



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos en
Juriquilla, Querétaro.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FISICA

P R E S E N T A:

NAREMI CECILIA CIENFUEGOS RIQUELME



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. HARRY ALVAREZ OSPINA
CIUDAD DE MÉXICO, 2019**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Hoja de Datos del Jurado.

1- Datos del Alumno

Cienfuegos
Riquelme
Naremi Cecilia
56 58 87 24
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
101001625

2- Datos del Tutor

Dr.
Harry
Alvarez
Ospina

3- Datos del Sinodal 1

M. en C.
Manuel Rene
De Jesús Garduño López

4- Datos del Sinodal 2

Dr.
Javier
Miranda
Martin del Campo

5- Datos del Sinodal 3

Dra.
Claudia Inés
Rivera
Cárdenas

6- Datos del Sinodal 4

Dr.
Oscar Augusto
Peralta
Rosales

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de crecer, ser y formarme de manera única.

Al programa UNAM-DGAPA-PAPIIT proyecto IA107717 por el apoyo económico recibido en la realización de esta tesis.

Al Dr. Harry Álvarez Ospina mi asesor por su invaluable apoyo, ayuda, su esfuerzo, sus conocimientos y su infinita paciencia, sin él este trabajo no sería lo mismo.

A la “Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos” de la Universidad Nacional Autónoma de México” por proporcionarme la base de datos de las propiedades físicas y de carbono negro de las PM_{2.5} para Juriquilla (JQRO).

Al jurado evaluador por sus valiosos comentarios, sugerencias y disposición que ayudaron a mejorar este trabajo.

A mi familia y amigos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCION.....	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 Aerosoles	3
2.2 Clasificación de los Aerosoles	4
2.4 Propiedades físicas de los Aerosoles	12
2.4.1 Dispersión	13
2.4.2 Absorción	14
2.4.3 Coeficiente de extinción	15
3. Objetivos.....	17
3.1 Objetivo general	17
3.1.1 Objetivos específicos	17
4. Parte experimental.....	18
4.1 Sitio de muestreo	18
4.2 Equipo de monitoreo	19
4.3 Validación de mediciones	24
5. Resultados y discusión	25
5.1 Comportamiento anual del coeficiente de absorción	25
5.2 Comportamiento anual del carbono negro	27
5.3 Comportamiento anual del coeficiente de dispersión	30
5.4 Variabilidad estacional de las propiedades físicas y carbono negro	32
5.5 Comparación de Resultados	36
6. Conclusiones	39
7. Referencias	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Media anual del forzamiento radiativo a escala global para los principales contaminantes atmosféricos (IPCC, 2007).....	3
Figura 2. Clasificación de los aerosoles según su origen: A) aerosoles naturales B) Aerosoles antropogénicos (https://es.slideshare.net/EDU3364/tema-7-contaminacin-en-la-atmosfera).....	4
Figura 3. Aerosoles primarios y secundarios (https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf).	5
Figura 4. Tamaño de partículas (EPA, 2017).	6
Figura 5. Distribución de tamaño de los aerosoles (EPA, 2017).	8
Figura 6. Aerosoles atmosféricos (https://slideplayer.es/slide/132030/release/release/woothee).	8
Figura 7. Estructura del carbono negro (http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html) ...	12
Figura 8. Fenómenos de dispersión Mie y Rayleigh (http://4.bp.blogspot.com/_71i2-sKkpU/	14
Figura 9. Fenómeno de dispersión no selectiva (http://4.bp.blogspot.com/_71i2-sKkpU/ . 14	14
Figura 10. Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla.	18
Figura 11. Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI).....	19
Figura 12. Vista frontal del extintómetro fotoacústico (PAX) ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 13. Diagrama de funcionamiento del extintómetro fotoacústico (PAX) ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 14. Variación del coeficiente de absorción durante 2017	25
Figura 15. Ciclo diurno del coeficiente de absorción durante 2017.	26
Figura 16. Comportamiento semanal del coeficiente de absorción durante 2017.....	27
Figura 17. Variación del carbono negro durante 2017.	28
Figura 18. Ciclo diurno del carbono negro durante 2017.....	29
Figura 19. Comparación del ciclo diurno del coeficiente de absorción y del carbono negro durante 2017.	29
Figura 20. Comportamiento semanal del carbono negro durante 2017.	30
Figura 21. Variación del coeficiente de dispersión durante 2017.....	31
Figura 22. Ciclo diurno del coeficiente de dispersión durante 2017.....	32
Figura 23. Comportamiento semanal del coeficiente de dispersión durante 2017.....	32
Figura 24. Comparación del coeficiente de absorción durante las tres temporadas climáticas (Temporada 1: secas frías; Temporada 2: secas calientes; Temporada 3: lluvias).	33
Figura 25. Comparación del coeficiente de carbono negro durante tres temporadas climáticas (Temporada 1: secas frías; Temporada 2: secas calientes; Temporada 3: lluvias).	34
Figura 26. Comparación del coeficiente de dispersión durante las tres temporadas climáticas (Temporada 1: secas frías; Temporada 2: secas calientes; Temporada 3: lluvias).	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del carbono negro (Pretzold et al., 2013).....	11
Tabla 2. Valores de los coeficientes de absorción, carbono negro y coeficiente de dispersión a los largo del 2017.....	35
Tabla 3. Comparación de propiedades ópticas de los aerosoles.....	37
Tabla 4. Comparación de concentración de carbono negro en México.....	37
Tabla 5. Comparación de concentración de carbono negro en diferentes sitio del mundo.	37

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el estudio de las propiedades físicas (coeficiente de dispersión y absorción) y la concentración de carbono negro presente en los aerosoles atmosféricos ($PM_{2.5}$) en Juriquilla durante el año 2017. El coeficiente de absorción presentó una variación entre 0.30 Mm^{-1} – 35.59 Mm^{-1} con un promedio anual de $4.0 (0.8) \text{ Mm}^{-1}$. Los valores más altos se registraron durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre (temporada de secas frías) dado la poca altura de la capa límite, mientras que los más bajos se registraron en los meses de junio a octubre (temporada de lluvias), meses en los que predomina la depositación húmeda. También presentó un comportamiento bimodal diario con un máximo en las horas de la mañana (08:00) y otro en las horas de la tarde (20:00), los cuales coinciden con las horas de mayor afluencia vehicular.

Por otro lado, el coeficiente de dispersión presentó una variación 0.6 Mm^{-1} – 75.6 Mm^{-1} con un promedio anual de $12.6 (1.3) \text{ Mm}^{-1}$ y sus valores más altos se registraron durante los meses abril y mayo, meses en los cuales hay una mayor temperatura e incidencia de radiación (temporada secas calientes), mientras que los menores se cuantificaron durante los meses de junio a octubre (temporada de lluvias) en los que predomina la depositación húmeda. El ciclo diurno promedio anual del coeficiente de dispersión, presentó un comportamiento bimodal similar al presentado por el coeficiente de absorción indicando la presencia de aerosoles envejecidos (sulfatos y nitratos) que provocan que estos coeficientes presenten los máximos en las mismas horas.

Finalmente, el carbono negro presentó una variación $0.4 \mu\text{g m}^{-3}$ – $1.9 \mu\text{g m}^{-3}$ con un promedio anual de $0.8 (0.5) \mu\text{g m}^{-3}$ y su comportamiento tanto anual como el ciclo diurno fue muy similar al del coeficiente de absorción. Esto es debido a que la principal especie particulada responsable de la absorción en la atmosfera es el carbono negro.

1. INTRODUCCION

La contaminación atmosférica se define como la presencia en la atmósfera de una o más sustancias en una concentración que genere y/o provoque un riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos (Martínez y Díaz, 2004). Las principales fuentes de contaminación atmosférica son los procesos industriales y los procesos de combustión por parte de automóviles, los cuales generan una gran cantidad de gases y aerosoles, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO₂), carbono negro (CN), sulfatos (SO₄²⁻), nitratos (NO₃⁻), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otros contaminantes (Jacobson, 2012).

Los aerosoles atmosféricos han tomado relevancia en los últimos años, debido a que tienen importantes efectos en la salud como pueden ser las alergias, intoxicaciones, problemas respiratorios e inclusive llegar a lesionar diversos órganos (Molgavkar, 2000; Schwartz, 2002; Hoek *et al.*, 2002, Pope y Dockery, 2006). Todos estos efectos mencionados ocurren generalmente cuando los aerosoles penetran en los pulmones en el torrente circulatorio. También se ha demostrado que los aerosoles tienen efectos en los ecosistemas, en edificaciones y en el balance radiativo (Moya *et al.*, 2003; Bravo *et al.*, 2006). Este último efecto es de gran importancia al igual que los efectos en la salud, dado que al alterar el balance radiativo se está modificando la cantidad de energía presente en la atmósfera (energía que entra ò energía que sale) conllevando a forzamientos positivos o negativos (Zhu *et al.*, 2015). El forzamiento positivo se refiere a que los aerosoles absorben radiación, mientras que los negativos se refieren a una dispersión o esparcimiento de la radiación.

La absorción de radiación por parte de los aerosoles se caracteriza por la conversión de la energía de los fotones en energía interna de la partícula que después es reemitida en forma de calor (Schmid *et al.*, 2006); mientras que la dispersión por parte de los aerosoles se puede considerar como un conjunto de

cuatro fenómenos físicos: la reflexión (los fotones rebotan con un ángulo igual), la dispersión (los fotones van en diferentes direcciones), la refracción (la dirección de los fotones cambia un poco), y la difracción (el haz de fotones “se dobla”), sin embargo, considerar estos cuatro procesos de dispersión por separado sería muy difícil, por esta razón, usualmente estos se generalizan y se habla de dispersión de forma general como el redireccionamiento de la radiación respecto a su trayectoria de incidencia (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000).

Considerando la importancia que representan las propiedades de dispersión y absorción de los aerosoles, en este trabajo se tuvo como objetivo medir de manera directa los coeficientes de absorción y de dispersión de las partículas atmosféricas y de manera indirecta la concentración de carbono negro en las instalaciones de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación de la Facultad de Ciencias en Juriquilla, Querétaro.

2. MARCO TEORICO

2.1 Aerosoles

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en la atmósfera (Jacobson, 2002) con radios de $0.001 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{m}$), los cuales tienen efectos sobre la salud, los ecosistemas y el clima (Dockery et al., 1993; Molgavkar, 2000; Schwartz, 2002; Bravo *et al.*, 2006; Pope et al., 2006). El clima es afectado o modificado como resultado de la alteración del balance radiativo de la Tierra (Moya *et al.*, 2003).

El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra producto de cambios internos en la composición química de los de los aerosoles y los gases atmosféricos, o cambios en el aporte externo de la energía solar. El forzamiento se expresa en unidades de W m^{-2} y se considera que un forzamiento radiativo positivo contribuye a aumentar la temperatura de la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece a su enfriamiento de esta.

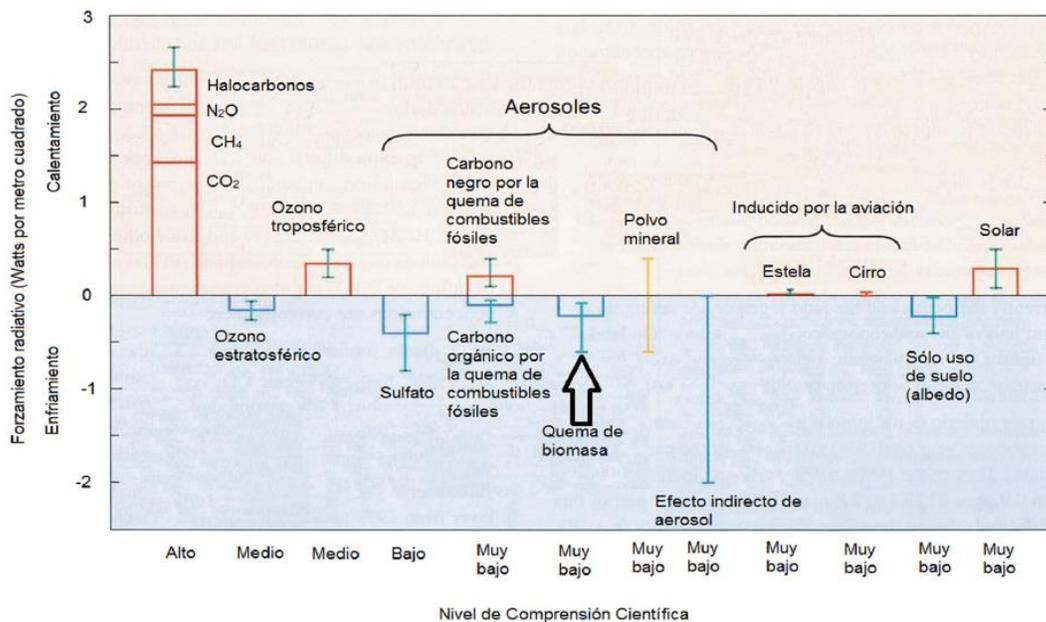


Figura 1. Media anual del forzamiento radiativo a escala global para los principales contaminantes atmosféricos (IPCC, 2007)

Los efectos que provoca el forzamiento radiativo por los gases de efecto invernadero como metano y bióxido de carbono, son bien conocidos, mientras que para el caso de los sulfatos y el material mineral presente en los aerosoles atmosféricos no se conoce con certeza, tal como se observa en la Figura 1.

