



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Estudio sobre la variación de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y la fracción gruesa ( $PM_{10}-PM_{2.5}$ ) en Juriquilla, Querétaro y su relación con variables meteorológicas**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Licenciado en Ciencias de la Tierra**

**P R E S E N T A:**

**Abigail Navarro Medina**



**DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Ricardo Torres Jardón**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## *Agradecimientos*

A la Red Universitaria de Observación atmosférica (RUOA) por proporcionarnos los datos de calidad del aire con los que fue posible la realización de este proyecto.

Al Dr. Ricardo Torres por tenerme paciencia, brindarme su apoyo y orientarme en la realización de este trabajo. Por compartirme sus experiencias y conocimientos.

Al jurado de revisión conformado por:

Presidente	Dr. Arón Jazcilevich Diamant
Vocal	Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas
Suplente	Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval
Suplente	Dr. Harry Alvarez Ospina

A Edson y Shaden por brindarme su ayuda y compartirme su conocimiento de programación.

## *Dedicatoria*

A las personas más especiales de mi vida, mis padres, Yolanda y Ricardo: Gracias por apoyarme, persuadirme y motivarme a salir adelante. Por brindarme las herramientas necesarias y hacer de este camino más fácil. Ustedes son mi mejor ejemplo de que se puede salir adelante y que se puede ser mejor cada día, son mi más grande motivación. Con mucho amor para ustedes.

A mis abuelos: por creer en las mujercitas de la familia y siempre tener la mejor expectativa de nosotras.

A las chiquitas: por preocuparse, por sus ánimos y por estar al pendiente de esta meta.

Y por supuesto, a Dama y Dibs, por estar presente en esta etapa tan importante de mi vida, por ayudarme a aclarar mis ideas, darme sus puntos de vista para que este trabajo sea mejor y por aguantarme en mis momentos de estrés que sólo ustedes conocen. Los adoro.

Por el apoyo y palabras de aliento de cada uno de ustedes, gracias....

# Índice

<i>Lista de figuras</i> .....	7
<i>Lista de tablas</i> .....	10
<i>Lista de acrónimos</i> .....	11
<b>Resumen</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>14</b>
1.1 <i>Importancia en la calidad del aire de las partículas y sus fracciones</i> .....	14
1.2 <i>Origen de Partículas PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y fracción gruesa</i> .....	15
1.3 <i>Características de la Tropósfera</i> .....	18
1.4 <i>Factores meteorológicos que afectan la contaminación del aire</i> .....	19
1.5 <i>Descripción de la zona de estudio</i> .....	22
1.6 <i>Planteamiento del problema</i> .....	25
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>26</b>
2.1 <i>Objetivo General</i> .....	26
2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	26
<b>3. Metodología</b> .....	<b>26</b>
3.1 <i>Descripción de la Estación de Monitoreo de la RUOA</i> .....	26
3.1.1 <i>Métodos Instrumentales de monitoreo de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub></i> .....	27
3.1.2 <i>Métodos Instrumentales de medición de variables meteorológicas</i> .....	29
3.2 <i>Métodos de análisis de datos</i> .....	29
3.2.1 <i>Método de validación de datos y análisis exploratorio</i> .....	29
3.2.2 <i>Análisis de datos meteorológicos</i> .....	32
3.3 <i>Construcción de trayectorias HYSPLIT</i> .....	33
3.4 <i>Evaluación de Cumplimiento de Normatividad y comparación con recomendaciones</i> .....	34
<b>4. Análisis y Resultados</b> .....	<b>35</b>
4.1 <i>Series de tiempo de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>(10-2.5)</sub> y evaluación del cumplimiento a la normatividad aplicable</i> .....	35
4.2 <i>Influencia climática temporal, mensual y horaria en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub></i> .....	38
4.3 <i>Influencia de la variable viento en la distribución de las concentraciones</i> .....	45
4.3.1 <i>Rosas de vientos</i> .....	45
4.3.2 <i>Rosas de vientos de contaminantes</i> .....	48
4.4 <i>Análisis de correlación con variables meteorológicas a mediano plazo</i> .....	53
4.5 <i>Identificación de eventos PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Asociación con análisis de trayectorias de retroceso HYSPLIT y mapas sinópticos</i> .....	62

4.5.1 Evento $PM_{10}$ del 19 Abril 2016 .....	63
4.5.2 Evento $PM_{10}$ del 2 de mayo de 2016 .....	66
4.5.3 Evento $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ del 3 de mayo de 2016.....	68
4.5.5 Evento $PM_{10}$ del 25 de diciembre de 2015 .....	71
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>78</b>
<b>6. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>80</b>

## Lista de figuras

<i>Figura 1. Representación de las diversas regiones del aparato respiratorio humano y zonas de afectaciones por los diferentes tamaños de PM (EPA, 2002).</i> .....	14
<i>Figura 2. Idealización de distribución de tamaños del material particulado mostrando los modos finos y gruesos y las fracciones colectadas por algunos métodos de muestreo. Modificada de Wilson y Suh, 1997. .</i>	16
<i>Figura 3. Localización de Querétaro y los municipios que conforman la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ). Indicando la ubicación del Observatorio Atmosférico de Juriquilla, Qro, RUOA. (SEDESU, 2014).</i> .....	23
<i>Figura 4 Se muestran los 19 parque industriales en operación (puntos rojos) y la ubicación de la estación de monitoreo RUOA (polígono amarillo) (SEDESU, 2011).</i> .....	24
<i>Figura 5. Estación de monitoreo de la RUOA en Juriquilla, exterior e interior. Tomadas de:</i> <i>http://www.ruoa.unam.mx/</i> .....	27
<i>Figura 6. Monitor de aerosoles alfa/beta. Marca Thermoenviroment. Foto propia.</i> .....	28
<i>Figura 7. Sensor climático compactado WS-600. Modificada de <a href="https://www.lufft.com/download/manual-lufft-wsx-weather-sensor-en/">https://www.lufft.com/download/manual-lufft-wsx-weather-sensor-en/</a></i> .....	29
<i>Figura 8. Series de tiempo del 1 de Octubre 2014 al 30 de Diciembre 2016 de los promedios en 24 horas de las concentraciones de: a) <math>PM_{10}</math>, b) <math>PM_{2.5}</math> y c) <math>PM_{10-2.5}</math> para la estación Juriquilla, Qro., de la RUOA. Las gráficas incluyen las respectivas normas de calidad del aire y las recomendaciones de la OMS para <math>PM_{10}</math> y <math>PM_{2.5}</math>.</i> .....	36
<i>Figura 9. Promedios anuales de <math>PM_{10}</math> y <math>PM_{2.5}</math> para 2015 y 2016. La línea verde representa los valores recomendados por la OMS (<math>PM_{10}</math>: <math>20 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> y <math>PM_{2.5}</math>: <math>10 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>), y la línea morada representa los valores establecidos por la NOM (<math>PM_{10}</math>: <math>40 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> y <math>PM_{2.5}</math>: <math>12 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>).</i> .....	37
<i>Figura 10. Promedios mensuales de <math>PM_{10}</math>, <math>PM_{2.5}</math> y fracción gruesa (<math>PM_{10}-PM_{2.5}</math>) para los años 2015 y 2016 en Juriquilla, Qro.</i> .....	38

<i>Figura 11. Promedios temporales de <math>PM_{10}</math> y <math>PM_{2.5}</math> y fracción gruesa (<math>PM_{10-2.5}</math>) para los años 2015 y 2016 en Juriquilla.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 12 . Distribución de los promedios horarios en las 24 horas de cada una de las temporadas climáticas de datos combinados de los años 2015 y 2016 de <math>PM_{10}</math>, <math>PM_{10-2.5}</math> y <math>PM_{2.5}</math> en Juriquilla. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 13. Correlaciones temporales de <math>PM_{10}</math>, <math>PM_{2.5}</math> y <math>PM_{10-2.5}</math> durante el año 2015.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 14. Correlaciones temporales de <math>PM_{10}</math>, <math>PM_{2.5}</math> y <math>PM_{10-2.5}</math> durante el año 2016.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 15. Rosas de viento anual para los años 2015 y 2016 para Juriquilla, Querétaro.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16. Rosas de viento por temporada climática del año para los años 2015 y 2016 para Juriquilla, Querétaro.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 17. Rosa de contaminantes anual de <math>PM_{2.5}</math> y fracción gruesa (<math>PM_{10-2.5}</math>) y <math>PM_{10}</math>, para los años 2015 y 2016.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 18. Rosa de contaminantes de <math>PM_{10}</math>, <math>PM_{2.5}</math> y fracción gruesa (<math>PM_{10-2.5}</math>) por temporada del año 2015.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19. Rosa de contaminantes de <math>PM_{10}</math>, <math>PM_{2.5}</math> y fracción gruesa (<math>PM_{10-2.5}</math>) por temporada del año 2016.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 20. Relación entre los promedios mensuales de: (a) temperatura ambiente, (b) humedad relativa, (c) presión atmosférica y, (d) intensidad de viento con <math>PM_{2.5}</math>, <math>PM_{10-2.5}</math> y <math>PM_{10}</math> en Juriquilla en el año 2015.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 21. Relación entre los promedios mensuales de: (a) temperatura ambiente, (b) humedad relativa, (c) presión atmosférica y, (d) intensidad de viento con <math>PM_{2.5}</math>, <math>PM_{10-2.5}</math> y <math>PM_{10}</math> en Juriquilla en el año 2016.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 22. Representación gráfica de las concentraciones de <math>PM_{2.5}</math>, la fracción gruesa (<math>PM_{10-2.5}</math>) y <math>PM_{10}</math> en función a las variables meteorológicas humedad relativa, intensidad del viento y presión atmosférica para 2015 de acuerdo a las respectivas regresiones.....</i>	<i>59</i>

<i>Figura 23. Representación gráfica de las concentraciones de <math>PM_{2.5}</math>, la fracción gruesa (<math>PM_{10-2.5}</math>) y <math>PM_{10}</math> en función a las variables meteorológicas humedad relativa, intensidad del viento y presión atmosférica para 2016 de acuerdo a las respectivas regresiones.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 24. Concentraciones horarias de los 10 eventos más altos durante los años 2015 y 2016 de a) <math>PM_{10}</math> y b) <math>PM_{2.5}</math>.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 25. . (a) Análisis sinóptico de superficie; y patrón de promedios de 5 minutos para <math>PM_{10}</math> (línea negra), <math>PM_{2.5}</math> (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 19 de abril de 2016.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 26. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 24 horas con arribo a Juriquilla a la hora equivalente del evento de partículas del 19 de abril de 2016. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 27. (a) análisis sinóptico de superficie; y patrón de promedios de 5 minutos para <math>PM_{10}</math> (línea negra), <math>PM_{2.5}</math> (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 2 de mayo de 2016.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 28. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 24 horas con arribo a Juriquilla a la hora equivalente del evento de partículas del 2 de mayo de 2016. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 29. (a) análisis sinóptico de superficie y patrón de promedios de 5 minutos para <math>PM_{10}</math> (línea negra), <math>PM_{2.5}</math> (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 3 de mayo de 2016.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 24 horas con arribo a Juriquilla a la hora equivalente del evento de partículas del 3 de mayo de 2016. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). .....</i>	<i>70</i>

*Figura 32. (a) análisis sinóptico de superficie; y patrón de promedios de 5 minutos para  $PM_{10}$  (línea negra),  $PM_{2.5}$  (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 25 de diciembre de 2015..... 72*

*Figura 33. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 6 horas con arribo a Juriquilla a una hora equivalente a las 5:00 horas del evento de partículas del 25 de diciembre de 2015. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). ..... 73*

## Lista de tablas

Tabla 1. Promedios horarios y promedios anuales recomendados por la OMS y establecidos por la NOM para partículas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> . Elaboración propia. ....	15
Tabla 2. Comparación de partículas ambientales de modo fino y grueso. Modificada de Wilson y Suh, 1997. ....	18
Tabla 3. Coeficientes de correlación (R <sup>2</sup> ) entre promedios mensuales de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10-2.5</sub> , temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa e intensidad de viento registrados en Juriquilla en 2015 y 2016.....	57

## Lista de acrónimos

ARL	Air Resources Laboratory
CCA	Centro de Ciencias de la Atmosfera
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
IMCO	Instituto Mexicano para la Competitividad
JQRO	Juriquilla Queretaro
LIDAR	Light Detection and Ranging
NE	Nordeste
ENE	Este noreste
NNE	Nor noreste
NNO	Nor noroeste
NOAA	National Organization and Atmospheric Administration
NOM	Norma Oficial Mexicana
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONO	Oeste noroeste
PM	Material particulado
PM <sub>10</sub>	Material particulado menores a 10 micrómetros
PM <sub>2.5</sub>	Material particulado menores a 2.5 micrómetros
PM <sub>10</sub> -PM <sub>2.5</sub>	Material particulado con diámetros entre 10 y 2.5 micrómetros
RUOA	Red Universitario de Observatorios Atmosféricos
SIGMAPLOT	Scientific Graphing and Data Analysis Software
SO	Suroeste
SSO	Sur-suroeste
UMDI	Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación
WRPLOT	Wind Rose Plot for Meteorological Data
ZMQ	Zona Metropolitana de Querétaro

## Resumen

La contaminación del aire es un problema frecuentemente asociado al crecimiento de zonas urbanas como es la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ). Durante los años 2015 y 2016 la ZMQ ha tenido una rápida urbanización, incluyendo un mayor número de industrias establecidas e incrementos en el parque vehicular así como de la población, lo cual ha llevado a una reducción del uso potencial del suelo para actividades agrícolas.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar el comportamiento temporal a corto y largo plazo las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , la fracción gruesa ( $PM_{10}-PM_{2.5}$ ) y  $PM_{10}$  registradas durante los años 2015 y 2016 en Juriquilla al norte de la ZMQ, así como investigar el papel que tienen las variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica) medidas en el mismo sitio. La validación e integración de datos horarios de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  registrados en la estación de monitoreo Juriquilla de la Red Universitaria de Observatorios (RUOA), y de la fracción gruesa resultante, permitió series de tiempo de concentraciones promedio de 24 horas, promedios anuales, mensuales y temporales. En sus niveles de concentración. Para esto se realizaron series de tiempo de concentraciones promedio de 24 horas, promedios anuales, mensuales y temporales.

La evaluación del cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM) y de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  mostró que durante los años 2015 y 2016 solo se excedió la norma anual para  $PM_{2.5}$ , en tanto que los valores recomendados por la OMS para ambos contaminantes tanto para 24 horas como para el promedio anual fueron excedidos en ambos contaminantes,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

De acuerdo al análisis de correlación entre  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10} - PM_{2.5}$ , se encontró que en general las  $PM_{10}$  están conformadas de proporciones similares de la fracción gruesa y la fina. El tráfico vehicular, la pérdida de humedad de los suelos de uso agrícola, las quemadas agrícolas, construcciones en proceso, caminos no pavimentados e industrias parecen ser las principales causas que

influyen en las concentraciones de material particulado observadas en Querétaro y que la proporción de sus contribuciones depende de las condiciones meteorológicas dominantes de cada temporada del año.

El análisis del acoplamiento de datos de dirección e intensidad de viento y las concentraciones horarias de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y de la fracción gruesa que los municipios de Querétaro y El Marqués son en principio los principales contribuyentes de estas emisiones.

Asimismo, se observó que si bien la meteorología local influye en los niveles de concentración de PM en Juriquilla, los fenómenos meteorológicos a nivel sinóptico como son frentes, zonas de baja/alta presión y anticiclones también juegan un papel importante en los eventos de corta duración con altos niveles de concentraciones de material particulado.

Los resultados parciales de esta tesis fueron presentados de manera oral en la Reunión Anual 2017 de la Unión Geofísica Mexicana.

# 1. Introducción

## 1.1 Importancia en la calidad del aire de las partículas y sus fracciones.

El material particulado (PM por sus siglas en inglés) es uno de los principales contaminantes que afecta el sistema respiratorio y cardiovascular. También son responsables de la reducción de la visibilidad local en ambientes urbanos. (Ahrens y Henson, 2015; Lutgens y Tarbuck, 2016).

La EPA ha identificado dos importantes grupos dentro de las PM: el material particulado con diámetros menores a  $10\ \mu\text{m}$  o  $\text{PM}_{10}$  y el de diámetros menores a  $2.5\ \mu\text{m}$  o  $\text{PM}_{2.5}$ . El principal interés está asociado a la región pulmonar donde pueden tener afectación (Ver figura 1). Las  $\text{PM}_{2.5}$  son capaces de llegar al sistema respiratorio profundo y en consecuencia ser transferidos al torrente sanguíneo. Mientras que la fracción gruesa sólo llega a la parte de la laringe.

La fracción gruesa puede ser removida más rápida y fácilmente por el propio sistema respiratorio; la remoción de partículas en la fracción fina puede llevar mucho más tiempo y ser más difícil, e incluso a ser imposible (Spellman, 2009).

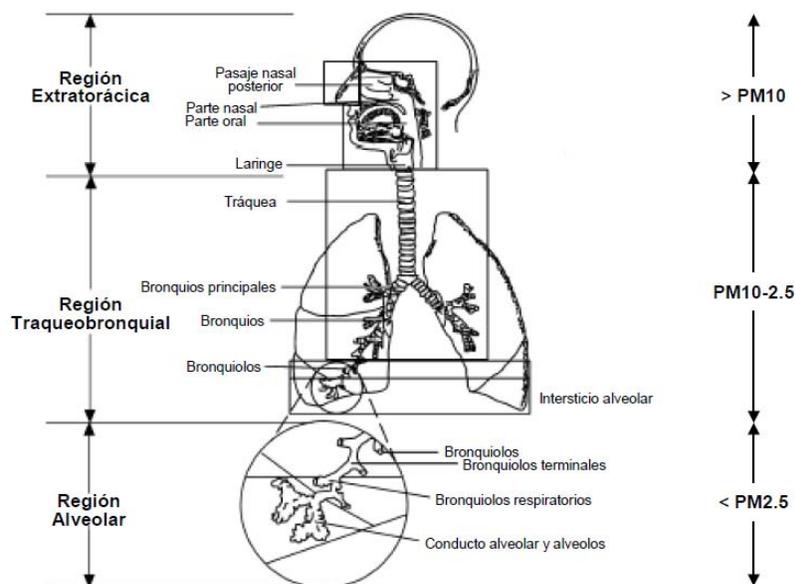


Figura 1. Representación de las diversas regiones del aparato respiratorio humano y zonas de afectaciones por los diferentes tamaños de PM (EPA, 2002).

Tomando como base los efectos conocidos en la salud, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, ha establecido valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). Para  $PM_{10}$  el límite es  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas y promedio anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para  $PM_{2.5}$  los límites son  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio de 24 horas, y promedio anual de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido recomendaciones de límites máximos para exposición tanto aguda o de corta duración (24 horas) como para exposición crónica o prolongada (media anual) para el material particulado. Para  $PM_{10}$  las recomendaciones son: media anual de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y promedio de 24 horas de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para  $PM_{2.5}$  el límite media anual es de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el promedio de 24 horas de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Guías de calidad del aire de la OMS, 2005). La Tabla 1 muestra un comparativo entre la NOM Mexicana para PM y las recomendaciones de la OMS.

**Tabla 1. Promedios horarios y promedios anuales recomendados por la OMS y establecidos por la NOM para partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Elaboración propia.**

Organización Mundial de la Salud (OMS)				Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014			
Promedio 24 hrs		Promedio Anual		Promedio 24 hrs		Promedio Anual	
$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$
$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$75 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$45 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$12 \mu\text{g}/\text{m}^3$

### *1.2 Origen de Partículas $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ y fracción gruesa.*

Como se muestra en la figura 2 el material particulado se clasifica en dos grandes grupos: partículas de modo finas y partículas de modo gruesas. Las partículas que se encuentran en el rango de entre 10 y  $2.5 \mu\text{m}$  se le conocen como fracción gruesa y suele denotarse como  $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ . Las partículas finas se tiene diámetros menores a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $<PM_{2.5}$ ) y es conocida como fracción fina.

Al considerar el origen de estas fracciones, la fracción gruesa está más asociada a fuentes de emisión natural y/o biológica, en tanto que la fracción fina tiene un origen dominante más antropogénico (Wilson y Suh, 1997). De este modo, el interés hacia el estudio de las PM está cada vez más enfocado a la fracción fina. La Figura 2 presenta la distribución de modos de acumulación de partículas en el aire donde también se distingue la importancia de poder separar las mediciones por modo de rango de tamaño.

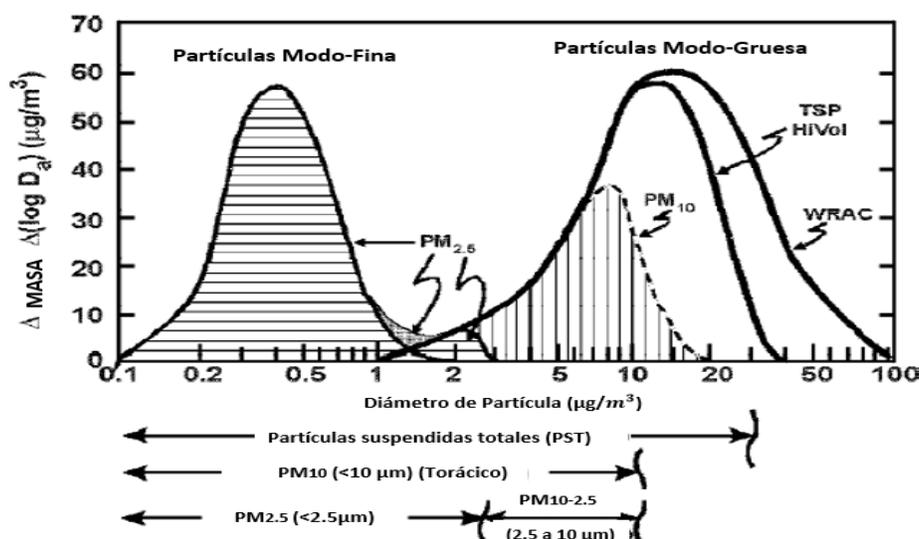


Figura 2. Idealización de distribución de tamaños del material particulado mostrando los modos finos y gruesos y las fracciones colectadas por algunos métodos de muestreo. Modificada de Wilson y Suh, 1997.

Así como otros contaminantes, las partículas también se clasifican en primarias y secundarias dependiendo de los procesos físicos o químicos que los originan. Las partículas primarias son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera, mientras que las partículas secundarias son aquellas que en la atmósfera tienen procesos de conversión gas-partícula (Ahrens y Henson, 2015).

Las fuentes de emisión de partículas primarias a la atmósfera pueden ser naturales y antropogénicas. Entre las fuentes naturales se encuentran las sales marinas, erupciones volcánicas, partículas biológicas, polvo re-suspendido del suelo e incendios forestales. Mientras que de las fuentes antropogénicas se

pueden mencionar la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, agricultura, construcción, plantas de cemento e industrias cerámicas, minería y fuentes móviles (Lutgens y Tarbuck, 2016). En la Tabla 2 se describe en forma resumida la formación, composición, fuentes de emisión, el tiempo de vida media en la atmósfera y las distancias que recorren las partículas de modo- fino y modo-grueso.

Por otro lado, debido a que las PM están suspendidas en el aire, su transporte, distribución espacial y finalmente los niveles de concentración dependen tanto de la meteorología local y regional y del tamaño dominante de las partículas. Por ejemplo, la distribución espacial en los niveles de PM<sub>10</sub> en la atmósfera se pueden ver influenciadas: 1) por las fuentes de emisión ya que la mayoría se encuentran cercanas al nivel del suelo y 2) a la rápida deposición de las partículas con mayor diámetro debido al efecto de la gravedad. Las emisiones de partículas gruesas tienen un gran impacto muy cerca de la fuente (impacto local) y un impacto mínimo a largas distancias de ésta (Richards, J *et al.* 2011).

En la mayor parte de los entornos urbanos están presentes tanto las partículas, gruesas como las finas, pero su variación está controlada por la edafología local, uso de suelo, meteorología, emisiones, transporte y procesos de transformación (Yadav *et al.*, 2014; OMS, 2005).

