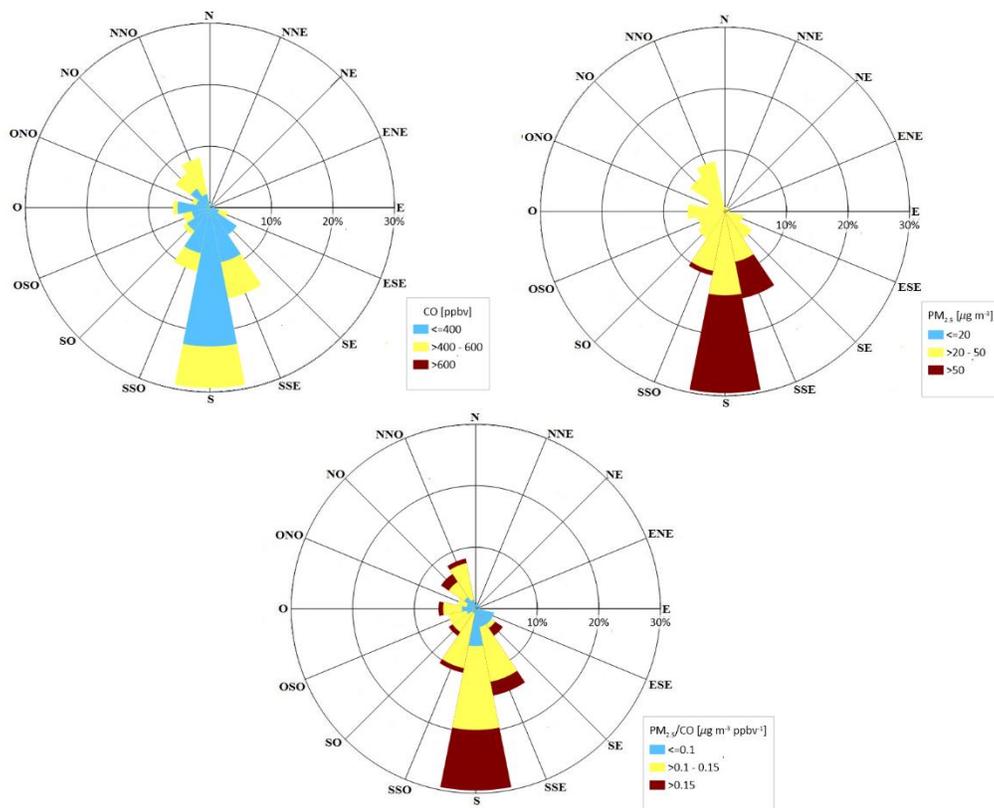


Figura A26. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 28 de abril de 2017 en Morelia, Michoacán.