2.2 Clasificación de los Aerosoles

Los aerosoles se clasifican de diversas maneras:

1. Por su origen se clasifican en **aerosoles naturales y antropogénicos**. Los naturales, como su nombre lo indica se originan de forma natural y se consideran los compuestos emitidos (cenizas y óxidos de azufre) por erupciones volcánicas, los minerales transportados por tormentas de arena, las esporas y polen emitidas por las plantas y las sales provenientes del rocío marino, mientras que los antropogénicos son los derivados de actividades humanas, tales como el humo de chimeneas, partículas minerales surgidas de procesos industriales (Figura 2) y procesos de quema de combustibles fósiles (Seinfeld y Pandis, 2006).

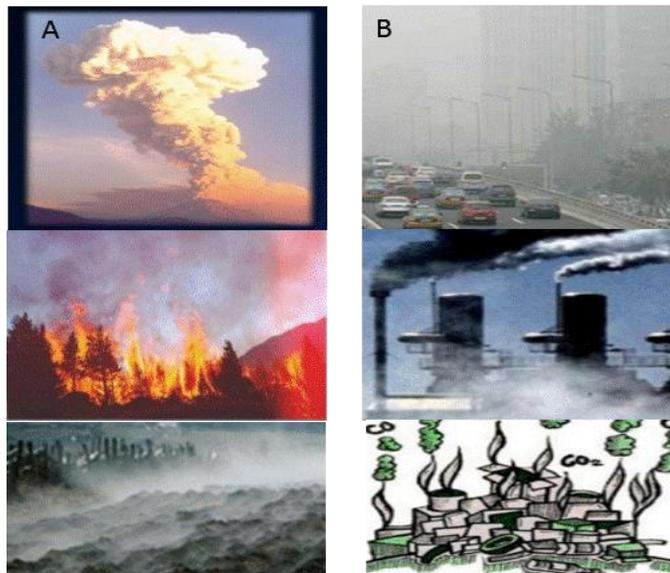


Figura 2. Clasificación de los aerosoles según su origen: A) aerosoles naturales B) Aerosoles antropogénicos (<https://es.slideshare.net/EDU3364/tema-7-contaminacin-en-la-atmosfera>).

2. Por su origen se clasifican en **aerosoles primarios y secundarios** (Figura 3). El primer tipo corresponde a aquellos que se emiten directamente a la atmósfera a través de emisiones naturales (erupciones volcánicas, polvo desértico, etc.) y/o actividades antropogénicas (quema de combustibles fósiles, actividades industriales, etc.); mientras que los secundarios son los que se originan como consecuencia de diversos procesos químicos que tienen lugar en la atmósfera (Seinfeld y Pandis, 2006).

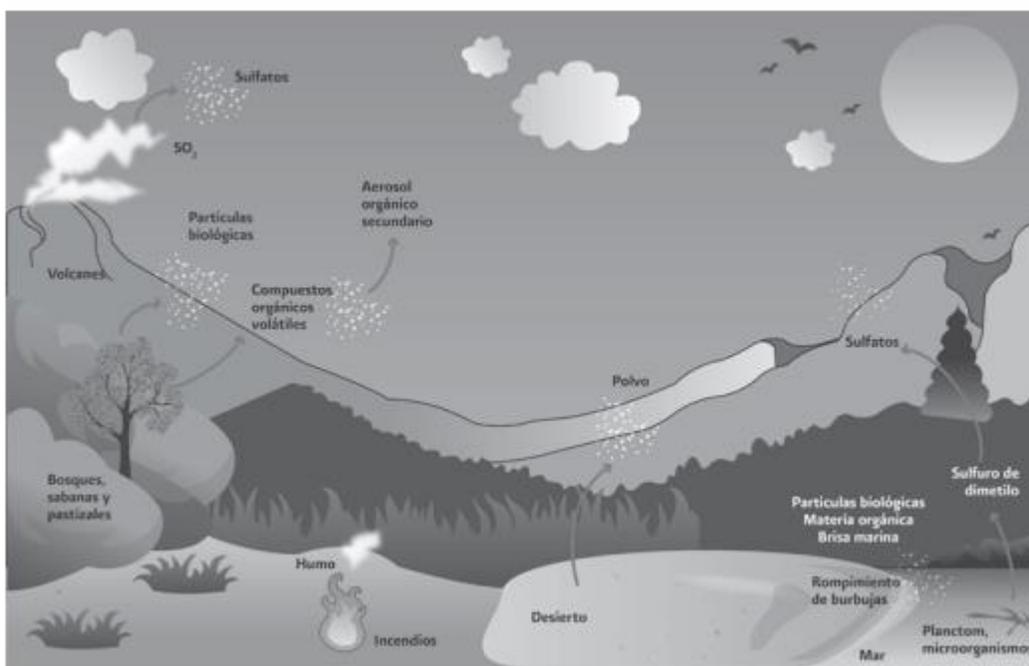


Figura 3. Aerosoles primarios y secundarios
(<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf>).

3. Por su tamaño se clasifican en **partículas suspendidas totales (PST), PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁**. Las partículas suspendidas totales se definen como el conjunto de todas las partículas de cualquier tamaño (0.001 μm a 100 μm), las PM₁₀ y PM_{2.5} están compuestas por partículas que tienen un diámetro aerodinámico medio inferior a 10 μm y 2.5 μm , respectivamente mientras que las PM₁ tienen un diámetro inferior a 1 μm (Figura 4). Sin embargo, es importante aclarar que dada la forma que tienen los aerosoles es difícil determinar su diámetro geométrico y poderlos clasificar. Por esta razón, para fines práctico-comparativos se trabaja con el diámetro aerodinámico, que se define como el diámetro de una partícula

esférica equivalente con una de densidad igual a 1 g cm^{-3} que tendría el mismo comportamiento aerodinámico en un flujo de aire (Baird, 2001).

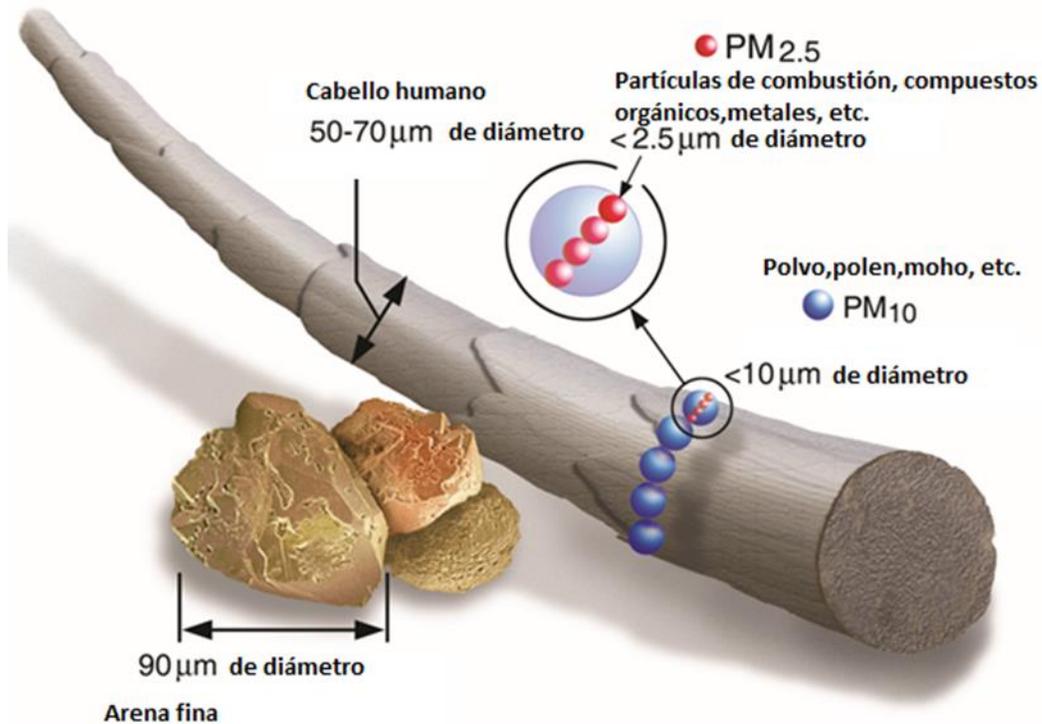


Figura 4. Tamaño de partículas (EPA, 2017).

4. Finalmente, los aerosoles se pueden clasificar de acuerdo al mecanismo de formación más frecuente llamado "moda", dentro de esta clasificación tenemos **moda de nucleación, moda de Aitken, moda de acumulación y moda gruesa** (Figura 5).

A. Moda de nucleación ($< 0.02 \mu\text{m}$): Estas partículas son emitidas tanto por fuentes de combustión como condensación de gases. Los precursores gaseosos con capacidad para formar partículas por nucleación homogénea son SO_2 , NH_3 y H_2O . Su máxima concentración en número de partículas oscila entre $5 \text{ nm} - 15 \text{ nm}$. Su vida media es del orden de horas ya que

coagulan rápidamente al reaccionar con otras partículas o aumentan de tamaño por condensaciones (Puigcerver y Carrascal, 2008).

- B. Moda Aitken ($0.02 \mu\text{m} - 0.1 \mu\text{m}$): Estas partículas tienen un origen primario y/o secundario (natural o antropogénico). Las partículas de origen secundario generalmente se forman por procesos de coagulación o condensación a partir de los de modas de nucleación. El carbono (hollín) es una partícula ejemplo típico de esta moda (Fernández, 2001; Puigcerver y Carrascal, 2008).
- C. Moda acumulación ($0.1 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$): en esta moda la mayor densidad se ha reportado dentro del intervalo de 150 nm a 250 nm. Estas partículas son producto de la coagulación de partículas más pequeñas emitidas de las fuentes de combustión, de la condensación de especies volátiles, de la conversión gas-partícula y de las partículas finas de polvo de tierra. Las partículas crecen a causa de reacciones en fase líquida que tienen lugar en pequeñas gotas de agua dentro de las nubes. El 90 % del sulfato que se forma en la atmósfera es consecuencia de la oxidación en fase líquida del dióxido de azufre en las nubes (Puigcerver y Carrascal, 2008).
- D. Moda gruesa ($> 1 \mu\text{m}$): La mayor parte de estas partículas se forman por procesos mecánicos tales como la erosión de la superficie terrestre o por la explosión de burbujas en la superficie de mares y océanos (Puigcerver y Carrascal, 2008).

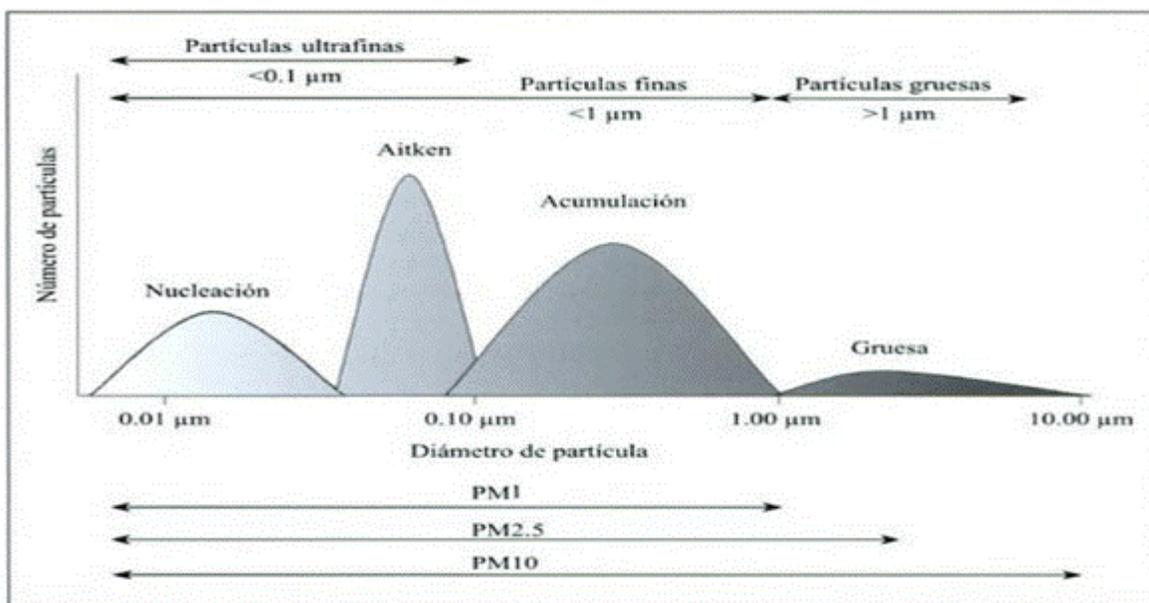


Figura 5. Distribución de tamaño de los aerosoles (EPA, 2017).

