



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**“EVALUACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO EN  
EL VALLE DE TOLUCA 2010”**

**T E S I S**

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

PRESENTA

**ANA KAREN DE LA CRUZ GRANADO**

TUTOR PRINCIPAL

*Dr. Oscar Augusto Peralta Rosales  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM*

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

*Dr. Ricardo Torres Jardón (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)  
Dr. Agustín García Reynoso (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)  
Dr. Harry Álvarez Ospina (Facultad de Ciencias, UNAM)  
Dr. Alberto Mendoza Domínguez (Facultad de Ingeniería y Ciencias, ITESM)*

Ciudad Universitaria, CDMX. Diciembre 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

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



*Ana Karen de la Cruz Granado*

A los Padi, para seguir brillando juntos  
y a mi grupi, por todas las oportunidades.

*BTBL*

## CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL .....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	14
1.1    Aerosoles atmosféricos .....	14
1.2    Carbono negro.....	15
1.2.1 Características fisicoquímicas .....	16
1.2.2. Fuentes de emisión .....	19
1.2.3 Efectos del carbono negro .....	22
1.3    Inventarios de emisiones.....	29
1.3.1 Elaboración de un IE .....	31
1.3.2 Incertidumbre y validación.....	33
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES .....	38
2.1    El Valle de Toluca .....	38
2.1.1 Características físicas .....	39
2.1.2 Población .....	41
2.1.3 Actividades económicas y desarrollo .....	41
2.2    Calidad del aire en el Valle de Toluca.....	42
2.2.1. Inventarios de emisiones .....	43
2.3    Validaciones de inventarios.....	47

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....	50
3.1 Área de estudio .....	50
3.2 Monitoreo .....	51
3.2.1 Campaña de monitoreo .....	51
3.2.2 Descripción de los Sitios de monitoreo .....	52
3.2.3 Equipos de medición .....	55
3.3 Validación de datos .....	60
3.3.1. Incertidumbre de las mediciones .....	62
3.4 Correlación carbono negro-monóxido de carbono .....	63
3.4.1 Relación $\Delta BC/\Delta CO$ .....	64
3.5 Cocientes de contaminantes primarios .....	64
3.6 Estimación de la emisión de carbono negro .....	65
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	68
4.1 Patrón de emisión de contaminantes .....	68
4.2 Correlación CO-BC .....	70
4.2.1 Relación lineal CO-BC .....	70
4.2.2 Análisis de correlación CO-BC por agrupación de datos .....	75
4.2.3 Relación $\Delta BC/\Delta CO$ .....	78
4.3 Estimación de la emisión de carbono negro .....	80
4.3.1 Cocientes de contaminantes .....	80
4.3.2 Estimación de la emisión de carbono negro .....	84
4.3.3 Comparación con otros inventarios de emisiones .....	89
4.4 Análisis meteorológico .....	90
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	97
5.1 Conclusiones .....	97
5.2 Recomendaciones .....	99

REFERENCIAS .....	101
ANEXO 1 .....	110
Interferencia del carbono orgánico en las mediciones de carbono negro.....	110
ANEXO 2 .....	111
Incertidumbre en las mediciones de concentración de contaminantes .....	111
ANEXO 3 .....	115
Análisis de correlación CO (ppm) vs BC (ng/m <sup>3</sup> ).....	115
ANEXO 4 .....	118
Análisis por agrupación de datos en periodo matutino (6:00-10:00 horas).....	118
ANEXO 5 .....	119
Cocientes NO <sub>x</sub> /CO en base molar .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Cantidad de partículas por tipo de ambiente .....	15
<b>Tabla 2</b> Área de ingreso de PM según su tamaño.....	26
<b>Tabla 3</b> Afectaciones a la salud por exposición a carbono negro.....	28
<b>Tabla 4</b> Etapas de elaboración de un inventario de emisiones .....	32
<b>Tabla 5</b> Metodologías de elaboración de inventarios de emisiones con base en el tipo de fuente evaluada. ....	44
<b>Tabla 6</b> Porcentaje de equivalencia de BC por tipo de fuente.....	45
<b>Tabla 7</b> Emisión de BC por tipo de fuente .....	46
<b>Tabla 8</b> Promedio anual de BC en la ZMVT.....	46
<b>Tabla 9</b> Relación de equipos usados, principio de medición, resolución temporal aplicada en campaña, límite de detección y otras características de la medición.....	60
<b>Tabla 10</b> Incertidumbre de la medición de contaminantes .....	63
<b>Tabla 11</b> Clasificación de los municipios de Valle de Toluca respecto a su grado de urbanización.....	67
<b>Tabla 12</b> Coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) CO-BC.....	73
<b>Tabla 13</b> Equivalencia de 1 ppm de CO a $\text{ng/m}^3$ de BC.....	74
<b>Tabla 14</b> Cocientes CO/NO <sub>x</sub> en base molar.....	83
<b>Tabla 15</b> Comparación del cociente CO/NO <sub>x</sub> .....	83
<b>Tabla 16</b> Estimación de las emisiones de CO y BC en los municipios del Valle de Toluca .....	85
<b>Tabla 17</b> Emisiones contaminantes reportadas para 2004 y 2010.....	86
<b>Tabla 18</b> Comparación entre cocientes CO/BC de las mediciones respecto al cociente del inventario. ....	87
<b>Tabla 19</b> Comparación entre las emisiones estimadas y las reportadas en el inventario. ...	87
<b>Tabla 20</b> Incertidumbre de la estimación de emisiones.....	88
<b>Tabla 21</b> Comparación de la emisión estimada de CO con la reportada en distintos inventarios. ....	90



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Estructura del carbono negro .....	16
<b>Figura 2</b> Partículas de carbono negro (a) conglomerados (b) esférulas. ....	17
<b>Figura 3</b> Rango de absorción de aerosoles carbonosos. ....	18
<b>Figura 4</b> Perfil de emisión de PM <sub>2.5</sub> en motores de diésel.....	21
<b>Figura 5</b> Comparación del forzamiento radiativo de distintas especies químicas.....	24
<b>Figura 6</b> Comportamiento del carbono negro en el ambiente .....	25
<b>Figura 7</b> Ingreso de PM al cuerpo humano. ....	26
<b>Figura 8</b> Esquema típico del proceso de gestión de la calidad del aire. ....	30
<b>Figura 9</b> Representación gráfica del modelo de caja simple .....	36
<b>Figura 10</b> Ubicación del Valle de Toluca.....	38
<b>Figura 11</b> Campo de viento en el Valle de Toluca. ....	40
<b>Figura 12</b> Principales vialidades en el Valle de Toluca. ....	42
<b>Figura 13</b> Ubicación de los puntos de monitoreo.....	52
<b>Figura 14</b> Sitio Tollocan.....	53
<b>Figura 15</b> Sitio Zinacantepec.....	54
<b>Figura 16</b> Sitio San Antonio la Isla .....	55
<b>Figura 17</b> Esquema de funcionamiento del PAS.....	56
<b>Figura 18</b> Esquema de funcionamiento del Etalómetro. ....	57
<b>Figura 19</b> Concentración de fondo del CO.....	61
<b>Figura 20</b> Serie de tiempo (promedios horarios) de contaminantes en Tollocan. ....	68
<b>Figura 21</b> Series de tiempo (promedios horarios) de contaminantes en San Antonio la Isla .....	69
<b>Figura 22</b> Series de tiempo (promedios horarios) de contaminantes en Zinacantepec .....	69
<b>Figura 23</b> Correlación CO-BC en el sitio urbano.....	71
<b>Figura 24</b> Correlación CO-BC en el sitio periurbano.....	72
<b>Figura 25</b> Correlación CO-BC en el sitio suburbano .....	72
<b>Figura 26</b> Relación CO-BC en el horario nocturno.....	75
<b>Figura 27</b> Correlación de promedios horarios CO vs BC por agrupación de datos. ....	77
<b>Figura 28</b> Variación $\Delta BC/\Delta CO$ ( $\mu\text{g BC}/\mu\text{gCO}$ ) durante los días hábiles. ....	79
<b>Figura 29</b> Variación $\Delta BC/\Delta CO$ ( $\mu\text{g BC}/\mu\text{gCO}$ ) durante los fines de semana .....	80
<b>Figura 30</b> Cocientes de contaminantes primarios en el sitio urbano .....	81
<b>Figura 31</b> Cocientes de contaminantes primarios en el sitio periurbano.....	82
<b>Figura 32</b> Cocientes de contaminantes primarios en el sitio suburbano .....	82
<b>Figura 33</b> Variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento en Tollocan. ....	91
<b>Figura 34</b> Variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento en San Antonio la Isla.....	91