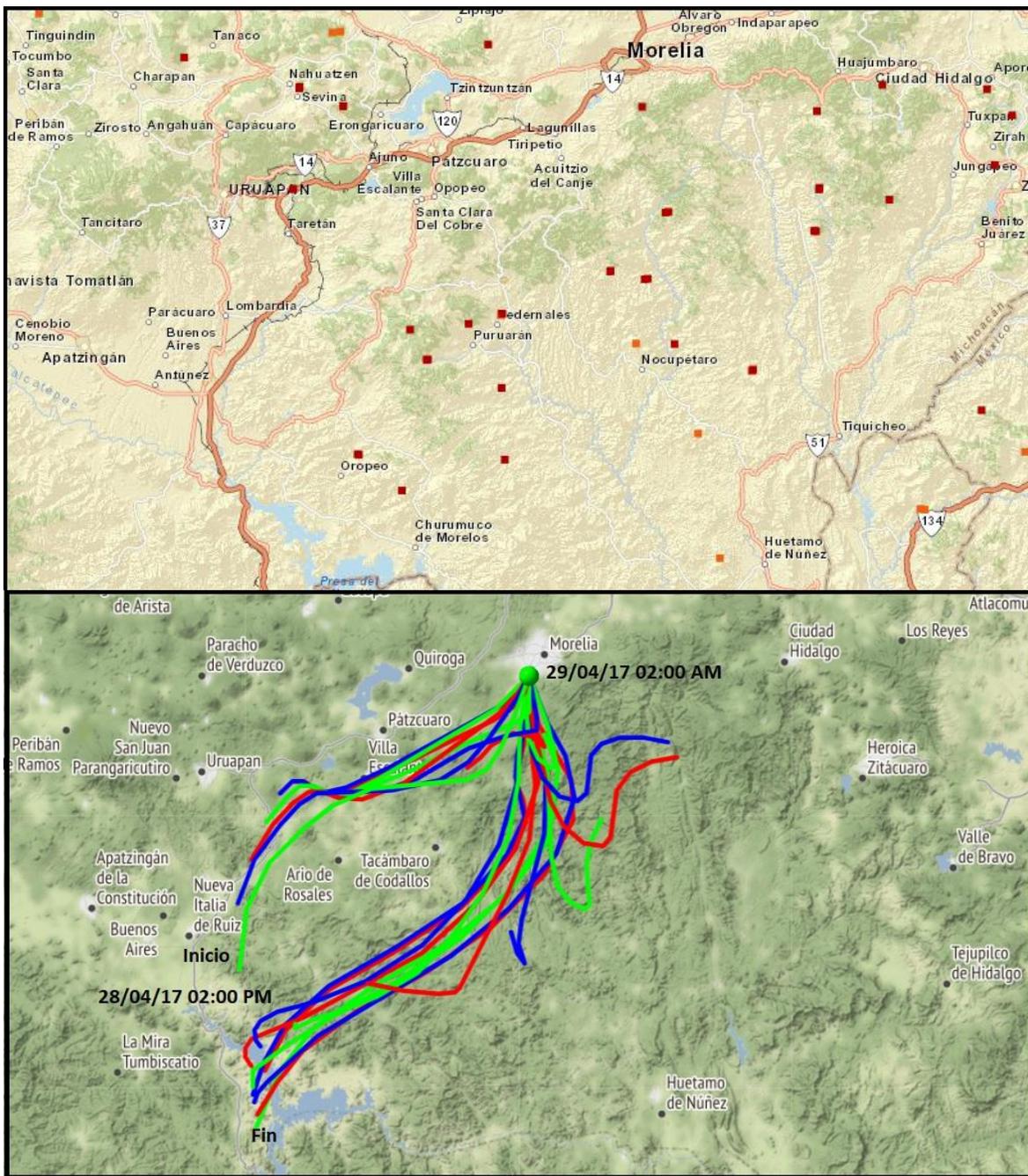


Figura A27. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 28 de abril de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 12 horas para el 28 de abril de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

29 de abril de 2017, Morelia

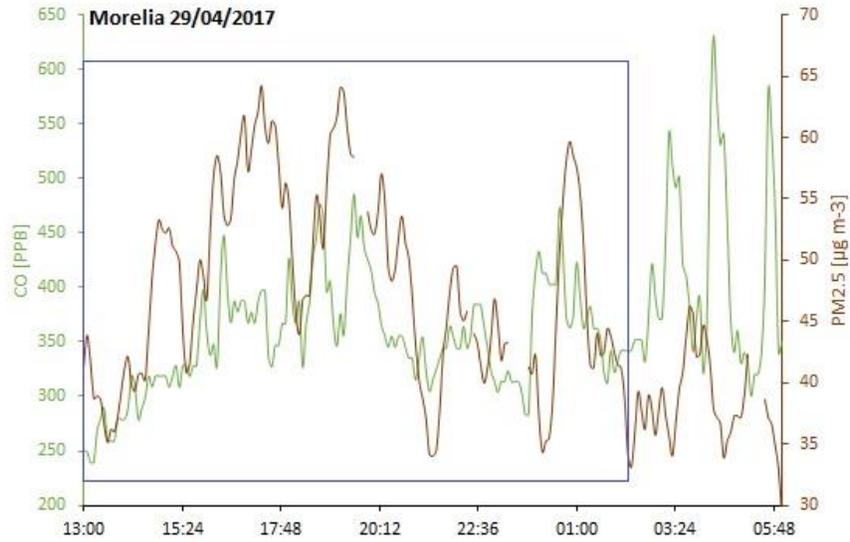


Figura A28. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 29 de abril de 2017 en Morelia. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