2.3 Composición química de los Aerosoles

La composición química de los aerosoles es muy variable (Figura 6) y depende de la fuente de emisión, de los mecanismos de formación, así como de la meteorología del lugar (Seinfeld y Pandis, 2006). Los principales compuestos presentes en los aerosoles atmosféricos son:

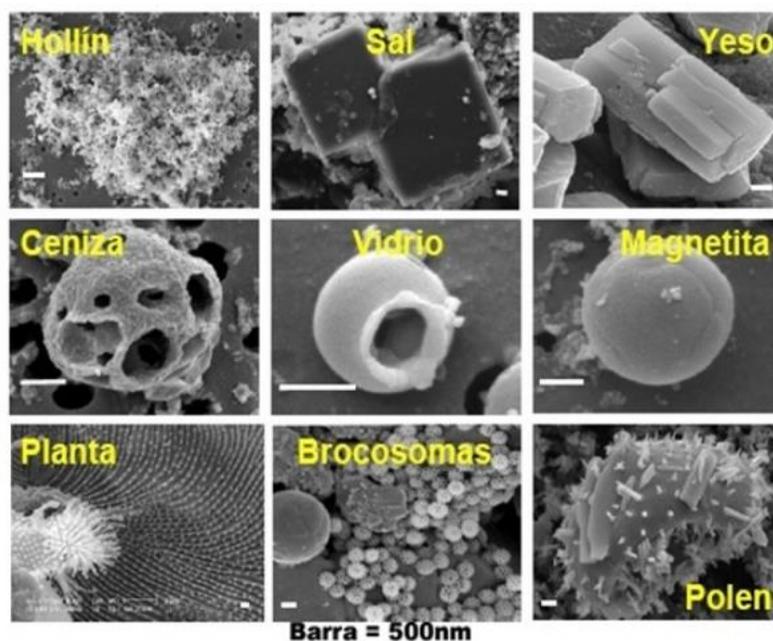


Figura 6. Aerosoles atmosféricos (<https://slideplayer.es/slide/132030/release/release/woothee>).

- A. Sulfatos: son compuestos secundarios que se generan como producto de la oxidación del SO_2 , el cual se introduce a la atmósfera a través de las emisiones volcánicas, emisiones biogénicas y quema de combustibles fósiles. Otra de las fuentes emisoras importante son las algas unicelulares las cuales emiten dimetil sulfuro. A pesar de que el sulfato es el componente azufrado en mayor abundancia, hay ocasiones en las cuales se forma el ácido sulfúrico por efecto del radical hidroxilo (Jiménez., 2018).
- B. Nitratos: son compuestos secundarios formados a partir de los óxidos de nitrógeno (NO_2 y NO), considerados conjuntamente como NO_x , cuya fuente mayoritaria es la combustión de carburante por parte de los vehículos. Este proceso emite tanto NO_2 como NO ; sin embargo este último en mayor proporción, que a su vez en la atmósfera se oxida y genera el dióxido de nitrógeno. Los gases precursores también se emiten a través de la actividad bacteriana en el suelo que causa la descomposición de compuestos nitrogenados, así como la actividad volcánica y las descargas eléctricas. Al igual que los óxidos de azufres, los óxidos de nitrógeno pueden llegar a formar su correspondiente ácido por presencia del radical hidroxilo (Jiménez., 2018).
- C. Amoniaco: es el compuesto alcalino más abundante e importante presente en la atmósfera debido a su papel neutralizador de la atmósfera a través de la formación de sales, principalmente sulfato de amonio y nitrato de amonio. Es emitido a la atmósfera en forma de su gas precursor (NH_3) en estado gaseoso por efecto de la descomposición de la materia orgánica, y por la quema de combustibles fósiles aunque a menor escala (Jiménez., 2018).
- D. Compuestos de carbono: dentro de los compuestos de carbono, se incluyen el carbono orgánico y elemental, los cuales representa más del 50 % de la

concentración másica del material particulado (Calvo *et al.*, 2013). Sus fuentes de emisión son tanto de origen biogénico como antropogénicas.

El carbono orgánico está conformado por grandes cantidades de compuestos orgánicos (aldehídos, alcanos, alquenos, cetonas, etc.) provenientes de la condensación de compuestos orgánicos volátiles emitidos directamente a la atmósfera (Morales, 2006) por procesos de combustión como lo son las emisiones de los escapes de los vehículos y/o procesos industriales, aunque también son emitidos por fuentes biogénicas, principalmente por la vegetación (Szidat *et al.*, 2009). Dada la complejidad que presenta el carbono orgánico por la gran variedad de compuestos que pueden estar presentes, se clasifican en compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles (Chow *et al.*, 1993; Falkovich y Rudich, 2001). Estos compuestos tienen propiedades físicas y químicas muy diferentes, razón por la cual en el momento de realizar el análisis se tiene en cuenta tanto el fenómeno de esparcimiento de la luz que incide en ellos como la temperatura a la cual se descomponen (< 500 °C) (Petzold y Niessner, 1995; Xie y Pan, 2001; Senfield y Pandis, 2006).

El carbono elemental se emitido directamente a la atmósfera mediante procesos de combustión incompleta, siendo la quema de combustibles la principal fuente, Tiene una estructura muy parecida al grafito impuro por lo cual su cuantificación térmica suele realizarse a temperaturas superiores a los 450 °C dada su complejidad estructural. A pesar de que el carbono elemental en el hollín es hidrofóbico; algunos atraen partículas que contienen gases inorgánicos disueltos. La mayoría de las partículas de carbono elemental se emite como partículas menores a 0.2 µm de diámetro, sin embargo, estudios realizados en Estados Unidos han demostrado que en ocasiones este excede el tamaño (Venkataraman *et al.*, 1994; Morales, 2006). El carbono elemental también denotado como “EC” por su abreviatura en inglés, es una forma esencialmente pura de carbono, que se encuentra poco combinada con otros elementos como hidrógeno y oxígeno.

Generalmente se usa como sinónimo del carbono negro “CN”, por sus siglas en inglés (*black carbon*). Es una forma sólida de carbono, con más del 60% de este elemento en masa (Pretzold et al., 2013), cuya característica principal es absorber la radiación solar en un amplio rango de longitudes de onda (del visible al infrarrojo). Forma parte del material particulado y es producto de procesos de combustión incompleta (EPA, 2017), Por lo tanto, es un contaminante primario. Existen propiedades importantes en las partículas de carbono negro que le confieren características específicas que, además de distinguirlas del resto del material particulado carbonáceo, determinan su comportamiento en el ambiente

Tabla 1. Propiedades del carbono negro (Pretzold et al., 2013).

Propiedad	Característica que le brinda al CN	Resultados en el comportamiento del CN
Microestructura (esférulas)	Estructura similar a la del grafito, con grandes cantidades de uniones atómicas del tipo SP ² .	Baja reactividad química en la atmósfera, baja remoción mediante procesos químicos y fuerte absorción óptica.
Morfología	Fractal, tiene un acomodo en forma de agregados en cadena que provienen de pequeñas esférulas menores a 10 nm y posee un área superficial específica típica de alrededor de 10 m ² /g.	Alta capacidad de adsorción de otras especies.
Estabilidad térmica	Su gasificación es posible solo mediante la oxidación, que inicia a temperaturas por encima de los 340 °C	Alta estabilidad en la atmósfera, incrementando el tiempo de residencia.
Solubilidad	Insoluble en cualquier disolvente, incluido el agua.	Baja remoción por nubes y precipitación, a menos que esté recubierto de compuestos solubles en agua, por lo tanto, incrementa su tiempo de residencia en la atmósfera
Absorción de la luz	Fuerte absorción de la luz en el rango de la luz visible. Las longitudes de onda en las que el CN tiene propiedades de absorción son aquellas presentes en la tropósfera, es decir de los 280 nm a los 2000 nm	Reducción del albedo en nubes, nieve y hielo, calentamiento de la atmósfera y enfriamiento de la superficie.

Dependiendo de la forma en que se generan las partículas de carbono, pueden consistir en diferentes sustancias. Las partículas pueden tener la misma estructura que el grafito, pueden ser escamas sueltas que tienen una estructura fractal o, cuando se generan por combustión, las partículas también pueden contener otras sustancias, como el combustible sin quemar (Figura 7).

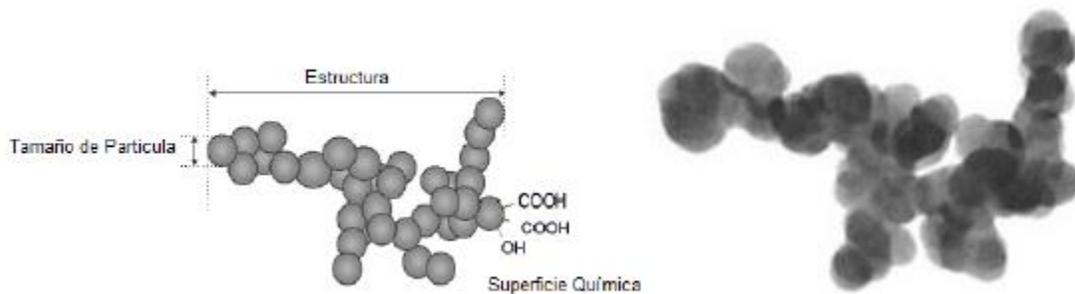


Figura 7. Estructura del carbono negro (<http://www.carbonblack.jp/en/cb/tokusei.html>)

El carbono negro es un subproducto no deseado de la combustión, ya que es un signo de desperdicio de energía. La masa de partículas (carbono y otras sustancias) emitidas por la combustión aumenta con el carácter incompleto de la combustión, así como, cuanto más completa es la combustión, mayor es el contenido de carbono elemental en la cantidad más pequeña de partículas emitidas.

2.4 Propiedades físicas de los Aerosoles

La importancia de estudiar las propiedades físicas de los aerosoles radica principalmente en su interacción con la luz del Sol, lo cual conduce a diferentes fenómenos que se presentan en la atmósfera, como la visibilidad, el calentamiento del aire, la formación de nubes, etc. Para su estudio, es necesario entender el concepto de algunos fenómenos naturales que se presentan en dicha interacción.

2.4.1 Dispersión

La dispersión es un proceso físico mediante el cual una partícula durante su trayectoria como onda electromagnética continuamente extrae energía de la onda incidente y la irradia en todas las direcciones (Liou, 2002). En la dispersión, una partícula absorbe cierta cantidad de energía incidente para después emitirla en un ángulo sólido centrado en la partícula, la cual se considera como un punto fuente de la energía dispersada.

El coeficiente de dispersión de la luz es la fracción de luz incidente que es dispersada por las partículas por unidad de longitud recorrida por el haz de luz. La dispersión es una propiedad óptica importante de los aerosoles, a menudo denominada eficiencia de dispersión de la masa, y se evalúa como el cociente de dispersión de luz de las partículas dividido por la concentración en masa de materia particulada. A veces se utiliza la eficiencia de dispersión molar, dividiéndolo por la concentración molar de una especie de partículas de aerosoles (Buseck y Schwartz, 2003). Dentro de la dispersión se consideran tres mecanismos:

La dispersión de Mie se observa cuando los diámetros de las partículas atmosféricas son esencialmente iguales a la longitud de onda de la radiación y tiende a influenciar la radiación de longitudes de onda mayor que las afectadas por la dispersión de Rayleigh (Figura 8).

La dispersión Rayleigh es el resultado de la interacción de la radiación con los aerosoles y partículas pequeñas cuyo diámetro es menor que la longitud de onda de la radiación con la que interactúan, es decir, tienden a dispersar las longitudes de onda más cortas, un ejemplo de esta dispersión es el color azul del cielo (Figura 8).

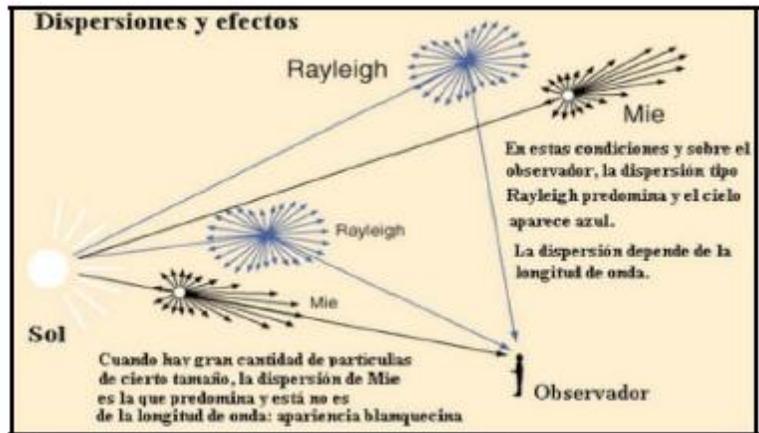


Figura 8. Fenómenos de dispersión Mie y Rayleigh (http://4.bp.blogspot.com/_71i2-sKkpU/)

La dispersión no selectiva se produce cuando los diámetros de las partículas o aerosoles que producen la dispersión son mucho mayores que las longitudes de onda con que interactúan. Un ejemplo es el color blanco de las nubes y de la niebla (Figura 9).

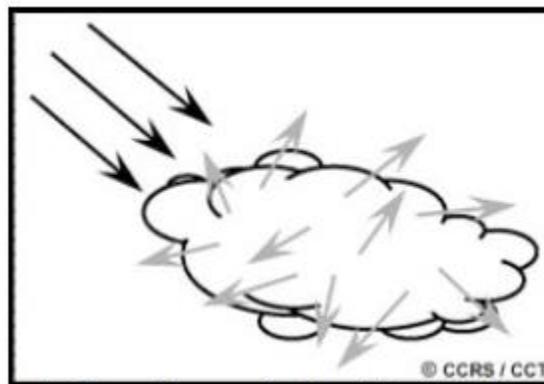


Figura 9. Fenómeno de dispersión no selectiva (http://4.bp.blogspot.com/_71i2-sKkpU/)

2.4.2 Absorción

La absorción es el proceso inverso a la dispersión, se produce en éste lo que se produce es una transferencia de energía de la radiación a los constituyentes atmosféricos (aerosoles). Cada sustancia va a absorber una serie de frecuencia de

radiación, no va a absorber todas, debido a esto las moléculas hacen que la atmósfera constituya un medio opaco para ciertos rangos espectrales, mientras que ofrece ventanas libres de absorción en otros rangos, las cuales son aprovechadas por los satélites. Los absorbentes más eficaces de la radiación solar son el agua, el dióxido de carbono y el ozono.