<b>Figura 35</b> Variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento en Zinacantepec. ....	92
<b>Figura 36</b> Rosas de viento de contaminantes de para el sitio urbano. ....	94
<b>Figura 37</b> Rosas de viento de contaminantes para el sitio periurbano. ....	95
<b>Figura 38</b> Rosas de viento de contaminantes para el sitio suburbano. ....	96

## RESUMEN

Se realizó la evaluación del inventario de emisiones “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México” del Valle de Toluca 2010 a través de la técnica top-down, que utiliza mediciones de la concentración de contaminantes tomadas en superficie. Dichas mediciones fueron recolectadas en el proyecto CCA-PT17, que formó parte de la campaña de monitoreo realizada por la Universidad Autónoma de México durante febrero a abril de 2017.

Para realizar dicha evaluación se consideraron 3 sitios de monitoreo clasificados con base en su grado de urbanidad. Tollocan (sitio urbano), Zinacantepec (suburbano) y San Antonio la Isla (periurbano). En estos sitios se registró la concentración de los contaminantes carbono negro (BC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y material particulado PM<sub>2.5</sub>. Así como parámetros meteorológicos tales como la velocidad y dirección de viento.

Debido a que a través de series de tiempo se identificó un patrón de comportamiento muy similar entre los contaminantes CO y BC y el análisis de regresión lineal por agrupación de datos mostró que el 90% del BC puede ser explicado a través del CO; se realizaron cocientes (base masa) de los contaminantes. Como lo indica la técnica top-down se consideraron únicamente los datos del horario matutino (6:00-10:00 hora local).

Mediante los cocientes y el cálculo de la tasa de motorización (relación entre la cantidad de habitantes y vehículos en el Valle de Toluca) se estimaron las emisiones de CO y BC, mismas que se compararon con las reportadas en el inventario de emisiones. Se encontró que el inventario de emisiones subestimaba tanto las emisiones de CO como las de BC, ya que reportó  $5.90 \times 10^5$  Mg CO/año y 742 Mg BC/año, mientras que se estimaron  $(3.15 \pm 0.02) \times 10^6$  Mg CO/año y  $(1.15 \pm 0.09) \times 10^3$  BC/año respectivamente.

## INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es un indicador del grado de afectación de los contaminantes atmosféricos sobre un área determinada. Las especies químicas que se consideran para expresar este indicador son llamados contaminantes criterio e incluyen ozono (O<sub>3</sub>), material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) (EPA, 2018b). Sin embargo, existen otros contaminantes en la atmósfera que, por sus características fisicoquímicas representan un daño potencial tanto al ambiente como a la salud humana. Este es el caso del carbono negro (BC por su abreviación en inglés: Black Carbon).

Este contaminante (BC) es una forma sólida (partícula) del carbono, cuyas características principales son un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros, absorción de la luz en un amplio rango de longitud de onda y un tiempo de vida de un par de días en la atmósfera (Sasser et al., 2012). La presencia del BC en el ambiente promueve efectos negativos; dado su pequeño tamaño puede ingresar fácilmente al organismo humano provocando afectaciones respiratorias, sanguíneas (Gong et al., 2003) y vasculares (Barath et al., 2010), a su vez en el ambiente genera un incremento de la temperatura como consecuencia de la absorción de la luz (Sasser et al., 2012).

El carbono negro se genera por procesos de combustión incompleta (Bockhorn, 1994) y, con base en las características de esta reacción química se generarán cantidades distintas de BC (Seinfeld y Pandis, 2006), considerando que a mayor peso molecular del combustible y menores temperatura y cantidad de oxígeno, se producirá mayor cantidad de carbono negro (Sasser et al., 2012).

Es común que en centros poblacionales se tengan afectaciones de calidad del aire por el BC como consecuencia de actividades diversas; desde el uso de combustibles fósiles en vehículos automotores o en la industria, así como por quema de biomasa que incluye el uso de leña para la cocción de alimentos o quemas a cielo abierto en zonas agrícolas. Un sitio que es afectado por la presencia del BC y que, hasta el momento, ha tenido poca atención para resolver dichas afectaciones es el Valle de Toluca.

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) es la segunda área conurbana más importante del Estado de México (SMAGEM, 2012b). Está integrada por 22 municipios y cuenta con una extensión de 2669.2 km<sup>2</sup> siendo considerada como uno de los centros poblacionales más importantes de la región centro de México, ya que hasta 2015 contaba con 3.5 millones de habitantes (INEGI, 2015a).

Una herramienta de gestión de la calidad del aire que los gobiernos utilizan con frecuencia son los inventarios de emisiones; ya que a través de ellos es posible identificar y cuantificar las fuentes de emisión en un área determinada (SEMARNAT, 2019a) para posteriormente

diseñar estrategias que reduzcan las afectaciones detectadas. Sin embargo, en muchos casos la elaboración de inventarios presenta incertidumbres no cuantificadas. En el caso del Valle de Toluca, se detecta un problema importante: dada la falta de mediciones de BC, las emisiones de este contaminante mostradas en el reporte “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México” fueron estimadas a través de emisiones de monóxido de carbono y material particulado  $PM_{2.5}$  (SMAGEM, 2010) y a su vez, éstas se basaron en factores de emisión no locales. Por ello se considera que las primeras tienen un nivel de incertidumbre significativo. Se destaca el hecho de que dicho reporte tiene el mismo objetivo que un inventario de emisiones y es, hasta el momento, el único esfuerzo documentado que el gobierno del Estado de México ha realizado referente a las emisiones de BC.