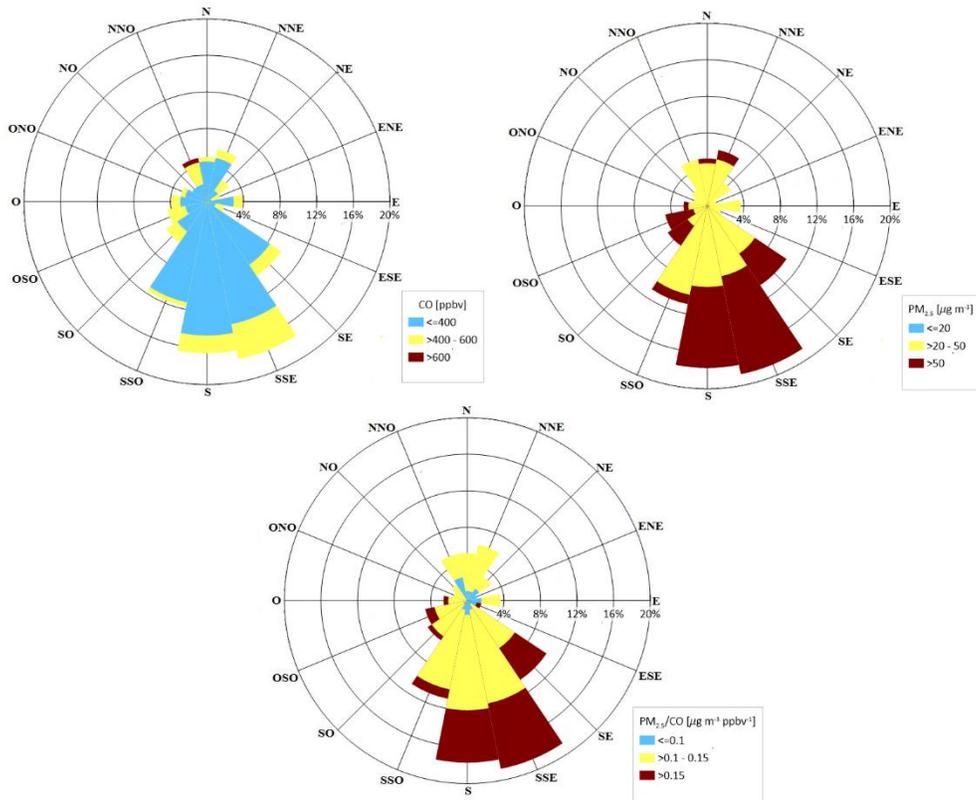


Figura A29. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 29 de abril de 2017 en Morelia, Michoacán.

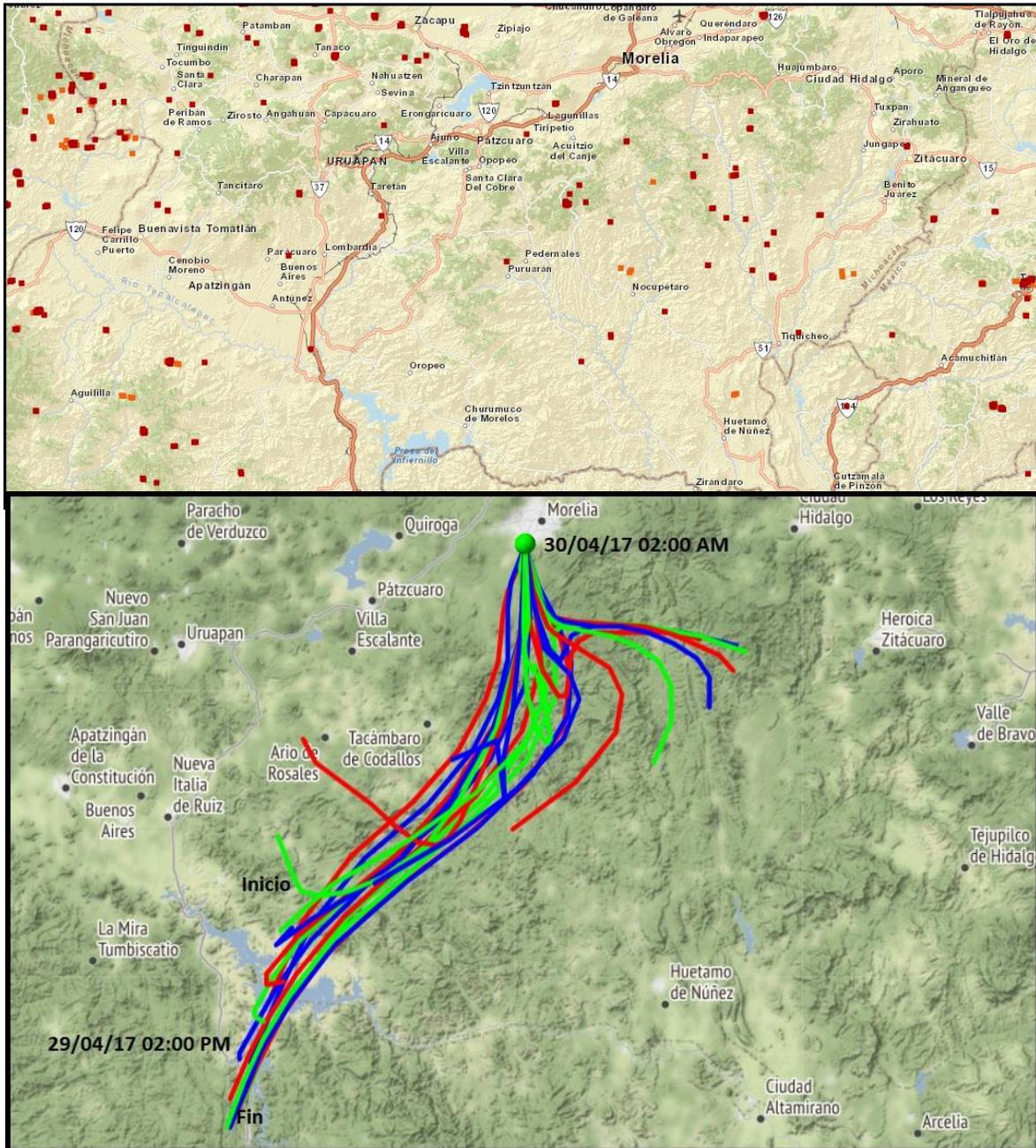


Figura A30. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 29 de abril de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 12 horas para el 29 de abril en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