**Tabla 2. Comparación de partículas ambientales de modo fino y grueso. Modificada de Wilson y Suh, 1997.**

<b>Característica</b>	<b>Partículas de modo-fino</b>	<b>Partículas de modo-gruesa</b>
Formado a partir de:	Gases	Sólidos grandes/gotas
Formado por:	Reacciones químicas o vaporización.	Ruptura mecánica (abrasión de superficies)
	Nucleación, condensación y coagulación.	Evaporación de espray
	Evaporación de niebla y gotas de nubes en las cuales los gases se han disuelto y reaccionado.	Suspensión de polvo
Composición	Sulfato, nitrato, amonio e iones de hidrógeno.	Re suspensión de polvo (polvo de suelo, polvo de calle)
	Carbón elemental	Carbón y petróleo
	Compuestos orgánicos (hidrocarburos poli-aromáticos)	Óxidos de elementos corticales, (silicio, aluminio, titanio y hierro).
	Metales (plomo, cadmio, vanadio, níquel, zinc, magnesio, hierro y cobre)	CaCO <sub>3</sub> , NaCl, sal de mar.
		Polen, moho, esporas de hongos
		Fragmentos de animales/plantas
		Escombros de desgastes de llantas
Solubilidad	Fuertemente soluble, higroscópico y delicuescente	Fuertemente insolubles y no-higroscópico
Fuentes:	Combustión de carbón, petróleo, gasolina, diésel y madera.	Re-suspensión de polvo industrial
	Producto de transformación atmosférica de óxidos de nitrógeno, SO <sub>2</sub> , y compuestos orgánicos, incluyendo especies orgánicas biogénicas.	Fuentes biológicas
	Procesos de alta temperatura, fundiciones, acerías, etc.	Construcción y demolición
		Combustión de carbón y petróleo.
		Suspensión desde suelo alterado (por ejemplo, agricultura, minería, caminos sin pavimentar).
Tiempo de vida-media en la atmósfera	Días a semanas	Minutos a horas
Distancia que recorren	100 a 1000 km	<1 a 10 km

### *1.3 Características de la Tropósfera*

La tropósfera es la capa más cercana a la superficie terrestre, y tiene una extensión aproximadamente de 10 km de altura. La capa inferior de la tropósfera (primeros kilómetros cercanos a la superficie terrestre) es afectada y modificada por los procesos de transporte e intercambio de masa y calor, y la frecuente presencia de corrientes verticales que pueden dar lugar a condensación,

formación de nubes y precipitación. También se observan variaciones diurnas de la temperatura, convección y turbulencias. De la capa inferior a la capa límite de la troposfera se presenta una disminución de la temperatura conforme aumenta la altura, disminuyendo 6.5°C por cada kilómetro (Spedding, 2002).

Debido a cambios en la temperatura la capa límite tiene un espesor variable en tiempo y espacio presentando espesores desde cientos de metros a pocos kilómetros (Stull, 1988). La importancia de la capa límite es que dentro de ella se emiten los contaminantes y finalmente su volumen define la concentración de estos.

#### *1.4 Factores meteorológicos que afectan la contaminación del aire*

Lutgens y Tarbuck (2016) mencionan que la contaminación atmosférica y la meteorología están vinculadas de dos maneras; la primera es la influencia que tienen las condiciones meteorológicas en la concentración, dilución y dispersión de contaminantes y la segunda en los efectos que tiene la contaminación atmosférica en el tiempo meteorológico y el clima. A continuación se describen algunos factores meteorológicos que afectan la contaminación del aire:

##### **Velocidad y dirección del viento**

El papel que juegan los vientos es diluir, dispersar y transportar los contaminantes presentes en la atmósfera de un lugar a otro. La velocidad del viento determina la rapidez con la que se mezcla los contaminantes y el aire circundante y que tan rápido se alejan de su fuente, mientras que la dirección, hacia donde son transportados los contaminantes. Los fuertes vientos tienden a disminuir la concentración de contaminantes por dilución y mientras más fuerte sea éste, más turbulento es el aire. El aire turbulento produce remolinos que diluyen los contaminantes con aire limpio haciendo que los niveles de contaminación disminuyan. Cuando hay periodos en los que el viento es débil o en calma suelen ocurrir episodios de contaminación del aire ya que los contaminantes no se dispersan fácilmente y tienden a estar atrapados y concentrados cerca del suelo. (Spellman, 2009)

### **Orografía/relieve**

El tipo de terreno es un factor importante que puede afectar la dispersión de los contaminantes (Hernández, 2007). Las diferentes características topográficas del terreno afectan la atmósfera por turbulencia térmica (calentamiento diferencial) y mecánicamente (por flujo de viento). Cuando el terreno es plano los contaminantes pueden ser transportados de forma más rápida y alcanzar mayores distancias.

Cuando el terreno es sinuoso éstas sirven como barrera impidiendo el transporte de contaminantes, ocasionando un entrapamiento y, por ende, un aumento en la concentración de contaminantes. (OPS/OMS, 2005)

### **Precipitación**

Los eventos de precipitación aceleran la depositación húmeda, principalmente de partículas gruesas. Debido a que la precipitación tiene menor efecto sobre las partículas finas éstas tienden, después de una tormenta, a tener mayor concentración en la atmósfera que las partículas gruesas. (Li, H *et al.* 2015; Li, Y *et al.* 2015). La visibilidad generalmente mejora ya que la precipitación elimina muchas de las partículas presentes en la atmósfera e inhibe el transporte de polvo superficial, reduciendo notablemente el polvo suspendido. (Li, H *et al.* 2015)

### **Temperatura y presión atmosférica**

La temperatura y la presión tienen influencia en el transporte y acumulación de material particulado por procesos de convección.

La temperatura tiene una fuerte correlación con las PM<sub>2.5</sub>, ya que ésta variable puede afectar la formación de partículas promoviendo las reacciones fotoquímicas entre precursores (Li, H. *et al.* 2015). Sin embargo, cuando las temperaturas son altas, hay fuertes turbulencias y convección intensa que lleva a la dispersión y difusión de contaminantes, por lo que concentración de material particulado disminuye. Por el otro lado, cuando las temperaturas son bajas y la convección es débil, el material particulado permanece suspendido, llevando a un aumento en la

concentración de PM atmosférico. Por lo que la probabilidad de contaminación atmosférica aumenta cuando hay temperaturas bajas.

Cuando hay baja presión los vientos se incrementan y se promueve la dispersión del polvo del suelo, ayudando a evacuarlos hacia fuera del área de generación. Debido a que las zonas de baja presión están caracterizadas por la presencia de lluvias, la concentración de PM tiende a disminuir. Por el contrario, en una zona de alta presión, se restringe el movimiento ascendente de PM y hay acumulación sobre la superficie. Bajo condiciones de sistemas de alta presión es fácil que se desarrollen capas de inversión térmica (condiciones atmosféricas estables) con vientos en calma (Li, Y *et al.* 2015; Li, H *et al.* 2015).

### **Estabilidad Atmosférica**

La estabilidad del aire determina la altura a la cual los movimientos verticales mezclarán los contaminantes con el aire de arriba y en ocasiones puede ser atribuida a la influencia de sistemas de baja y alta presión, frentes y convección. Se conoce la estabilidad del aire comparando la temperatura de una parcela ascendente con la de su entorno y se divide en tres clases: estable, inestable y neutral (Spellman, 2009):

- **Atmósfera estable:** la parcela de aire es más fría y densa que el aire cercano a la superficie y los movimientos verticales son restringidos. Se presentan condiciones de baja velocidad del viento y bajo grado de turbulencia, lo que lleva a una acumulación y concentración de PM.
  
- **Atmósfera inestable:** la parcela ascendente es más cálida que el aire circundante por lo que tiende a ascender. Se presentan condiciones de alto grado de turbulencia, que lleva a un mezclado vertical rápido y a la dispersión de PM.

- Atmósfera neutra encontramos condiciones que no favorecen ni inhiben los movimientos convectivos. Son comunes durante los días con altas velocidades de viento.

Se puede concluir que las dos condiciones atmosféricas más importantes que afectan la dispersión del material particulado son: la velocidad del viento y la estabilidad del aire. Estos factores son críticos ya que determinan la rapidez con la que los contaminantes se diluyen después de ser emitidos de su fuente (Ahrens, 2012).

### *1.5 Descripción de la zona de estudio.*

Querétaro se encuentra ubicada en la región central del país (coord.: 20°35'17" N 100°23'17" O), limita al norte con San Luis Potosí; al este con Hidalgo; al oeste con Guanajuato y al sur con el Estado de México y Michoacán. Cubriendo un área de 11, 687.7 km<sup>2</sup>. Su ubicación está influenciada por tres provincias fisiológicas: al sur el Eje Neovolcánico, la meseta al centro y la Sierra Madre Oriental). La cuenca de Querétaro presenta un patrón de vientos predominante norte-sur (ProAire, 2016).

El área de estudio es la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ), localizada en la parte suroeste de Querétaro (Coord: 20.7030 °N, 100.4473 °W) abarca el 17% de la extensión territorial estatal y está integrada por los municipios: Querétaro, Corregidora, el Marqués y Huimilpan (Ver Figura 3).

Aunque el clima que predomina es el semi-seco templado, se presentan condiciones meteorológicas cálidas secas en la región sur del municipio de Querétaro y norte de Corregidora. En la región sur de Corregidora y centro de Huimilpan se tiene un clima templado subhúmedo mientras que, para la región norte de El Marqués encontramos un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (ProAire, 2016; SEDESU,2016).

El inventario de emisiones criterio del Estado de Querétaro (2015) menciona que las fuentes de área son las principales contribuyentes de emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las PM<sub>10</sub> son emitidas principalmente por caminos no pavimentados (24%), combustión residencial (21%) y quemas agrícolas (12%). Mientras que, las PM<sub>2.5</sub> son emitidas principalmente por combustión residencial (33%) y quemas agrícolas (19%).

Siendo los municipios de Querétaro (entre un 20% y 27%) y El Marques (12%) los de mayor aportación (ProAire, 2016; SEDESU, 2016).

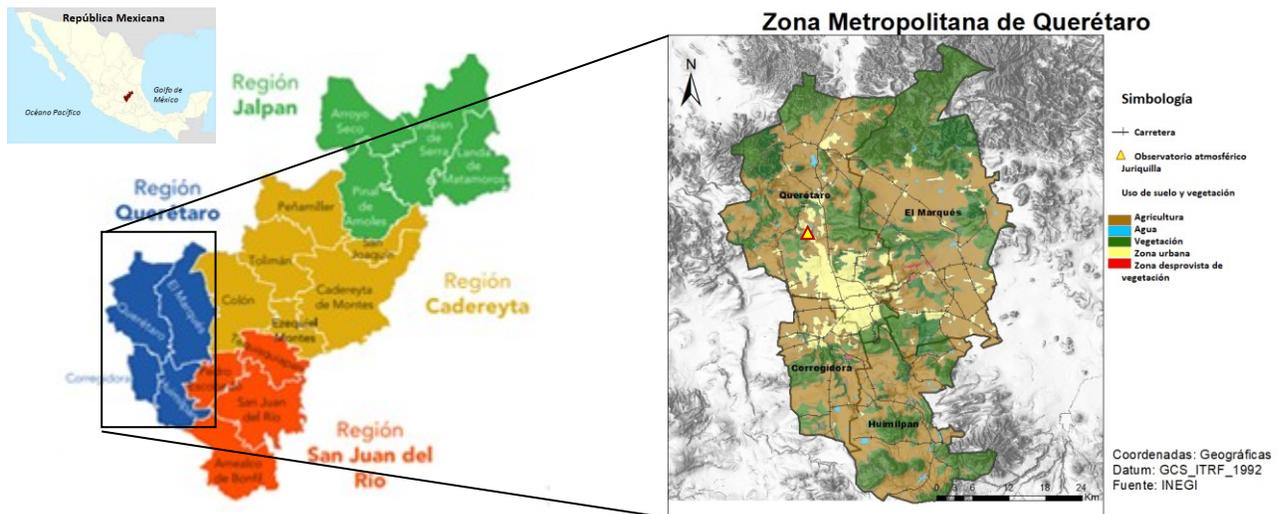


Figura 3. Localización de Querétaro y los municipios que conforman la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ). Indicando la ubicación del Observatorio Atmosférico de Juriquilla, Qro, RUOA. (SEDESU, 2014).

*Uso de Suelo:* En el norte y centro del Estado de Querétaro el uso potencial del suelo es para actividades agrícolas o sobre-pastoreadas. Por lo que al norte y el municipio El Marqués son zonas donde se favorecen los procesos erosivos por tener mayor susceptibilidad. En la zona centro-sur, en los municipios de Corregidora, El Marqués y de Querétaro los suelos se destinan sobre todo para la agricultura de riego (ProAire, 2016).

*Parque Vehicular:* La estadística del Área de Verificación Ambiental de la Secretaría de Desarrollo Sustentable informó que en el 2016 el parque vehicular en circulación ascendió a un total de 757 mil 663 unidades.

Siendo el Municipio de Querétaro (57%), Corregidora (9.5%) y El Marqués (4.7%) los municipios que concentran la mayor parte de automóviles.

*Parques o zonas industriales:* De los 19 parques industriales en operación: seis se encuentran en el municipio de Querétaro, dos en Corregidora y seis en El Marqués (Ver figura 4).

*Vías de comunicación:* La vías de comunicación terrestres que se encuentran con mayor densidad y accesibilidad en la Región de Querétaro es la carretera federal 57 México-Querétaro y Querétaro-San Luis Potosí.

En cuanto a la densidad vial, El Marqués presentan una densidad vial alta, Huimilpan una densidad vial media y el resto de los municipios presentan una densidad vial baja (PorAire Querétaro 2014-2023)

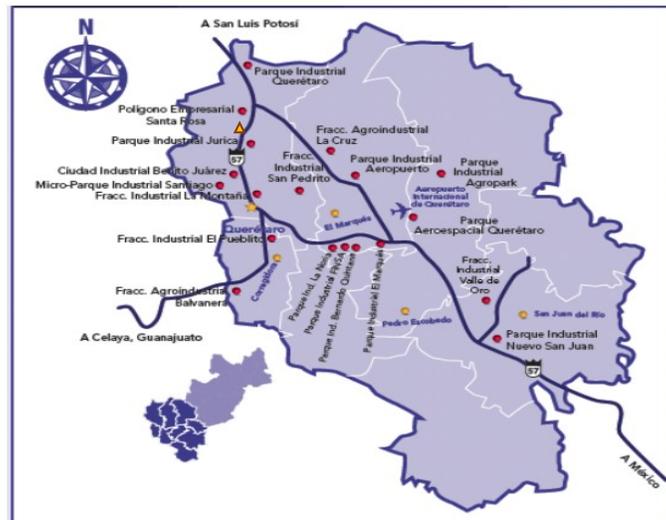


Figura 4 Se muestran los 19 parques industriales en operación (puntos rojos) y la ubicación de la estación de monitoreo RUOA (polígono amarillo) (SEDESU, 2011).

## *1.6 Planteamiento del problema*

La OMS ha estimado que en el país ocurren 3 millones de muertes cada año causadas por la contaminación atmosférica urbana y de interiores, atribuido principalmente a la exposición de niveles altos de partículas menores o iguales a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro ( $\leq \text{PM}_{10}$ ) (OMS, 2005)

El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) estimó que en Querétaro la exposición al  $\text{PM}_{10}$  ocasiona 79 muertes prematuras, 135 hospitalizaciones y más de 17 mil consultas al año. Estas estimaciones se realizaron mediante una calculadora diseñada para medir los impactos de la contaminación. Ya que Querétaro era en el 2010, una de las ciudades que no contaba con equipos de mediciones de  $\text{PM}_{10}$  y las concentraciones que se tenían no se reportaban ni analizaban. Por lo que no se tenía un conocimiento claro de la calidad del aire ni las principales fuentes contaminadoras de ese lugar.

Los efectos perjudiciales de la contaminación atmosférica en la salud se han vuelto una importante razón para dar inicio a proyectos de monitoreo de calidad del aire cuya principal finalidad es conocer los niveles de calidad del aire y el cumplimiento de las respectivas normas, además de seguir el comportamiento de los contaminantes criterio:  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{SO}_2$ . Por otro lado, es común que las estaciones de monitoreo cuenten con una estación meteorológica que permita obtener el comportamiento de parámetros meteorológicos como la presión, temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa y precipitación pluvial asociados a los niveles de contaminantes.

Debido a que Querétaro es una zona que está en desarrollo y debido al crecimiento poblacional, al aumento industrial y vehicular, es necesario analizar las emisiones durante un periodo amplio para conocer los niveles de la contaminación atmosférica y determinar si éstos se han mantenido o han ido aumentando, identificar las principales fuentes contaminadoras, los procesos que las generan y los factores meteorológicos involucrados.

## **2. Objetivos**

### *2.1 Objetivo General*

- Analizar los eventos de mayor concentración de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> registradas en la estación de monitoreo Juriquilla, Qro de la RUOA, UNAM, en el periodo 2014-2016.

### *2.2 Objetivos específicos*

- Determinar el cumplimiento de la normatividad nacional en calidad del aire respecto a PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> y con las recomendaciones respectivas de la OMS durante el 2014-2016.
- Investigar la variabilidad estacional y diaria de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> y su tendencia y el comportamiento horario promedio por temporada.
- Investigar las condiciones meteorológicas sinópticas y regionales asociadas a la ocurrencia de altos niveles de estos contaminantes.
- Investigar el papel de la fracción gruesa de las partículas (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>) en la ocurrencia de eventos de PM<sub>10</sub>.

## **3. Metodología**

### *3.1 Descripción de la Estación de Monitoreo de la RUOA.*

La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) forma parte de un esfuerzo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM para impulsar la investigación y la docencia de las ciencias atmosféricas en el país. A través de la interdisciplina y la cooperación institucional, el proyecto busca proveer de información atmosférica relevante y confiable para estudiar los problemas emergentes y dar soluciones a los retos que enfrenta el planeta en materia de contaminación atmosférica, cambio climático, recursos hídricos, seguridad alimentaria entre otros.

La RUOA se compone de seis observatorios de calidad del aire entre las que se encuentra el observatorio de Juriquilla (JQRO). Este observatorio se colocó en la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) de la Facultad de Ciencias de la UNAM, campus Juriquilla.

Cuenta con la instrumentación para medir en forma continua y automática los siguientes parámetros: gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), gases criterio ( $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}$ ), partículas finas ( $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ ), carbono negro (BC), campos eléctricos y de perfil de aerosoles (MLH) (LIDAR). Realiza mediciones en tiempo real de las siguientes variables meteorológicas: dirección e intensidad de viento, temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa y precipitación.

La estación está equipada con analizadores continuos de la marca Thermoenviroment y tanto su operación como los datos registrados son controlados vía Internet (en tiempo real) por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), de la UNAM. (Figura 5).

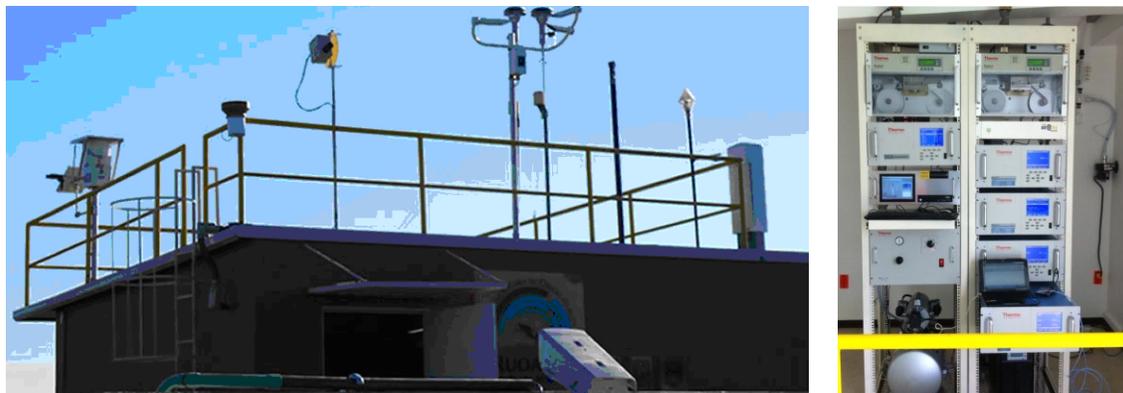


Figura 5. Estación de monitoreo de la RUOA en Juriquilla, exterior e interior. Tomadas de: <http://www.ruoa.unam.mx/>

### 3.1.1 Métodos Instrumentales de monitoreo de $\text{PM}_{10}$ y $\text{PM}_{2.5}$

Para la medición de las  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  se utiliza el principio de Atenuación de Radiación Beta (Ver figura 6). Este principio de operación consiste en la medición de la intensidad de rayos beta (provenientes del  $^{14}\text{C}$ ) que pasan a través de un

filtro en forma de cinta, a través del cual se hace pasar una corriente regulada de aire del exterior conteniendo partículas con tamaños iguales o menores a ya sea 10 micras o 2.5 micras. El aire es succionado del exterior mediante una bomba de vacío a un flujo controlado que primero pasa a través de cabezales o separadores inerciales específicos para separar las partículas por los rangos antes mencionados. Una vez separadas las partículas de tamaño mayor al límite superior establecido, las partículas remanentes acarreadas por la corriente de aire son retenidas en el filtro-cinta que se mantiene sin desplazamiento por un periodo de tiempo dado. La acumulación de las partículas sobre el filtro ocasiona que la intensidad de la radiación beta irradiada del otro lado de la cinta sufra una atenuación. Esta atenuación es previamente calibrada con respecto a la cantidad de partículas depositadas y como hay una correlación directa entre esta cantidad y el grado de atenuación, es posible determinar el cambio en la cantidad de masa acumulada con el respectivo cambio en la atenuación. Dado que también se registra automáticamente el flujo de aire que es circulado, el instrumento transforma todas las señales electrónicas de las mediciones, tanto de la masa acumulada como del flujo por unidad de tiempo para entregar la concentración de las partículas en el rango definido por el tipo de cabezal utilizado (FH62C14 Continuous Ambient Particulate Monitor Instruction Manual, 2007).



**Figura 6. Monitor de aerosoles alfa/beta. Marca Thermoenviroment. Foto propia.**

### 3.1.2 Métodos Instrumentales de medición de variables meteorológicas.

El instrumento utilizado fue el sensor climático compacto Modelo WS-600, Marc Lufft. (Ver figura 7). Este sensor mide las variables: temperatura ambiente, temperatura de rocío, presión atmosférica, humedad relativa (HR), velocidad y dirección del viento, precipitación.

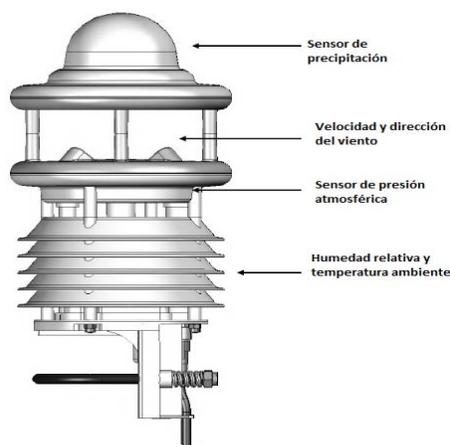


Figura 7. Sensor climático compacto WS-600. Modificada de <https://www.lufft.com/download/manual-lufft-wsx-weather-sensor-en/>.

## 3.2 Métodos de análisis de datos

### 3.2.1 Método de validación de datos y análisis exploratorio

El procedimiento de validación de datos tiene el objetivo de identificar, mediante diferentes métodos de revisión, los datos extremos o los comportamientos temporales y estacionales anómalos de los contaminantes atmosféricos así como datos ausentes y no lógicos debido al mal funcionamiento de instrumentos o a la operación de los mismos. En general, la verificación de datos consta de tres etapas secuenciales (Informe nacional de calidad del aire, 2014):

Etapas 1) *Limpeza o depuración de datos:*

En esta etapa se eliminan de forma manual o con procedimientos propios de funciones de software tipo Excel, los valores etiquetados como no válidos, generalmente el número -9999 y valores fuera de rango u “outliers”. Estos valores

pueden aparecer por fallas en el sistema eléctrico o de comunicación, por fallas en los equipos de medición, y por la calibración o un cambio en el funcionamiento del analizador o del sensor. También se eliminaron los valores negativos, menores a -4, que se visualizaron en la base de datos.

*Etapa 2) Identificación de datos extremos y comportamientos anómalos:*

La identificación de valores extremos o anómalos la continuidad, tendencia y comportamiento típico de los datos registrados que pasaron la etapa 1.