Debido a la incertidumbre asociada al inventario de emisiones se busca conocer a través de mediciones *in situ* tanto de BC como de otros compuestos, si las tasas de emisión reportadas están subestimadas o sobreestimadas, es decir, se requiere la evaluación del inventario. La importancia de ello radica en que la correcta identificación de concentraciones de BC llevaría a una mejor implementación de políticas de control que busquen la mejora de la calidad del aire. Para obtener las mediciones con las que se evaluó el inventario-, se realizó una campaña de monitoreo entre febrero a abril de 2017 en cuatro sitios representativos del Valle de Toluca. Se midieron parámetros meteorológicos (radiación solar, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento) y concentraciones ambientales de carbono negro, gases criterio y material particulado en una zona urbana, una suburbana y dos periurbanas. Por otro lado, se tomaron muestras de gases y partículas para ser analizadas en distintos laboratorios y se realizaron mediciones de perfil de concentración vertical a través de globos cautivos.

La campaña fue un esfuerzo conjunto entre el Centro de Ciencias de la Atmósfera, las Facultades de Química y Ciencias, así como los Institutos de Geofísica y Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. La obtención de datos durante la campaña fue enfocada para obtener la matriz de datos de las concentraciones y los parámetros medidos, así como elaborar propuestas para mejorar los inventarios de emisiones del Estado de México (Peralta, 2018).

Con base en los datos obtenidos durante esa campaña, la presente investigación busca evaluar el inventario de emisiones de BC en el Valle de Toluca, si bien este inventario puede considerarse un tanto obsoleto ya que su año de publicación fue 2010, se decidió evaluarlo ya que es, hasta el momento, el único reporte que el Gobierno del Estado de México tiene para este contaminante. De esta manera, se busca identificar si las emisiones reportadas corresponden a las reales, es decir aquellas que serían obtenidas a través de cálculos basados en las mediciones realizadas.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el inventario de emisiones de carbono negro en el Valle de Toluca 2010 a través de la estimación de emisiones obtenida mediante uso de datos ambientales (mediciones en superficie de concentración de contaminantes).

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar la correlación que tiene el carbono negro con el monóxido de carbono (CO) en cada uno de los sitios de monitoreo, considerando que los resultados presentados en el inventario de emisiones fueron basados en la cantidad de CO presente en el Valle de Toluca.
2. Estimar las emisiones de carbono negro (BC) en tres sitios de monitoreo en el Valle de Toluca (Tollocan, sitio urbano, Zinacantepec, sitio suburbano y San Antonio la Isla, sitio periurbano) con base en mediciones de concentración de contaminantes tomadas en superficie.
3. Identificar si las emisiones de carbono negro reportadas en el inventario “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México 2010” se encuentran en concordancia con las emisiones estimadas con base en mediciones de concentración de contaminantes (aplicación de la técnica top-down).

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Aerosoles atmosféricos

Las partículas (líquidas y sólidas) son un componente primordial de la atmósfera, ya que su presencia tiene consecuencias distintas muy importantes en la dinámica, en las reacciones químicas y en los balances que ocurren en el sistema atmosférico. Su estudio resulta muy complejo, sin embargo, es necesario conocer los distintos aspectos de las partículas, por ejemplo; su tamaño, distribución, composición química, propiedades ópticas, entre otros.

Una definición que es imprescindible en el estudio de las partículas es el término aerosol atmosférico, el cual se refiere a una suspensión estable de partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso (atmósfera). Típicamente, las partículas que se encuentran en la atmósfera tienen un diámetro aproximado entre 0.002 y 100 $\mu\text{m}$  (Pitts, 1999). Los aerosoles atmosféricos pueden ser clasificados según su origen, si provienen directamente de una fuente de emisión son llamados “primarios”, mientras que aquellos que se generan por procesos de transformaciones fisicoquímicas en la atmósfera se conocen como “secundarios”(Jacobson, 2002). Por otro lado, según la fuente que los genere pueden ser naturales o antropogénicos, esto repercute en su composición química y, por lo tanto, sus características y su impacto.

En áreas urbanas los aerosoles atmosféricos que son generados provienen tanto de emisiones industriales o vehiculares (primarios) como de procesos fisicoquímicos (secundarios), mientras que los rurales tienen una mayor influencia natural y moderada influencia antropogénica. A su vez, en las zonas urbanas predomina una mayor cantidad de partículas respecto a otro tipo de áreas como las zonas rurales (Seinfeld y Pandis, 2006).

La razón por la cual en zonas urbanas existe mayor cantidad de partículas (Tabla 1) es porque existen más fuentes que las aportan; estas fuentes generan una gran cantidad de contaminantes. Uno de los contaminantes más emitidos a través de las actividades antropogénicas es el **BC**, el cuál es generado a través de procesos de combustión incompleta y llamado coloquialmente “hollín”.

**Tabla 1** Cantidad de partículas por tipo de ambiente

<b>Tipo</b>	<b>PM<sub>1</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>
Urbano (contaminado)	30-150
Marino	1-4
Rural	2.5-8
Continental Remoto	0.5-2.5

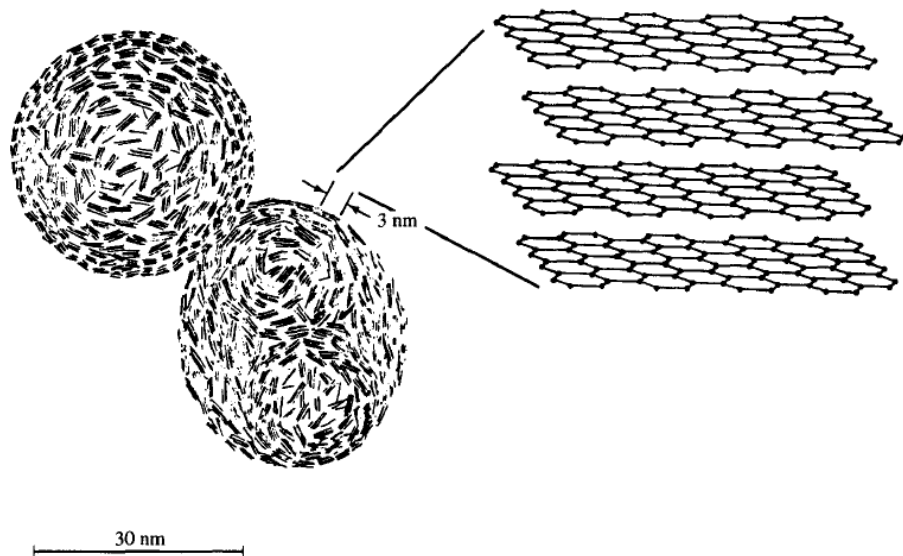
Fuente: (Seinfeld y Pandis, 2006)

## 1.2 Carbono negro

El carbono es uno de los elementos más abundantes en la composición elemental de los aerosoles atmosféricos (Gelencsér, 2004). Es por ello que existen varias subdivisiones respecto al tipo de carbono que contienen las partículas. Una generalización de este tipo de partículas es el término hollín, el cual, es un arreglo de componentes orgánicos que es soluble en solventes orgánicos y que contiene material particulado carbonoso llamado “carbono elemental (EC por su abreviación en inglés)”, “carbono grafitico” o “carbono negro” (Gelencsér, 2004). En la Figura 1 se muestra la estructura del BC, primero como una esférula (que es el modo en que se observaría como material particulado), posteriormente aparece un acercamiento de su estructura química. Ésta es variable y depende del modo en que se genere, sin embargo, siempre es bastante compleja.