30 de abril al 3 de mayo de 2017, Morelia

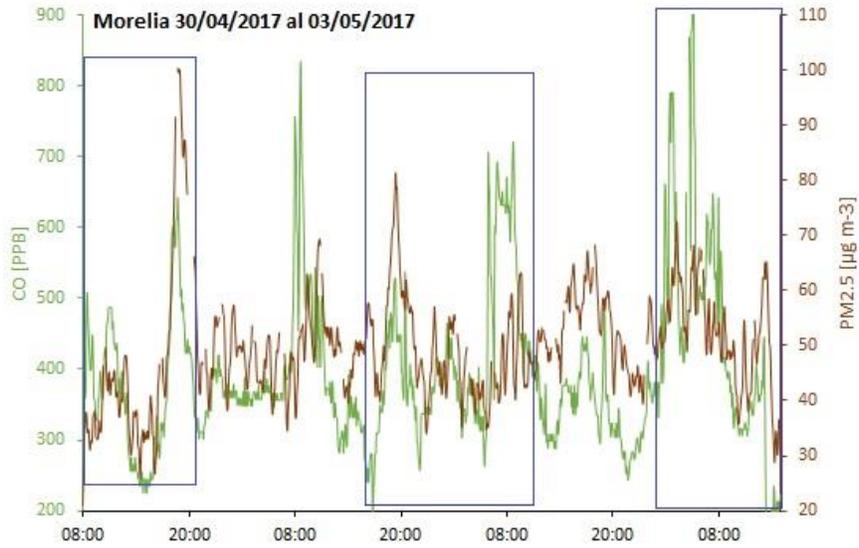


Figura A31. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 30 de abril al 3 de mayo de 2017 en Morelia. Los recuadros azules representan el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

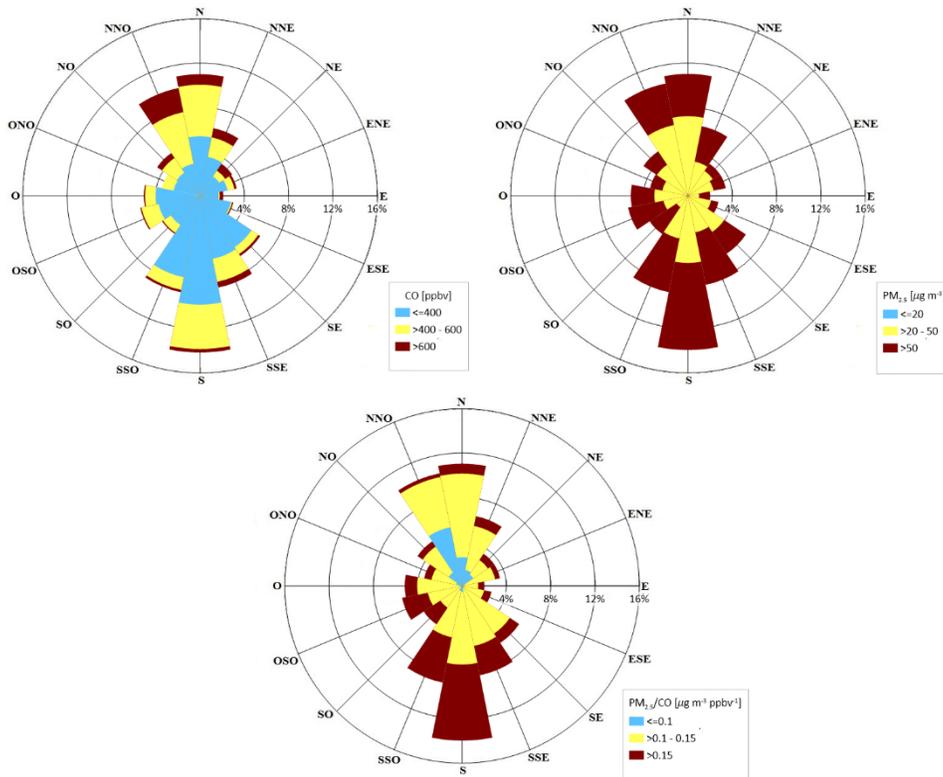


Figura A32. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el evento del 30 de abril al 3 de mayo de 2017 en Morelia, Michoacán.