Para las concentraciones del contaminante  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se identificaron 6 casos en base a los siguientes criterios que aplican a las concentraciones promedio de 5 min:

a)  $PM_{10}$  nunca puede ser menor a  $PM_{2.5}$ , por lo que un primer filtrado es identificar los casos en que esto suceda. Si  $PM_{10} < PM_{2.5}$  cuando  $PM_{10}$  está por arriba de  $4 \mu g/m^3$  se anula el dato de  $PM_{2.5}$  y se procede como abajo en b) para tratar de recuperar el dato. Si en esta situación  $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$  están por abajo de  $4 \mu g/m^3$  pero son valores positivos se procede como se indica más abajo en d). El valor de  $4 \mu g/m^3$  es el límite de detección mínimo de estos analizadores

b) Cuando la tendencia de la serie de tiempo de  $PM_{10}$  es congruente con los valores previos tanto en el rango de valores como en continuidad, se puede substituir el valor de  $PM_{2.5}$  anulado por un valor artificial equivalente al 50% el valor de  $PM_{2.5}$ . Este criterio se asume considerando que en general las  $PM_{2.5}$  representan aproximadamente el 50% de las  $PM_{10}$  en muchas partes de México y el mundo (exceptuando zonas áridas como la estación de Hermosillo).

c) Por otro lado, si se ha anulado el valor de  $PM_{10}$  o no existe registro, pero hay valor validado para  $PM_{2.5}$  con tendencia y rango lógico, se puede substituir el valor ausente o eliminado de  $PM_{10}$  por él 2 veces el valor de  $PM_{2.5}$ .

d) Cuando un valor negativo ya sea de  $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$  se ubica en el rango entre "0" y el negativo del límite inferior de detección ( $-4 \mu g/m^3$ ), ese valor se substituye por

la mitad del valor positivo del límite de detección ( $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Si este criterio se aplicó a  $\text{PM}_{10}$  conviene verificar que su contraparte  $\text{PM}_{2.5}$  a la misma hora de registro no se mayor. Si éste fuera el caso, aplicar el criterio de substituir el valor de  $\text{PM}_{10}$  por 2 veces el asociado de  $\text{PM}_{2.5}$ . En el caso de que el valor reportado de  $\text{PM}_{10}$  o  $\text{PM}_{2.5}$  sea  $< - 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se desecha este registro y se procede como en b) o c).

e) Si se cumplen los criterios anteriores, se verifica la congruencia general de la tendencia de los datos con una gráfica de retraso (lag-plot). En esta gráfica el eje X contiene los valores secuenciales de  $\text{PM}_{10}$  o  $\text{PM}_{2.5}$  a la hora de registro  $t$  que debe ser de cada 5 min de preferencia. El eje Y contiene los mismos valores de X pero desfasados un registro de la hora en el tiempo  $t$  ya sea hacia adelante o hacia atrás. Una congruencia aceptable en la serie de tiempo es aquella que presente una correlación buena. Los valores “outliers” que resaltan por quedar claramente fuera de la tendencia. Estos valores aberrantes se identifican y se descartan. Se verifica la tendencia con periodos no mayores a un mes para facilitar la identificación.

f) Si uno de los valores del par de ya sea  $\text{PM}_{10}$  o  $\text{PM}_{2.5}$  para una misma hora fue eliminado por ser valor aberrante, pero el valor asociado ya sea  $\text{PM}_{10}$  o  $\text{PM}_{2.5}$  no lo fue, entonces es posible hacer la substitución sugerida antes:  $\text{PM}_{2.5} = 0.5 \times \text{PM}_{10}$ , o bien  $\text{PM}_{10} = 2 \times \text{PM}_{2.5}$ .

Una vez terminado el proceso de verificación de datos, se realizaron procedimientos estadísticos para visualizar de manera más fácil las tendencias, cumplimiento de normas, identificación de eventos y otros. Este procedimiento incluyó la elaboración de gráficas de series de tiempo; gráficas de barras de promedios temporales, mensuales y anuales y correlaciones entre  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y la fracción gruesa ( $\text{PM}_{10} - \text{PM}_{2.5}$ ) y con respecto a las diferentes variables meteorológicas: presión, temperatura, humedad relativa y precipitación para diferentes escalas de tiempo, dependiendo el enfoque del evento a analizar.

### *3.2.2 Análisis de datos meteorológicos*

La base de datos de los registros promedio de las variables meteorológicas no requirió de ningún procedimiento de validación, dada la confiabilidad de la estación, y sólo ocasionalmente se verificó que coincidieran con los registros de la estación meteorológica adicional que se localiza en el mismo observatorio de la RUOA.

#### *3.2.2.1 Rosas de viento de contaminantes.*

Para conocer la distribución de los contaminantes en la atmósfera se requiere conocer la dirección y velocidad del viento. Donde la velocidad es la magnitud del viento y la dirección la orientación de su proveniencia (Hernández, 2007)

El viento es representado por medio de una rosa de los vientos, ésta consiste en utilizar barras o extensiones que van desde el centro de un círculo hacia un punto determinado que ilustra la dirección del viento, la longitud de cada extensión indicará el porcentaje de tiempo en el que el viento provino de esa dirección (Ahrens, 2009).

En las representaciones de rosa de vientos también se observa la velocidad del viento, en unidades de millas por hora o metros por segundo. Y se reportan la frecuencia de las “calmas”, que son periodos con velocidad cero. La EPA recomienda el rango de 0-0.5 m/s como representativo de calmas.

En el caso de esta tesis se utilizó el software WRPLOT View (Wind Rose Plot for meteorological data), programa de libre distribución de Windows que elabora rosas de vientos para varios formatos de datos meteorológicos.

Por otro lado, para la interpretación de la influencia de los diferentes sectores geográficos en las concentraciones de las PM en función de la dirección de proveniencia del viento, se elaboraron “rosas de vientos de contaminantes”. Mientras que una rosa de vientos simple presenta la frecuencia de distribución

conjunta de la intensidad de viento con la dirección de proveniencia de los vientos, una rosa de vientos de contaminantes indica la distribución de frecuencia de concentraciones de contaminantes en función a la dirección del viento, y en donde los rangos de clase de los sectores de viento se refieren a rangos de concentraciones. Este tipo de esquema gráfico permite apreciar la importancia que la dirección de proveniencia del viento en el transporte de cierto contaminante. Por ejemplo, una concentración “pico” asociada a una dirección de viento poco frecuente tendrá posiblemente menor importancia que una concentración moderada asociada a una dirección de viento dominante con alta frecuencia de ocurrencia. Cada rosa de vientos se realizó con los promedios horarios de la velocidad y dirección del viento y de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y fracción gruesa  $PM_{10-2.5}$  registradas en la estación de monitoreo en los mismos periodos y fechas.

Asimismo, para investigar la influencia climatológica sobre el comportamiento por temporada del año de las  $PM_{10}$ ;  $PM_{2.5}$  y la fracción gruesa, se utilizó el criterio de De Foy *et. al* (2005) donde menciona que la climatología del Valle de México se clasifica principalmente en tres temporadas: la temporada fría-seca que abarca del mes de Noviembre a Febrero; la temporada cálida-seca presente en los meses de Marzo y Abril; y la temporada de lluvias de los meses mayo a octubre.

### *3.3 Construcción de trayectorias HYSPLIT*

El modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Simple (HYSPLIT) del Laboratorio de Recursos Atmosféricos (ARL) de la NOAA, es un sistema completo para calcular trayectorias de partículas simples en el aire, así como complejas simulaciones de transporte, dispersión, transformación química y deposición. El modelo de Trayectorias de HYSPLIT simula el transporte de una partícula contaminante a través de un cálculo de retro-trayectorias y trayectorias. El análisis de trayectorias regresivas ayuda a determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes, mientras que el análisis de trayectorias progresivas ayuda a

determinar la dispersión de los contaminante (American Meteorological Society, 2018).

El método de cálculo de este modelo es un híbrido entre el enfoque Lagrangiano y Euleriano. El método Lagrangiano puede simular la dispersión de contaminantes basándose en el crecimiento de “puffs” de contaminantes, utilizando un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y difusión de las trayectorias o parcelas de aire que se mueven desde su ubicación inicial. Y la metodología Euleriana usa una cuadrícula tridimensional fija como un marco de referencia para calcular la concentración en cada celda de la malla integrando el flujo de contaminantes proveniente de la dispersión y advección de dicho contaminante (ARL, 2017)

Por lo que HYSPLIT puede simular una distribución de contaminantes a partir de una partícula simple o “puff”, o siguiendo el movimiento dispersivo de un gran número de partículas (HYSPLIT Training Seminar, 2004).

Este software de acceso libre sigue siendo uno de los modelos de transporte y dispersión atmosféricos utilizados más ampliamente en la comunidad de las ciencias de la atmósfera.

### *3.4 Evaluación de Cumplimiento de Normatividad y comparación con recomendaciones*

Para revisar el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM) y de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de los contaminantes  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  se calcularon promedios de acuerdo a las escalas de tiempo señaladas por las NOM y la OMS. Para ello se tomó en cuenta el criterio de suficiencia de al menos 75% de datos, es decir, para comparar con las normas y guías de 24 horas se deben contar con al menos 18 de los 24 datos horarios para la realización de cada cálculo, mientras que para el promedio anual, se aplica el mismo criterio del 75% de los datos de promedios de 24 horas por periodo trimestral. Se requieren al menos tres trimestres para definir un promedio anual.

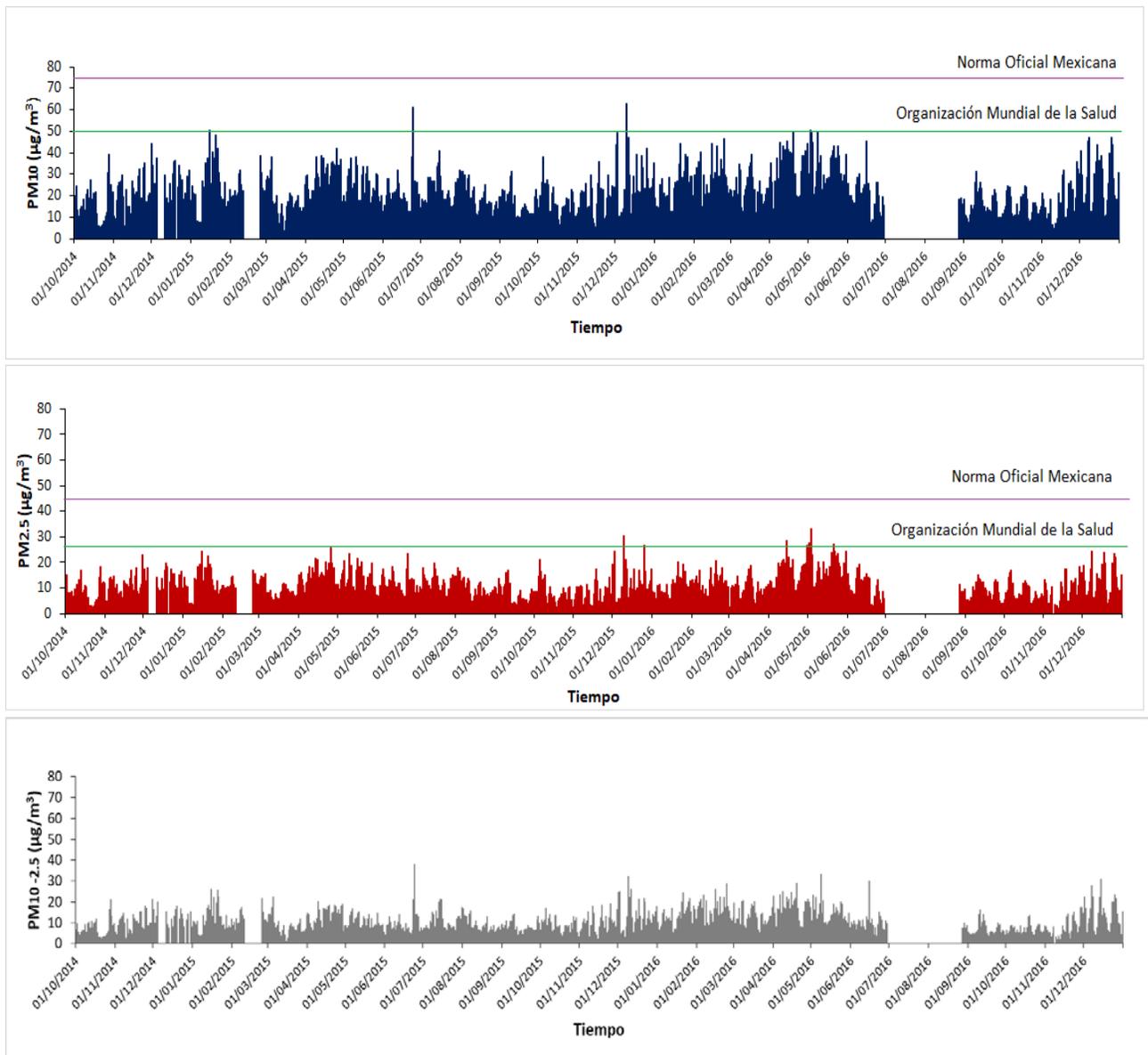
## 4. Análisis y Resultados

### *4.1 Series de tiempo de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>(10-2.5)</sub> y evaluación del cumplimiento a la normatividad aplicable*

La serie de tiempo de las concentraciones promedio de 24 horas de los contaminantes (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10-2.5</sub>) del 1 de Octubre 2014 al 30 de Diciembre 2016 se muestra en la figura 8.

Las concentraciones más altas registradas de PM<sub>10</sub> y de PM<sub>2.5</sub> fueron 62.64 µg/m<sup>3</sup> y 33.17 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente, en tanto que la máxima de la fracción gruesa de 37 µg/m<sup>3</sup> para este mismo promedio.

Los mayores promedios de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> ocurrieron en las temporadas: fría-seca y cálida-seca, aunque este patrón no fue tan consistente para la fracción gruesa. Respecto al cumplimiento con la normatividad nacional para exposiciones agudas, no se rebasaron estas normas ni para PM<sub>10</sub> ni PM<sub>2.5</sub>. Sin embargo, si ocurrieron algunas excedencias a los valores de concentración recomendados por la OMS para promedios de 24 horas precisamente en la temporada de secas.



**Figura 8. Series de tiempo del 1 de Octubre 2014 al 30 de Diciembre 2016 de los promedios en 24 horas de las concentraciones de: a)  $\text{PM}_{10}$ , b)  $\text{PM}_{2.5}$  y c)  $\text{PM}_{10-2.5}$  para la estación Juriquilla, Qro., de la RUOA. Las gráficas incluyen las respectivas normas de calidad del aire y las recomendaciones de la OMS para  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ .**

La figura 9 presenta los promedios anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para 2015 y 2016 en Juruquilla y su comparación con las normas de calidad del aire y recomendaciones de la OMS respectivas.

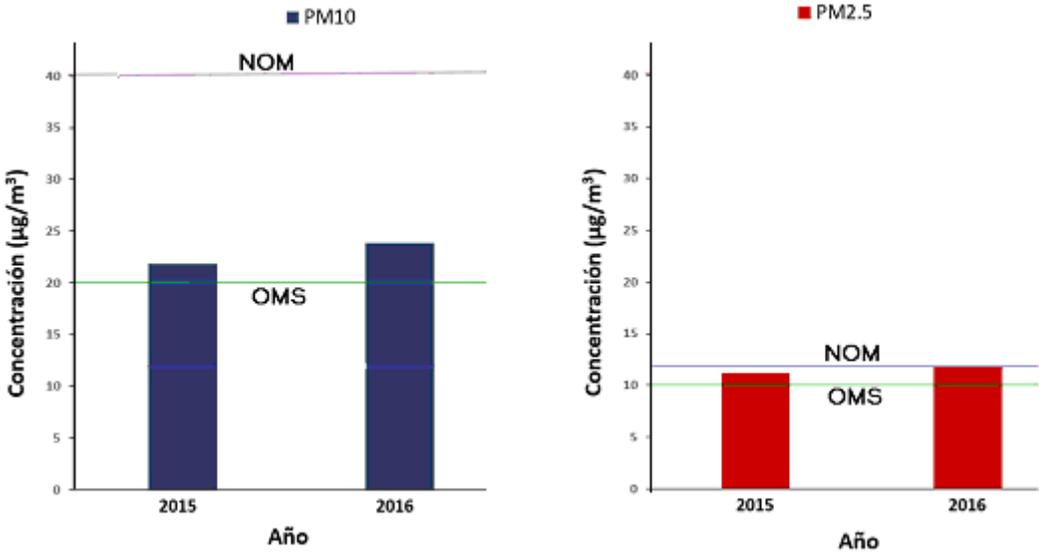


Figura 9. Promedios anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para 2015 y 2016. La línea verde representa los valores recomendados por la OMS ( $PM_{10}$ :  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $PM_{2.5}$ :  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y la línea morada representa los valores establecidos por la NOM ( $PM_{10}$ :  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $PM_{2.5}$ :  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Los promedios anuales reflejan incremento del año 2015 al 2016 de 9.4% para  $PM_{10}$  y para la fracción fina de un 4.8%. Los promedios anuales obtenidos de los dos años no exceden las respectivas NOM para  $PM_{10}$ , pero se alcanza a rebasar la norma de  $PM_{2.5}$  para 2016. En forma similar a los promedios de 24 horas, se rebasaron en ambos casos los valores máximos recomendados por la OMS.

#### 4.2 Influencia climática temporal, mensual y horaria en las concentraciones de $PM_{2.5}$ , $PM_{10-PM_{2.5}}$ y $PM_{10}$ .

La figura 10 muestra la serie de tiempo de los promedios mensuales de  $PM_{10}$  y las fracciones gruesa y fina para 2015 y 2016.

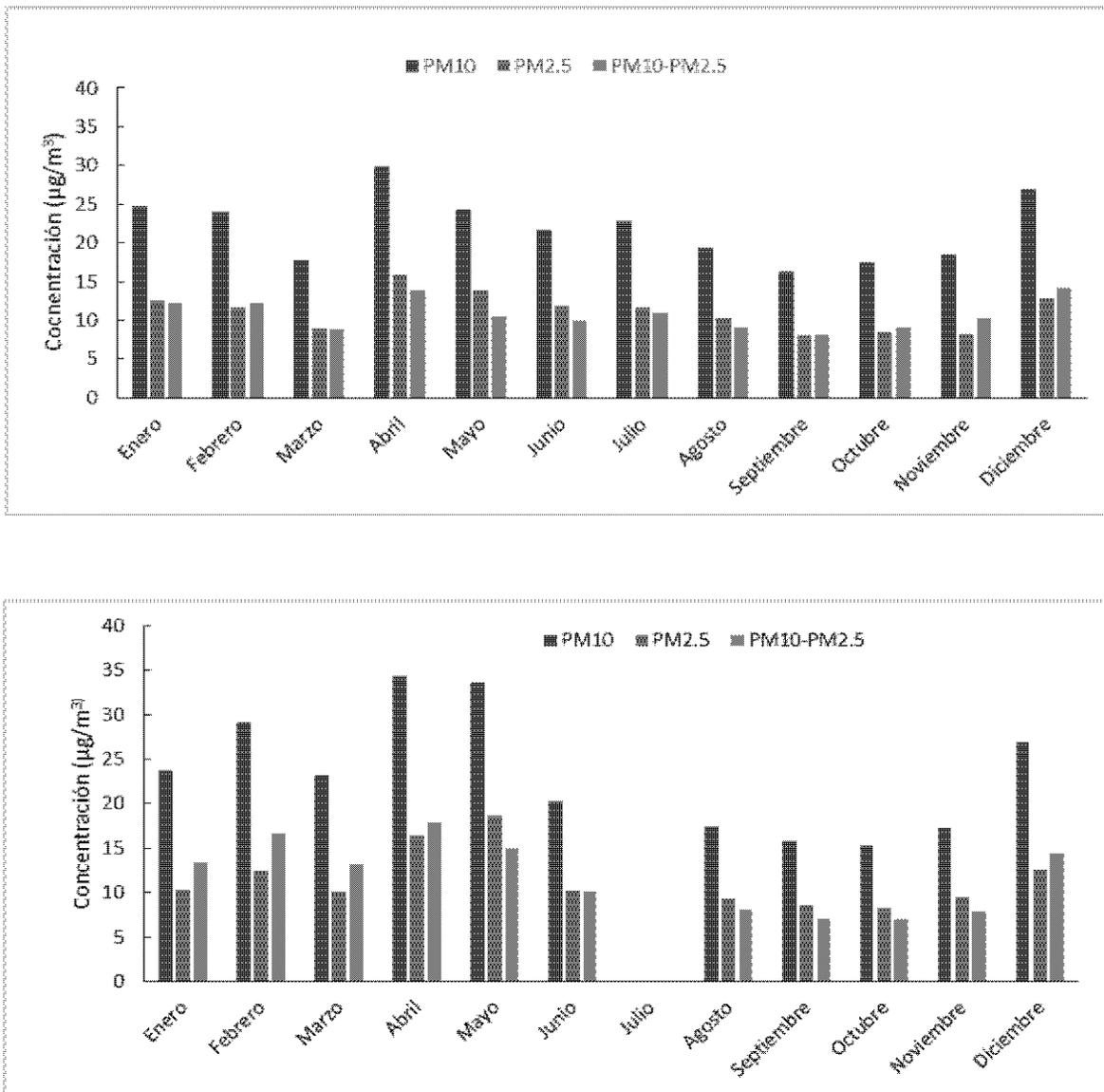


Figura 10. Promedios mensuales de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y fracción gruesa ( $PM_{10-PM_{2.5}}$ ) para los años 2015 y 2016 en Juriquilla, Qro.

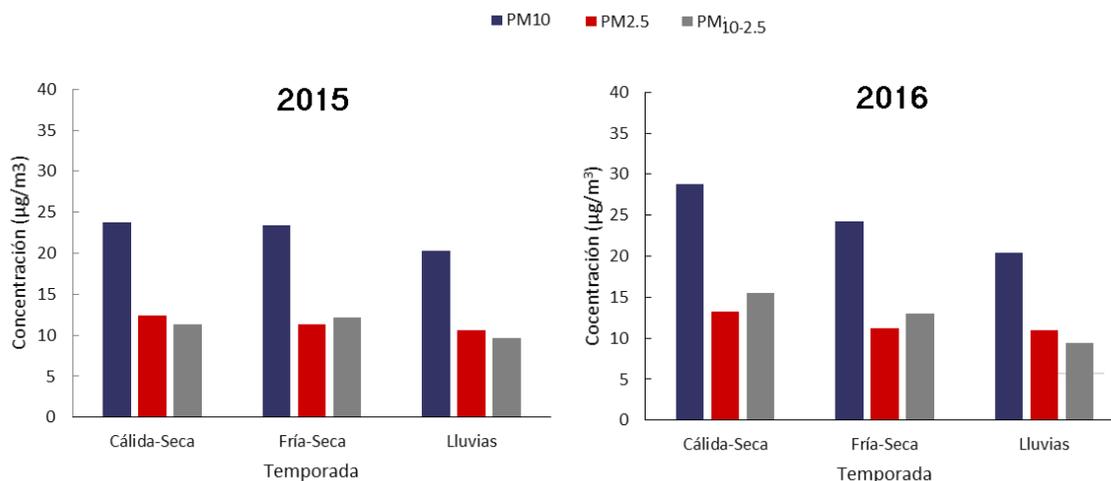
Los promedios mensuales y la tendencia por temporada presentadas en la figura 10 muestran que las concentraciones de todas las fracciones de PM fueron mayores en 2016 con respecto a 2015. En el mes de abril se presenta el máximo de concentración promedio mensual de  $PM_{10}$ , seguido por el mes de mayo y diciembre mientras que las concentraciones más bajas se presentan en los meses junio a noviembre, meses que conforman la temporada de lluvias y el inicio de la temporada seca fría.

Asimismo, los promedios mensuales de  $PM_{2.5}$  y la fracción gruesa presentaron diferentes dominancias aun en los mismos meses en los dos años. En el 2015 del mes de entre abril a agosto tuvo mayor contribución la fracción fina y del mes de septiembre a marzo contribuyó más la fracción gruesa. En el 2016, del mes de mayo a noviembre contribuyó más la fracción fina y del mes de diciembre a marzo la fracción gruesa.

Para ambos años, los promedios temporales indican que en la temporada cálida-seca se registró la mayor concentración de material particulado. Debido a las condiciones secas que se tiene en esta temporada, se propicia la resuspensión de partículas aumentando su concentración. En la temporada de lluvias se tiene una menor concentración de material particulado. Esto se atribuye al papel que tiene la precipitación en la deposición húmeda de material particulado presente en la atmósfera, limpiando principalmente las partículas gruesas.