Es común variar el uso de esta terminología con base en el método mediante el cual se determine la composición de las partículas. Es decir, el término *carbono elemental* suele utilizarse cuando se optó por el uso de métodos de determinación térmicos o químicos; si se utiliza algún método de espectroscopia o microscopía electrónica de alta resolución para la detección de la estructura cristalina del aerosol carbonoso, se utiliza el término *carbono grafitico*. A su vez, el uso de métodos ópticos y por lo tanto se hace alusión a la propiedad de las partículas para absorber la luz visible, se habla de *carbono negro (BC)* (Gelencsér, 2004).





**Figura 1** Estructura del carbono negro (Seinfeld y Pandis, 2006)

### *1.2.1 Características fisicoquímicas*

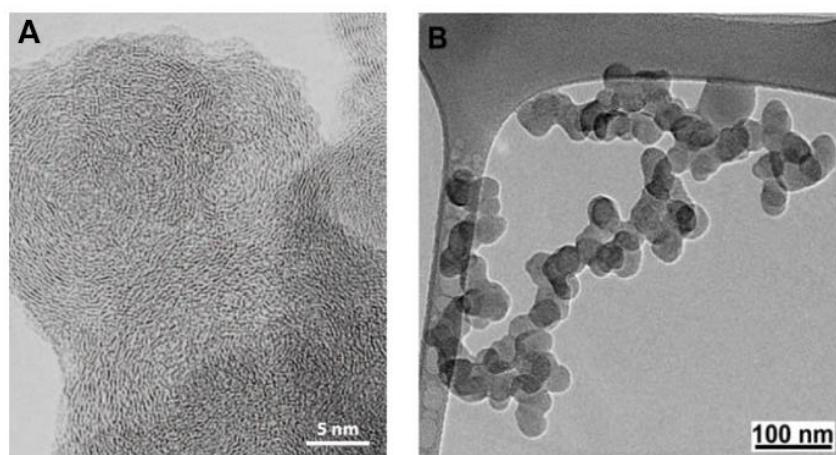
Formalmente, el BC puede ser definido como una sustancia compuesta de carbono con la capacidad de absorber la luz visible que es caracterizada por su resistencia a la transformación química (Ogren y Charlson, 1983; Petzold et al., 2013). Más que como una forma aislada y elemental de carbono, el BC debe ser entendido como un polímero orgánico tridimensional; se considera que tiene una fracción pequeña de oxígeno en su composición, sin embargo, es común que tenga algunos grupos funcionales que puedan modificar su comportamiento en la atmósfera (Gelencsér, 2004).

En general, algunas de las características fisicoquímicas del BC son:

- Es insoluble en agua, en solventes orgánicos incluyendo metanol y acetona y en otros componentes de los aerosoles atmosféricos (Bond et al., 2013). Por lo tanto, el BC tiene una baja tasa de remoción a través de las nubes o procesos de precipitación (Petzold et al., 2013).
- Consiste en agregados de pequeñas esferulas de carbono con un diámetro <10 nm hasta 50 nm aproximadamente (Bond et al., 2013). De esta manera, el BC posee una alta capacidad de absorción de otras especies; por otro lado, cuando el aerosol envejece, estas esferulas tienden a formar conglomerados (Petzold et al., 2013).
- Posee una estructura grafítica (gran cantidad de átomos de carbono  $sp^2$  unidos), lo cual le confiere la propiedad de tener una baja reactividad química en la atmósfera, así como una baja remoción a través de procesos químicos y una fuerte absorción óptica (Petzold et al., 2013).

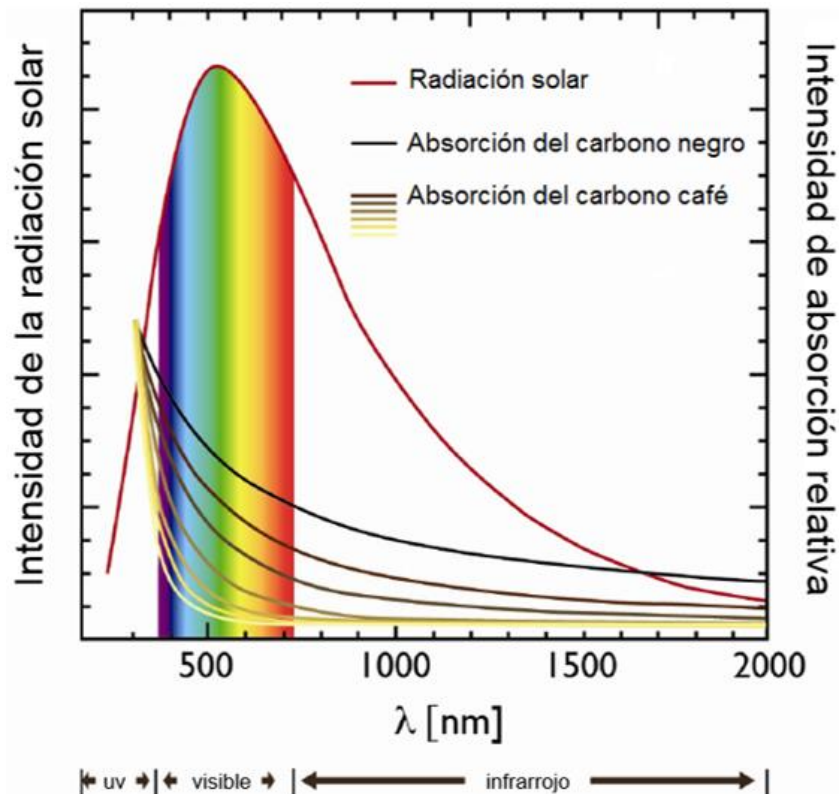
Cabe mencionar que con el paso del tiempo sucede un fenómeno conocido como envejecimiento del aerosol, y parte de los procesos que lo conforman son la coagulación, condensación y reacciones fotoquímicas (Weingartner et al., 1997). A través de este proceso las características del BC se modifican por lo que el que ha sido recién emitido a la atmósfera se comportará de manera distinta al que se encontraba previamente en ella. Las partículas que son recién emitidas son la forma más estable del BC (Gelencsér, 2004).

Adicional al cambio en las características fisicoquímicas del BC por el fenómeno de envejecimiento, es importante destacar que, durante su permanencia en la atmósfera, las partículas tienden a incrementar su tamaño. El BC pasa de formar parte del material particulado ultrafino (esférulas recién emitidas) al material particulado fino, es decir con un diámetro de partícula menor a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ) (Figura 2).



**Figura 2** Partículas de carbono negro (a) conglomerados (b) esférulas. (Pósfai y Buseck, 2010). (a) y (Alexander et al., 2008) (b).

Una de las propiedades más sobresalientes del BC es su capacidad de absorción de la luz. A la superficie de la Tierra llega una fracción de radiación que es emitida por el Sol. Esta radiación comienza alrededor de los 280 nm hasta los 2000 nm. El BC tiene la capacidad de absorber en todo ese rango teniendo una absorción máxima en 880 nm (Ran et al., 2016), debido a que la absorción por el resto de los aerosoles atmosféricos es significativamente menor en esa longitud de onda (Zhang et al., 2018). Como consecuencia de esta propiedad esta especie presenta su característico color negro de tal manera que puede incrementar la temperatura ambiental a través del aumento de energía en el sistema climático de la Tierra. (Figura 3) (Sasser et al., 2012).