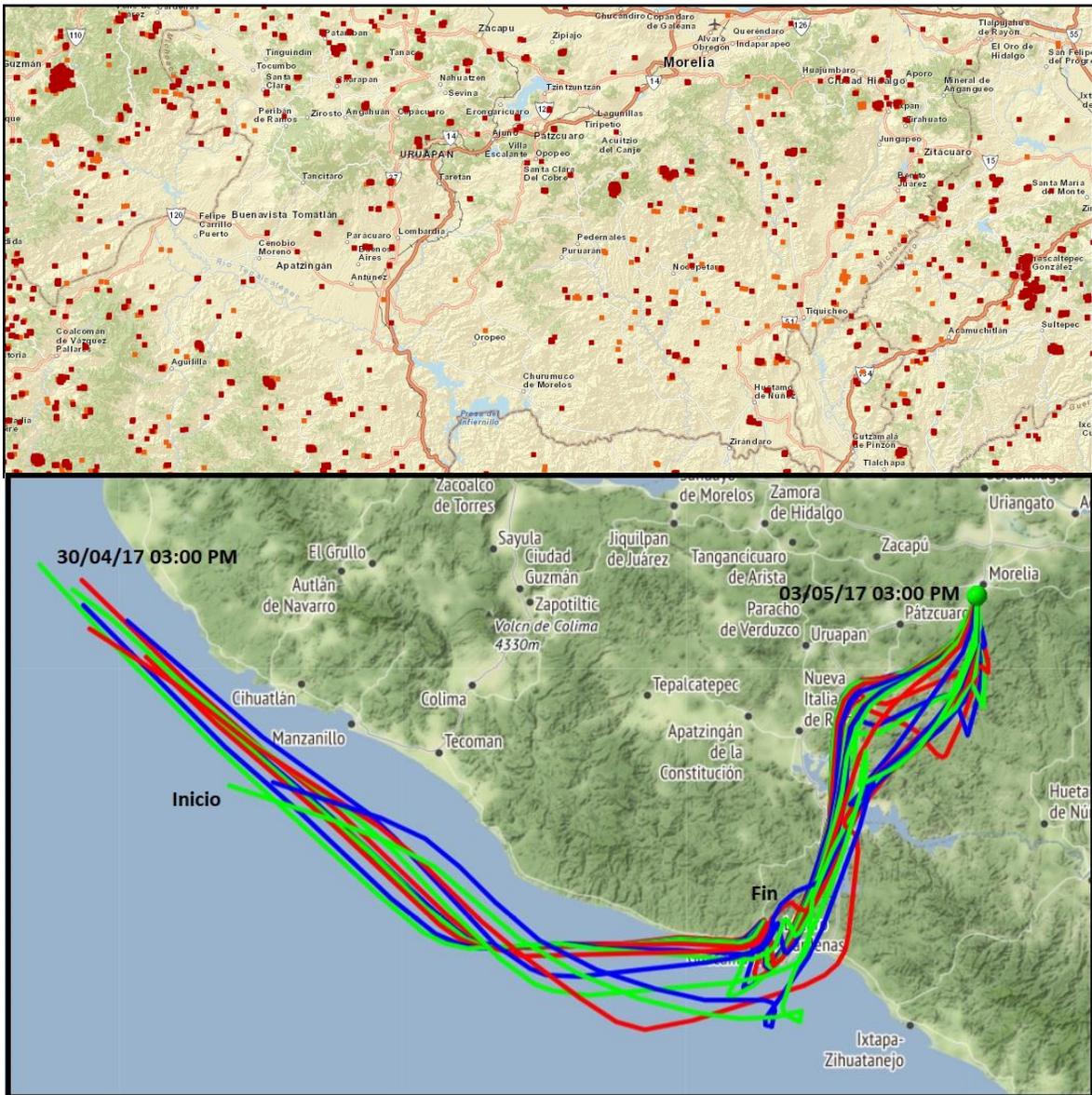


Figura A33. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) desde el 30 de abril al 3 de mayo de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 48 horas para el evento del 30 de abril al 3 de mayo de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

13 y 14 de mayo de 2017, Morelia

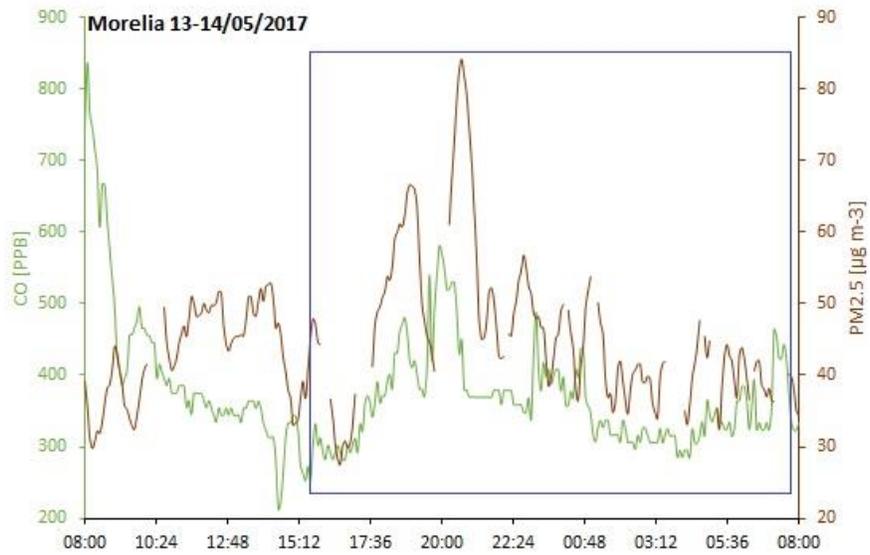


Figura A34. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 13 y 14 de mayo de 2017 en Morelia. El recuadro azul representa el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