Por otro lado, en las temporadas fría-seca y cálida-seca del 2016 se presentaron las mayores concentraciones de la fracción gruesa que de  $PM_{2.5}$ . Mientras que en el 2015, sólo en la temporada fría-seca se tiene una mayor concentración de la fracción gruesa. Se asume que una mayor contribución de fracción gruesa indica la dominancia de polvos mientras que una mayor dominancia de fracción fina indica contribución por fuentes antropogénicas.

Con objeto de confirmar la temporalidad en los niveles de las PM en Juriquilla, la figura 11 contiene los promedios temporales de PM<sub>10</sub> y las fracciones gruesa y fina.



**Figura 11. Promedios temporales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> y fracción gruesa (PM<sub>10-2.5</sub>) para los años 2015 y 2016 en Juriquilla.**

La figura anterior permite confirmar que en la temporada cálida seca las PM<sub>10</sub> tiene las mayores concentraciones. En la temporada seca caliente hay una alternancia en el dominio de las fracciones fina y gruesa, mientras que en la seca fría domina ligeramente la fracción gruesa, y en la de lluvia es clara la dominancia de las PM<sub>2.5</sub>.

Por otro lado, y con el fin de investigar como se presentan las concentraciones durante el día para cada una de las temporadas, se investigo su distribución en 24 horas mediante el análisis de diagramas de caja y bigotes. Consiste en una caja rectangular que se divide en tres cuartiles Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> y Q<sub>3</sub> donde cada cuartil representa el 25% de los datos. Siendo Q<sub>2</sub> el cuartil que se encuentra en el centro y por tanto representa la mediana (50%) de los datos. Esto proporciona una visión de la simetría de la distribución de los datos; si hay simetría la mediana se ubicará en el centro de la caja; si la mediana no está en el centro de la caja, la distribución no es simétrica indicando que los datos están sesgados hacia donde se ubique la mediana.

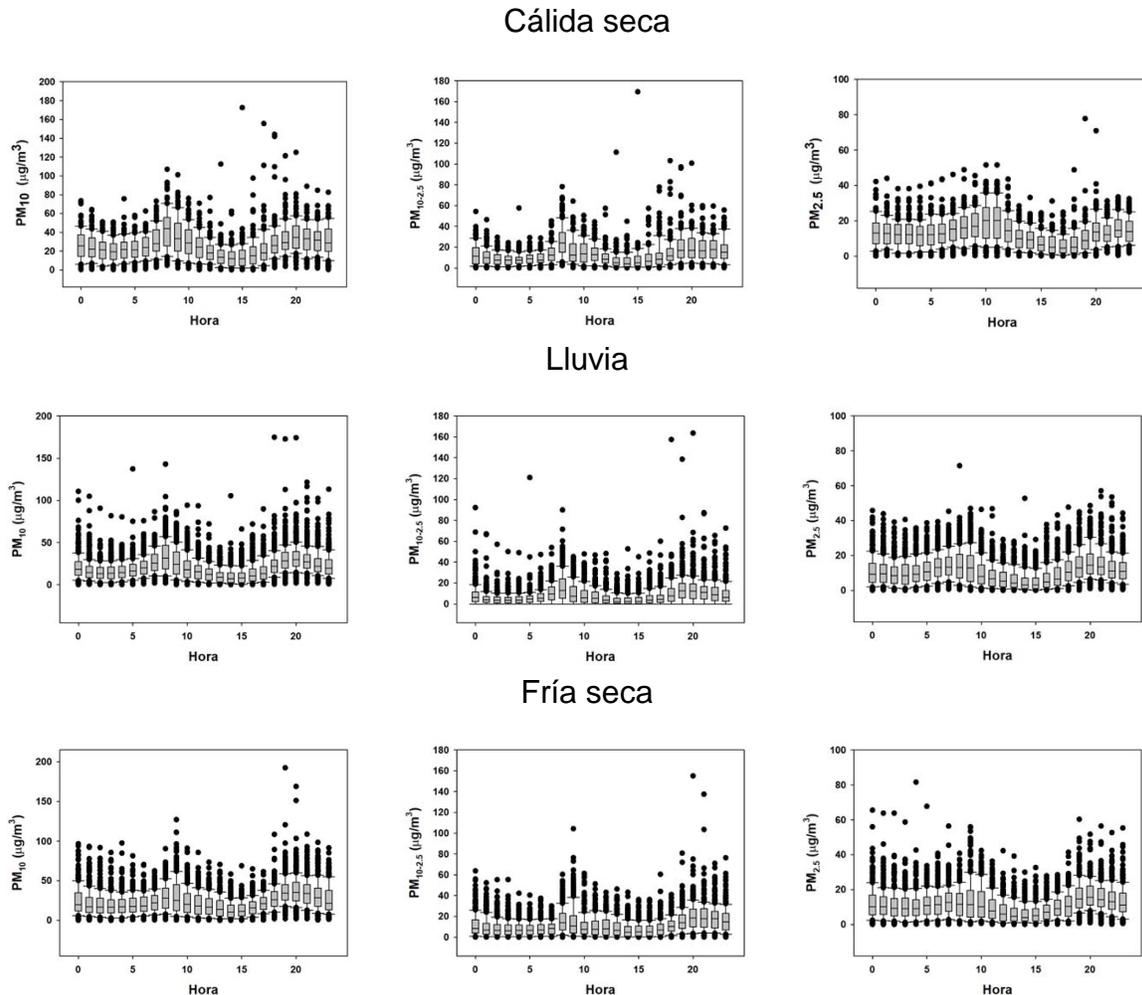


Figura 12 . Distribución de los promedios horarios en las 24 horas de cada una de las temporadas climáticas de datos combinados de los años 2015 y 2016 de  $PM_{10}$ ,  $PM_{10-2.5}$  y  $PM_{2.5}$  en Juriquilla.

La figura 12 muestra que se conforman dos modos de acumulación de las  $PM_{10}$ , en asociación a la hora de tráfico vehicular, por la mañana entre las 5 y 11 am y por la tarde-noche de las 16 hrs a las 23 hrs. Los valores más bajos se presentan entre las 12 y las 16 horas y en la madrugada. De las tres temporadas, el promedio horario máximo matutino de las  $PM_{10}$  ocurre a las 9 de la mañana durante la fría seca, en tanto que en las otras dos el pico resulta a las 8 a.m. En tanto que en la temporada de lluvia los promedios máximos de  $PM_{10}$  también son notables, resultando incluso que hay mayores promedios nocturnos que diurnos. Al desgregar las  $PM_{10}$  en sus dos componentes, fracción fina y fracción gruesa, se puede detectar que la fracción fina es la que tiene mayor contribución al comportamiento de las  $PM_{10}$ .

En las tres temporadas, los eventos de concentraciones altas de la fracción gruesa se presentaron generalmente en la noche, de las 18 hrs a las 24 hrs. Siendo los datos nocturnos en las tres temporadas similares o mayores que los máximos matutinos. Este comportamiento es similar al observado en Hermosillo (Rangel, 2017) en donde al anochecer las concentraciones de  $PM_{10}$ , y en particular la fracción gruesa se incrementa muy por arriba de las concentraciones observadas en el día. Este efecto se ha sugerido está asociado al atrapamiento que se presenta al reconfigurarse muy rápidamente la capa de inversión nocturna, que atrapa y debido a que tiene un menor grosor, comprime los polvos previamente resuspendidos (Torres, 2018).

Por otro lado, la fracción fina presenta en general eventos de concentraciones altas por las madrugadas y mañanas. Esto puede deberse a una influencia antropogénica, principalmente por el tráfico vehicular de camiones y autos, ya que las emisiones de procesos de combustión son básicamente fracción fina. Al ser emitidas a una atmósfera estable, las partículas finas tienden a acumularse ocasionando los niveles observados. Los valores observados al anochecer pueden también ser consecuencia del atrapamiento por causa de la capa de inversión nocturna.

El análisis de correlación entre las diversas fracciones de las  $PM_{10}$  por temporadas para los años 2015 y 2016 se presenta en las figuras 13 y 14.

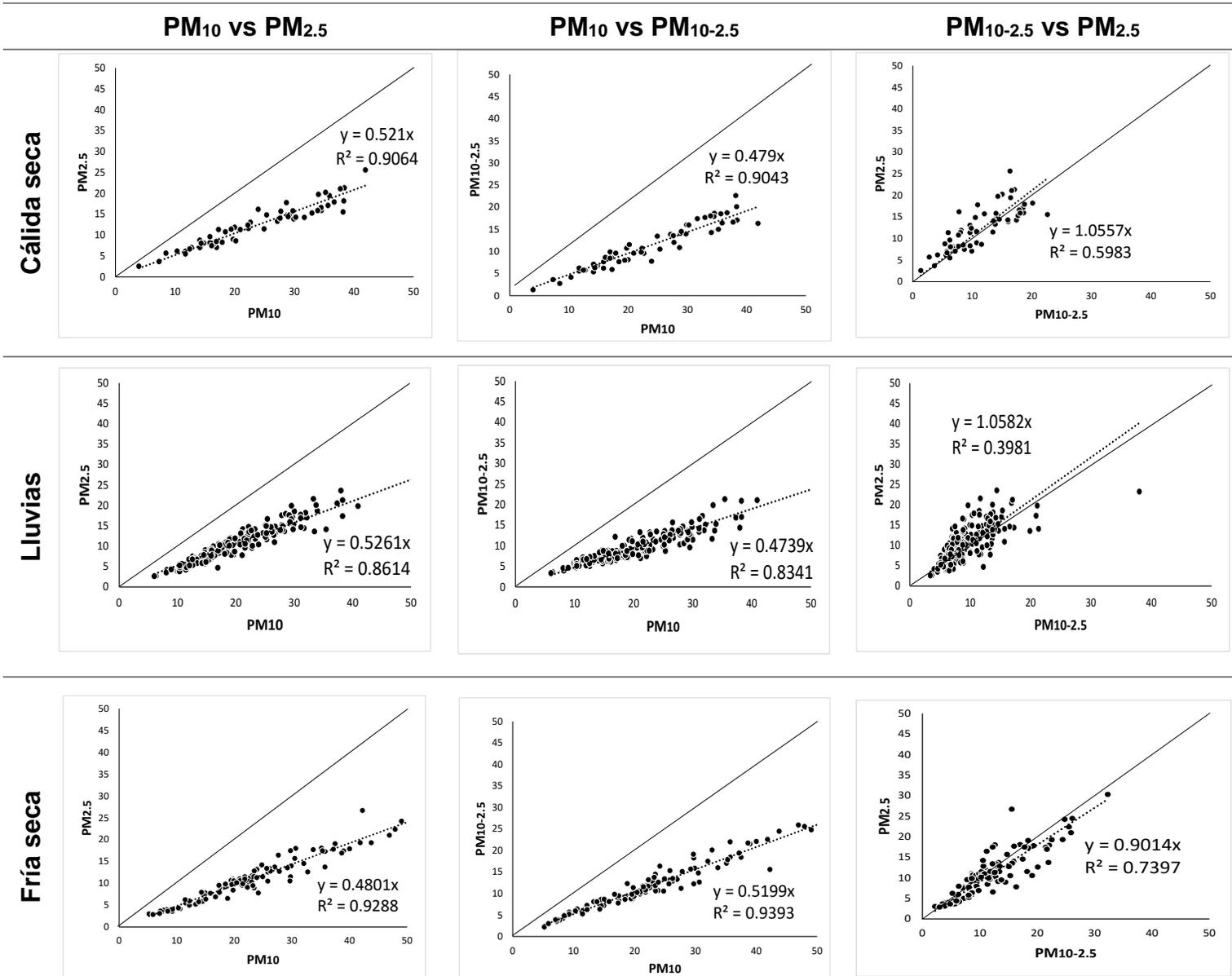


Figura 13. Correlaciones temporales de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10-2.5</sub> durante el año 2015.

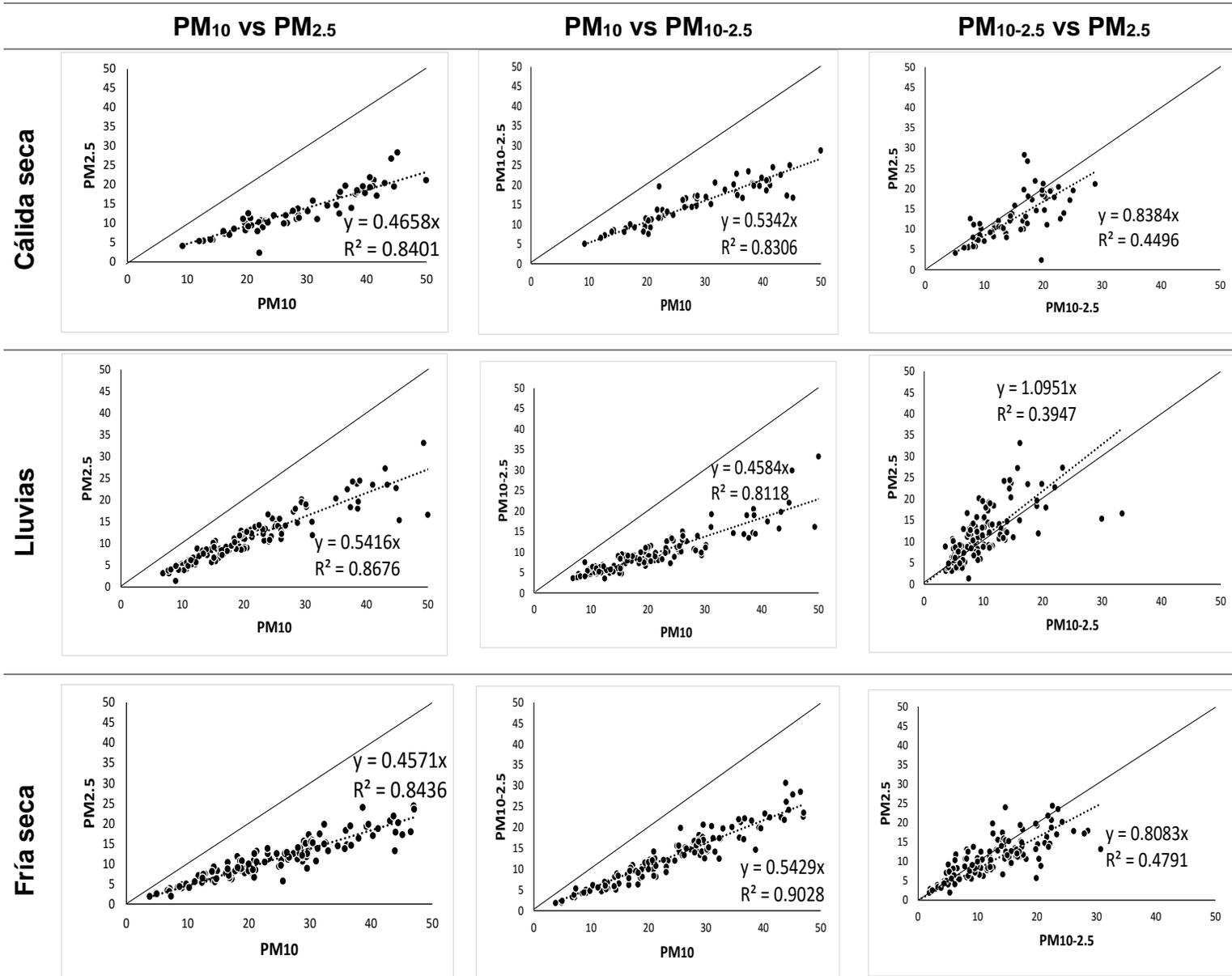


Figura 14. Correlaciones temporales de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10-2.5</sub> durante el año 2016.

El análisis de correlación de las concentraciones promedio de 24 horas entre PM<sub>2.5</sub> vs PM<sub>10</sub>, PM<sub>10-2.5</sub> vs PM<sub>10</sub> y PM<sub>10-2.5</sub> vs PM<sub>2.5</sub> para las diferentes temporadas en los años 2015 y 2016 muestra que la contribución de PM<sub>2.5</sub> en las PM<sub>10</sub> (la pendiente de la regresión) varía de entre aproximadamente un 45% a un 54%, con

ligeras variaciones de un año al otro. Para 2015, la fracción fina fue ligeramente mayor al 50% en la temporada cálida seca y lluvias y menor al 50% en la fría seca. Mientras que en 2016, las  $PM_{2.5}$  fueron mayores al 50% también en lluvias y menores a este valor en ambas, seca fría y cálida. Los coeficientes de correlación fueron mayores a  $R^2 = 0.84$  lo que da buena certeza a esta observación ya que es cercano a  $R^2=1$ . Mientras que, la contribución de la fracción gruesa en los eventos de  $PM_{10}$  mostró que fue mayor en la temporada seca fría y menor en temporada de lluvias. Los coeficientes de correlación fueron también mayores a 0.81. Esto indica que de las tres temporadas, la temporada cálida seca tiene condiciones favorables para la resuspensión de polvos debido a los bajos porcentajes de humedad. De acuerdo al análisis anual se puede decir que aproximadamente el 50% de las  $PM_{10}$  en Juriquilla son partículas finas y que el otro 50% son partículas gruesas es decir  $PM_{2.5}/PM_{10} \sim 0.5$  y  $PM_{10-2.5}/PM_{10} \sim 0.5$ , respectivamente.

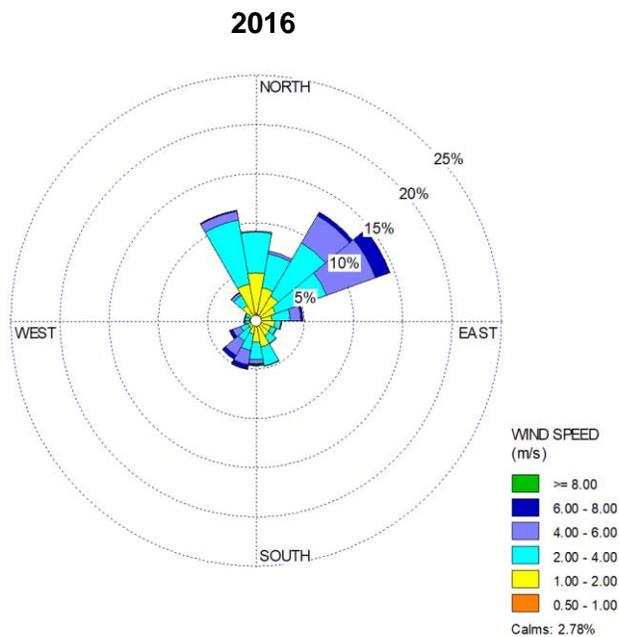
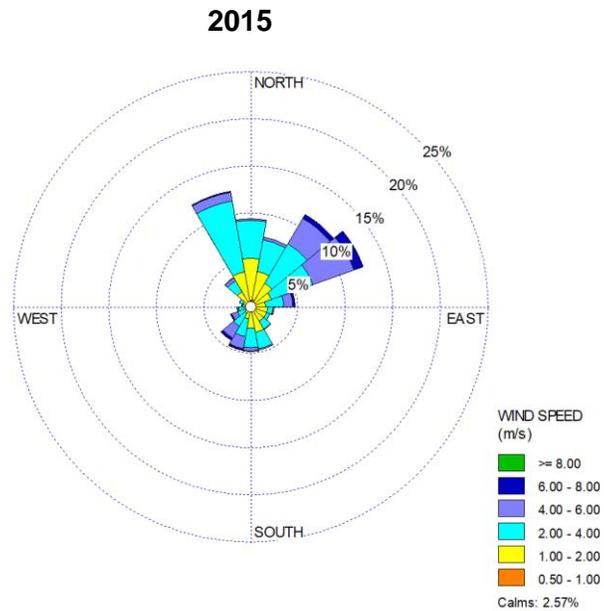
De la correlación entre  $PM_{2.5}$  y la fracción gruesa para las diferentes temporadas se concluyó que hay una ligera dominancia de las  $PM_{2.5}$  en temporada de lluvias y una ligera dominancia de la fracción gruesa en temporada de secas. Lo cual indica que la tendencia de la suspensión de polvo es mejor en secas que en lluvias. Incluso en la correlación de la temporada de lluvia se aprecia un conglomerado de puntos más cercano al origen asociado al efecto de lavado de partículas grandes por la lluvia.

#### *4.3 Influencia de la variable viento en la distribución de las concentraciones.*

La influencia de la velocidad y dirección del viento en sus diferentes temporadas climáticas fue analizada mediante rosas de vientos típica y de la respectiva rosa de vientos de contaminantes para las PM.

##### *4.3.1 Rosas de vientos*

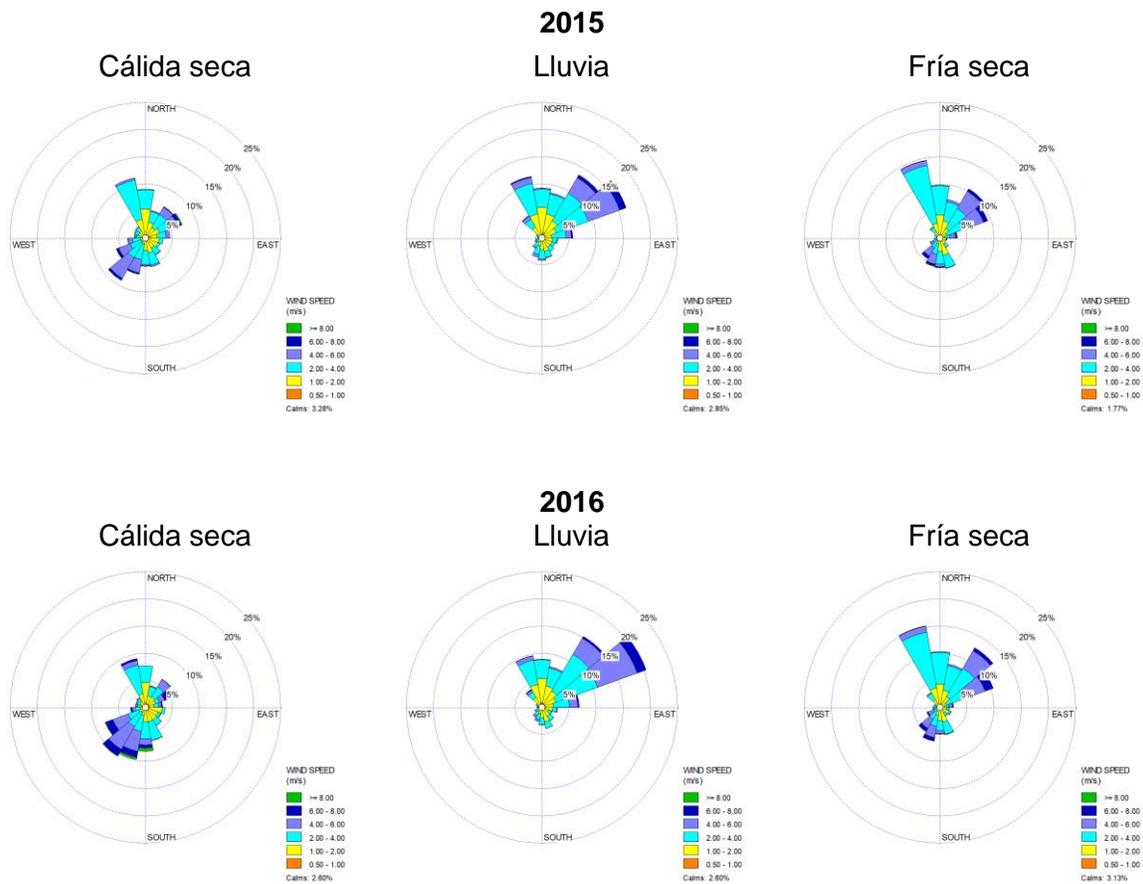
La Ilustración 15 presenta las rosas de vientos anuales por temporada del año.



**Figura 15. Rosas de viento anual para los años 2015 y 2016 para Juriquilla, Querétaro.**

Las rosas de vientos para los años 2015 y 2016 muestran que las distribuciones de las diferentes componentes del viento fueron muy similares observándose una clara dominancia de vientos del NE tanto en frecuencia como en intensidad.

La frecuencia de calmas es apenas menor al 3% lo que implica que prácticamente todo el tiempo hay ventilación de aire. Asimismo, se observa que hay componentes del SO-SSO con baja frecuencia pero con la presencia de vientos de moderados a fuertes. Un mejor detalle de la influencia de la intensidad de viento y la dirección de su procedencia por temporada de cada uno de los años estudiados se presenta en la figura 16.