**Figura 3** Rango de absorción de aerosoles carbonosos. (Sasser et al., 2012)

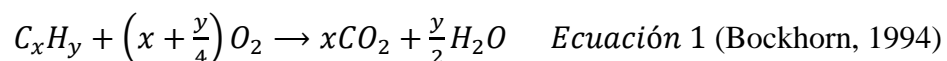
Existe otro tipo de aerosol carbonoso que tiene la capacidad de absorber la luz; el carbono café. Éste es diferenciado del BC debido a que contiene una mayor combinación de elementos como hidrógeno y oxígeno ligados a los átomos de carbono. Como se observa en la Figura 3, tiene rangos de absorción similares a los del BC, sin embargo, con una capacidad mucho menor.

El material particulado carbonoso puede diferenciarse entre sí por distintas propiedades fisicoquímicas; mientras el BC es una sustancia estable, refractoria (es decir, mantiene su forma aún a muy altas temperaturas cercanas a 400 K) y con alta capacidad de absorción por sección (al menos  $5 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  con un máximo en 550 nm) (Bond et al., 2013), el carbono café (cuya apariencia se debe a la absorción no uniforme en el rango visible (Petzold et al., 2013)) es una sustancia con poca capacidad de absorción (con un máximo de absorción en el UV) (Sasser et al., 2012) y puede ser soluble en agua (Sarkar et al., 2019). Las diferencias entre ambos se deben a su composición química, la cual depende del origen de emisión de ambos aerosoles. Las fuentes primarias del carbono café son las quemadas de biomasa, suelo húmico y sustancias húmicas (HULIS) (Graber y Rudich, 2006), materiales alquitranados de la

combustión ( Pósfai et al., 2004; Andreae y Gelencsér, 2006) y algunos combustibles. Y sus fuentes secundarias pueden ser emisiones antropogénicas secundarias (Gao y Zhang, 2018). Al compararlo con el BC, se observa que éste tiene únicamente un origen primario a través de fuentes como la quema de combustibles fósiles (Sasser et al., 2012).

### 1.2.2. Fuentes de emisión

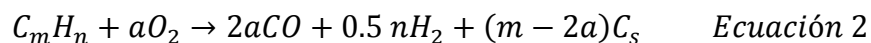
El proceso a través del cual se genera el BC, es el proceso químico de oxidación conocido como combustión. Hay dos maneras en las que puede darse un proceso de combustión; de manera completa (Ecuación 1) e incompleta (Ecuación 2). La primera (ideal) implica que todos los reactivos involucrados se conviertan a productos (proceso eficiente), mientras que la segunda se refiere al proceso en el que se generan productos “secundarios” (proceso ineficiente). Si ocurre una combustión completa a base de un combustible carbonoso, el producto principal será el CO<sub>2</sub>.



El proceso de combustión incompleta emite productos adicionales, tanto en la fase gas como material particulado (Sasser et al., 2012), dentro de esos productos generados se encuentran el monóxido de carbono y una amplia mezcla compleja de aerosoles carbonáceos como el carbono negro. Cabe señalar que el estudio de éstos resulta de gran relevancia dado su potencial daño a la salud humana (Bockhorn, 1994).

La cantidad y características de los productos generados durante la combustión dependerán de las condiciones de ésta, por ejemplo, de la cantidad de oxígeno disponible, la temperatura de la flama, así como el tipo y la calidad del combustible. Un aspecto crítico en la formación del carbono negro durante la combustión, es la proporción entre la relación C/O, es decir, la cantidad de carbono en el combustible y la cantidad de oxígeno para realizar el proceso (Seinfeld y Pandis, 2006).

Considerando que la reacción de combustión puede ser representada con la siguiente relación estequiométrica:



Y que los términos  $C_s$  y  $C_mH_n$  son el hollín formado y el combustible carbonoso, respectivamente; se observa que si la relación C/O es  $>1$  ( $m > 2a$ ), es decir, hay mayor cantidad de carbono respecto a la cantidad de oxígeno disponible, se dará la formación del hollín (BC) (Seinfeld y Pandis, 2006). De esta manera, si existe suficiente oxígeno en combinación con

altas temperaturas, el hollín es completamente oxidado y, por lo tanto, la emisión de BC será mínima (Sasser et al., 2012).

Como se mencionó anteriormente, el tipo de combustible tiene gran influencia en la emisión de BC. Un aspecto importante es que las moléculas del combustible se mezclen con las del oxígeno para que suceda la combustión; a continuación, se menciona cómo el estado de agregación del primero tiene influencia en la emisión de BC:

- i. Combustibles en fase gaseosa. La mezcla entre éste y el oxígeno resulta fácil, por lo cual la emisión de partículas carbonosas es mínima (Sasser et al., 2012).
- ii. Combustibles líquidos. Cuando las moléculas del combustible se caracterizan por tener un alto peso molecular, el proceso de volatilización de éstas resulta complicado, por lo cual, se genera una gran cantidad de material particulado. Cabe señalar que a mayor complejidad y peso molecular del combustible, se emitirá mayor cantidad de BC; por ello, la combustión de diésel genera mayor cantidad de este contaminante respecto a un proceso similar con gasolina (Sasser et al., 2012).
- iii. Combustibles sólidos. La quema de estos combustibles genera una gran cantidad de material particulado, sin embargo, dado a que generalmente contienen mucha humedad, los productos de su combustión son en gran medida partículas de carbono café y vapor de agua (Sasser et al., 2012).

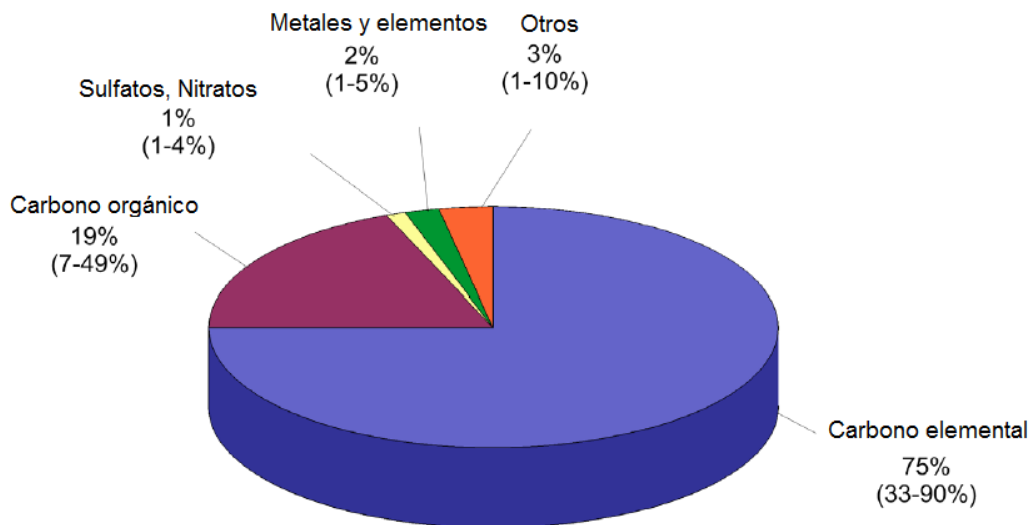
Si bien prácticamente cualquier proceso de combustión genera BC, éstos pueden dividirse en dos grupos para analizar sus fuentes de emisión.