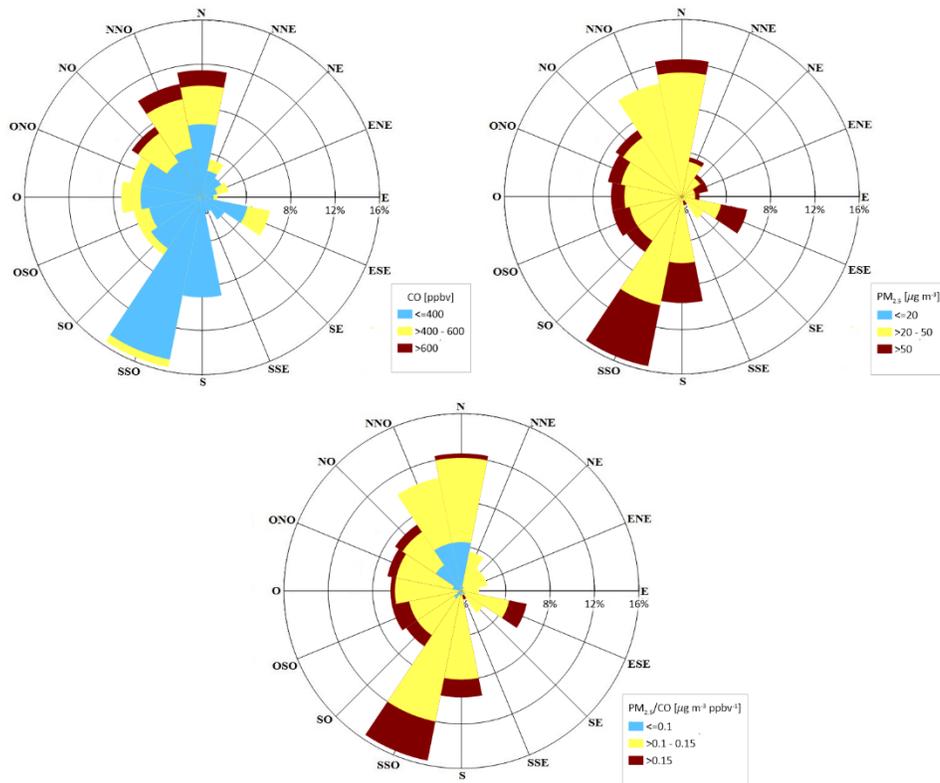


Figura A35. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 13 y 14 de mayo de 2017 en Morelia, Michoacán.