Cuando un haz de luz paralelo se propaga a través de una atmósfera uniforme, es decir cuando no hay dispersión, su intensidad decrece exponencialmente con la distancia x (Ecuación 1) (Bohren y Huffman. 1998).

$$I = I_0 e^{-\sigma x} \quad (1)$$

Donde I_0 es la intensidad inicial y σ es el coeficiente de extinción.

El cuerpo negro es un receptor y emisor de energía perfecto. La energía radiante emitida desde el cuerpo negro por unidad de superficie, en la unidad de tiempo y por unidad de intervalo de longitud de onda, tiende a cero para longitudes de onda muy cortas y muy largas, y presenta un sólo máximo a una longitud de onda que depende de la temperatura.

En la realidad es utópico tener un cuerpo negro ya que no existe tal perfección. El problema se resuelve mediante la introducción del modelo de "cuerpo gris", a cuyo comportamiento se asemejan los cuerpos reales. Para el mismo, la absorptividad no depende de la temperatura del medio exterior, es decir, la relación entre el poder emisor de un cuerpo cualquiera y el coeficiente de absorción de dicho cuerpo depende exclusivamente de la temperatura (T) del mismo.

2.4.3 Coeficiente de extinción

En química, el coeficiente de extinción (también llamado coeficiente másico de atenuación o coeficiente másico de absorción) define cuán fuertemente una sustancia absorbe radiación solar a una determinada longitud de onda. En física, el "coeficiente de extinción" es la parte imaginaria del índice de refracción que está relacionada con la absorción de luz. Usualmente se le denomina opacidad, y está

relacionada con el grado de luz que atraviesa un material. Cuando la luz es bloqueada en gran parte, se dice que el material es opaco. Si el caudal de luz que pasa es bastante grande, el material es clasificado como traslúcido, y si la luz atraviesa el material en su totalidad, se considera un material transparente o traslúcido.

Para aplicaciones técnicas, se estudia la transparencia u opacidad a la radiación infrarroja, a la luz ultravioleta, a los rayos X, a los rayos gamma, y en cada una de ellas se caracteriza su función de opacidad.

La función de opacidad generalmente involucra tanto la frecuencia de la luz que interacciona con el objeto como la temperatura de dicho objeto. La opacidad se expresa matemáticamente como kT y representa los niveles de energía que corresponden a la longitud de onda usada.

El coeficiente de extinción del medio (σ) se expresa como la suma de los coeficientes de dispersión de luz (σ_s) y el coeficiente de absorción de la luz (σ_a), que son las constantes de proporcionalidad de la pérdida de energía del rayo por dispersión y absorción, respectivamente (Ecuación 2), este coeficiente también depende del número de partículas por unidad de volumen (η).

$$\sigma = \eta (\sigma_s + \sigma_a) \quad (2)$$

Los gases atmosféricos pueden afectar al coeficiente de extinción, debido a que este depende de los fenómenos de absorción y de dispersión. Esto último es fundamentalmente dispersión Rayleigh, para la cual la frecuencia de la luz incidente no cambia en el proceso de dispersión. Así ocurre con moléculas de gas y partículas de tamaño mucho menor que la longitud de onda de la luz incidente, es decir, radio menor a $0.1 \mu\text{m}$, por lo que las partículas Aitken tienen gran importancia en este fenómeno. Por otro lado, la contribución de la dispersión Rayleigh a la reducción de la visibilidad atmosférica es muy pequeña comparada con otros fenómenos como la dispersión Mie (Spedding, 1981).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo consistió en determinar las propiedades físicas de los aerosoles y la concentración de carbono negro presente en las partículas atmosféricas $PM_{2.5}$ en Juriquilla mediante el empleo de un extintómetro fotoacústico.

3.1.1 Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo principal, se formularon los siguientes objetivos específicos:

- a) Adquirir conocimientos y habilidades en el manejo de un Extintómetro fotoacústico (PAX).
- b) Determinar los coeficientes de absorción y dispersión en Juriquilla.
- c) Cuantificar el contenido de carbono negro en Juriquilla.
- d) Obtener el comportamiento diario promedio, semanal y mensual tanto de las propiedades ópticas como de la concentración de carbono negro presente en los aerosoles atmosféricos $PM_{2.5}$.
- e) Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con estudios reportados en México.



Figura 11. Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI).

4.2 Equipo de monitoreo

Para realizar las mediciones de las propiedades físicas (coeficiente de absorción y dispersión) y la concentración de carbono negro presentes en los aerosoles atmosféricos ($PM_{2.5}$), se utilizó un extintómetro fotoacústico (PAX, Figuras 12), utilizando un diodo de láser modulado a aproximadamente 870 nm longitud de onda única del instrumento.

El PAX trabaja con un flujo nominal de 1 LPM que pasa primero a una válvula de solenoide, que permite el muestreo periódico del filtro para determinar las señales de fondo del instrumento. Las longitudes del tubo de muestra entre la línea de filtro y la línea de muestra es igual para proporcionar las mismas propiedades acústicas a lo largo de ambos canales. El flujo de muestra pasa a un aislamiento acústico, un recinto el cual contiene las celdas de muestra, donde se divide, haciendo que a 90 grados opuestos se conviertan en las regiones de medición dispersión y de la absorción. La muestra es agotada, a través de dos puertos en los extremos de las celdas donde se filtran y bombean fuera del instrumento. Los flujos se controlan utilizando orificios críticos, los cuales no afectan el cálculo de los

coeficientes de absorción y dispersión, ya que solo estos coeficientes dependen de las propiedades de las partículas muestreadas y la geometría de la región de medida (Retama *et al.*, 2015).



Figura 12. Vista frontal del extintómetro fotoacústico (PAX)

La figura 13 muestra un diagrama de las celdas de medición del PAX. La celda de absorción incluye un tubo de 0.635 cm de diámetro, 10.8 cm de largo, llamado resonador y un pequeño micrófono ubicado en la parte superior del resonador que detecta las perturbaciones de presión, inducido por el calentamiento de las partículas absorbentes de luz. La señal del micrófono pasa a través de un circuito rápido que da la potencia máxima al resonador mientras la frecuencia se calcula en base a la geometría del resonador, medido por la presión del aire, la temperatura y el punto de rocío en la celda. La señal de presión bruta del micrófono (pmic) se convierte al coeficiente de absorción de luz utilizando la siguiente ecuación:

$$b_{abs,raw} = \frac{p_{mic} A \pi^2 f}{P_L (\gamma - 1) Q} \cos \phi_{raw} \quad (3)$$

Donde A es la sección transversal del resonador, f es la frecuencia del resonador, P_L es la potencia del láser, que es la relación del calor específico

isobárico e isocórico para el aire, Q es calculado por el factor de calidad del resonador (calculado a partir de la medida de presión, temperatura y temperatura del punto de rocío) y raw es la señal de absorción en fase relativa a la fase de la señal de potencia láser más la corrección de fase.

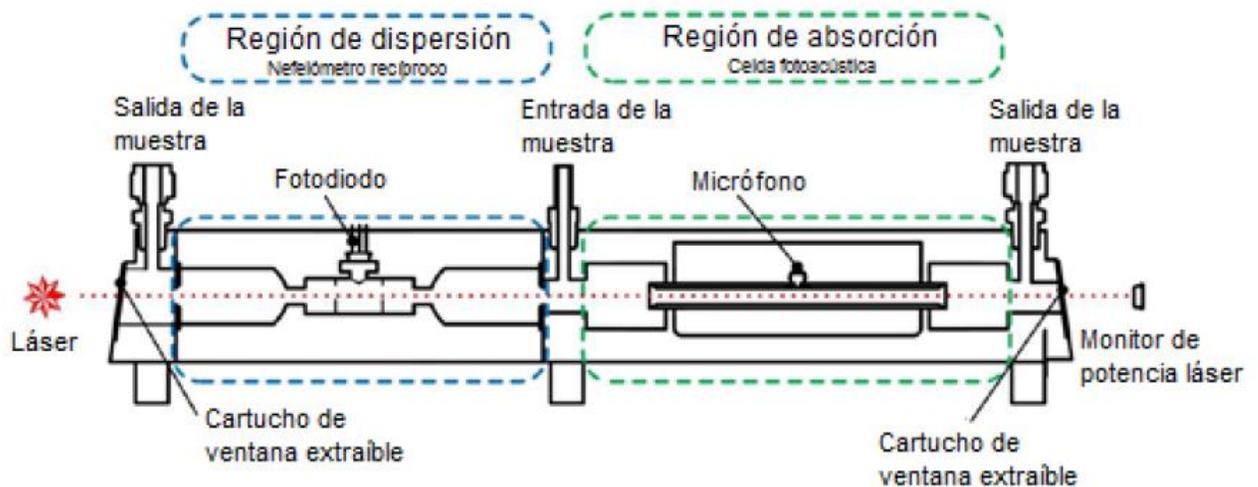


Figura 13. Diagrama de funcionamiento del extintómetro fotoacústico (Retama et al., 2015).

Las señales de absorción y dispersión deben ser corregidas por las señales de fondo dadas por la absorción por parte de la celda, de las partículas depositadas a las superficies de las celdas (especialmente las ventanas de la celda), y del ruido acústico y eléctrico que contribuyen a la señalización de la frecuencia del resonador. La dispersión de fondo no se ve afectada por el ruido acústico, pero sí por el ruido eléctrico y la dispersión de la luz de las superficies de las celdas así como de las partículas depositadas, en las superficies de las celdas y ventanas.

Las señales de fondo se calculan simultáneamente en un intervalo especificado por el usuario, normalmente una vez cada 5 min, pasando el aire de muestra a través de un filtro antes de que entre en la celda de medición durante 20 s con la finalidad de que arrastre todas las partículas que pudieran estar en la cámara, posteriormente se repite el procedimiento durante 30 s en los cuales se

toma la medición de fondo y finalmente se vuelve a repetir el paso inicial, asegurando de esta manera que el sistema quede libre de partículas, por lo tanto se puede reanudar las mediciones de la absorción y dispersión. Los valores se guardan automáticamente y se restan a las señales obtenidas de los coeficientes de absorción y de dispersión en tiempo real. Típicamente la señal de fondo es pequeño ($< 3 \text{ Mm}^{-1}$) en comparación con la observada de los coeficientes de dispersión y absorción, especialmente en los lugares altamente contaminados (Retama *et al.*, 2015).

Con el tiempo, las señales de fondo se ven afectadas por la contaminación en las ventanas de celdas y por los cambios menores en la alineación óptica. La limpieza y realineación del sistema es necesaria, cuando la magnitud de la señal de fondo se vuelve comparable a los cambios en los valores de dispersión y absorción.

La sensibilidad de los coeficientes de absorción y dispersión medidos con el PAX depende de las condiciones de muestreo y la potencia del láser en la celda. La potencia del láser a su vez depende de la calidad de la alineación y del nivel de contaminación en las ventanas de las celdas. La sensibilidad de la dispersión está limitada principalmente por el pequeño volumen de medición y variabilidad en el flujo de muestras de partículas, mientras, que la absorción están limitada principalmente por la electricidad y la acústica (Retama *et al.*, 2015).

El PAX se calibra a través de un proceso de dos pasos, en el cual inicialmente se introducen concentraciones elevadas de partículas altamente dispersante de luz y posteriormente partículas con una alta capacidad de absorción (Arnott *et al.*, 2000; Nakayama *et al.*, 2015). Las concentraciones deben ser altas y suficientes para permitir la medición directa del coeficiente de extinción utilizando la siguiente ecuación:

$$\mathbf{b}_{\text{ext}} = -\frac{1}{l} \ln \frac{I}{I_0} 10^6 [\text{Mm}^{-1}] \quad (4)$$

Donde I es la potencia promedio del láser cuando una alta concentración de partículas es medida, I_0 es la potencia promedio del láser inmediatamente antes y después de que altas concentraciones de partículas sean introducidas en la celda y l es la longitud del camino del rayo láser a través de toda la cavidad óptica (región de dispersión) y la región de absorción) entre las dos ventanas, que para el PAX es de 0.354 m.

El coeficiente de extinción medido es igual al coeficiente de dispersión medido para partículas puramente dispersas (sulfato de amonio). La relación entre la extinción medida y los coeficientes de dispersión se ajustan mediante una regresión lineal dando un factor de calibración para la medida de dispersión. Ahora introduciendo las partículas de calibración que tienen dispersión de cero, significa que la extinción medida es igual al coeficiente de dispersión obtenido anteriormente más el coeficiente de absorción.