#### 1.2.2.1 Quema de Biomasa

Dentro de esta práctica, se consideran la quema de materiales como leña, incendios forestales y/o algunos residuos de la agricultura. Debido a que este tipo de prácticas son muy comunes, la quema de biomasa representa una fuente importante de emisión de BC. Generalmente, se produce gran cantidad de BC en los incendios forestales no controlados dadas las condiciones de oxígeno reducido en comparación con la cantidad de biomasa quemada (Gelencsér, 2004). Además, algunos materiales que son carbonizados durante los incendios pueden ser transportados por acción del aire una vez que el evento de fuego ha sido controlado. Esto promueve que la cantidad de BC se incremente (Kuhlbusch et al., 1996).

### 1.2.2.2 Quema de combustibles fósiles

La quema de este tipo de combustibles es considerada la fuente de emisión más importante de BC (Gelencsér, 2004). A su vez, debido a la naturaleza química de éstos (como se explicó anteriormente), el uso de diésel en motores de combustión interna (Figura 4) representa una fuente principal de BC (Sasser et al., 2012).



**Figura 4** Perfil de emisión de  $PM_{2.5}$  en motores de diésel (EPA, 2001).

Las fuentes de emisión por el uso de combustibles fósiles pueden dividirse, por ejemplo, en fuentes fijas (uso de equipos industriales como calderas y hornos) así como móviles (vehiculares) (Sasser et al., 2012). Para el caso de la cuantificación de las emisiones de BC como consecuencia de la actividad vehicular por el método de factores de emisión, se requiere previamente de la obtención de estos. Estos se calculan a partir de mediciones directas a través de distintos métodos y condiciones, por ejemplo, a través del uso de dinamómetros en laboratorios fijos y/o directamente en las vialidades (Gelencsér, 2004). Si bien es posible cuantificar las emisiones, existen distintos factores que reducen la certidumbre de dicha estimación, más adelante se abordará dicha cuestión.

### *1.2.3 Efectos del carbono negro*

Existe un grupo de contaminantes denominados “forzadores climáticos de vida corta”, éstos incluyen al BC, ozono (O<sub>3</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) y se caracterizan por incrementar la cantidad de energía en el balance energético terrestre en un tiempo corto en la atmósfera (días a semanas) en comparación con otras especies como el CO<sub>2</sub>, el cual puede tener ese efecto durante cientos de años (Sasser et al., 2012).

El BC como parte del material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) tiene un tiempo de vida alrededor de una semana, variando entre 4-12 días según las condiciones atmosféricas-ambientales (Cape et al., 2012). Dada la baja reactividad química que el BC presenta en la atmósfera, sus procesos de remoción principales son el depósito húmedo y seco (Bond et al., 2013). El primer proceso ocurre cuando la partícula de BC envejece, incrementa su tamaño o su composición química se ve modificada de modo que puede ser un núcleo de condensación efectivo y ser removido por precipitación (Sasser et al., 2012). Por otro lado, el depósito seco se refiere al proceso de remoción de las partículas atmosféricas hacia distintas superficies por acción gravitacional (Emerson et al., 2018). Este proceso depende del tamaño de las partículas; ocurre un asentamiento gravitacional en las partículas más gruesas (>1 micrómetro de diámetro) y pueden sedimentar por difusión aquellas de menor tamaño (<300 nm) ( Ruijgrok et al., 1995; Bond et al., 2013). El BC es ideal para ser removido a través del depósito seco, ya que es una especie no volátil y poco reactiva; ya que aunque internamente se puede encontrar mezclado con otros aerosoles, el BC es insoluble en agua. Cuando las condiciones físico químicas no permiten un cambio en su composición química tal que le permita la interacción con el agua, tiene lugar el depósito seco (Emerson et al., 2018).

Si bien el BC es removido de manera natural y se mantiene poco tiempo en la atmósfera, su corta presencia en la atmósfera implica potencial riesgo tanto al ambiente como a la salud humana, ambos discutidos a continuación.

#### *1.2.3.1 Efectos Ambientales*

Las repercusiones del BC tienen distintos efectos según en el nivel de la atmósfera en que éste se encuentre. Por ejemplo, en la estratósfera baja (entre los 9 a 13 km) el tiempo de residencia del BC es mayor (Gelencsér, 2004); considerando que en la superficie del BC pueden ocurrir reacciones de consumo de oxidantes, la presencia de estas partículas puede resultar en un sumidero importante de ozono y, por lo tanto, tener consecuencias climáticas importantes (Gelencsér, 2004). Por otra parte, las emisiones que son generadas a nivel de superficie tienen impactos relevantes en la tropósfera. Cabe resaltar que dichas emisiones no contienen únicamente BC, sino una mezcla compleja de distintos contaminantes (tanto gases como partículas) (Sasser et al., 2012).

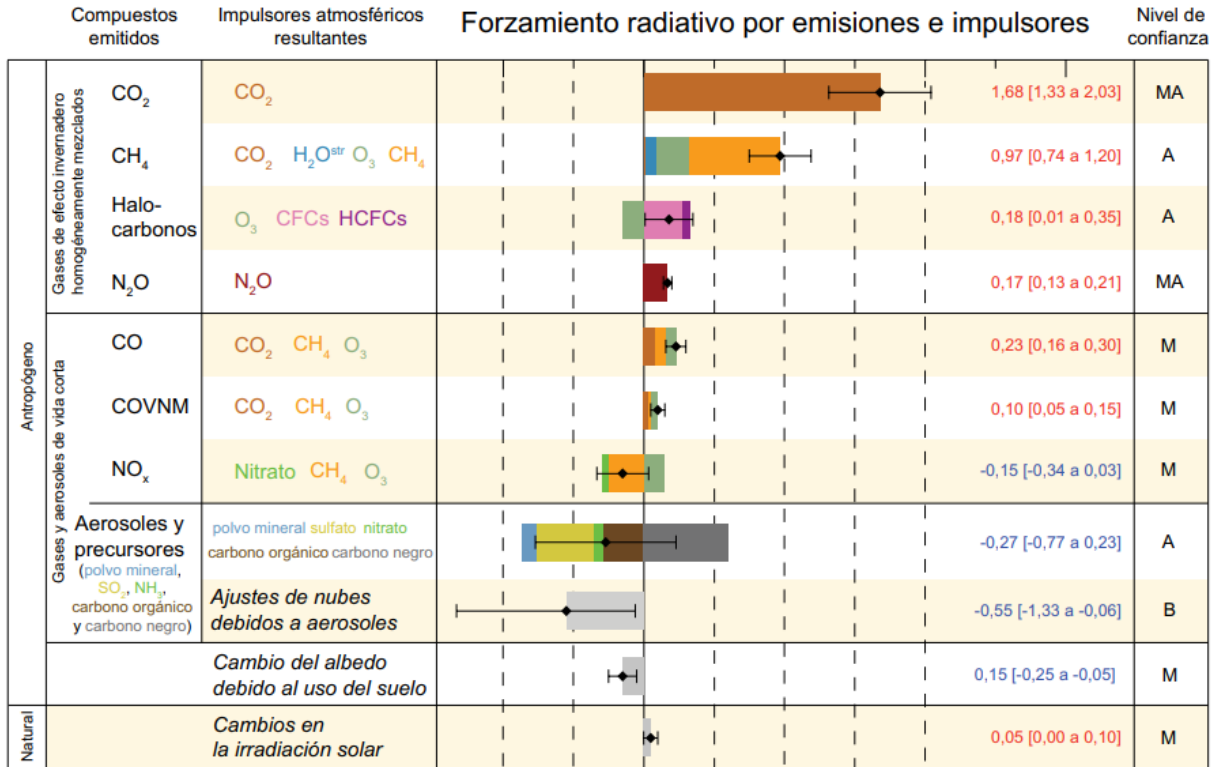
La presencia de algunos contaminantes co-emitidos con el BC, tales como el SO<sub>2</sub> tienen un efecto de enfriamiento en la atmósfera, mientras que el BC se comporta de manera opuesta (Sasser et al., 2012). Para entender la premisa anterior, se requiere definir al forzamiento radiativo. Éste es una medida que refleja la variación del balance entre la radiación solar incidente en la atmósfera respecto a la radiación infrarroja saliente (dada la presencia de algún contaminante) (Sasser et al., 2012). Esta medida es calculada en la tropopausa o en la parte superior de la tropósfera (Sanz et al., 2006; IPCC, 2014).