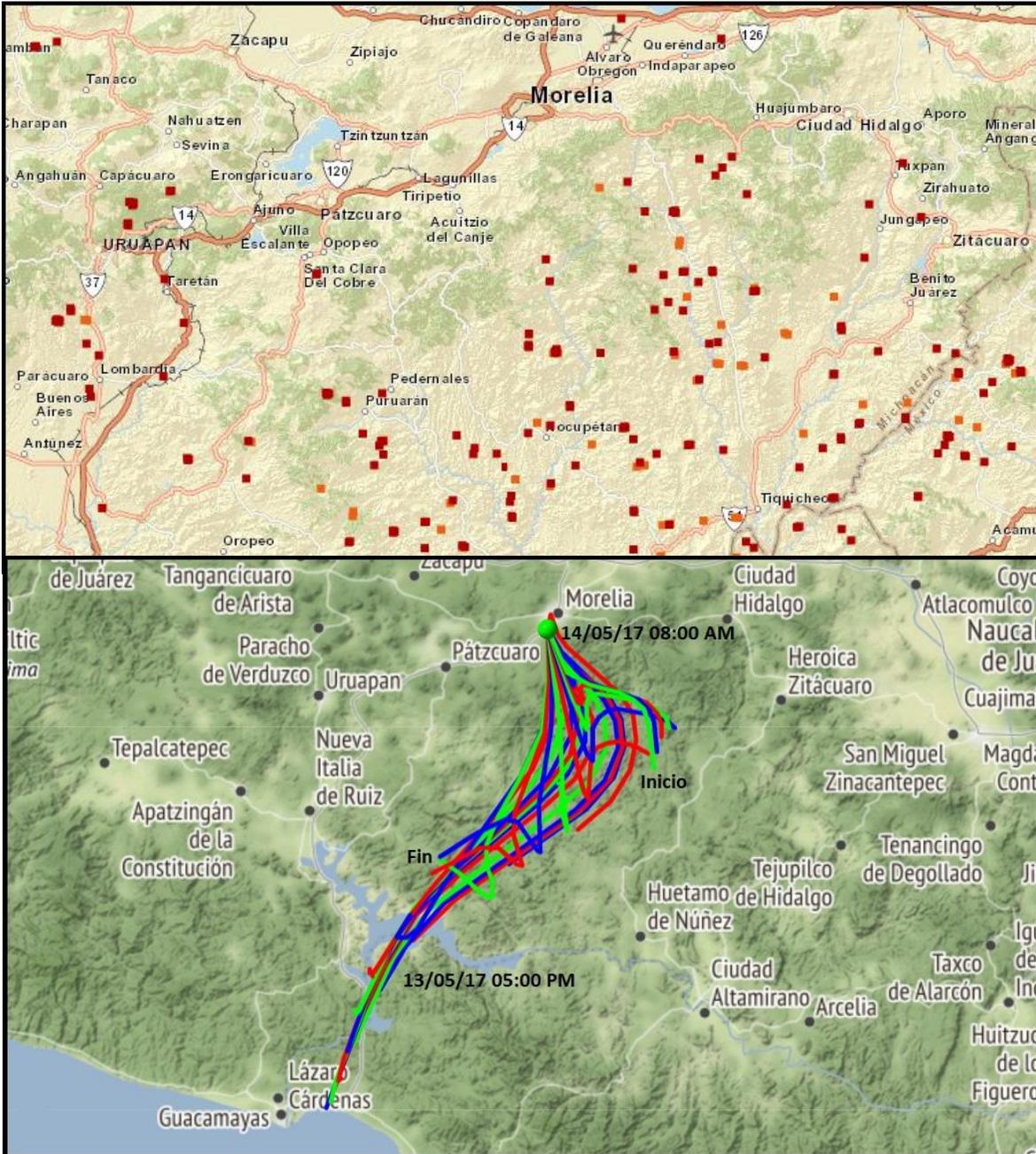


Figura A36. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) el 13 y 14 de mayo de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 15 horas para el 13 y 14 de mayo de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.

18 de mayo al 20 de mayo de 2017, Morelia

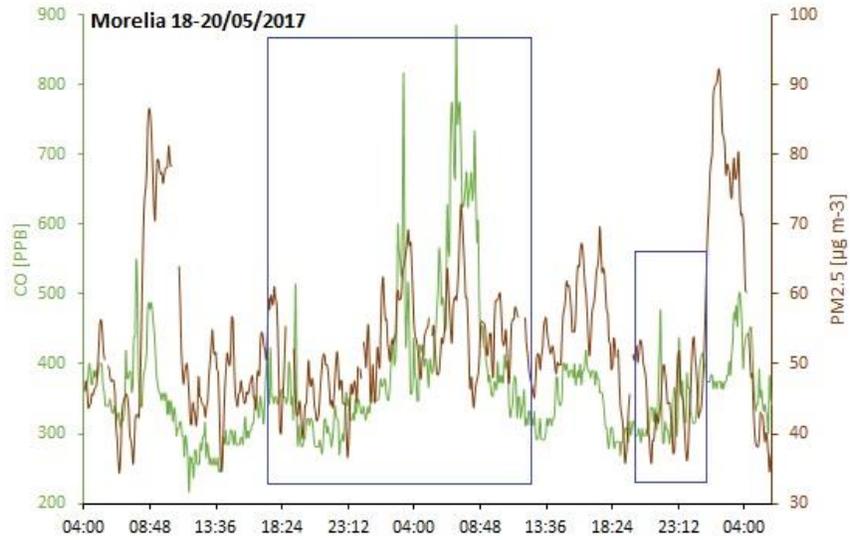


Figura A37. Series de tiempo de CO y PM_{2.5} para el evento del 18 al 20 de mayo de 2017 en Morelia. Los recuadros azules representan el periodo en donde existe una correlación entre ambas especies.

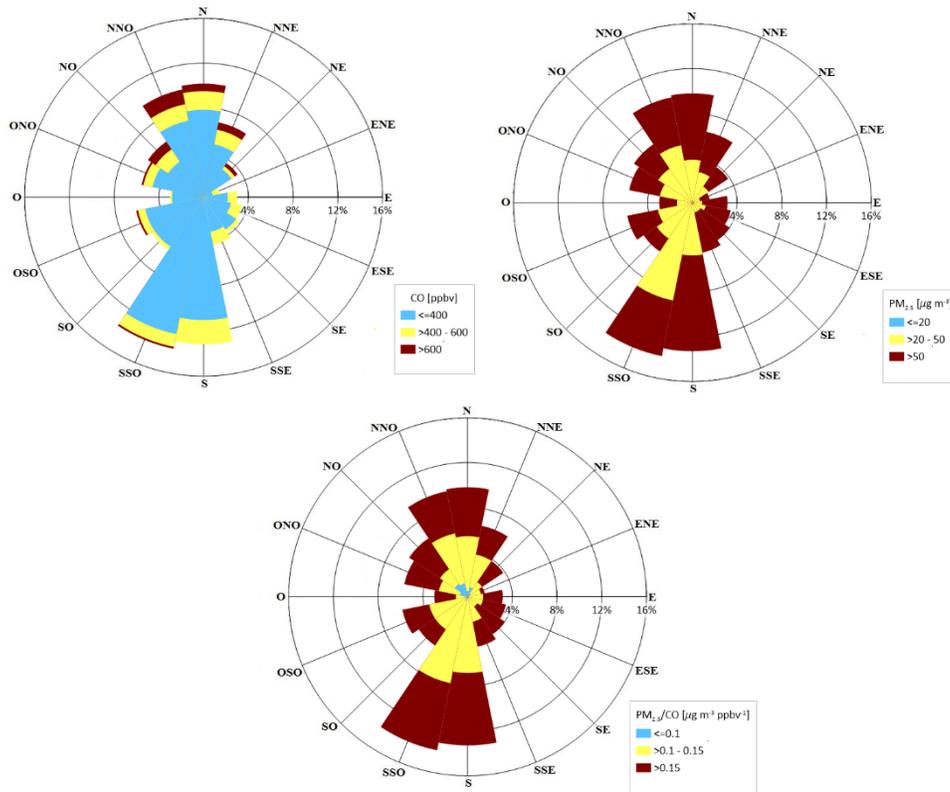


Figura A38. Rosas de contaminantes para CO (arriba-izquierda), PM_{2.5} (arriba-derecha) y el cociente PM_{2.5}/CO (abajo) para el 18 al 20 de mayo de 2017 en Morelia, Michoacán.