**Figura 16. Rosas de viento por temporada climática del año para los años 2015 y 2016 para Juriquilla, Querétaro.**

La figura anterior muestra que en cada temporada del año los vientos presentan diferentes comportamientos. En la temporada cálida seca hay una componente importante de vientos de moderados a intensos del SO-SSO seguido de vientos del NNO. Para la temporada de lluvias es dominante la influencia de vientos intensos del NE, mientras que en seca frías dominan los vientos del ONO con

vientos de ligeros a moderados. La importancia de que los vientos sean intensos en las temporadas secas es que bajo cierta combinación de condiciones, estos vientos pueden ser capaces de resuspender polvos. Si estos vientos se presentan en las temporadas de secas, es posible que influyan en esta resuspensión. Sin embargo, en lluvias, al estar el suelo húmedo, a pesar de tener vientos intensos, la resuspensión de polvos se reduce.

#### 4.3.2 Rosas de vientos de contaminantes

La rosa de vientos de contaminantes anual de promedios horarios de  $PM_{2.5}$ , la fracción gruesa ( $PM_{10-2.5}$ ) y  $PM_{10}$  para los años 2015 y 2016 en Juruquilla se muestra en la figura 17.

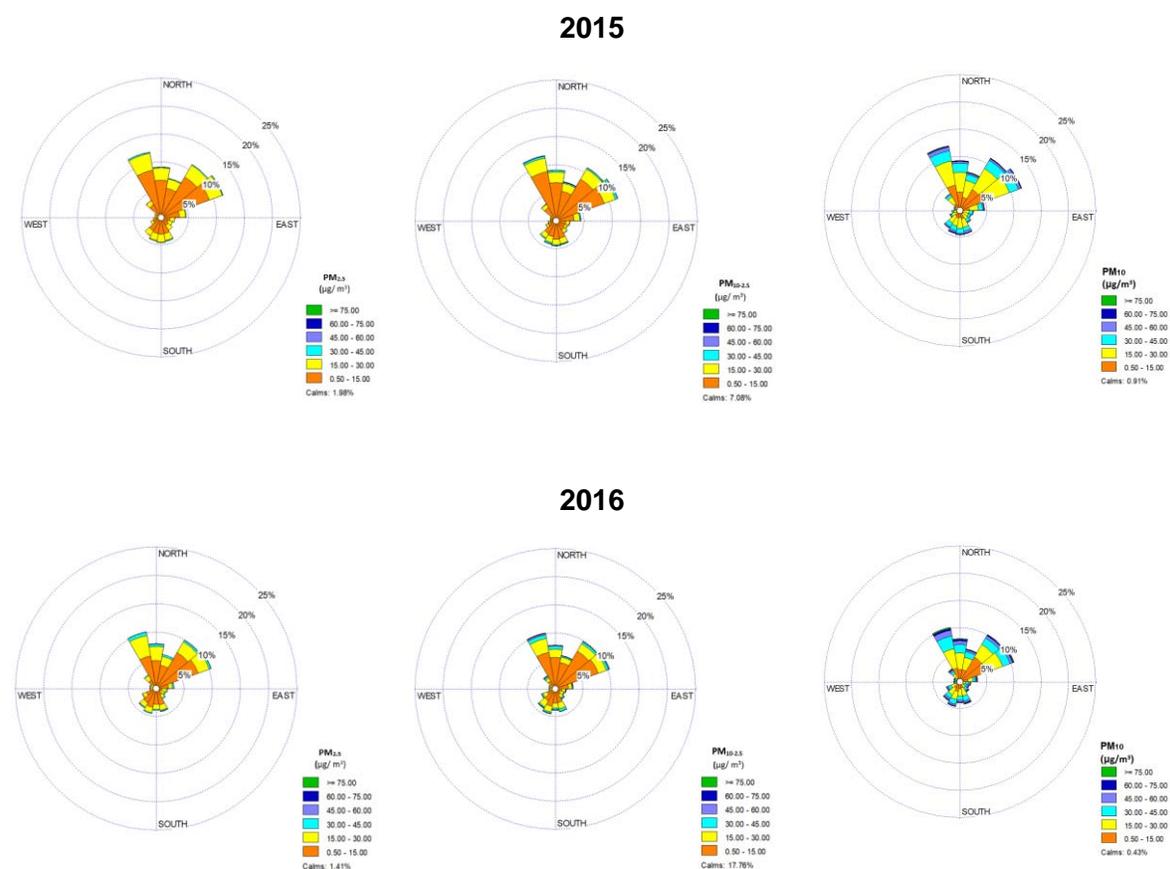


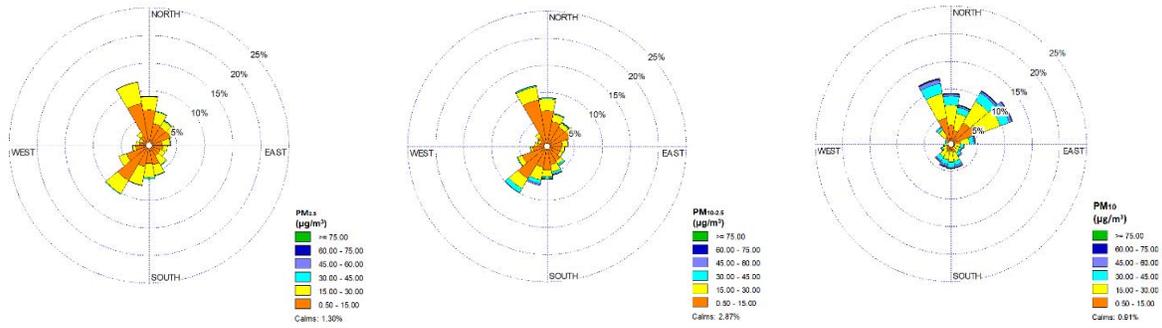
Figura 17. Rosa de contaminantes anual de  $PM_{2.5}$  y fracción gruesa ( $PM_{10-2.5}$ ) y  $PM_{10}$ , para los años 2015 y 2016.

De acuerdo a las rosas anuales de la figura 17, la proveniencia de los vientos parece no influir notablemente en los incrementos de las concentraciones de las  $PM_{10}$  y sus fracciones finas y gruesas siendo muy similares para cada año. Al combinar todas las contribuciones del sector Oeste-Norte-Este, resulta una mayor dominancia de acarreo de partículas en sus diferentes fracciones hacia Juriquilla en comparación con las contribuciones del sector sur, sin importar que tan intenso fue el viento. Siendo las partículas provenientes del sector NNO con respecto a la estación de monitoreo en Juriquilla, las que predominan la mayor parte de año y las que acarrearán mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y sus fracciones.

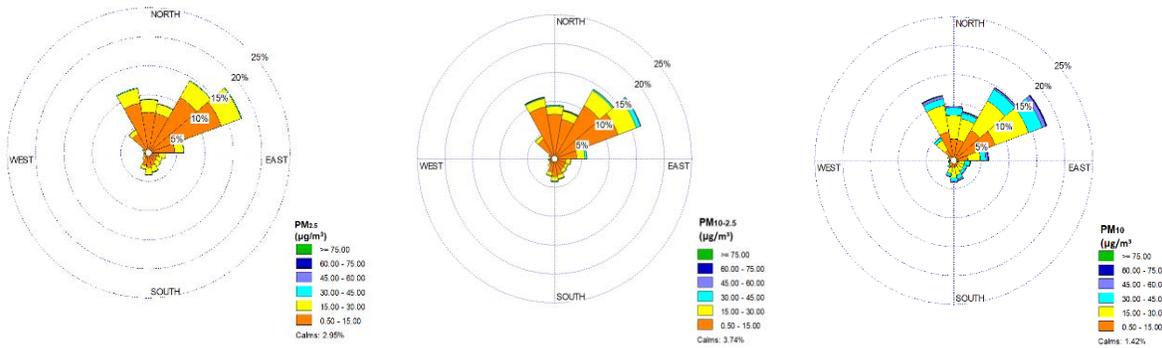
De la rosa de contaminantes anual de  $PM_{10}$  se observaron concentraciones en promedio horario por arriba de los  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Con objeto de visualizar la influencia de las temporadas meteorológicas del año en la proveniencia de los vientos, se realizaron las rosas de contaminantes de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  y  $PM_{10}$  por temporada para los años 2015 y 2016. Las figuras 18 y 19 presentan los resultados.

### Cálida seca



### Lluvia



### Fría seca

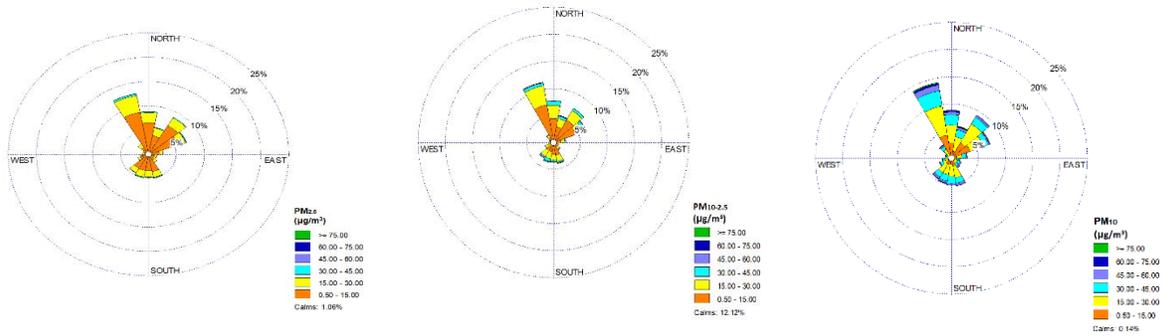
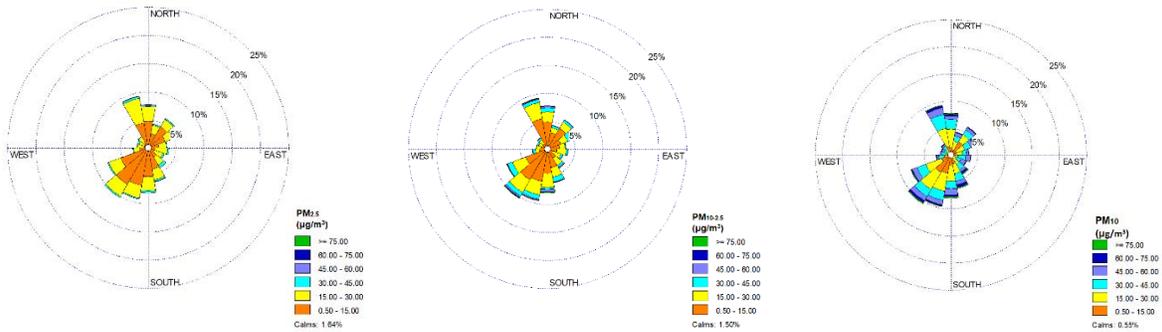
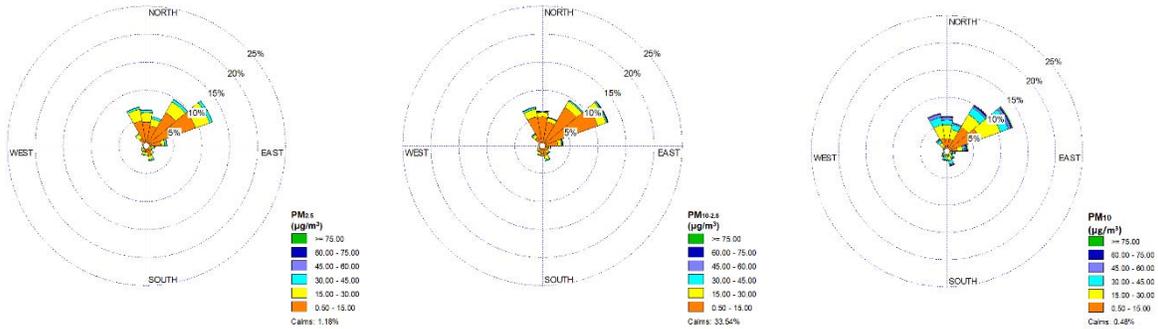


Figura 18. Rosa de contaminantes de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y fracción gruesa (PM<sub>10-2.5</sub>) por temporada del año 2015.

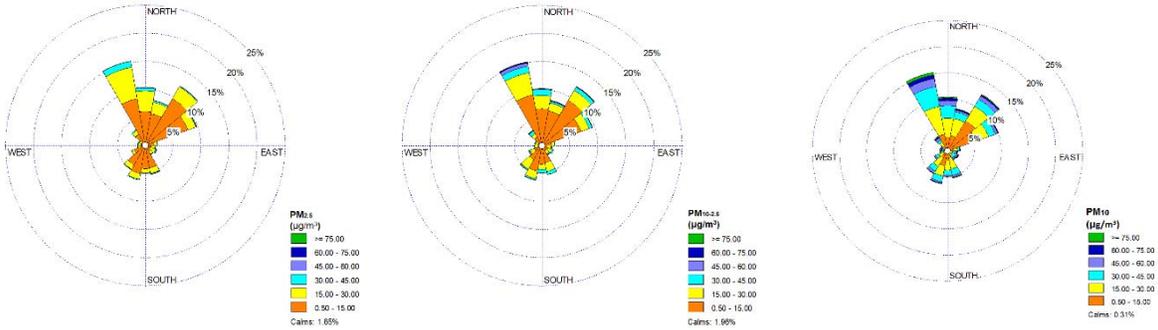
### Cálida seca



### Lluvia



### Fría seca



**Figura 19. Rosa de contaminantes de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y fracción gruesa (PM<sub>10-2.5</sub>) por temporada del año 2016.**

En el análisis de las rosas de contaminantes por temporada se observa un comportamiento relativamente similar en los dos años, aunque hay cambios en los vientos dominantes en cada temporada como se observó previamente en las rosas de vientos temporales (ver figuras 18 y 19).

En la temporada cálida-seca los vientos dominantes provienen del SSO-S (zona urbana de Querétaro) y del NNO-N (municipio de Querétaro), siendo el acarreo de partículas gruesas mayor que el de la fracción fina. Las concentraciones promedio

horario medidas de  $PM_{10-2.5}$  se encuentran por arriba de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , fracción fina apenas rebasa las  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y las concentraciones promedio horarias de  $PM_{10}$  llegan alcanzan los  $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La predominancia de la fracción gruesa se puede asociar a las actividades agrícolas que hay en el centro y norte de Querétaro ya que en este tipo de suelos los procesos erosivos tienden a ser favorables.

En la temporada de lluvias, los vientos dominantes provienen del sector NE-ENE con una contribución mínima de todo el sector sur, en esta temporada se observa un ligero incremento en la fracción fina.

En esta temporada las  $PM_{2.5}$  llegan a tener concentraciones de entre  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y hasta  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para la fracción gruesa se registraron contribuciones de partículas menores a  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En tanto, las  $PM_{10}$  registran concentraciones mayores a  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dado que hay una ligera dominancia de la fracción fina, esto puede estar asociado a la carretera federal 57 que se encuentra ubicada al NE de la estación de monitoreo, la cual presenta un tráfico carretero muy intenso, por lo que las emisiones de fuentes móviles podrían ser las responsables de los niveles de  $PM_{2.5}$  y en consecuencia de una fracción importante de las  $PM_{10}$ . También se puede ver asociada a eventos de lluvia que suprime la resuspensión de polvos.

Finalmente, en la temporada fría-seca los vientos dominantes provienen del sector NNO-N y NE con una discreta contribución del SSO. Las contribuciones de concentraciones en la fracción fina es variable siendo en ocasiones dominante el rango  $< 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las concentraciones de entre  $15$  y  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dominaron, especialmente cuando el viento provino del sector SSO aunque con menor frecuencia. Asimismo, se detectan contribuciones claras en el rango  $30$  a  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{2.5}$  del NNO. Para la fracción gruesa, también hubo cierto dominio de contribuciones en el rango  $15$  a  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aunque se observa que se recibieron parcelas de aire con concentraciones promedio horario importantes del NNO en el rango  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y mayores a pesar de que en esta temporada los vientos intensos fueron tanto del NNO como del sur. Por lo que la resuspensión de polvo no pudo ser el mecanismo más importante en la ocurrencia de estos niveles, también pudieron tener influencia los parques industriales. De esta forma, el

comportamiento de las  $PM_{10}$  para la temporada seca fría muestra que el paso de aire proveniente del NNO-N contribuyó ampliamente al incremento en las concentraciones registrándose hasta más de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Es posible que las contribuciones a la fracción gruesa sea por construcciones, quemas o por preparación de tierras para cultivo.

#### *4.4 Análisis de correlación con variables meteorológicas a mediano plazo*

En la sección 4.3 se analizó la ocurrencia de los niveles de concentración de  $PM_{10}$  y sus fracciones fina y seca con respecto a la dirección y velocidad del viento a una escala temporal, por estar directamente asociado con la dispersión, resuspensión, y transporte de las partículas. En esta sección se analiza la ocurrencia de los niveles de concentración de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  con respecto a otras variables meteorológicas como son: humedad relativa (contenido de humedad y asociación con lluvia), temperatura ambiente (potencial de estabilidad e inestabilidad atmosférica), presión atmosférica (influencia de sistemas de alta y baja presión), e intensidad de viento (potencial de resuspensión y transporte). Si bien el comportamiento horario de cada una de estas variables es diferente durante el transcurso de las 24 horas del día y puede cambiar rápidamente en unos cuantos días, se asumió que el promedio mensual podría representar de una forma razonable, su posible influencia en el comportamiento de las partículas.

Las figuras 20 y 21 muestran la serie de tiempo de promedios mensuales las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y fracción gruesa con los respectivos promedios de humedad relativa, presión, temperatura e intensidad del viento registrados en Juriquilla.

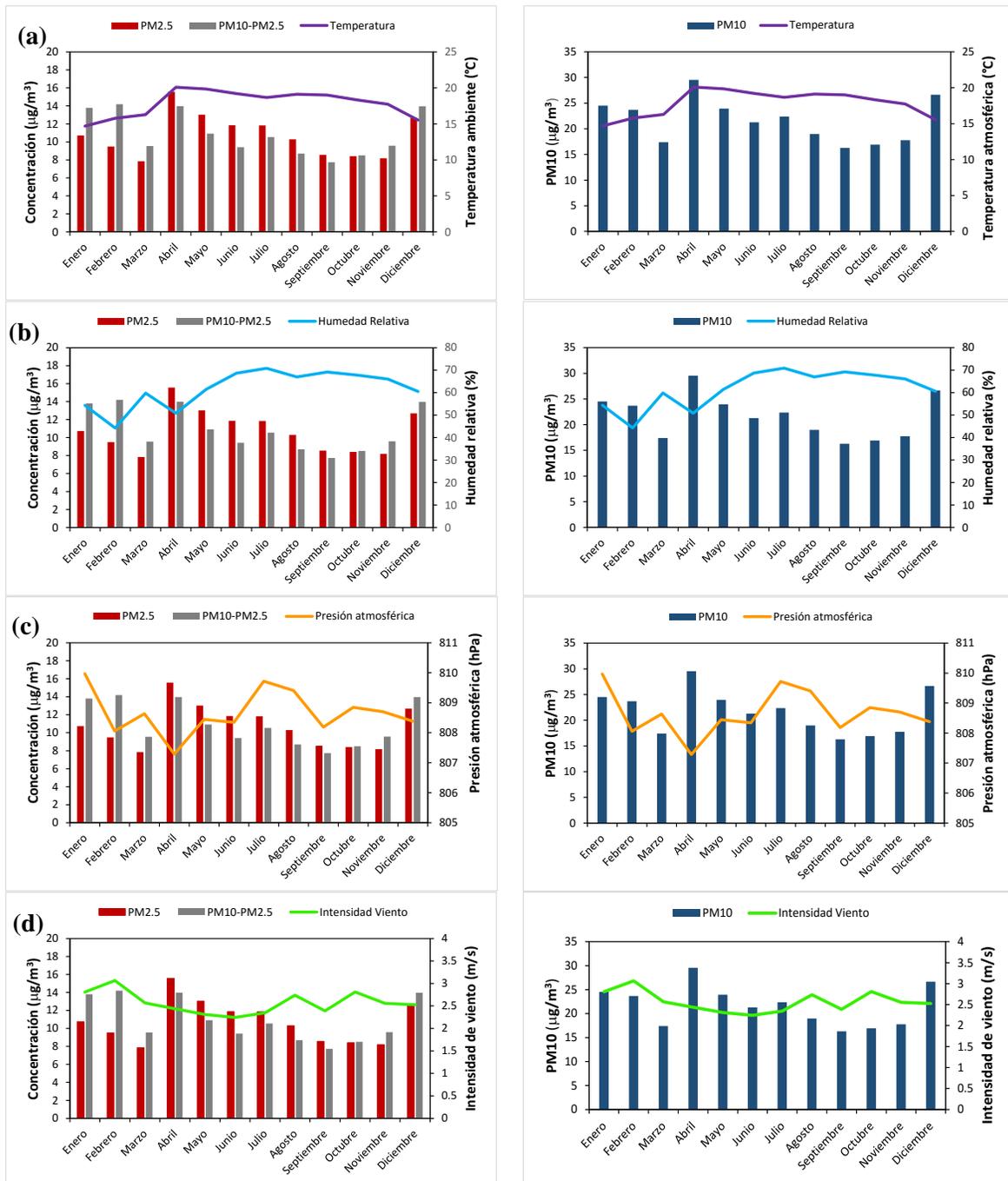


Figura 20. Relación entre los promedios mensuales de: (a) temperatura ambiente, (b) humedad relativa, (c) presión atmosférica y, (d) intensidad de viento con  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10-2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  en Jiquilla en el año 2015.

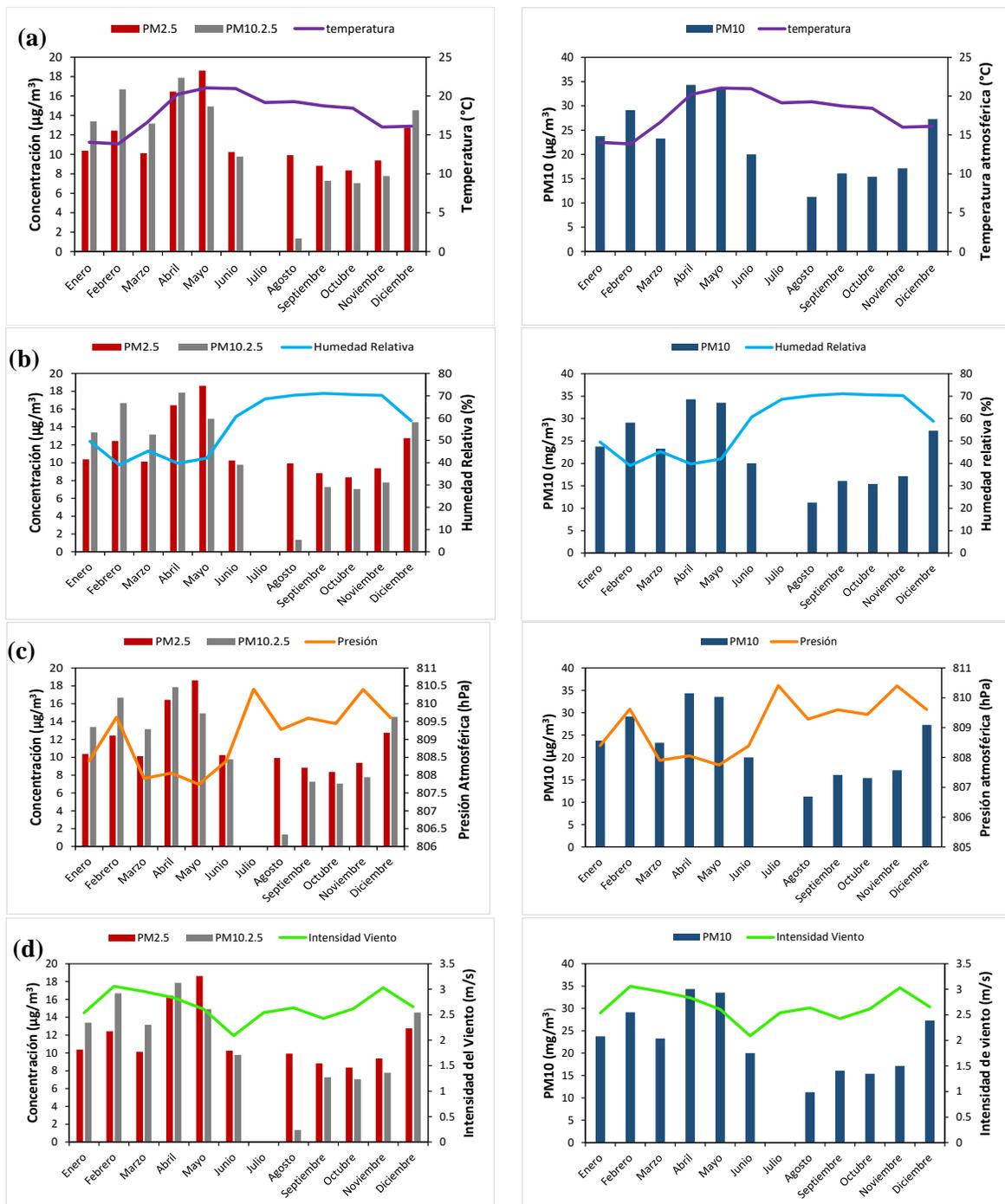


Figura 21. Relación entre los promedios mensuales de: (a) temperatura ambiente, (b) humedad relativa, (c) presión atmosférica y, (d) intensidad de viento con PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10.2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Juruquilla en el año 2016.