El PAX fue operado con un ciclón de $PM_{2.5}$ en la entrada con el fin de eliminar partículas más grandes. El PAX se conectó a un ciclón mediante un tubo conductor de 3/8". Las pérdidas de transmisión son insignificantes a la tasa de flujo de 1 Lpm, basado los cálculos reportados por Retama y colaboradores (Retama et al., 2015). La incertidumbre en el B_{scat} es del 10 % debido a la precisión con la que se puede calibrar el instrumento y a las pérdidas aerodinámicas en el sistema de entrada del instrumento que lleva el aire ambiente a la celda de medición. La incertidumbre en el B_{abs} es 20 %, esta incertidumbre se deriva principalmente de la precisión de la calibración, pero las pérdidas en el sistema de entrada también contribuyen a la precisión general. Dado el rango de posibles valores MAC que dependen de la composición y distribución del tamaño del carbono negro (Bond y Bergstrom, 2006), la incertidumbre en el MAC es de orden 50 % y por lo tanto el CN derivado de B_{abs} es aproximadamente 55 % - 60 % (Retama et al., 2015).

4.3 Validación de mediciones

Para llevar a cabo el análisis de los datos de las propiedades físicas y la concentración de carbono negro en los aerosoles atmosféricos $PM_{2.5}$ en Juriquilla, fue necesario realizar el siguiente procedimiento de validación:

1. Eliminación de lecturas negativas (menores que cero)
2. Eliminación de valores iguales a cero
3. Eliminación de picos anómalos

Para aplicar el primer y segundo filtro sólo fue necesario desarrollar un programa en el software Matlab R2015A, en el cual se colocó la condición de eliminar los datos que fueran menores o iguales a cero.

En referencia al tercer filtro se realizaron dos procedimientos. El primero consistió en graficar toda la serie de tiempo y observar los picos en los cuales las concentraciones cambiaban repentinamente, es decir, no se mostraba un aumento paulatino que se mantuviera por un tiempo considerable (al menos un par de minutos) que pudiera asociarse a un determinado fenómeno de emisión. El segundo procedimiento consistió en realizar un gráfico de dispersión en donde se representó tanto en el eje “x” como en el eje “y” los valores de concentración de cada uno de los coeficientes. Sin embargo, estos valores se desfasaron una lectura, es decir, los valores para el eje “y” iniciaron en el tiempo 2 mientras que los del eje “x” iniciaron en el tiempo 1 y de esta manera poder descartar las lecturas que salieran de la tendencia que tenían los datos. Cabe mencionar que fue necesario revisar cuáles eran los datos que salían de la tendencia, ya que, si correspondían a algún día festivo o a una hora denominada como hora pico en la cual se tienen mayores emisiones de contaminantes, el dato se consideraba como válido. Una vez validados los datos que se encontraban cada 5 min, fue posible realizar los promedios mediante el desarrollo de un programa en el software Matlab R2015A y posteriormente graficados con la paquetería de Open Air del software R studio.

5. Resultados y discusión

Durante el año 2017 se realizó una campaña de medición en las inmediaciones del Campus Juriquilla (UNAM) ubicado al norte de la Ciudad de Santiago de Querétaro, con el fin de evaluar tanto las propiedades físicas de las partículas $PM_{2.5}$ a través de la cuantificación del coeficiente de absorción, dispersión y albedo de dispersión simple; como la concentración de carbono negro presente en las partículas $PM_{2.5}$.

5.1 Comportamiento anual del coeficiente de absorción

En la Figura 14, se ilustra el comportamiento del coeficiente de absorción en Juriquilla a lo largo del 2017, en donde se observa un comportamiento muy constante (máximos y mínimos) con una variación entre 0.3 Mm^{-1} – 35.6 Mm^{-1} y un promedio anual de $4.0 (0.8) \text{ Mm}^{-1}$. Los valores más altos de este coeficiente se reportaron en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, los cuales se consideran como la temporada de secas frías, mientras que los más bajos se registraron en los meses de junio a octubre, que es la temporada de lluvias.

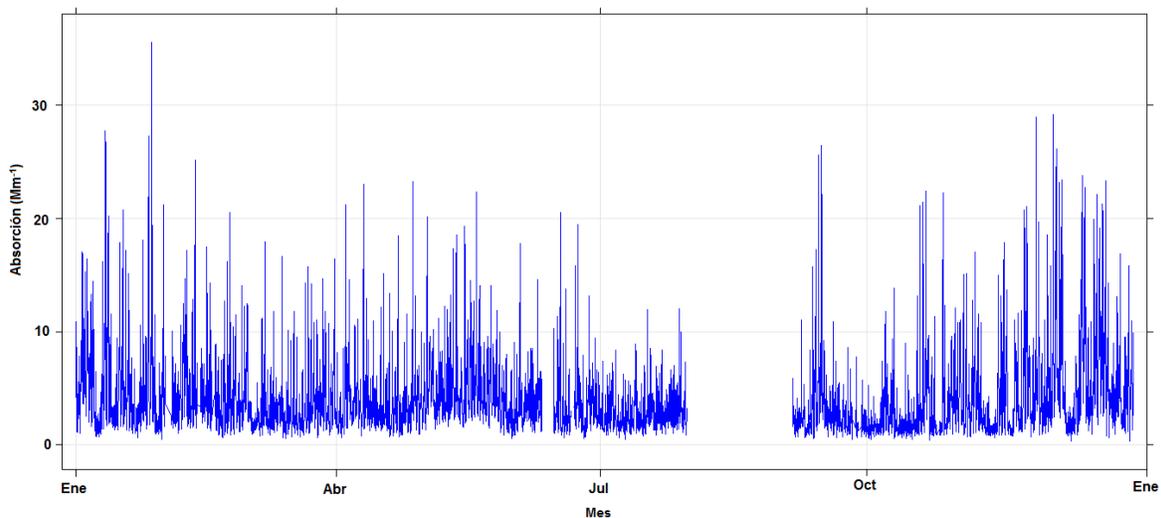


Figura 14. Variación del coeficiente de absorción durante 2017

Con referencia al ciclo diurno promedio anual del coeficiente de absorción (Figura 15), podemos decir que presentó un comportamiento bimodal, con un primer pico en las horas de la mañana (08:00) con un valor de 8.7 (0.8) Mm^{-1} y otro en las horas de la tarde (20:00) con un valor de 3.8 (0.8) Mm^{-1} . Este comportamiento bimodal coincide con las horas en las que hay una mayor afluencia de vehículos, los cuales emiten una gran cantidad y variedad de partículas cuando se lleva a cabo en ellos el proceso de quema de combustible fósil. Dentro de estas partículas emitidas se destaca el carbono negro, que es una especie que, como su nombre lo dice, es capaz de absorber una gran cantidad de radiación o energía provocando altos valores de absorción. Cabe mencionar que el pico de la noche es más pequeño que el de la mañana (casi la mitad) y esto se debe a la gran diferencia que existe entre el flujo vehicular de la mañana y de la noche.

Las disminuciones observadas a partir de las 08:00 se atribuyen, por un lado, a que durante estas horas la capa límite empieza a elevarse, y por otro a que las partículas de carbono negro que se emitieron en las horas de la mañana empiezan a recubrirse debido a las reacciones fotoquímicas que ocurren sobre ellas.

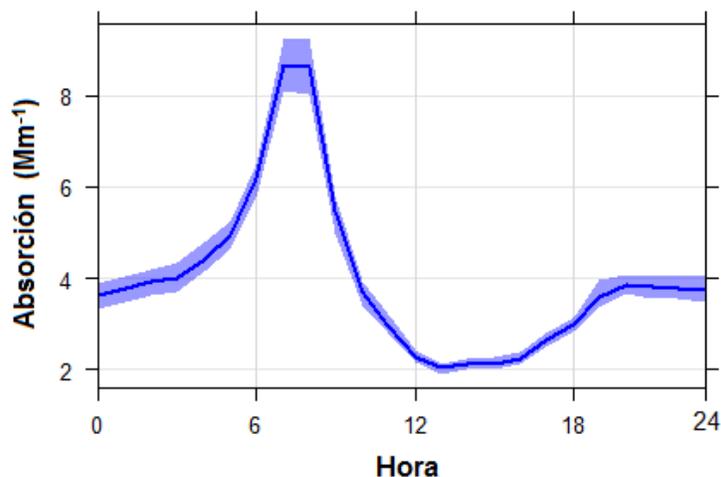


Figura 15. Ciclo diurno del coeficiente de absorción durante 2017.

Con la finalidad de comprobar si el flujo vehicular es el responsable de los altos valores del coeficiente de absorción, es decir, si los compuestos que se emiten de procesos de combustión incompleta por parte de los autos son los causantes del incremento del coeficiente de absorción, se decidió realizar un análisis del comportamiento diurno anual de este coeficiente durante cada uno de los diferentes días de la semana.

A partir de la Figura 16, se observa que entre semana los valores son relativamente altos y constantes, mientras que al observar los fines de semana se aprecia una disminución considerable los dos días, en especial el domingo cuando se reportan los valores más bajos. Por lo anterior, es posible concluir que la especie química responsable de los valores altos en el coeficiente de absorción es el carbono negro que se emite por parte de los vehículos; sin embargo, para confirmar, se analizó el comportamiento del carbono negro de igual manera que como se realizó con este coeficiente.

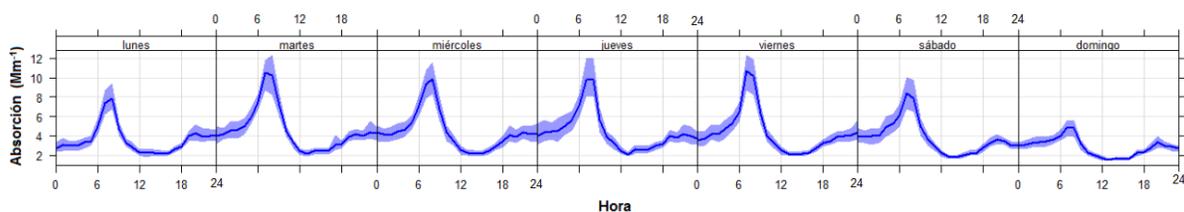


Figura 16. Comportamiento semanal del coeficiente de absorción durante 2017.

5.2 Comportamiento anual del carbono negro

El carbono negro en Juriquilla a lo largo del 2017, presento un comportamiento muy similar al observado para el coeficiente de absorción, con una variación entre $0.4 \mu\text{g m}^{-3}$ – $1.9 \mu\text{g m}^{-3}$ y un promedio anual de $0.8 (0.5) \mu\text{g m}^{-3}$ (Figura 17). Los valores más altos del carbono negro se observaron entre los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, mientras que los valores más bajos se apreciaron durante el periodo de junio a octubre. Los meses en los cuales el carbono negro tanto presento sus máximos como mínimos coinciden con los del coeficiente

de absorción, encontrándose que existe una relación estrecha entre estos dos parámetros.

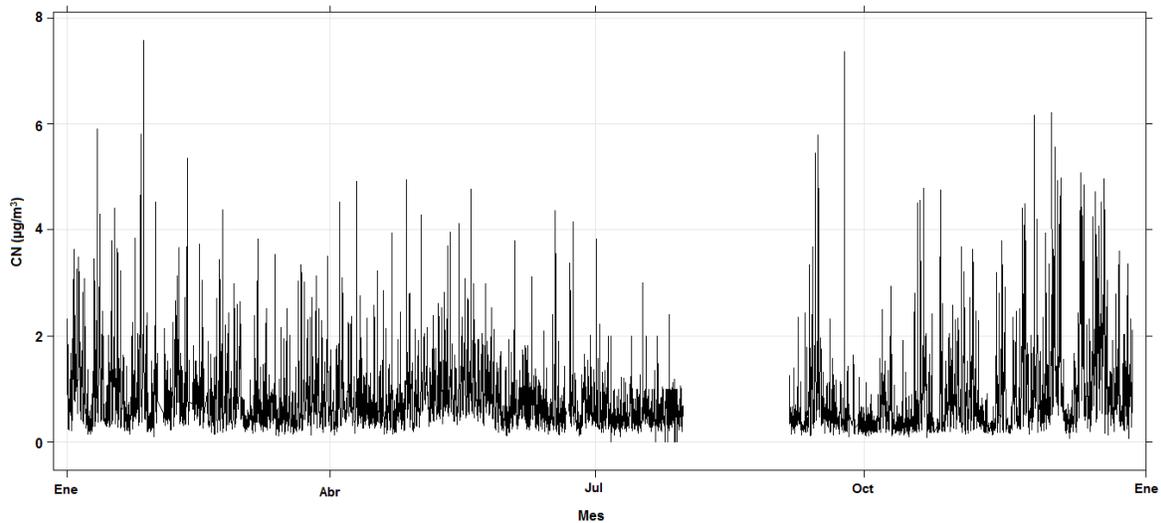


Figura 17. Variación del carbono negro durante 2017.

Con referencia al ciclo diurno del carbono negro, podemos decir que presentó un comportamiento bimodal con picos en las horas de la mañana y en la tarde (Figura 18), similares a los observados para el coeficiente de absorción. Por lo tanto, la explicación de estos picos en el comportamiento del ciclo anual del carbono negro son las mismas razones que se presentaron para el coeficiente de absorción dado que tienen la misma fuente u origen en común, que es la quema de combustibles fósiles por parte de los vehículos.