Se habla de un forzamiento positivo cuando la presencia de una sustancia en la atmósfera incrementa la cantidad de energía en el sistema climático de la Tierra y negativo en caso contrario. Es expresado en W/m<sup>2</sup> (Sasser et al., 2012). A través de modelación se han estimado valores de forzamiento radiativo para distintos contaminantes. La Figura 5 muestra estos valores estimados en 2011 por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. El diagrama muestra el nivel de confianza con el que se han realizado las estimaciones, dónde MA significa muy alto, A: alto, M: medio, B: bajo y MB muy bajo. Para el caso de los aerosoles, se observa que el BC tiene un forzamiento positivo mientras que otros aerosoles tienden a promover enfriamiento en la tropósfera (IPCC, 2013).

El forzamiento radiativo directo es causado por la interacción total de la luz con los contaminantes. En el caso del BC se da por la absorción y en el caso de otros aerosoles atmosféricos se da por la dispersión de la luz solar (Bond et al., 2013). El fenómeno de absorción reduce la cantidad de luz que llega a la superficie y que se refleja nuevamente hacia el espacio; (Bond et al., 2013).de esta manera, el BC incrementa el calentamiento de la tropósfera (Sasser et al., 2012). La base física a través de la cual se explica el proceso de calentamiento, implica considerar que los aerosoles generados a través de combustibles como el diésel, poseen propiedades como las de un cuerpo negro (López et al., 2012).

Aunado a lo anterior, al considerar su estructura gráfica, el BC puede ser visto como un cuerpo negro (Robitaille, 2008), de forma que absorbe -casi- por completo toda la radiación incidente sobre él en todas las longitudes de onda. Su espectro de frecuencia depende de la temperatura del cuerpo (partícula de BC) y, a temperatura ambiente la mayor parte de la emisión se encuentra en la región infrarroja (IR), traducido en un incremento de temperatura (Zwinkels, 2018). Ese calentamiento tiene consecuencias en el sistema climático terrestre, dentro de los que se encuentra el incremento de la temperatura ambiente, cambios en la precipitación, derretimiento de nieve y hielo, así como alteración en el proceso de formación de nubes (Bond et al., 2013).

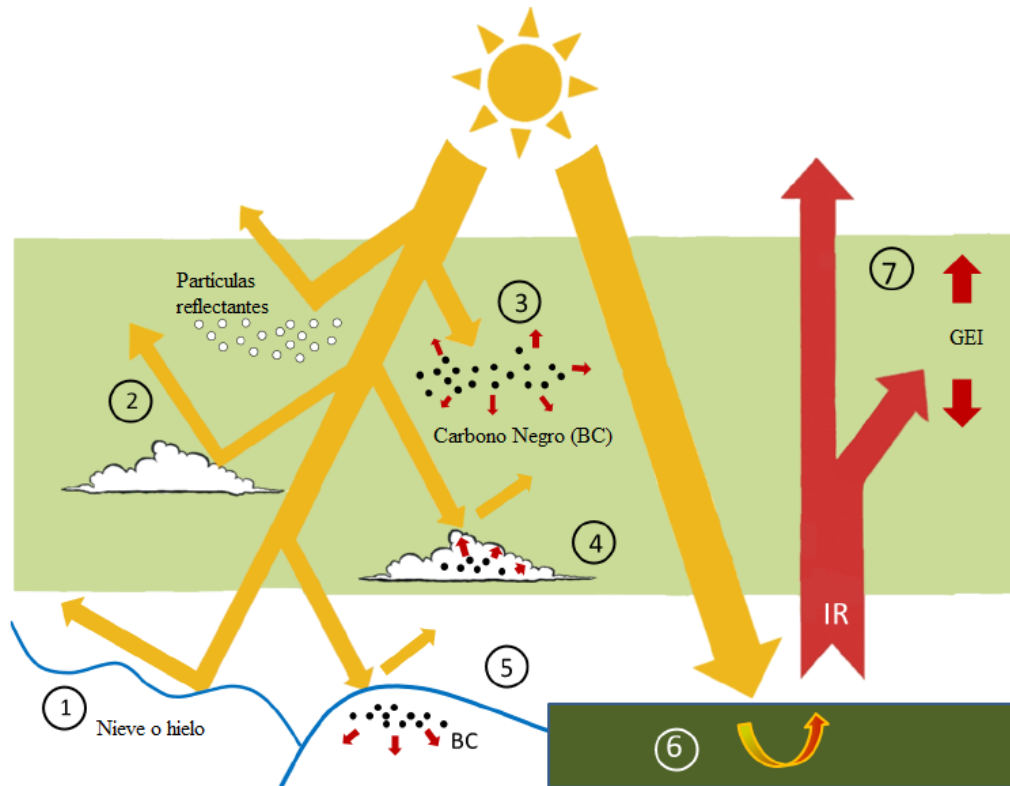




**Figura 5** Comparación del forzamiento radiativo de distintas especies químicas. (IPCC, 2013).

La interacción del BC en el sistema climático se explica a continuación (Sasser et al., 2012) (Figura 6).

1. La luz que incide en la Tierra se es reflejada por superficies brillantes (mayormente por nieve y hielo).
2. Las nubes que no contienen contaminantes y las partículas que no absorben energía, tienden a dispersar la luz de modo que la cantidad de energía que se absorbe por la superficie es menor.
3. Una vez emitido, el BC absorbe parte de la energía emitida por el sol, promoviendo el calentamiento en la tropósfera.
4. Las nubes que contienen BC absorben cierta cantidad de radiación solar, de modo que se reduce la capacidad de dispersión de éstas.
5. Por medio de procesos de depósito el BC llega a capas de hielo o nieve de modo que en esta superficie se comienza a absorber energía, acelerando la tasa de derretimiento del hielo.
6. Una vez que la radiación infrarroja (IR) es liberada a la atmósfera, puede ser retenida por algunos gases de efecto invernadero (GEI) como el CO<sub>2</sub> incrementando aún más el calentamiento de la atmósfera baja y la superficie.