Se aprecia que la tendencia mensual de las diferentes variables meteorológicas fue muy similar entre 2015 y 2016. El análisis cualitativo de las figuras 20 y 21 indica una aparente asociación entre los promedios mensuales de las fracciones fina y gruesa, así como de PM<sub>10</sub> con los respectivos promedios de las variables

meteorológicas antes mencionadas. La temperatura presenta los valores más altos en los meses de la temporada cálida seca por tenerse en verano las temperaturas promedio diario más altas que en los otros meses. Los promedios mensuales de la humedad relativa parecen anticorrelacionar con las partículas, con una aparente mayor asociación con la fracción gruesa. En lo que respecta a la presión atmosférica, esta presenta una proporcionalidad directa en gran parte del año, salvo los meses de abril, mayo y septiembre que muestran una anticorrelación. Finalmente la intensidad de viento, al igual que la presión atmosférica, parece mostrar asociación entre los promedios mensuales de las concentraciones de las  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  excepto los meses de abril, mayo y diciembre.

Como una primera aproximación para investigar cual variable presentaba mejor correlación bajo el contexto de los promedios mensuales, se realizó el análisis de correlación múltiple de los promedios mensuales de todas las variables contra  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y la fracción gruesa para ambos años. La Tabla 3 muestra los resultados para los años 2015 y 2016.

De acuerdo a la tabla 3, la humedad relativa fue la variable que más alto coeficiente de correlación ( $R^2$ ) presentó, sobre todo con la fracción  $PM_{10-2.5}$  y en particular para el año 2016 al ser éste año un tanto más húmedo que en 2015. Asimismo, y bajo el esquema de promedios mensuales, la fracción gruesa resultó con el más alto coeficiente de correlación con las  $PM_{10}$ .

**Tabla 3. Coeficientes de correlación ( $R^2$ ) entre promedios mensuales de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10-2.5}$ , temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa e intensidad de viento registrados en Juruquilla en 2015 y 2016.**

2015

Variables	PM2.5	PM10-PM2.5	PM10	Temperatura	Presión	Humedad Relativa	Intensidad Viento
PM2.5	1						
PM10-PM2.5	0.56120151	1					
PM10	0.88057435	0.88642347	1				
Temperatura	0.34749053	-0.487641809	-0.084879051	1			
Presión	-0.3021262	-0.189972445	-0.277735844	-0.320238479	1		
Humedad Relativa	-0.25101759	<b>-0.826536326</b>	<b>-0.61363389</b>	0.448834222	0.374095193	1	
Intensidad Viento	-0.42939777	0.3034655	-0.066381795	-0.605310137	0.18851477	-0.547013407	1

2016

Variables	PM2.5	PM10.2.5	PM10	temperatura	Presión	Humedad Relativa	Intensidad Viento
PM2.5	1						
PM10-PM2.5	0.76925117	1					
PM10	0.927926201	0.951685617	1				
temperatura	0.332536302	-0.18472705	0.060852954	1			
Presión	-0.546426611	-0.500348846	-0.565562931	-0.297555	1		
Humedad Relativa	-0.724341738	-0.939564168	-0.896757512	0.176641741	<b>0.682020324</b>	1	
Intensidad Viento	0.138789265	0.352193067	0.258519779	<b>-0.544360226</b>	0.150183157	-0.36831681	1

Las correlaciones entre la humedad relativa y la concentración PM de los años 2015 y 2016, muestran que tienen una anticorrelación (al haber mayor porcentaje de humedad las concentraciones disminuyen). Debido a que en condiciones de mayor humedad, hay eventos de precipitación (mayo a octubre), son eliminadas muchas de las partículas presentes en la atmósfera por arrastre y se inhibe el transporte de polvo superficial, además de que por la lluvia el suelo se cubre de cubierta vegetal, por ello las concentraciones de PM en general disminuyen. Por el contrario, por las condiciones muy secas que se tienen en los meses de marzo y abril, por las quemadas agrícolas y por la resuspensión de polvo superficial; las concentraciones de  $PM_{2.5}$  aumentan.

La presión atmosférica también muestra anticorrelación, aunque sólo para 2015.. Por otro lado, las correlaciones de los dos años para la concentración de las PM y la temperatura muestran que no hay correlación, a pesar de que cualitativamente parece presentarse esta tendencia. Es posible que el estadístico basado en promedios mensuales no permita detectar esta influencia y que posiblemente otro indicador, quizás la temperatura máxima y/o la mínima sean mejores parámetros de correlación. En cuanto a la intensidad de viento, los coeficientes de correlación fueron bajos, siendo los valores más altos para la fracción gruesa sin que lleguen

a ser significativos. Es también posible que el promedio mensual no permita una mejor apreciación de la correlación esperada. Lo esperado sería que a mayor viento mayor dispersión de  $PM_{2.5}$ , pero también mayor resuspensión de polvos, y con vientos ligeros, mayor concentración de partículas en su fracción fina. Esto implica que por sí mismas ni la presión atmosférica, la temperatura ambiente, ni la intensidad de viento son capaces de ayudar a explicar las variaciones en las concentraciones de PM en Juriquilla.

Como un segundo análisis para investigar si las correlaciones podrían mejorarse al combinar dos variables meteorológicas con cada una de las fracciones de las PM, se realizaron gráficas de contorno usando el programa SIGMAPLOT. Para este análisis, Z correspondió a cada concentración promedio mensuales de  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10-2.5}$  y  $PM_{10}$ ; X se consideró en todos los casos al promedio mensual de la humedad relativa, e Y fue variada entre las variables: presión atmosférica e intensidad de viento. Para todas las combinaciones se calculó el coeficiente de correlación ajustado que considera los posibles errores asociados.

Las figuras 22 y 23 muestran la integración gráfica de las diferentes correlaciones obtenidas así como el respectivo coeficiente de correlación ajustado de los promedios mensuales. Las gráficas mostradas representan el pronóstico de las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10-2.5}$  para los años 2015 y 2016 en función a las variables humedad relativa, presión atmosférica e intensidad de viento, que resultaron con los coeficientes de regresión ajustado más altos.

## Año 2015

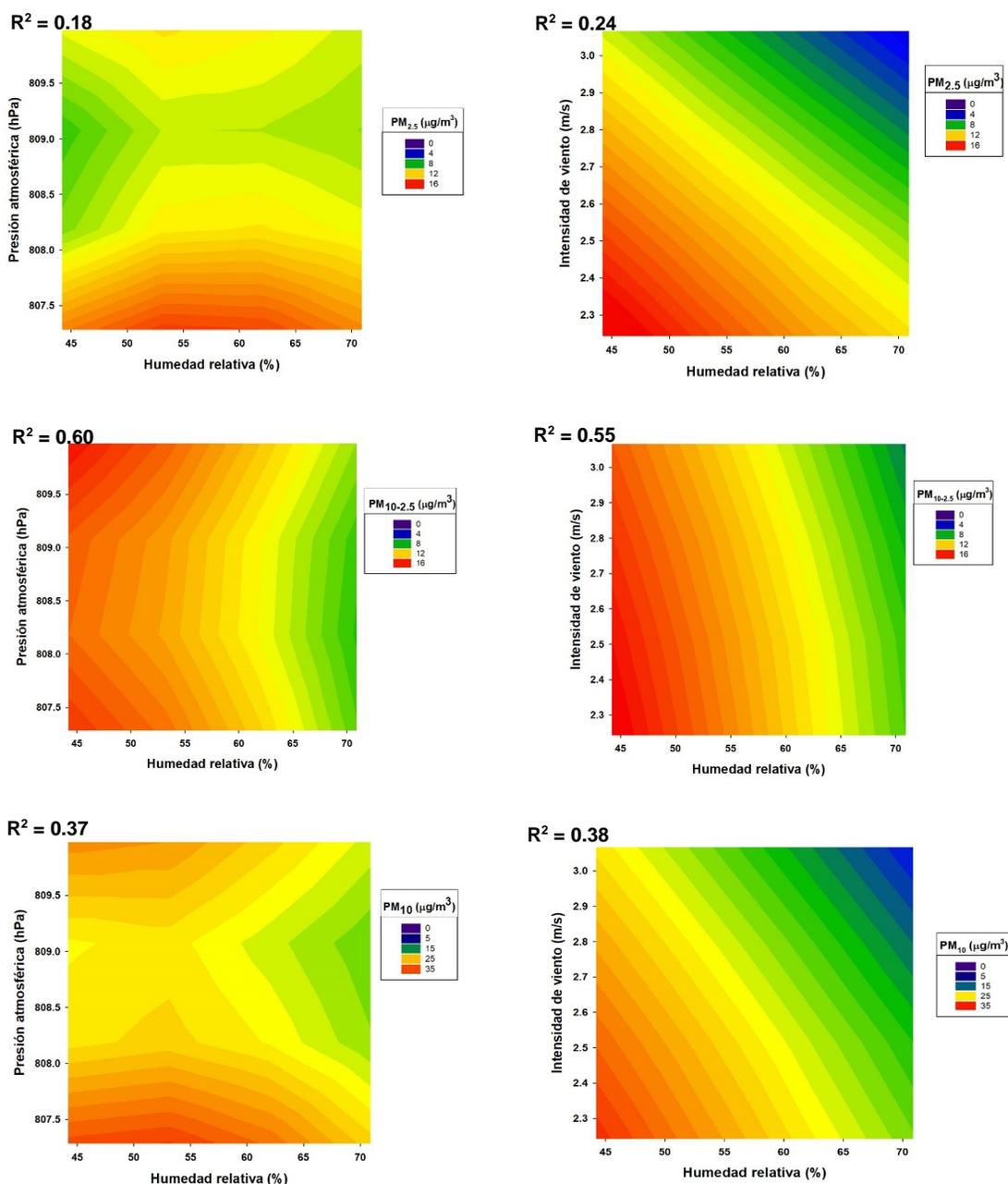
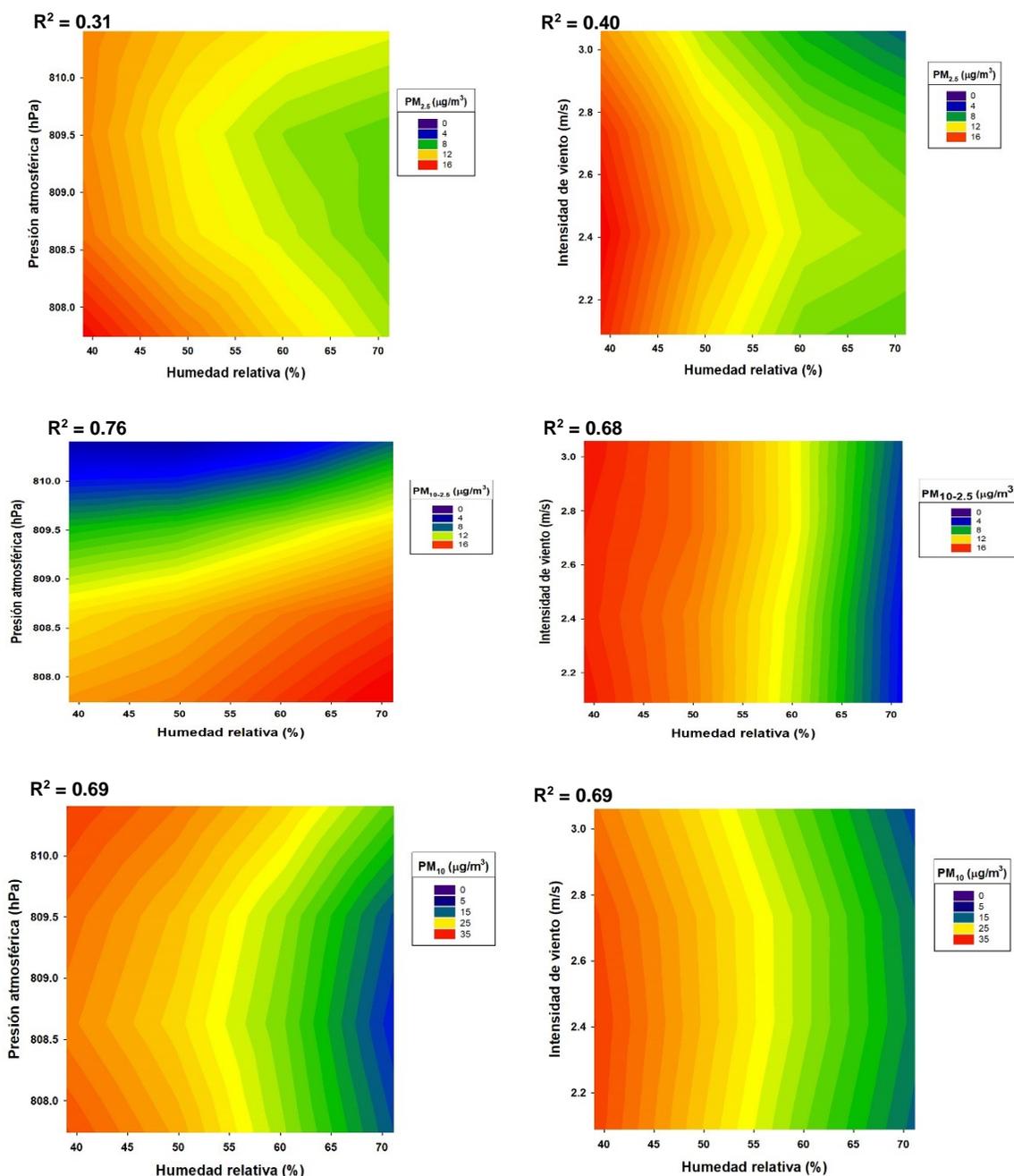


Figura 22. Representación gráfica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , la fracción gruesa ( $PM_{10-2.5}$ ) y  $PM_{10}$  en función a las variables meteorológicas humedad relativa, intensidad del viento y presión atmosférica para 2015 de acuerdo a las respectivas regresiones.

## Año 2016



**Figura 23. Representación gráfica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , la fracción gruesa ( $PM_{10-2.5}$ ) y  $PM_{10}$  en función a las variables meteorológicas humedad relativa, intensidad del viento y presión atmosférica para 2016 de acuerdo a las respectivas regresiones**

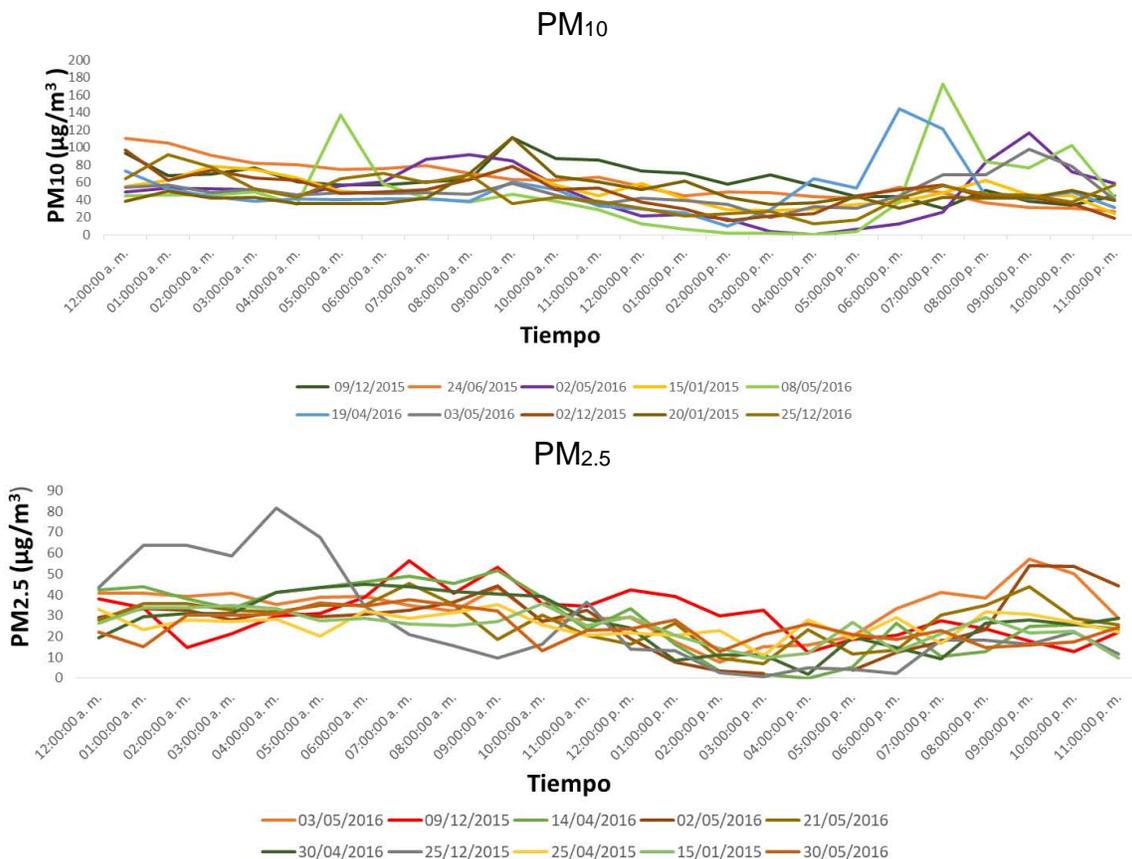
La fracción fina sólo mostró una correlación baja con la humedad relativa (máxima  $R^2$  ajustada = 0.40) y en general se deduce que a humedad relativa baja y viento ligero a moderado, mayores concentraciones de  $PM_{2.5}$ , en tanto que a mayor humedad relativa y mayor la intensidad de viento, menores son estas

concentraciones. La presión atmosférica sugiere únicamente que a menor presión y baja humedad, mayores concentraciones y viceversa, a mayor presión y humedad, menor concentración. Con respecto a la fracción gruesa los coeficientes de correlación fueron de moderadas a bajas ( $R^2$  ajustado: 0.55 a 0.76), tanto con humedad relativa como con presión e intensidad de viento. Así, y tomando la presión atmosférica, los gráficos sugieren que a menor humedad relativa y mayor presión, menor concentración, en tanto que a mayor humedad y presión baja, mayor concentración. Esto es, la inestabilidad atmosférica parece favorecer la resuspensión de polvos. Por otro lado, la correlación entre humedad y viento indica que hay una linealidad; a menor humedad e intensidad de viento desde ligeros a moderados, habrá resuspensión de polvos; mientras que a humedad alta y vientos también de ligeros a moderados menor concentración. Esto confirma la propuesta de que bajo condiciones de humedad alta se facilita el depósito de polvos y se minimiza su resuspensión.

Finalmente, las  $PM_{10}$  se comportan de acuerdo a la combinación de ambas fracciones gruesa y fina, dominando la influencia del comportamiento de linealidad de las partículas gruesas. Si bien se obtuvieron coeficientes de correlación bajos en 2015 ( $R^2$  ajustado: 0.37 a 0.38 con presión atmosférica y con intensidad de viento, respectivamente), para 2016 estos valores aumentaron significativamente ( $R^2$  ajustado: 0.69). Para condiciones de humedad baja y presión de baja a alta (inestabilidad a estabilidad), la concentración esperada de  $PM_{10}$  será alta, y conforme se incrementa la humedad, la concentración de  $PM_{10}$  disminuye. Y en el caso de la influencia combinada de la humedad relativa con la intensidad de viento, hay una tendencia a que a baja humedad y viento de ligero a moderado, se tengan concentraciones altas de  $PM_{10}$ , y esta tendencia cambia cuando la humedad y la intensidad se incrementa, llevando a concentraciones bajas. Con este análisis se entiende en gran parte la influencia de la climatología en el comportamiento de las  $PM_{10}$  y su fracciones gruesa y fina.

#### 4.5 Identificación de eventos $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ . Asociación con análisis de trayectorias de retroceso HYSPLIT y mapas sinópticos.

Con el objeto de profundizar en más detalles sobre la influencia meteorológica regional en la ocurrencia de días evento en los que se registraron altos niveles de partículas, se seleccionaron aquellos días con mayor concentración entre 2015 y 2016 para el análisis de trayectorias asociadas. La figura 24 muestra estos eventos para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . De este conjunto, se escogieron tres eventos ilustrativos registrados en 2016. Un cuarto evento registrado en 2015 (25 de diciembre), representa un caso atípico no asociado a cuestiones meteorológicas ni a la actividad antropogénica habitual, sino a la quema de materiales y fuegos artificiales típicos de la noche de navidad.



**Figura 24. Concentraciones horarias de los 10 eventos más altos durante los años 2015 y 2016 de a)  $PM_{10}$  y b)  $PM_{2.5}$ .**

#### 4.5.1 Evento $PM_{10}$ del 19 Abril 2016

La figura 25 muestra la información meteorológica detallada del día 19 de abril de 2016. Esta incluye la carta sinóptica del análisis de superficie a la hora más cercana al evento, y los patrones en 24 horas de promedios de 5 minutos de presión atmosférica, humedad relativa, precipitación, e intensidad y dirección de viento acoplados a los respectivos promedios de las concentraciones de  $PM_{10}$  registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla.