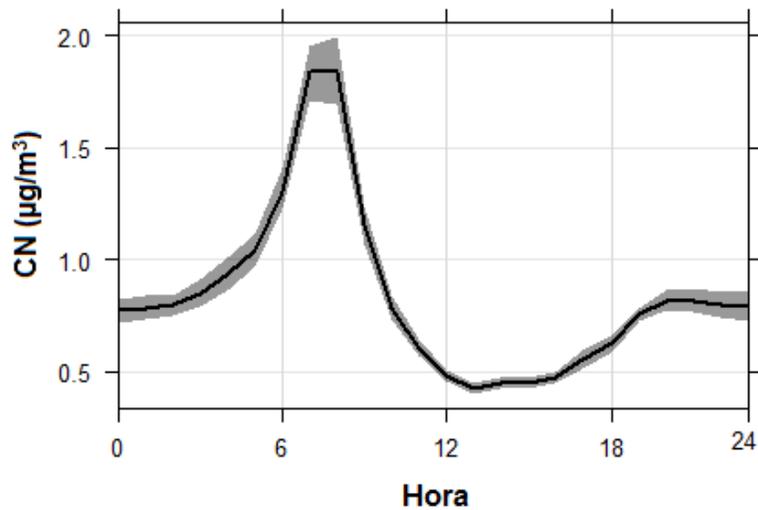


Figura 18. Ciclo diario del carbono negro durante 2017.

En la figura 19, se aprecia de manera más clara la similitud o concordancia entre los máximos y mínimos de los dos ciclos (coeficiente de absorción y el carbono negro), esto a pesar de que tienen unidades y/o concentraciones diferentes (Figura 19).

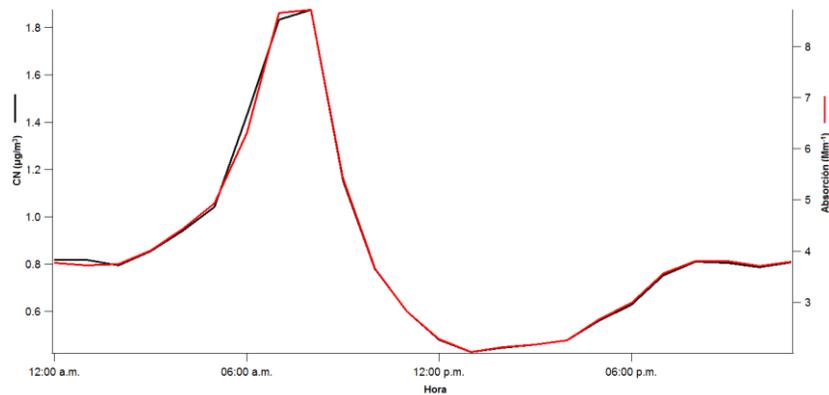


Figura 19. Comparación del ciclo diario del coeficiente de absorción y del carbono negro durante 2017.

En cuanto al ciclo diario semanal se comprobó que durante la semana la concentración de carbono negro se mantiene constante (aproximadamente 2.0 µg

m^{-3}) y durante los fines de semana baja considerablemente hasta la mitad del valor semanal, en especial el domingo (aproximadamente $1.0 \mu\text{g m}^{-3}$), indicando una fuerte correlación con el bajo flujo vehicular que hay durante los fines de semana (Figura 20).

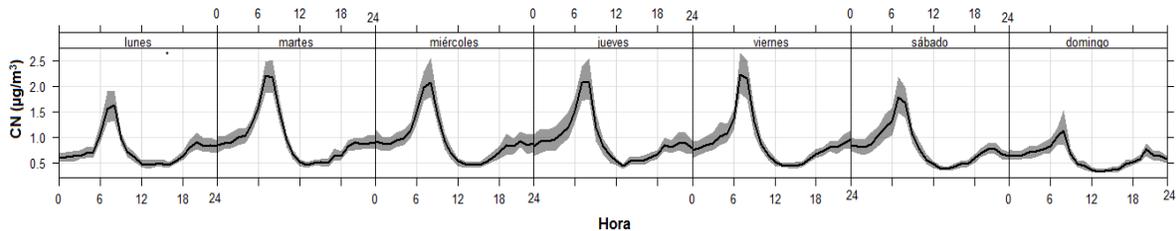


Figura 20. Comportamiento semanal del carbono negro durante 2017.

5.3 Comportamiento anual del coeficiente de dispersión

En la figura 21, podemos observar la variación anual del coeficiente de dispersión en Juriquilla durante el 2017, el cual presentó un comportamiento constante con valores oscilando entre 0.6 Mm^{-1} – 75.6 Mm^{-1} y un promedio anual de $12.6 (1.3) \text{ Mm}^{-1}$. Los valores altos de este coeficiente se registraron durante los meses abril y mayo, meses en los cuales hay una mayor temperatura e incidencia de radiación, mientras que los menores se pudieron apreciar durante los meses de junio a octubre, meses de lluvias, tal como se reportó para el coeficiente de absorción y el carbono negro.

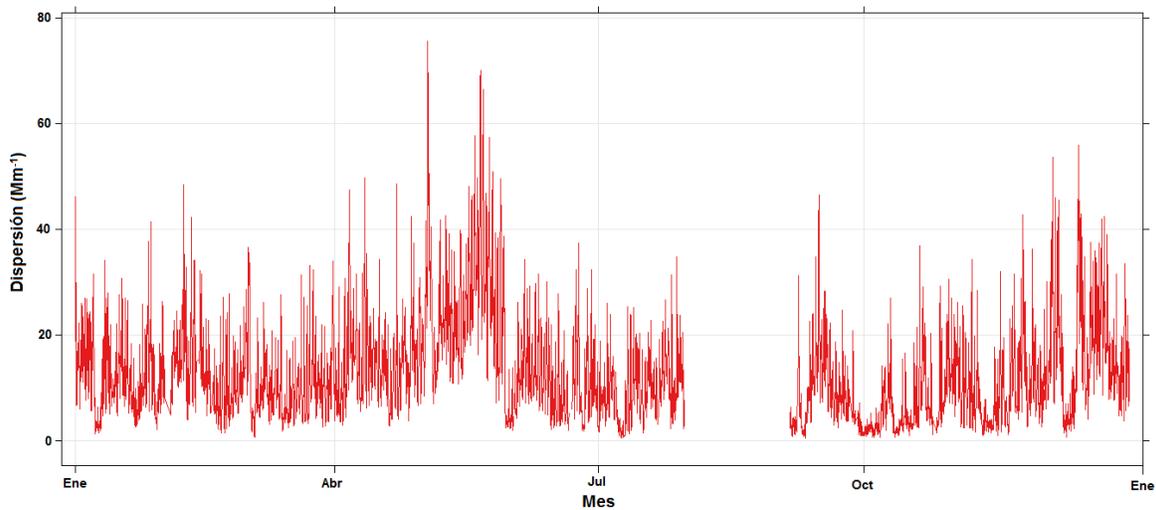


Figura 21. Variación del coeficiente de dispersión durante 2017.

El ciclo diurno promedio anual del coeficiente de dispersión (Figura 22), presenta un comportamiento bimodal con un primer pico en las horas de la mañana (08:00) con un valor de 21.0 (1.3) Mm^{-1} y otro en las horas de la tarde (19:00) con un valor de 11.5 (1.3) Mm^{-1} . Este comportamiento (máximos en las mismas horas) es muy similar al observado tanto para los coeficientes de absorción como el carbono negro, sin embargo, los aerosoles dispersantes generalmente son especies secundarias que presentan sus máximos desfasados (un tiempo después) con estos, por lo tanto se puede decir que en Juriquilla en las horas de la mañana hay presencia de aerosoles envejecidos (sulfatos y nitratos) que provocan que este coeficiente presente altos valores ese horario. Esta observación está en concordancia con lo reportado por Liñán y colaboradores, en donde se comprobó la presencia matutina de especies secundarias en las horas de la mañana en Juriquilla durante un estudio realizado entre 2014 y 2016 (Liñán *et al.*, 2019).

La disminución observada a partir de las 08:00 se atribuyen, a que durante estas horas la capa limite empieza a elevarse, por lo cual la concentración de aerosoles secundarios empieza a disminuir provocando que el coeficiente también decrezca ya que los aerosoles están más diluidos (Figura 22).

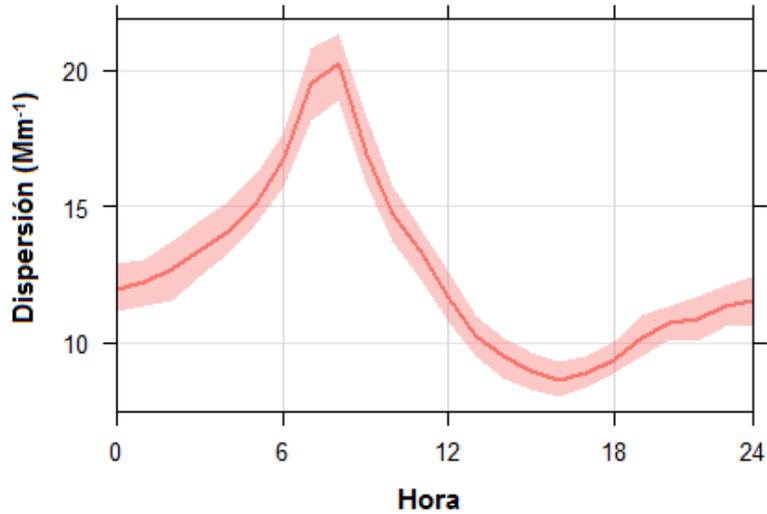


Figura 22. Ciclo diario del coeficiente de dispersión durante 2017.

En cuanto al comportamiento diario semanal del coeficiente de dispersión no se observó una notable disminución durante los fines de semana (Figura 23) como en el caso del coeficiente de absorción y carbono negro. Esto cual confirma la hipótesis de que hay un flujo permanente de aerosoles de tipo secundarios desde las regiones adyacentes hacia nuestro sitio de muestreo.

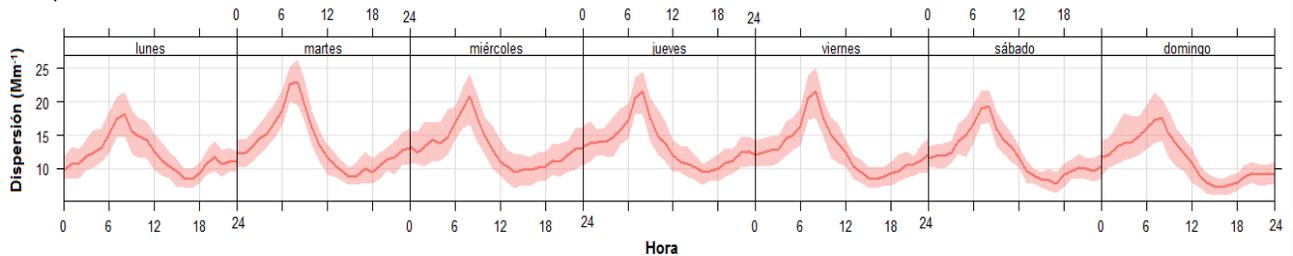


Figura 23. Comportamiento semanal del coeficiente de dispersión durante 2017.

5.4 Variabilidad estacional de las propiedades físicas y carbono negro

Con la finalidad de conocer la variabilidad estacional de los diferentes parámetros (coeficiente de absorción, carbono negro y coeficiente de dispersión) a lo largo del año, se decidió realizar un análisis dividiendo el año en tres temporadas

climáticas (Temporada 1: secas frías (noviembre – febrero); Temporada 2: secas calientes (marzo – mayo); Temporada 3: lluvias (junio – septiembre)).

A partir de la figura 24 observamos que el coeficiente de absorción presentó el mismo comportamiento diurno sin importar la temporada, es decir, los máximos se presentaron en las mismas horas; sin embargo, la diferencia radicó en los valores, obteniéndose el mayor valor de absorción en la temporada de secas frías (11.2 (1.1) Mm^{-1}) y esto se asocia principalmente a la bajas temperaturas que hay durante esta temporada que ocasionan que la concentración de contaminantes en especial la del carbono negro que se emite por proceso de quema de combustibles fósiles y biomasa aumenten en la atmósfera debido a la poca altura que tiene la capa límite (menor volumen, mayor concentración). Los valores más bajos se observaron en la temporada de lluvias (6.0 (0.6) Mm^{-1}), y esto se debe a la menor concentración de aerosoles presentes que disminuyen como consecuencia del proceso de depósito húmeda. La temporada de secas calientes presentó un máximo de 8.9 (0.9) Mm^{-1} , siendo la temporada intermedia entre las otras dos.