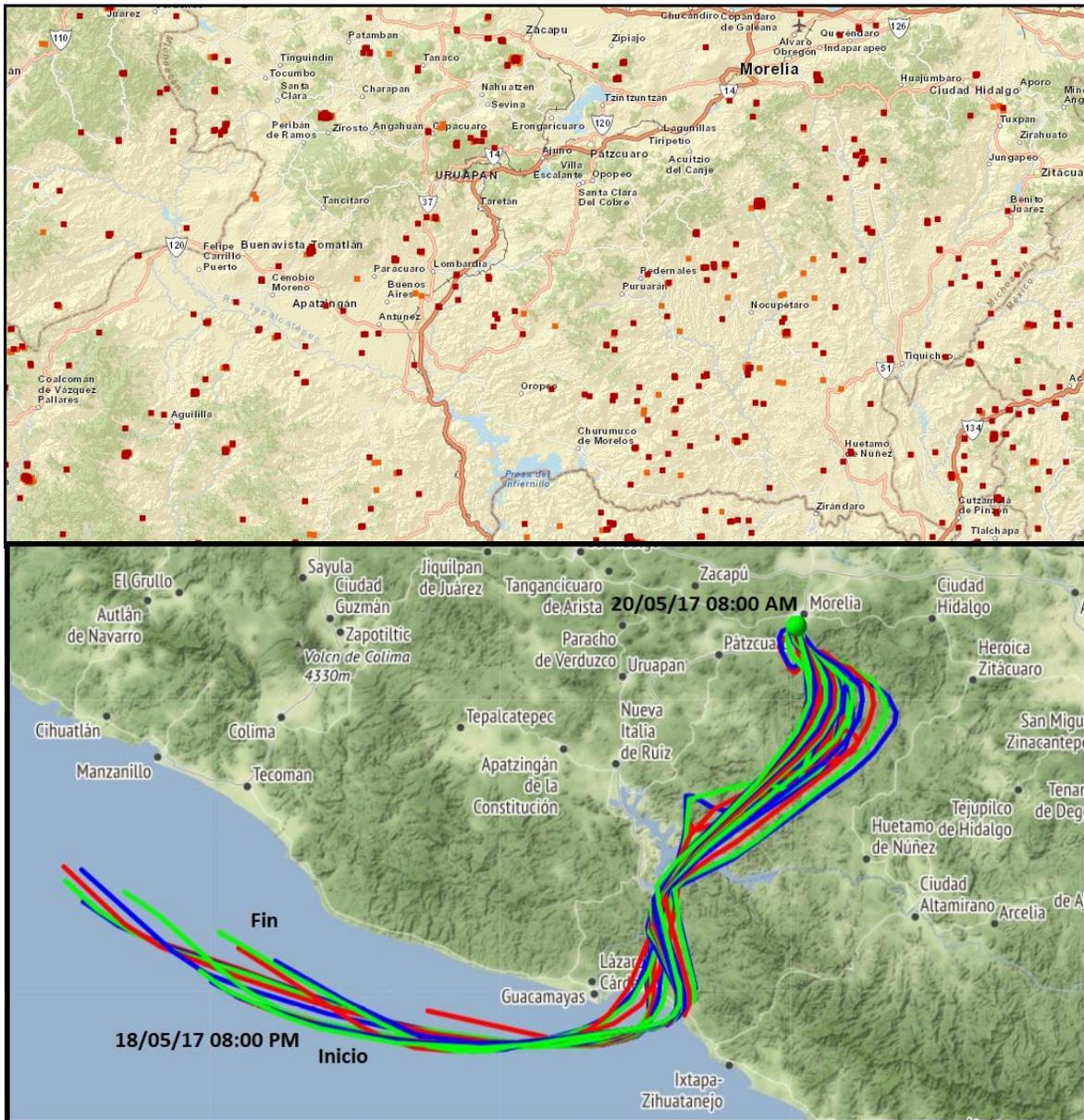


Figura A39. Incendios registrados por MODIS y VIIRS (arriba) del 18 al 20 de mayo de 2017 en Morelia. Los puntos rojos representan los eventos registrados por VIIRS y los puntos naranjas los eventos de MODIS. Trayectorias de retroceso (abajo) de 36 horas para el evento del 18 al 20 de mayo de 2017 en Morelia obtenidas por HYSPLIT a 50 m sobre el nivel del suelo, cada línea representa una trayectoria cada hora.