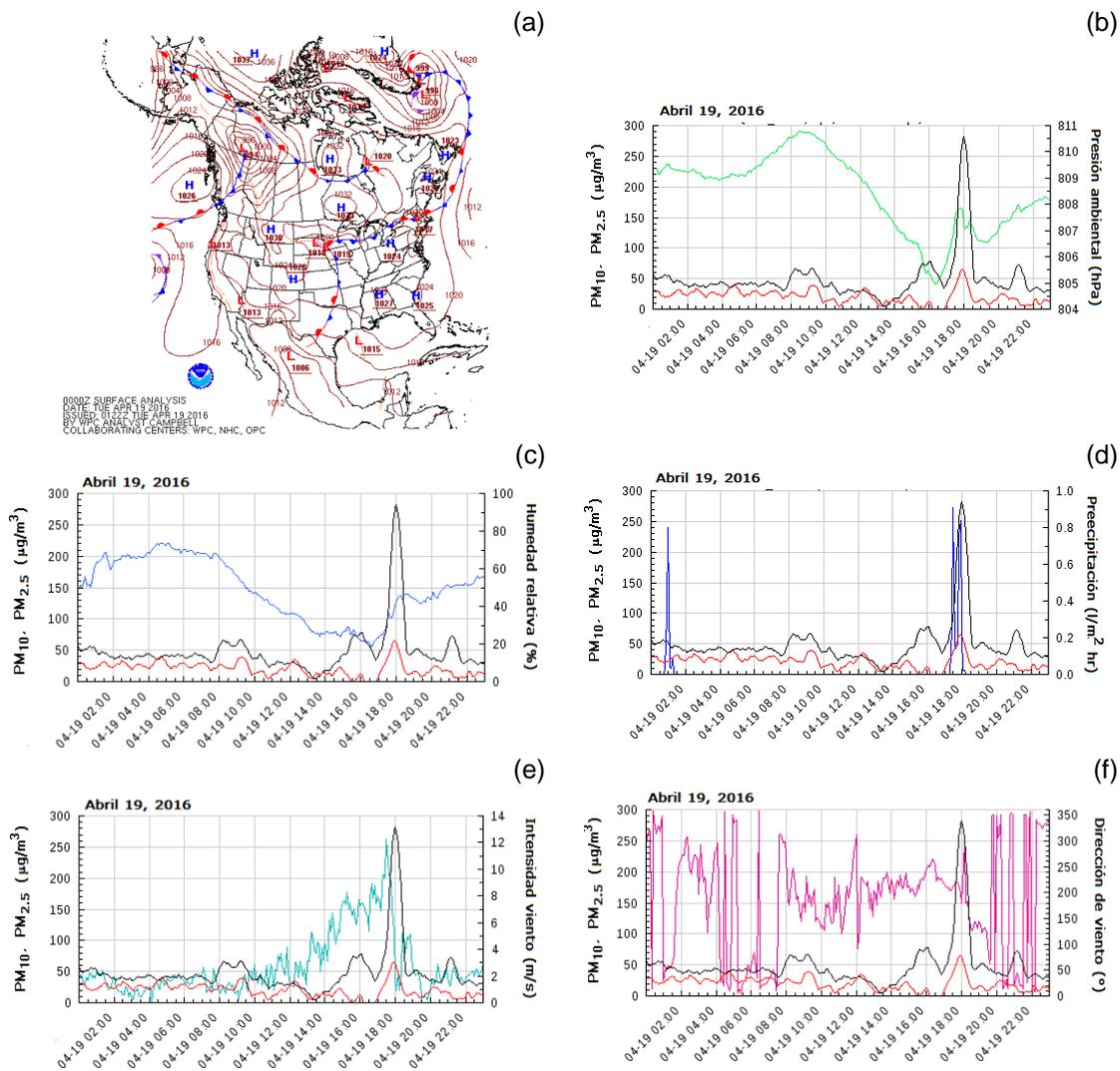
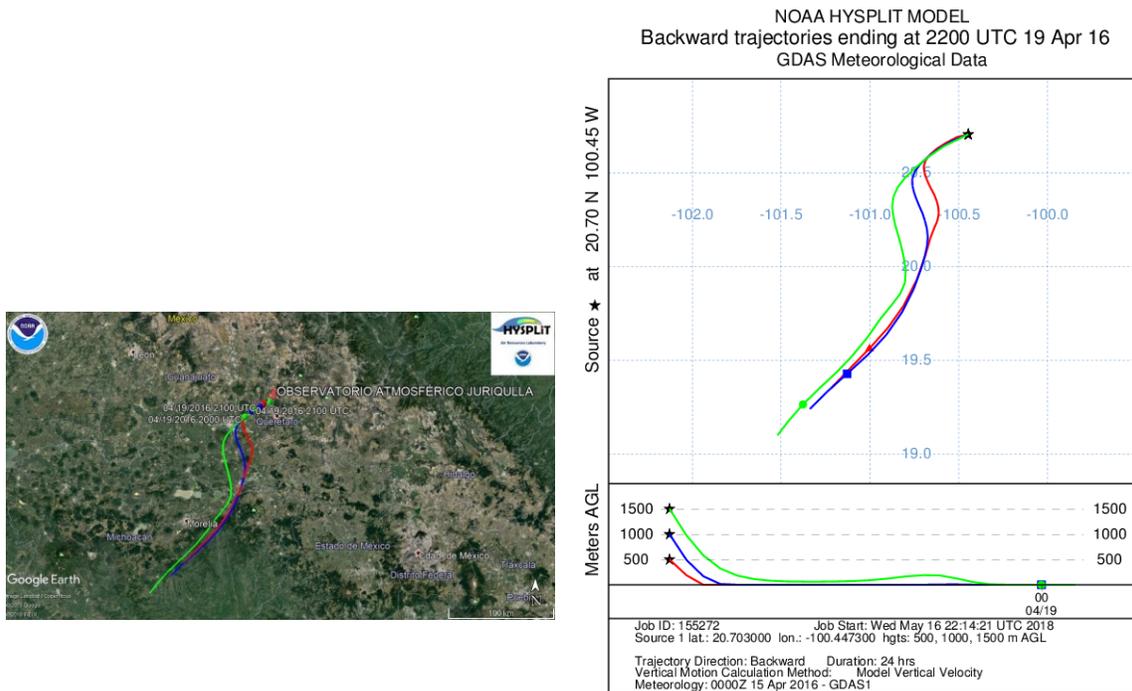


Figura 25. . (a) Análisis sinóptico de superficie; y patrón de promedios de 5 minutos para  $PM_{10}$  (línea negra),  $PM_{2.5}$  (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 19 de abril de 2016.

De acuerdo a la figura 25, el 19 de abril de 2016 se alcanzó una concentración promedio de 5 minutos “pico” de  $PM_{10}$  de poco más de  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en torno a las 18:00 horas, que fue acompañado de otro pico de menor concentración de  $PM_{2.5}$  de aproximadamente  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La diferencia entre estas dos indica que la carga de partículas gruesas ( $PM_{10-2.5}$ ) fue de casi  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mostrando un efecto claro de resuspensión de polvos. La carta de análisis sinóptico de superficie muestra que un sistema de baja presión dominó sobre el centro de México favoreciendo condiciones inestables en la región. Poco antes de la ocurrencia del pico, la presión en Juriquilla disminuyó hasta unos 805 hPa, para incrementarse muy rápidamente hasta 808 hPa en poco más de 1 hora. Esto es, se observa un incremento en inestabilidad muy fuerte.

Un patrón similar se observó en la humedad relativa para incrementarse de 20% a 45%. Este incremento fue el resultado de la ocurrencia de un evento de lluvia intensa que ocurre casi simultáneamente con el incremento en la concentración de las PM y que poco después de finalizar se reducen las concentraciones de partículas a menos de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $PM_{10}$  y  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $PM_{2.5}$  es decir, ocurre un lavado atmosférico efectivo. El efecto del incremento en la inestabilidad atmosférica es claramente observada al apreciar que la intensidad de viento aumentó consistentemente de 5 a 12 m/s (18 a 43 km/hr) en menos de 3 horas hasta poco antes de la ocurrencia del evento para caer intempestivamente en menos de 30 min a casi 1 m/s una vez establecida la precipitación. La dirección de viento durante el evento mostró una proveniencia del sector ONO.

Las trayectorias teóricas asociadas al transporte de masas de aire del modelo HYSPLIT es mostrado en la figura 26. De acuerdo a esta información trayectorias de retroceso de HYSPLIT que arribaron a la región de la Zona Metropolitana de Querétaro, en el periodo de ocurrencia del evento, los vientos dominantes del S-SO. Si bien hay cierta diferencia con las mediciones de dirección de viento en Juriquilla que indican el sector O-ONO, las trayectorias indican que pudo acarrear polvo desde la zona rural al oeste de Juriquilla y de las quemas agrícolas que se realizan en este mes.



**Figura 26. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 24 horas con arribo a Juriquilla a la hora equivalente del evento de partículas del 19 de abril de 2016. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde).**

Sin embargo, dadas las condiciones de inestabilidad y turbulencia fuertes antes del evento de lluvia, se puede especular que ocurrió una fuerte resuspensión de polvos del entorno cercano a la estación al caer en forma intensa las primeras gotas al suelo que, al estar seco y sin contar con cubierta vegetal por ser la transición de seca fría a caliente, se favoreció esta resuspensión. Una vez que el evento de lluvia se volvió más intenso, las subsecuentes gotas realizaron un arrastre de las partículas gruesas previamente resuspendidas acarreado de regreso hacia el suelo esa fracción gruesa de las PM.

#### 4.5.2 Evento $PM_{10}$ del 2 de mayo de 2016

Las condiciones meteorológicas y las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  del día 2 de mayo de 2016 en Juruquilla se presentan en promedios de 5 minutos en la figura 27.

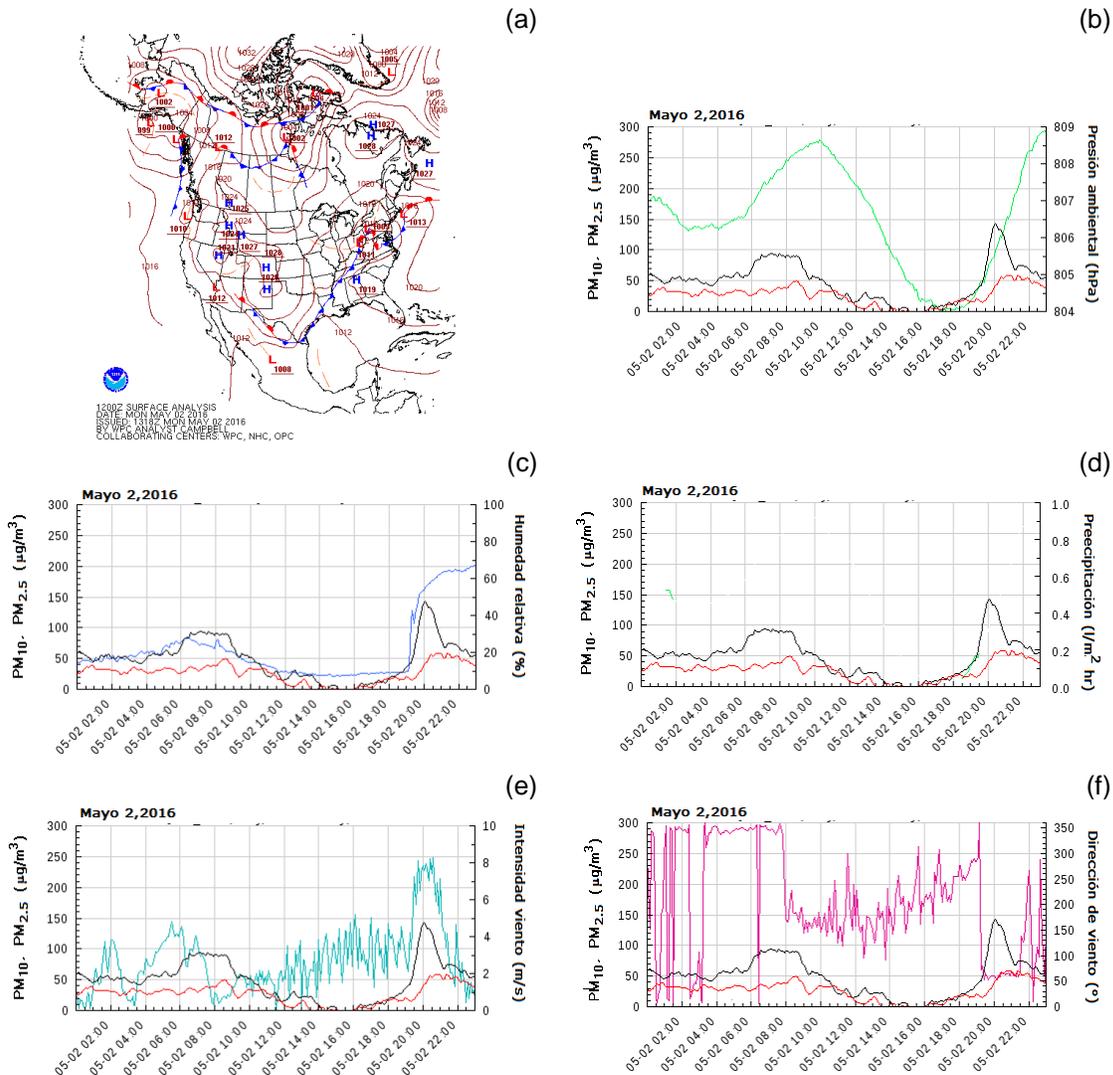


Figura 27. (a) análisis sinóptico de superficie; y patrón de promedios de 5 minutos para  $PM_{10}$  (línea negra),  $PM_{2.5}$  (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juruquilla el 2 de mayo de 2016.

La carta sinóptica muestra la entrada de un frente frío al norte del país con una dominancia de condiciones de baja presión hacia el centro y sur de México. Este día se presentó un nivel relativamente alto de  $PM_{10}$  en el transcurso de la mañana. Sin embargo, a las 20 horas ocurrió un incremento importante en las concentraciones de las partículas en este rango alcanzándose un máximo de casi  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La fracción fina de las PM también se incrementó registrándose un máximo en torno a  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  poco después del pico de  $PM_{10}$ . La proporción de la fracción gruesa durante este evento es ligeramente mayor que la fina, lo que indica que la resuspensión de polvos contribuyó más en el incremento de las  $PM_{10}$ . La ocurrencia de este evento se ve acompañada con un incremento paralelo en la presión atmosférica, en la humedad relativa y en la intensidad de viento, lo que sugiere que posiblemente el frente frío empezaba ya a ingresar generando condiciones de turbulencias intensas. Al momento del evento el viento tuvo una proveniencia del sector NE. Este día no hubo precipitación, por lo que la posible causa del evento pudo ser tanto resuspensión de polvos como contribuciones antropogénicas del sector NE ya sea por actividades de quema agrícola o por el parque vehicular de la carretera federal 57. En la figura 28 se muestra la trayectoria de retroceso calculada con el modelo HYSPLIT indicando que las masas de aire en torno a la hora de ocurrencia del evento provenían del SO. No obstante, es muy probable que el incremento en las concentraciones locales y efectos del frente frío hayan sido la causa del evento.

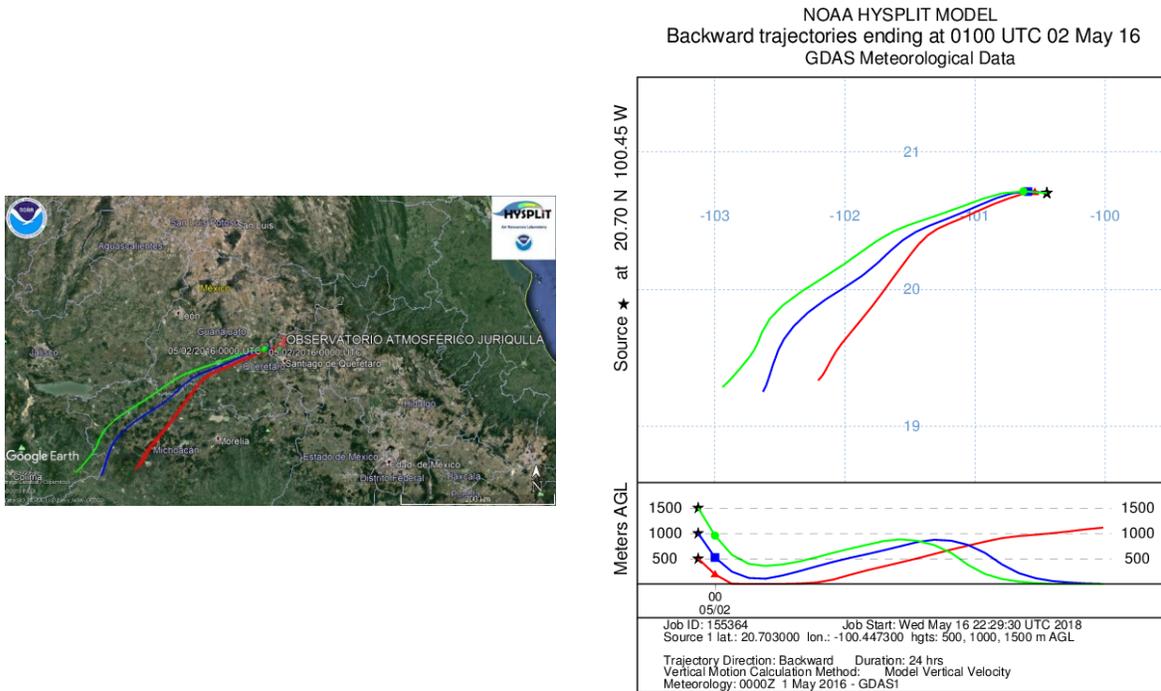


Figura 28. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 24 horas con arribo a Juriquilla a la hora equivalente del evento de partículas del 2 de mayo de 2016. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde).

#### 4.5.3 Evento $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ del 3 de mayo de 2016

Las condiciones meteorológicas y las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  del día 3 de mayo de 2016 en Juriquilla se presentan en el mismo formato de las figuras anteriores en la figura 29.

(a)

(b)

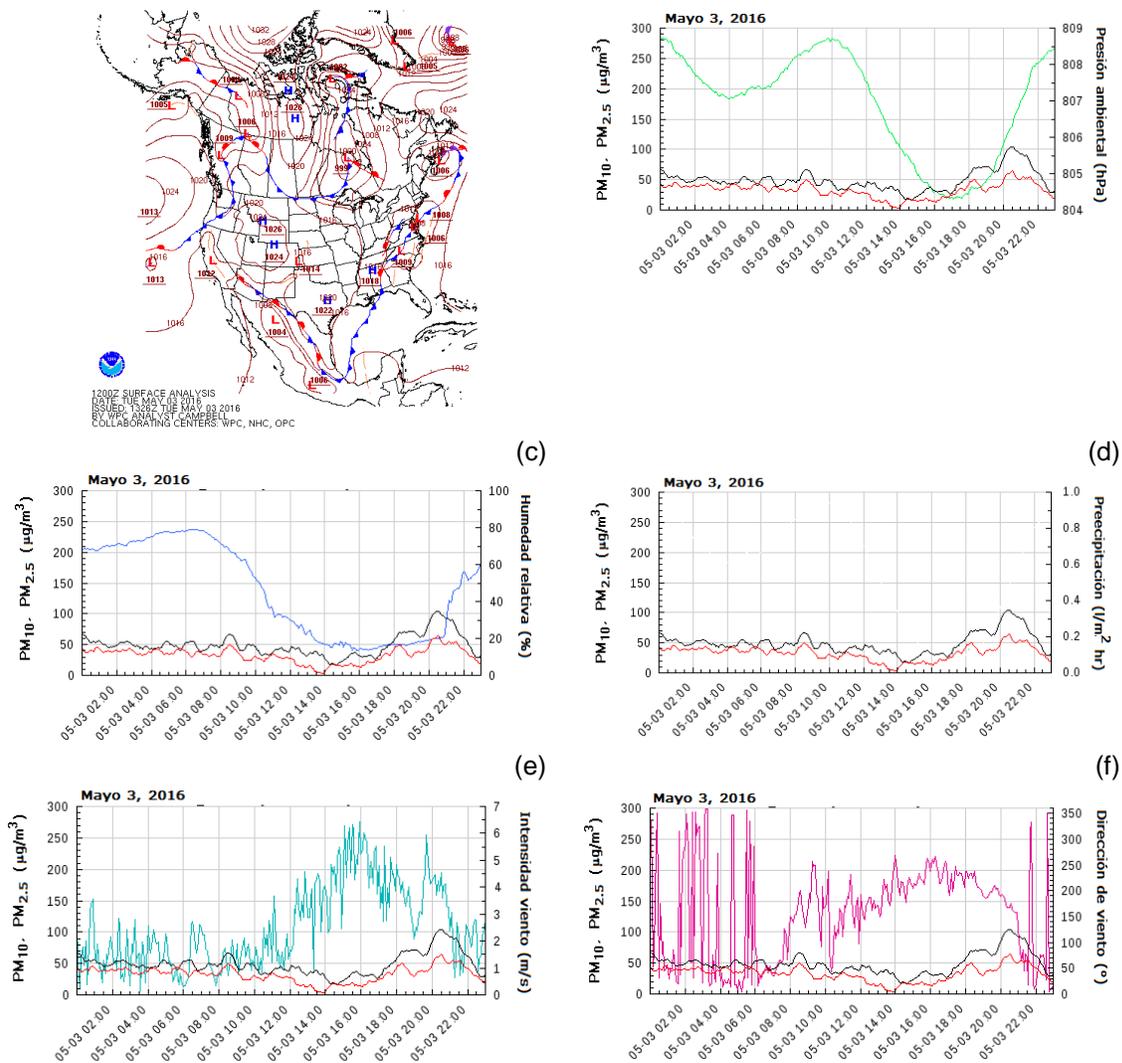
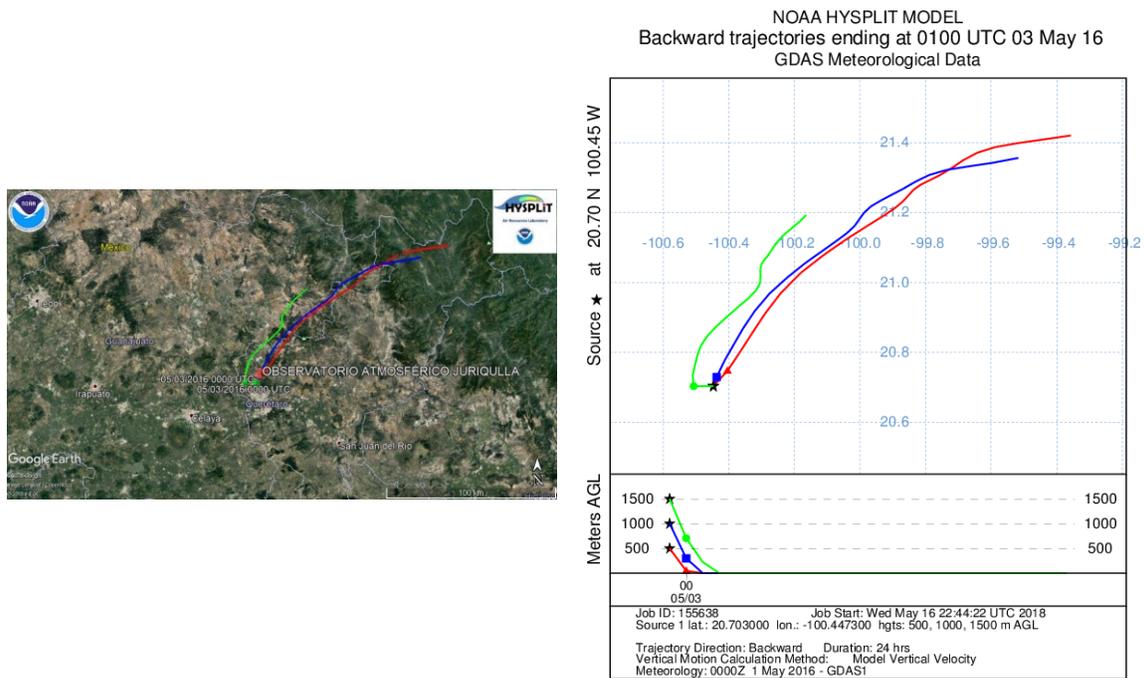


Figura 29. (a) análisis sinóptico de superficie y patrón de promedios de 5 minutos para PM<sub>10</sub> (línea negra), PM<sub>2.5</sub> (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 3 de mayo de 2016.

La figura 29 claramente muestra que el frente frío ya había ingresado y se movía hacia el sur de México. El evento de PM<sub>10</sub> ocurrió a las 22:00 horas, llegando a los 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La fracción fina también tuvo un incremento que alcanzó más de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  lo que indica que la contribución fue más antropogénica. Al igual que el día anterior, la presión atmosférica presenta un incremento casi simultáneo a la hora del evento, aunque la humedad relativa registra este incremento minutos más tarde. Este día tampoco hubo precipitación, pero el viento en el transcurso de la tarde tuvo muchos cambios variando de intensidades de 2 a 6 m/s entre las 14:00 y las 22:00 horas. De hecho, el evento coincide con un incremento súbito en su

intensidad. Minutos antes de la hora del evento el viento provino del sector SSO-S para rápidamente cambiar y dominar del sector NE. La trayectoria teórica asociada a la llegada de las masas de aire aproximadamente a la hora del evento muestra que efectivamente el viento provino del NE (ver figura 30) y que posiblemente sobre la zona metropolitana de Querétaro se presentó este efecto anticiclónico de circulación acarreado partículas de la zona metropolitana a Juriquilla.



**Figura 30. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 24 horas con arribo a Juriquilla a la hora equivalente del evento de partículas del 3 de mayo de 2016. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde).**

Por otro lado, la trayectoria muestra que las parcelas provinieron del noreste, 24 horas antes desde San Luis Potosí. Dado que no se identifica una fuente de emisión de partículas importante en esa trayectoria,

La circulación en las capas bajas de la atmósfera en alta presión es en el sentido de las manecillas del reloj, mientras que en sistemas de baja presión hacia el sentido contrario. Al sobreponer esta circulación en la región de Querétaro,

resultaría que en alta presión posiblemente se favorece el transporte de masas de aire de zonas rurales del norte y noreste con respecto a Juriquilla, mientras que en la circulación en baja presión, se estarían recirculando masas de aire del suroeste y sur que abarca la ciudad de Querétaro y el corredor industrial hacia Celaya.

Al entrar un frente frío, éste genera fuertes vientos incrementando las concentraciones de PM, debido a que re-suspende grandes cantidades de polvo local y difunde las partículas finas. Una vez que pasó el frente la difusión del viento empieza a disminuir al igual que las concentraciones de fracción gruesa, seguido de las partículas finas. Siendo las concentraciones de PM menores que antes que pasará el frente frío. Feng, X., & Wang, S. (2012) mencionan que el principal papel de los frentes fríos es el de limpiar la atmósfera. En este evento la fracción gruesa  $PM_{10-2.5}$  fue mucho mayor el aporte de los niveles de contaminación que el aporte de las partículas finas.