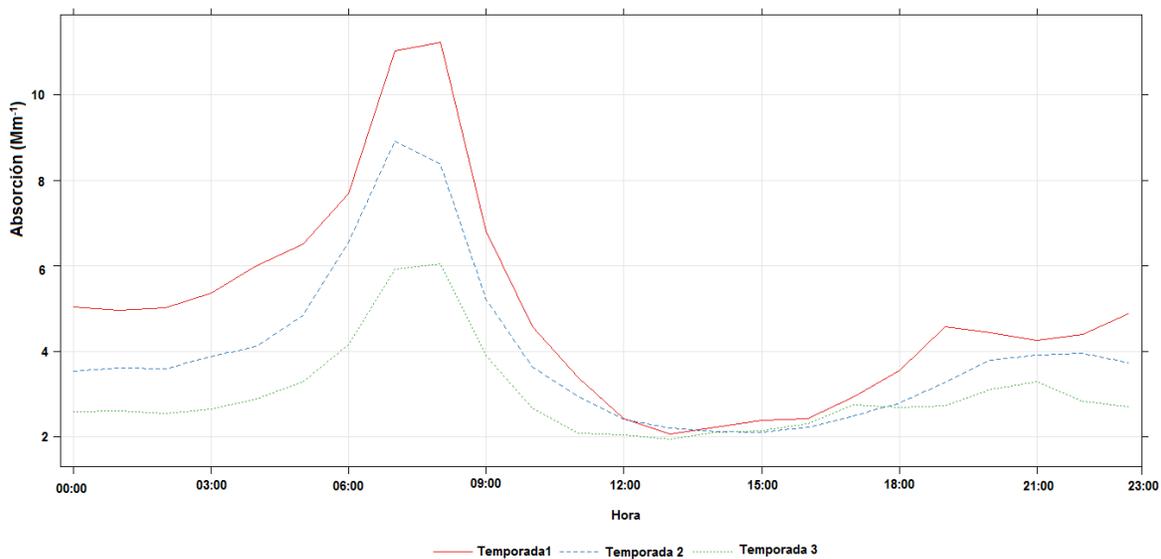


Figura 24. Comparación del coeficiente de absorción durante las tres temporadas climáticas (Temporada 1: secas frías; Temporada 2: secas calientes; Temporada 3: lluvias).

En el caso de la variación estacional del carbono negro (Figura 25) se observó la misma tendencia que para el coeficiente de absorción, es decir se alcanzó el máximo en la temporada de secas frías ($2.4 (0.6) \mu\text{g m}^{-3}$) y el mínimo en la temporada de lluvias ($1.3 (0.4) \mu\text{g m}^{-3}$). Esta similitud en comportamiento como ya se ha discutido anteriormente obedece a que tienen como principal fuente de emisión la quema de combustibles fósiles. La temporada de secas calientes presentó un máximo de $1.9 (0.5) \mu\text{g m}^{-3}$.

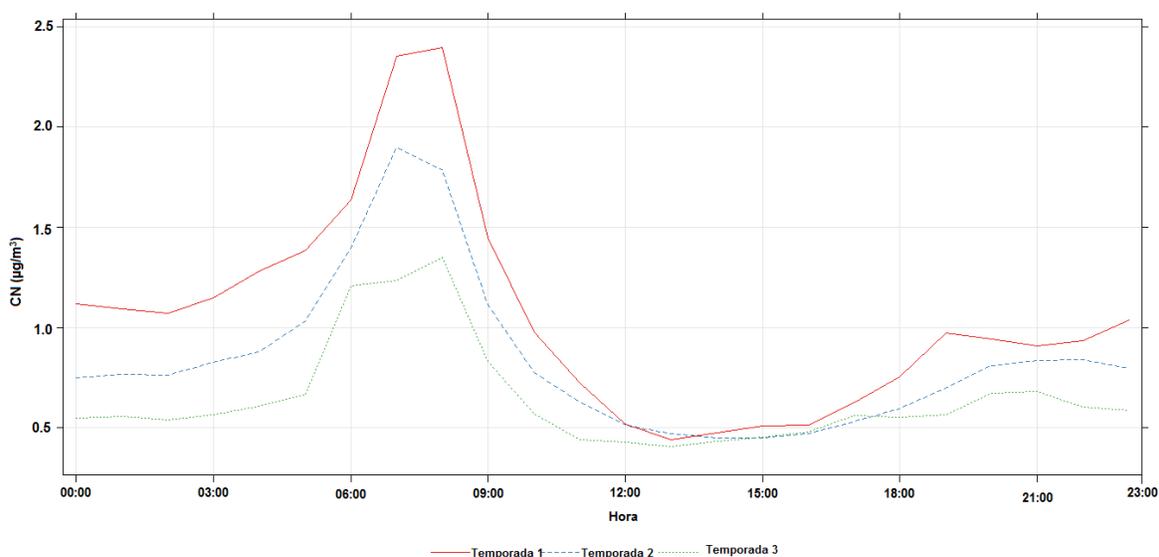


Figura 25. Comparación del coeficiente de carbono negro durante tres temporadas climáticas (Temporada 1: secas frías; Temporada 2: secas calientes; Temporada 3: lluvias).

En cuanto a la variación estacional del coeficiente de dispersión, se observó que al igual que el coeficiente de absorción (Figura 26), su ciclo presento el mismo comportamiento diurno sin importar la temporada. El máximo valor de dispersión ($26.0 (1.9) \text{Mm}^{-1}$) se alcanzó durante la temporada de secas calientes y esto se debe a que en este periodo hay una mayor incidencia de radiación, lo que conlleva a un ambiente más reactivo, es decir, se llevan a cabo más reacciones fotoquímicas en la atmosfera que generan aerosoles de tipo secundario (especies dispersantes). El menor valor de dispersión ($15.5 (1.1) \text{Mm}^{-1}$) se alcanzó en la temporada de lluvias

y como se mencionó anteriormente, esto obedece a que durante el periodo ocurren procesos de depositación húmeda que limpian la atmósfera de partículas. La temporada de secas frías presento un máximo de $21.4 (1.5) \text{ Mm}^{-1}$, siendo la temporada intermedia entre las otras dos.

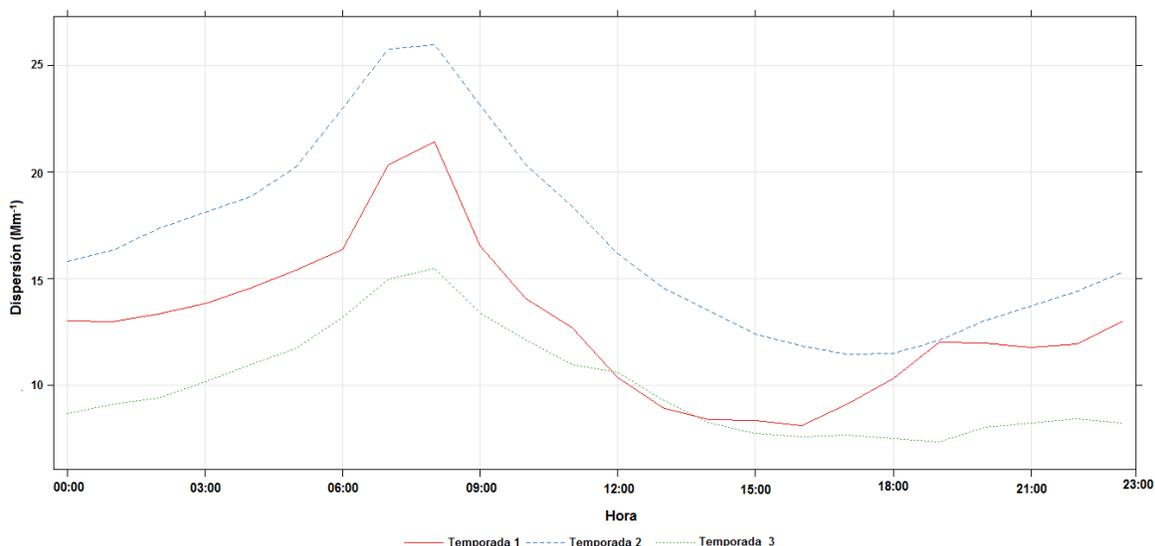


Figura 26. Comparación del coeficiente de dispersión durante las tres temporadas climáticas (Temporada 1: secas frías; Temporada 2: secas calientes; Temporada 3: lluvias).

Por otro lado, con la finalidad de apreciar de mejor manera las diferencias encontradas entre las temporadas climáticas, se decidió realizar un promedio de todas las mediciones durante cada una de las temporadas y los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de los coeficientes de absorción, carbono negro y coeficiente de dispersión a los largo del 2017.

Temporada	Coeficiente de Absorción (Mm ⁻¹)	Carbono Negro (µg m ⁻³)	Coeficiente de Dispersión (Mm ⁻¹)
Secas Frías	4.9 ± 1.1	1.0 ± 0.6	12.8 ± 1.5
Secas Calientes	3.9 ± 0.7	0.8 ± 0.5	16.8 ± 1.9
Lluvias	3.0 ± 0.6	0.6 ± 0.4	10.0 ± 1.1

A partir de la tabla 2, se observan los mayores valores del coeficiente de absorción ($4.9 (1.1) \text{ Mm}^{-1}$) y de carbono negro ($1.0 (0.6) \mu\text{g m}^{-3}$); se observan en la temporada de secas frías y, como se ha mencionado, esto obedece a la poca altura de la capa límite durante esta temporada. En el caso del coeficiente de dispersión ($12.8 (1.5) \text{ Mm}^{-1}$) la mayor concentración se determinó en la temporada de secas calientes y esto ocurre por la alta fotoquímica durante este periodo de tiempo. De manera general podemos decir que en nuestro sitio de muestreo predominaron los aerosoles dispersantes sobre los absorbentes, es decir, la atmósfera del sitio de muestreo es muy reactiva y/o está influenciada fuertemente por el transporte de aerosoles envejecidos desde otros lugares vecinos. Finalmente, en todos los casos se observó que la temporada de lluvias es donde se tienen los menores valores de todos los parámetros medidos y la causa es debe a la baja concentración de aerosoles presentes en esta temporada.

5.5 Comparación de Resultados

Con la finalidad de determinar si los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación están en el mismo orden de magnitud que otros estudios realizados en México, se decidió comparar por un lado las diferentes mediciones de los coeficientes de dispersión y absorción y por otro los valores de carbono negro.

En la tabla 3 se muestran los coeficientes de absorción y dispersión de distintos estudios realizados en México y podemos apreciar que nuestros valores estuvieron muy por debajo de los reportados, indicándonos que la cantidad de aerosoles tanto absorbentes como dispersantes presentes en nuestro sitio de muestreo es menor que los reportados para otros sitios en México, sin embargo, es importante destacar que esta gran diferencia de valores se deba por un lado a que en nuestras mediciones se utilizó un ciclón de $\text{PM}_{2.5}$ y por otro lado, que la longitud de onda fue de 870 nm a diferencia de las otras mediciones en donde no se usaron ciclones y que la longitud de onda fue menor (verde, aproximadamente 530 nm).

Tabla 3. Comparación de propiedades ópticas de los aerosoles.

Sitio	σ_a (Mm ⁻¹)	σ_s (Mm ⁻¹)	Referencias
La Merced, Cd. Mx.	80.8	225.25	Eidels-Dubovoi, 2001
Pedregal, Cd. Mx.	58	141.98	Eidels-Dubovoi, 2001
Cd. Mx.	22.3	142	Raga et al., 2001
Orizaba, Veracruz	16.74	39.32	Márquez <i>et al.</i> , 2005
Santa Ana Edo. Mex.	97.5	545	García, 2010
Ávila Camacho Edo. Mex.	44.5	49.0	García, 2010
Norte Cd. Mx.	20 – 80	60 – 170	Paredes-Miranda et al., 2009
Tijuana, Baja California	63.07	22.97	Levy et al., 2010
Querétaro	4.0	12.6	Presente estudio

Tabla 4. Comparación de concentración de carbono negro en México.

Sitio	Carbono Negro ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Referencias
Chapultepec, Cd. Mx.	3.4	Miranda et al., 1992
La Merced, Cd. Mx.	4.5	Edgerton et al., 1999
La Merced, Cd. Mx.	4.0	Watson et al., 2001
Pedregal, Cd. Mx.	2.9	Watson et al., 2001
Cd. Mx.	3.4 – 30.2	Chow et al., 2001
La Merced, Cd. Mx.	2.5	Chow et al., 2002
CENICA, Cd. Mx.	1.7 – 7.7	Salcedo et al., 2006
Centro, Guadalajara	1.3 – 8.7	Limon-Sanchez et al., 2011
Miravalle, Guadalajara	1.5 – 13.8	Limon-Sanchez et al., 2011
Vallejo, Cd. Mx.	2.2	Retama et al., 2015
Querétaro	0.8	Presente estudio

Tabla 5. Comparación de concentración de carbono negro en diferentes sitio del mundo.

Sitio	Carbono Negro ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Referencias
Área Metropolitana Chile	3.5 – 10.4	Artaxo et al., 1999
Helsinki, Finlandia	2.2 – 4.2	Viidanoja et al., 2002
Hong Kong, China	6.4	Ho et al., 2004
Xi'an, China	5.0 – 10	Cao et al., 2006
Los Angeles, USA	3.6 – 27.6	Faning et al., 2007

De igual manera que con las propiedades físicas de los aerosoles, se decidió realizar una comparación de las concentraciones de carbono negro tanto con estudios realizados en México (Tabla 4) como estudios en diferentes ciudades alrededor del mundo (Tabla 5), y se puede decir en todos los casos que nuestros

valores fueron más pequeños que muchos; sin embargo, es importante notar que muchos estudios presentan un rango más que un valor único.

6. Conclusiones

Durante la campaña de monitoreo de las propiedades físicas de los aerosoles en Juriquilla durante el año 2017 se encontró que el coeficiente de absorción presentó un promedio anual de 4.0 (0.8) Mm^{-1} y los valores más altos se registraron durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre (temporada de secas frías) dado la poca altura de la capa límite, mientras que los más bajos se registraron en los meses de junio a octubre (temporada de lluvias), meses en los que predomina la depositación húmeda. También se determinó que este coeficiente presenta un comportamiento bimodal diario con un máximo en las horas de la mañana (08:00) y otro en las horas de la tarde (20:00), los cuales coinciden con las horas de mayor afluencia vehicular.

El coeficiente de dispersión en Juriquilla presentó un promedio anual de 12.6 (1.3) Mm^{-1} y sus valores más altos se registraron durante los meses abril y mayo, en los cuales hay una mayor temperatura e incidencia de radiación (temporada secas calientes), mientras que los menores se cuantificaron durante los meses de junio a octubre (temporada de lluvias) en los que predomina la depositación húmeda. El ciclo diurno promedio anual del coeficiente de dispersión, presentó un comportamiento bimodal similar al presentado por el coeficiente de absorción indicando la presencia de aerosoles envejecidos (sulfatos y nitratos) que provocan que estos coeficientes presenten los máximos en las mismas horas.

El carbono negro presentó una concentración promedio anual de 0.8 (0.5) μgm^{-3} y su comportamiento tanto anual como el ciclo diurno fue muy similar al del coeficiente de absorción. Esto se debe a que la principal especie particulada responsable de la absorción en la atmósfera es el carbono negro.

Se observó que el comportamiento diurno anual de los diferentes coeficientes y del carbono negro no variaron a lo largo del año; sin embargo, sí hubo diferencias en los valores obtenidos.

Los resultados de las propiedades físicas de los aerosoles obtenidos en el presente proyecto de investigación estuvieron muy por debajo de los reportados en la literatura para México, indicándonos que la cantidad de aerosoles tanto absorbentes como dispersantes presentes en nuestro sitio de muestreo es menor. No obstante, es importante destacar que esta gran diferencia de valores se deba por un lado a que en nuestras mediciones se utilizó un ciclón de PM_{2.5} y por otro lado, que la longitud de onda fue de 870 nm a diferencia de las otras mediciones en donde no se usaron ciclones y que la longitud de onda fue menor (verde, aproximadamente 530 nm). De igual manera, al comparar nuestros resultados con otros realizados alrededor del mundo (tabla 5), se encontró que nuestros valores fueron más pequeños que muchos; más pequeños que estuvo dentro del rango de los estudios reportados; sin embargo, es importante notar que muchos estudios presentan un rango más que un valor único, siendo la principal fuente de CN en Juriquilla, como se demostró proviene de la quema de combustibles fósiles y esto es debido a cerca de nuestro sitio de muestreo hay tanto una carretera con abundante flujo vehicular y como la escuela de la U.N.A.M.

7. Referencias

- Arnott, W. P, Moosmüller, H., and Walker, J. W.: Nitrogen Dioxide and Kerosene-Flame. 2000. Soot Calibration of Photoacoustic Instruments for Measurement of Light Absorption by Aerosols, *Review of Scientific Instruments*. **71**, 4545–4552
- Artaxo P., Oyola P., Martinez R. 1999. Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **150**, 409 – 416.
- Baird C. 2001. Química ambiental. Editorial Reverté. New York, USA.
- Baron, P. A. and Willeke, K.: Aerosol Measurements Principles, *Techniques and Applications*, John Wiley and Sons, New York, NY, 1133 pp., 2001.
- Bohren C.F. y Huffman D.R. 1998. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. 1a Edición, Capítulo: Absorption and Scattering by an Arbitrary Particle
- Bond, T. C., Habib, G., and Bergstrom, R. W.: Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state, *J. Geophys. Res.*, **11**. 2006.
- Bravo, H., Soto, R., Sosa, R., Sánchez, P., Alarcón, A. L., Kahl, J., Ruíz, J. 2006. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México. *Environmental Pollution* **144**, 665 – 660.
- Buseck P.R, Schawartz S.E. 2003. Tropospheric Aerosols. Treatise on Geochemistry, Volume 4. Editor: Ralph F. Keeling. Executive Editors: Heinrich D. Holland y Karl K. Turekian.
- Chow J., Watson J., Pritchett L., William R., Pierson, Fraizier C., Purcell R. 1993. The dry thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U.S. air Quality studies. *Atmospheric environment* **27A**, 1185 – 1201.
- Calvo A.I., Alves C., Castro A., Pont V., Vicente A.M., Frailer R. 2013. Research on aerosol sources and chemical composition: past, current and emerging issues. *Atmospheric Research* **120**, 1 – 28.

- Cao G., Zhang X., Zheng F. 2006. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China. *Atmospheric Environment* **40**, 6516 – 6527.
- Chow J., Watson J., Crow D., Lowenthal D., Merrifield T. 2001. Comparison of IMPROVE and NIOSH Carbon Measurements. *Aerosol Science and Technology* **34**, 23 – 34.
- Chow, J., Watson J., Edgerton S., Vega E. 2002. Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997. *The Science of the Total Environment* **287**, 177 – 201.
- Edgerton S., Bian X., Doran J.C, Fast J.D., Hubbe J.M, Malone E.L., Shaw W.J., Whiteman C.D., Zhong S., Arriaga J.L., Ortiz E., Ruiz M., Sosa G., Vega E., Limon T., Guzman F., Archuleta J., Bossert J.E., Elliot S.M., Lee J.T., McNair L.A., Chow J.C., Watson J.G., Coulter, R.L., Doskey P.V., Gaffney J.S., Marley N.A., Neff W., Petty R. 1999. Particle air pollution in Mexico City: a collaborative research project. *Journal of the Air & Waste Management Association* **49**, 1221 – 2129.
- Eidels-Dubovoi S., 2001. Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City. *The Science of the Total Environment* **287**, 213 – 220.
- Falkovich A.H., Rudich Y. 2001. Analysis of semivolatile organic compounds in atmospheric aerosols by direct sample introduction thermal desorption GC/MS. *Environmental Science and technology*, **35**, 2326 – 2333.
- Fanning E., Yu R.C., Lu R. Froines J., 2007. Monitoring and Modeling of Ultrafine Particles and Black Carbon at the Los Angeles International Airport. Final Report ARB Contract #04-325. Prepared for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency. Los Angeles.
- Fernández A. 2001. Especiación química y física de metales en la materia particulada atmosférica: aplicación al estudio de la contaminación ambiental de la ciudad de Sevilla. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Finlayson-Pitts, B.J., Pitts, J.N. 2000. Chemistry of the upper and lower atmosphere. Academic Press.

- García L.Q., Castro T., Martínez-Arroyo M.A. 2010. Optical properties of aerosols: southern México City. *Atmósfera* **23**(4), 403 – 408.
- Ho K.F., Cao J.J., Harrison R.M., Lee S.C., Bau K.K. 2004. Indoor/outdoor relationships of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} in roadside environment of Hong Kong. *Atmospheric Environment* **38**, 6327 – 6335.
- Hoek G., Brunekreef B., Goldbohm S., Fischer P., Van Den Brandt P. A. 2002. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet* **360**, 1203 – 1209.
- IPCC: Climate Change The Physical Science Basis. (2007). AA(NOAA/ESRL/CSD, 325 Broadway, Boulder, CO 80305, United States.
- Jacobson M.Z. 2002. Atmospheric pollution. History, science and regulation. Cambridge E.U.A., 50 – 116.
- Jiménez A. 2018. Caracterización química de los aerosoles atmosféricos al suroeste de la ciudad de Querétaro. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Levy E.M., Zhang R., Zheng J., Tan H., Yuan Wang Y., Molina L., Takahama S., Russell L.M., Guohui L. 2014. Measurements of submicron aerosols at the California Mexico border during the Cal–Mex 2010 field campaign. *Atmospheric Environment* **88**, 308 – 319.
- Liñán-Abanto R., Peralta O., Salcedo D., Ruiz-Suárez L., Arnott P., Paredes-Miranda G., Alvarez-Ospina H., Castro T. 2019. Optical properties of particles and criteria pollutants over an urban site in Mexico City and a peri-urban site in Queretaro. *Journal of Atmospheric Chemistry*. Aceptado.
- Limon-Sanchez M.T., Carbajal-Romero P., Hernandez-Mena L., Saldarriaga-Norena H., Lopez-Lopez A., Cosio-Ramirez R., Arriaga-Colina J.L., Smith W. 2011. Black carbon in PM_{2.5}, data from two urban sites in Guadalajara, Mexico during 2008. *Atmospheric Pollution Research* **2**, 358 – 365.
- Liou K.N. 2002. An Introduction to Atmospheric Radiation, Volume 84 2nd Edition.

- Marquez C., Castro T., Muhli A., Moya M., Martinez-Arroyo A., Baez A. 2005. Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba National Park, and its relationship to air pollution transport. *Atmospheric Environment* **39**, 3877 – 3890.
- Miranda J., Morales J., Cahill T., Aldape F., Flores J. 1992. A study of elemental contents in atmospheric aerosols in Mexico City. *Atmosfera* **5**, 95 – 108.
- Moolgavkar, S. H. 2000. Air Pollution and Daily Mortality in Three U.S. Countries. *Environmental Health Perspectives* **108**, 777 – 784.
- Morales R. 2006. Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Santiago de Chile: Universitaria.
- Moya M., Castro T., Zepeda M., Baez A. 2003. Characterization of size differentiated inorganic composition of aerosol in México City. *Atmospheric Environment* **37**, 3581 – 3591.
- Nakayama, T., Suzuki, H., Kagamitani, S., Ikeda, Y., Uchiyama, A., and Matsumi, Y. 2015. *Characterization of a three wavelength photoacoustic soot spectrometer (PASS-3) and photoacoustic extinciometer (PAX)*, J. Meteorol. Soc. Jpn., **93**, 285–308.
- Paredes-Miranda G., Arnott W.P., Jimenez J.L., Aiken A.C., Gaffney J.S., Marley N.A. 2009. Primary and secondary contributions to aerosol light scattering and absorption in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics* **9**, 3721 – 3730.
- Petzold A., Niessner R. 1995. Method comparison study on soot selective techniques. *Mikrochimica acta* **117**, 215 – 237.
- Petzold A., Ogren J., Fiebig M., Laj P., Li S.M., Baltensperger U., Holzner-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiendensohler A., Zhang X.Y. 2013. Recommendations for reporting “black carbon” measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* **13**, 8365 – 8379.

- Ponce C. 2018 Caracterización química de partículas pm_{2.5} y pm₁₀ por cromatografía de intercambio iónico en Juriquilla, Querétaro. Tesis de Licenciatura en Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pope C., Dockery D.W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* **56**, 709 – 742.
- Puigcerver M., Carrascal M.D. 2008. El medio atmosférico: meteorología y contaminación. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Raga G.B., Castro T., Baumgardner D. 2001. The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City. *Atmospheric Environment* **35**, 1805 – 1811.
- Retama A., Baumgardner D., Raga G.B., Mc Meeking G.R., Walker J.W. 2015. Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics* **15**, 9693 – 9709.
- Salcedo D., Onasch T.B., Dzepina K., Canagaratna M.R., Zhang Q., Huffman J. A., De Carlo P.F., Jayne J.T., Mortimer P., Worsnop D.R., Kolb E., Johnson K.S., Zuberi B., Marr L.C. 2006. Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite. *Atmospheric Chemistry and Physics* **6**, 925 – 946.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. 2006. Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons, second edition. U.S.A.
- Schmid O., Artaxo P., Arnott W.P., Chand D., Gatti L.V., Frank G.P., Hoffer A., Schnaiter M., Andreae M. O. 2006. Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics* **6**, 3443 – 3462.
- Schwartz J., Laden, F., Zanobetti, A. 2002. The concentration-response relation between PM_{2.5} and daily deaths. *Environmental Health Perspectives* **110**, 1025 – 1029.

- Spedding D.J. 1981. Contaminación atmosférica. Reverte. Academic Press, New York 1963.
- Szidat, S., Ruff, M., Perron, N., Wacker, L., Synal, H.-A., Hallquist, M., Shannigrahi, A.S., Yttri, K.E., Dye, C., Simpson, D. 2009. Fossil and non-fossil sources of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in Göteborg, Sweden. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 1521–1535.
- Venkataraman C., Lyons J., Friedlander S. 1994. Size Distributions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Elemental Carbon. 2. Ambient Measurements and Effects of Atmospheric Processes. *Environmental Science and technology* **28**, 563 – 572.
- Viidanoja J., Sillanpaa M., Laakia J., Kerminen V.M., Hillamo R., Aarnio P., Koskentalo T. 2002. Organic and black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀: 1 year of data from an urban site in Helsinki, Finland. *Atmospheric Environment* **36**, 3183 – 3193.
- Watson J., Chow J. 2001. Estimating Middle, neighborhood, and urban scale contributions to elemental carbon in Mexico City with a rapid response aethalometer. *Journal of the Air & Waste Management Association* **51**, 1522 – 1528.
- Xie W., Pan W.P. 2001. Thermal characterization of materials using evolved gas analysis. *Journal of thermal analysis and calorimetry* **65**, 669 – 685.
- Zhu C.S., Cao J.J., Ho K.F., Chen L.W., Huang R.J., Wang Y.C., Li H., Shen Z.X., Chow J.C., Watson J. G., Su X.I., Wang Q.y., Xiao S. 2015. The optical properties of urban aerosol in northern China: a case study at Xi'an. *Atmospheric Research* **160**, 59 – 67.