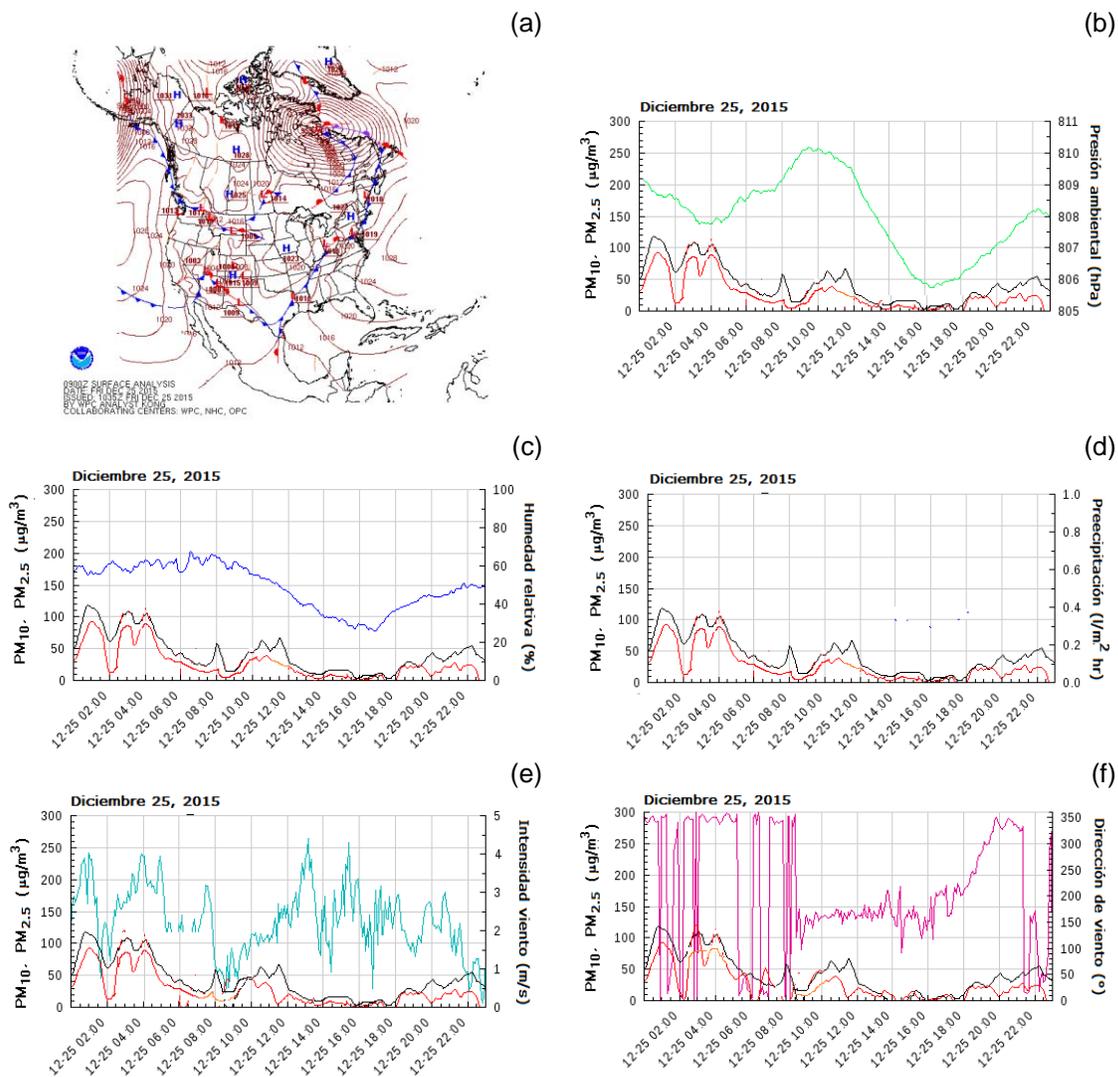
De acuerdo a la información de la Ilustración 31, la rosa de vientos de contaminantes muestra que para este día los vientos dominantes provienen del N-NE y del S-SW. No obstante, las trayectorias de retroceso de HYSPLIT muestran que las parcelas de aire provinieron del N-NE cuando se registró la máxima concentración de contaminantes.

#### *4.5.5 Evento $PM_{10}$ del 25 de diciembre de 2015*

El 25 de diciembre de 2015 se registraron concentraciones relativamente altas de material particulado en Juriquilla que en principio podrían asociarse a la actividad nocturna que se da en la noche del 24 y que continúa la madrugada del día siguiente. No obstante, y con objeto de investigar si la meteorología tuvo algún rol en la ocurrencia de este evento. La figura 32 documenta las condiciones meteorológicas y patrón de las concentraciones promedio en 5 minutos de este evento.

Los niveles tanto de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  alcanzaron sus máximos entre la 1:00 y las 5:00 horas, con las  $PM_{10}$  oscilando entre  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en tanto que los

máximos de  $PM_{2.5}$  oscilaron en el orden de los  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La proporción de  $PM_{2.5}$  en las  $PM_{10}$  claramente fue dominante (de poco más del 85%), lo que permite definir que las partículas finas tuvieron un origen netamente antropogénico, con pequeñas contribuciones de resuspensión de polvos. La carta sinóptica para el periodo más cercano a la hora del evento muestra que posiblemente dominó un sistema de baja presión que favoreció condiciones inestables.



**Figura 31. (a) análisis sinóptico de superficie; y patrón de promedios de 5 minutos para  $PM_{10}$  (línea negra),  $PM_{2.5}$  (línea roja) y las variables meteorológicas: (b) presión ambiental; (c) humedad relativa; (d) precipitación; (e) intensidad, y, (f) dirección de viento registrados en la estación de monitoreo de Juriquilla el 25 de diciembre de 2015.**

Durante la madrugada ni la presión atmosférica y ni la humedad relativa mostraron alguna asociación con el comportamiento de las partículas. Además de que tampoco hubo algún evento de precipitación. En cambio, la intensidad de viento si presentó cierta correlación con ambas, las  $PM_{10}$  y las  $PM_{2.5}$ . Mientras el viento fue más intenso, las concentraciones aumentaron, en tanto que cuando ocurrió un descenso importante en esta variable meteorológica, también las concentraciones disminuyeron, en particular la fracción fina. La dirección de proveniencia del viento también fue sostenida del sector N-NO. Esto sugiere que se favoreció el transporte de masas de aire hacia Juriquilla cuando el viento fue más intenso, y que al decaer éste se desfavoreció este acarreo. El efecto fue más notable con las  $PM_{2.5}$ , ya que las  $PM_{10}$  pudieron permanecer suspendidas un poco más de tiempo con vientos más débiles. La trayectoria hipotética que siguieron las masas de aire 6 horas antes de llegar a Juriquilla se muestran en la figura 33.

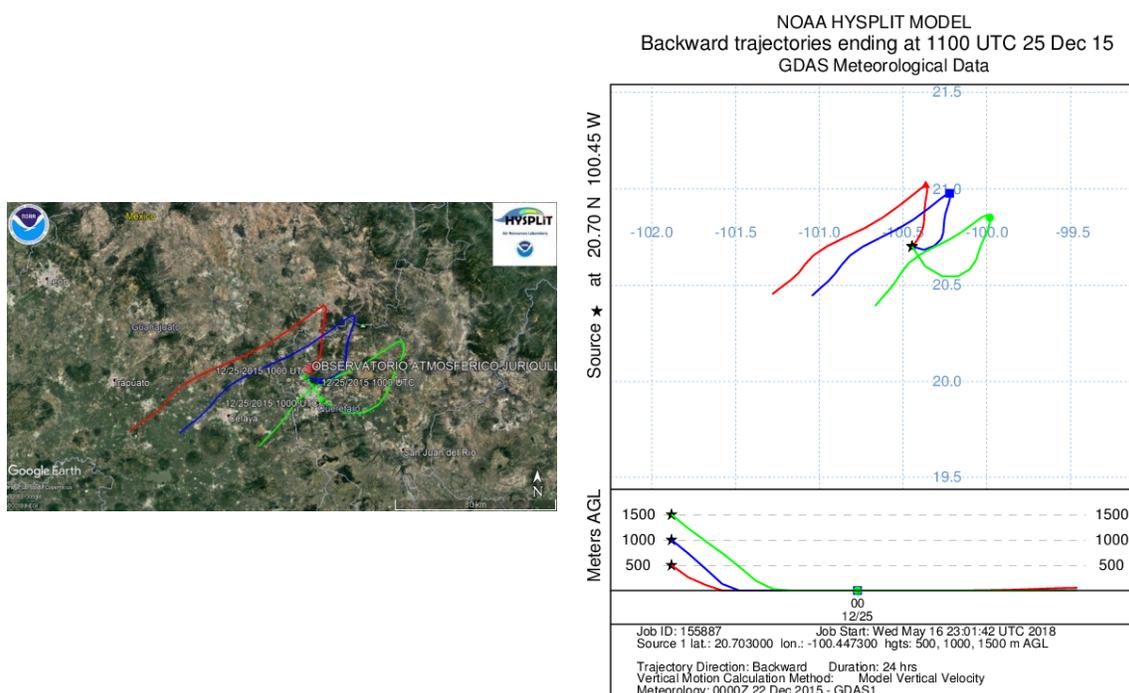


Figura 32. Trayectorias de retroceso de HYSPLIT de 6 horas con arribo a Juriquilla a una hora equivalente a las 5:00 horas del evento de partículas del 25 de diciembre de 2015. Las trayectorias representan alturas de: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde).

En principio las trayectorias sugieren que ocurrió un transporte del suroeste de Juriquilla, aunque la dirección medida en la estación mostró que fue el norte. Esta incongruencia podría deberse a que estuvo posiblemente ocurriendo una circulación anticiclónica por arriba de la capa nocturna de inversión, y que el efecto por debajo de esta capa que no se pudo reproducir en el modelo HYSPLIT.

Dado que no se observa correlación con variables meteorológicas con alcance de escala media, se puede proponer que la quema de fuegos artificiales locales hacia el norte de la estación fue la principal contribuyente a este evento. Esto es, actividades antropogénicas sin control locales pueden llevar a altos niveles de contaminación que bajo condiciones restrictivas por la capa de inversión nocturna pueden complicarse.

## **5. Conclusiones**

Las series de tiempo de los años 2015 y 2016 mostraron que en ninguno de los dos años se rebasó la normatividad oficial mexicana para exposiciones agudas de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Pero sí se excedieron los valores recomendados por la OMS para ambos contaminantes. Los mayores promedios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  ocurrieron en las temporadas de secas con concentraciones máximas de  $62.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $33.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. La fracción gruesa mostró una máxima concentración de  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aunque no se observó un comportamiento similar a la fracción fina y  $PM_{10}$ .

De los promedios anuales de los años 2015 y 2016 de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , se rebasaron los valores máximos recomendados por la OMS. Las respectivas NOM no se excedieron para  $PM_{10}$ , pero se rebasa la norma de  $PM_{2.5}$  para 2016.

La tendencia de los promedios anuales y mensuales fueron mayores en 2016 con respecto a 2015.

Los promedios temporales indican que en la temporada cálida-seca se registró la mayor concentración de  $PM_{10}$ , particularmente en el mes de Abril, seguido por el mes de Mayo y Diciembre. Mientras que las concentraciones más bajas se presentan en los meses junio a noviembre, meses que conforman la temporada de

lluvias y el inicio de la temporada fría-seca. Los promedios temporales indican que en las temporadas fría-seca y cálida-seca del 2016 se presentaron las mayores concentraciones de la fracción gruesa que de  $PM_{2.5}$ . Mientras que en el 2015, sólo en la temporada fría-seca se tiene una mayor concentración de la fracción gruesa. Las correlaciones temporales de  $PM_{2.5}$  y la fracción gruesa mostraron para la temporada cálida seca que hay una alternancia en el dominio de las fracciones fina y gruesa, en la fría seca domina ligeramente la fracción gruesa, y en la de lluvia dominan las  $PM_{2.5}$ .

Donde la dominancia de la fracción gruesa indica una mayor contribución de polvos y la dominancia de fracción fina indica mayor contribución por fuentes antropogénicas.

El análisis de los diagramas de caja para las tres temporadas muestra que los promedios máximos de  $PM_{10-2.5}$  son mayores al anochecer y las primeras horas de la noche. Los promedios máximos para la fracción fina son mayores por las madrugadas y mañanas. Para  $PM_{10}$  se muestran dos modos de acumulación, por la mañana (temporada fría seca) y durante las primeras horas de la noche (temporada de lluvias). Presentando una asociación a la hora de tráfico vehicular. Por lo que se sugiere que las altas concentraciones de PM al anochecer se asocian a un posible atrapamiento de contaminantes por la reconfiguración de la capa de inversión nocturna.

Las rosas de vientos anuales, de los años 2015 y 2016 indican que las mayores contribuciones de partículas en sus diferentes fracciones hacia Juriquilla, provienen del sector oeste-norte-este, siendo mayores los vientos provenientes del sector NE tanto en frecuencia como en intensidad. Esto se asocia al tráfico vehicular de la Carretera Federal Mexicana 57 muy intenso que hay al NE de la estación de monitoreo y a actividades de uso de suelo para uso agrícola (centro y norte de Querétaro) o preparación de tierras para cultivo.

Mientras que del SO (zona metropolitana de Querétaro) se registraron las menores contribuciones de partículas, con vientos en menor frecuencia, de

moderados a fuertes, siendo las emisiones de fuentes móviles las posibles responsables de los niveles de  $PM_{2.5}$  y en consecuencia de una fracción importante de las  $PM_{10}$ .

El análisis de correlación múltiple de los promedios mensuales y las variables meteorológicas mostró que la humedad relativa presentó el más alto coeficiente de correlación con la fracción gruesa. En el 2015 se obtuvo una  $R^2 = -0.82$  y en el 2016 una  $R^2 = -0.93$ . Siendo la fracción gruesa el que tiene el más alto coeficiente de correlación con las  $PM_{10}$ .

El análisis de los promedios mensuales de las PM con variables meteorológicas fue muy similar entre 2015 y 2016. Las correlaciones mostraron que:

- La humedad relativa presenta una anticorrelación con las partículas, con una aparente mayor asociación con la fracción gruesa.
- La presión atmosférica presenta una correlación con las partículas en gran parte del año, salvo los meses de abril, mayo y septiembre que se muestran una anticorrelación.
- La intensidad de viento muestra una correlación con las concentraciones de las  $PM_{10}$  y sus fracciones excepto los meses de abril, mayo y diciembre. Aunque no son significativos.
- La concentración de las PM y la temperatura no presentan ninguna correlación.

Las variables presión atmosférica, temperatura ambiente y la intensidad de viento por sí solas no son capaces de ayudar a explicar las variaciones en las concentraciones de PM en Juriquilla. Al acoplar la influencia combinada de la humedad relativa vs presión atmosférica e intensidad de viento se concluyó lo siguiente:

- Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  son altas cuando hay condiciones de humedad relativa alta, viento ligero a moderado y menor presión. Sus concentraciones son bajas cuando la intensidad de viento es mayor, mayor presión y menor humedad relativa.
- Las concentraciones de la fracción gruesa aumentan cuando hay condiciones de inestabilidad atmosférica, menor humedad relativa, vientos ligeros a moderados y menor presión. Sus concentraciones son bajas cuando se tienen condiciones de humedad relativa alta, vientos ligeros altos y presión atmosférica alta.
- Las  $PM_{10}$  se comportan de acuerdo a la combinación de ambas fracciones gruesa y fina, dominando la influencia del comportamiento de correlación con las partículas gruesas. Se tienen mayores concentraciones cuando hay condiciones de humedad relativa baja y presión de baja a alta (inestabilidad a estabilidad sinóptica) y los vientos de ligeros a moderados. Cuando se tienen mayores condiciones de humedad relativa y la intensidad de viento las concentraciones de  $PM_{10}$  incrementan.

El análisis de los eventos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  registrados con altos niveles de concentración de partículas mostraron que no sólo la meteorología local influye en los niveles de concentración de PM sino que los fenómenos meteorológicos a nivel sinóptico como son frentes, zonas de baja/alta presión y anticiclones tienen mayor influencia en los altos niveles de concentraciones de material particulado.

## **ANEXO: Resumen de presentación en: Reunión Anual 2017. Unión Geofísica Mexicana. Puerto Vallarta.**

Título:

**ESTUDIO SOBRE LA VARIACIÓN DE LAS PARTÍCULAS PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> Y LA FRACCIÓN (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>) EN JURQUILLA, QUERÉTARO Y SU RELACIÓN CON VARIABLES METEOROLÓGICAS.**

**Autores:**

<sup>1</sup> Abigail Navarro Medina ← Ponente  
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM  
[abinm@ciencias.unam.mx](mailto:abinm@ciencias.unam.mx)

<sup>2</sup> Ricardo Torres Jardón  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM  
[rtorres@atmosfera.unam.mx](mailto:rtorres@atmosfera.unam.mx)

Sesión:

CCA **Climatología, cambios climáticos y atmósfera** Sesión regular

Resumen:

La Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ) presenta ya un potencial importante en la contaminación del aire. La principal causa se le puede atribuir al parque vehicular, tanto local como foráneo, seguido por la actividad industrial y el desarrollo urbano. La ZMQ se asienta en la cuenca de Querétaro, por su situación orográfica y el patrón de vientos predominantes podrían ser los causantes de que la contaminación sea acarreada por los vientos desde otras áreas hacia la ZMQ.

El objetivo de este trabajo es conocer la influencia que tiene la meteorología sinóptica y regional en la niveles de contaminación, así como determinar el papel que tiene la fracción gruesa (PM<sub>10</sub> -PM<sub>2.5</sub>) en la ocurrencia de eventos de PM<sub>10</sub>.

Para ello se descargaron los contaminantes PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, dirección e intensidad de viento, humedad relativa, precipitación, temperatura ambiente y presión atmosférica registradas en la estación de monitoreo de Juriquilla de la RUOA, UNAM en el periodo 2014-2016.

Se concluye que en el año 2016 se tienen mayores concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en comparación con los años 2014 y 2015. Siendo los niveles de contaminación altos en la estación cálida-seca, durante el mes de Abril.

Se obtuvieron buenas correlaciones entre  $PM_{10}$  y la fracción gruesa. Las correlaciones nos indican que la contaminación es principalmente por fuentes naturales como polvos.

En general, los contaminantes  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y fracción gruesa no presentan grandes correlaciones con las condiciones meteorológicas locales.

Las mayores correlaciones se observan durante el día, de 7 am a 7pm.

En la estación calida seca los vientos predominantes provienen del sur-oeste.

## 6. Referencias Bibliográficas

Ahrens, C. D. (2012). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. (6ª Ed.). Estados Unidos de América: Cengage Learning.

Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and Environment* (9ª Ed.). Estados Unidos de América: Cengage Learning.

Ahrens, D y Henson, R. (2015). *Meteorology today: An Introduction to Weather, Climate and Environment* (11ª Ed.). Cánada: Cengage Learning.

Chaloulakou, A., Kassomenos, P., Spyrellis, N., Demokritou, P., y Koutrakis, P. *Measurements of PM10 and PM2.5 particle concentrations in Athens, Greece*. Atmospheric Environment 2003, 37, 649-660.

de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, T. L., y Molina, J. M. *Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign*. Atmos, Chem. Phys.,5,2267-2288, 2005.

Feng, X., y Wang , S. *Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China*. Journal of Environmental Sciences 2012, 24(4), 665-674.

Guerra, S. A., et al. *Effects of Wind Direction on Coarse and Fine Particulate Matter Concentrations in Southeast Kansas*. ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Assoc. 2006, 56: 1525-1531

Hernandez (2007). *La aplicación de modelos de dispersión en la evaluación del impacto en la calidad del aire por instalaciones industriales* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México.

INECC, 2010A. *Manual 3: Redes estaciones y equipos de medición de la calidad del aire*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INECC, 2010B. *Manual 5. Protocolo de Manejo de Datos de Calidad del Aire*. Ciudad de México.

INECC, *Manual 2. Sistemas de Medición de Calidad del Aire*. Ciudad de México.

INECC, *Manual 4. Procedimiento para obtener indicadores de la Calidad del Aire*. Ciudad de México.

INECC/SEMARNAT. *Informe Nacional de Calidad del Aire 2014*, México.

INEGI, 2015. *México en Cifras*. S.F. Recuperado el 10 de Octubre 2017. Obtenido de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/queret/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=22>

Kassomenos, P., Vardoulakis, S., Chaloulakou, A., Grivas, G., Borge, R., y Lumbreras, J. *Levels, sources and seasonality of coarse particles (PM10-PM2.5) in three European capitals- Implications for particulate pollution control*.

Lakes Environmental Software Inc. (2016). WRPLOT View versión 8.0.0. México

Levresse G., Cruzabeyro, L., Perez R. *Informe meteorológico anual 2010: Estación meteorológica del Campus UNAM Juriquilla*, CGEOUNAM.

Li, H., Guo, B., Han, Mengfei, Tian Miao y Zhang Jin. *Particulate Matters Pollution Characteristic and the Correlation between PM (PM2.5, PM10) and Meteorological*

*Factors, during the Summer in Shijiazhuang.* Journal Environmental Protection , 2015, 6, 457-463.

Li, Y., Chen, Q., Zhao, H., Wang, L., y Tao, R. *Variations in PM10, PM2.5 y PM1.0 in an Urban Area of the Sichuan Basin and Their Relation to Meteorological Factors.* Atmosphere 2015, 6, 150-163; doi:10.3390/atmos6010150.

Liu, J., y Cui, S. *Meteorological Influences on Seasonal Variation of Fine Particulate Matter in Cities over Southern Ontario, Canada.* Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/169476>.

Lutgens, F. K & Tarbuck, E. (2016). *The atmosphere: An Introduction to Meteorology* (13<sup>o</sup> Ed). Estados Unidos:PEARSON.

NOAA, 2004. Air Resources Laboratory: HYSPLIT Training Seminar. Recuperado el 05 de Abril 2018 de <https://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/hysplit1/spanish/workshop.pdf>.

NOAA, 2017. Air Resources Laboratory: Advancing Atmospheric Science and Technology through Research. Consultado el 05 de Abril 2018 de <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>

OMS, 2005. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de evaluación de los riesgos.* Recuperada el 19 de Agosto 2017. Obtenida de [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)

OPS/OMS, O.P. *Curso de autoinstrucción, conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire.* Recuperado el 21 de 05 del 2017 de

[http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/index.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/index.html).

Rangel López, J. C. (2017) “Diagnóstico del origen y estado de la contaminación del aire en Hermosillo, Sonora”. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Sistemas Ambientales. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. México D.F. Abril.

SEDESU. *Anuario Económico: Querétaro competitivo 2017*. Recuperado el 11 de Marzo 2018. Obtenido de <http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/contenido.aspx?q=0P7NpleTMww3HR5p8WDNH+uEt5B3ifl94/GBSxbgl7w>

SEDESU. *Anuario Económico: Querétaro competitivo 2016*. Recuperado el 11 de Marzo 2018. Obtenido de <http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/contenido.aspx?q=0P7NpleTMww3HR5p8WDNH+uEt5B3ifl94/GBSxbgl7w>

ProAire, 2016. *Programa de Gestión para Mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Querétaro- San Juan del Río 2014-2023*, México.

Spedding, J. D. (2002). *Contaminación Atmosférica*. España: Editorial Reverté.

Spellman R. F., (2009). *The Science of Air: Concepts and applications* (2ª Ed.). Boca Raton, Fla: CRC Press.

Stein, F., Draxler, R., Rolph, D., Stunder, B., Cohen, D., y Ngan, F., (2016). *NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110>.

Stull, R., (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Vancouver, Canada: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.

Thermo FisherScientific, 2007, 2010. *Instruction Manual Continuous Ambient Particulate Monitor FH62C14*. Franklin: Thermo Fisher Scientific Inc.

Torres Jardón Ricardo (2018). Comunicación Personal. Centro de Ciencias de la atmósfera.

Wang, J., & Ogawa, S. *Effects of Meteorological Conditions on PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Nagasaki, Japan*. Int. J. Environ. Res. Public Health 2015, 12, 9089-9101; doi:10.3390/ijerph120809089.

Wilson, W. E., & Suh, H. H. *Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies*. ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Assoc. 1997, 47: 1238-1249.

Yadav, R., Kumar, L., Nisar, Saiyed. (2014). *Temporal Variation of Particulate matter (PM) and Potencial Sources at an Urban Site of Udaipur in Western India*. Aerosol and Air Quality Research, 14: 1613-1629.