**Figura 6** Comportamiento del carbono negro en el ambiente Adaptado de (Sasser et al., 2012)

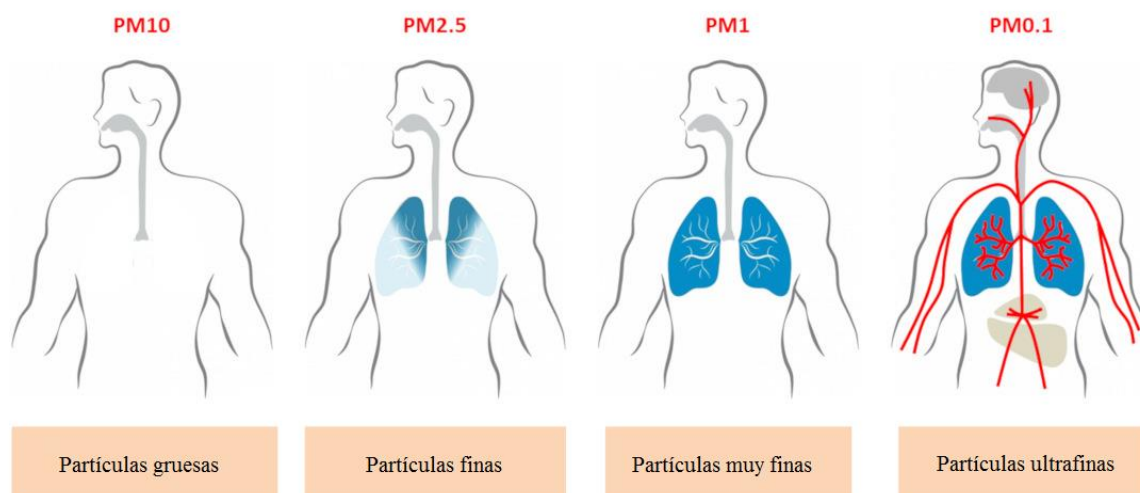
### 1.2.3.2 Efectos a la salud humana

A través de estudios epidemiológicos y toxicológicos se ha demostrado que el BC es un buen indicador de sustancias peligrosas en el material particulado (Janssen et al., 2012). A su vez, es necesario considerar que el BC se encuentra dentro del material particulado fino, por ejemplo, en sitios con alta influencia de tránsito vehicular más del 90% del BC se encuentra en la fracción  $PM_{2.5}$  (Viidanoja et al., 2002); por lo que su ingreso al organismo resulta más sencillo. En la Figura 7 se observa el alcance que tienen las partículas en el cuerpo humano según su tamaño, denotando que el rango de penetración del BC se encontraría de las partículas finas a las muy finas. En la Tabla 2 se muestra la relación entre el tamaño de la partícula (dado en  $\mu m$ ) respecto a la región de ingreso en el organismo.

**Tabla 2** Área de ingreso de PM según su tamaño

Tamaño de la partícula ( $\mu m$ )	Región hasta dónde puede llegar en el organismo humano
>11	Capturadas en orificios nasales; no penetran en la parte baja del tracto respiratorio.
7-11	Pasaje nasal
4.7-7	Región de la laringe
3.3-4.7	Tráquea y región primaria bronquial
2.1-3.3	Región bronquial secundaria
1.1-2.1	Región bronquial terminal
0.65-1.1	Bronquiolos
0.43-0.65	Alveolos

Fuente: (Mejía y Páramo, 2011)



**Figura 7** Ingreso de PM al cuerpo humano. (Danel, 2020)

De esta manera, se considera que el BC es una de las fracciones más relevantes del PM respecto a los efectos nocivos en la salud humana (Janssen et al., 2012). Un factor que propicia dichos efectos es la alta concentración. Usualmente su concentración en áreas cercanas a las vialidades es hasta dos veces mayor que la concentración de fondo en un sitio urbano; mientras que la concentración de PM en la zona aledaña a las vialidades es solo 20% mayor a la concentración de fondo para un sitio con las mismas características (Janssen et al., 2011).

Para conocer de manera más precisa los efectos del BC en la salud, se realizan estudios basados en los resultados de identificación de las fuentes principales del contaminante, por ejemplo, las fuentes móviles que usen diésel en las zonas urbanas, quema de biomasa en espacios abiertos, en zonas agrícolas o puertos y/o zonas industriales en zonas comerciales (Janssen et al., 2012). Ya que de ello dependerá la cantidad de BC a la que esté expuesta la población.

Algunos de los estudios a través de los cuales se han detectado los efectos adversos por el BC, se han realizado través de la detección de éste en las  $PM_{2.5}$ . Mostrando que, aún a través de una exposición de poco tiempo al BC, causa efectos adversos que incluyen admisiones hospitalarias por casos cardiopulmonares por exposición a largo plazo (Janssen et al., 2012).

Los estudios que dan a conocer estos resultados incluyen la exposición humana controlada a ciertas concentraciones de material particulado ultra fino ( $PM_1$ ) entre 100 y 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante cortos lapsos de tiempo (generalmente un lapso de 2 horas) (Janssen et al., 2012). Dentro de los efectos relacionados con las emisiones de partículas carbonáceas, se encuentran el estrés oxidativo, inflamación, arterioesclerosis, arritmia cardíaca y cambios en las funciones vasculares, tales como cambios en la presión sanguínea (Grahame y Schlesinger, 2010). En la Tabla 3 se muestra un resumen de algunos de estos estudios y las afectaciones que encontraron por exposición al BC (Janssen et al., 2012).

**Tabla 3** Afectaciones a la salud por exposición a carbono negro

<b>Población de estudio</b>	<b>Exposición</b>	<b>Objeto de estudio</b>	<b>Hallazgos</b>	<b>Referencias</b>
12 Individuos sanos y 12 individuos con padecimiento de asma.	2 Horas de exposición a una concentración de $174 \mu g/m^3$ PM <sub>0.1-2.5</sub> con 10% de BC.	Funciones respiratorias y sanguíneas.	En ambos grupos se observaron variaciones en el ritmo cardíaco y la presión arterial sistólica, sin embargo, no hubo cambios en funciones respiratorias.	(Gong et al., 2003)
18 Voluntarios de sexo masculino, sanos (no fumadores) con edad promedio de 27 años.	1 Hora de exposición intermitente al escape de diésel generado en condiciones d tránsito urbano con una concentración de $250 \mu g/m^3$	Funciones vasculares.	Función vascular deteriorada, vasodilatación atenuada y reducción en la capacidad para eliminar coágulos de sangre.	(Barath et al., 2010)
Individuos sanos, no fumadores entre 21-44 años.	2 Horas de exposición a emisiones de motores a diésel con $350 \mu g/m^3$ de PM.	Sangre y trombosis.	Incrementa la generación de trombos.	(Lucking et al., 2008)
15 Hombres y mujeres sanos.	1 hora de exposición a emisiones de motores a diésel, con concentración de $300 \mu g/m^3$	Efectos en pulmones.	Eosinofilia (incremento de leucocitos esofinófilos) en la zona broncoalveolar; promoviendo lesiones pulmonares.	(Sehlstedt et al., 2010)

Fuente: Adaptado de Janssen et al., 2012.

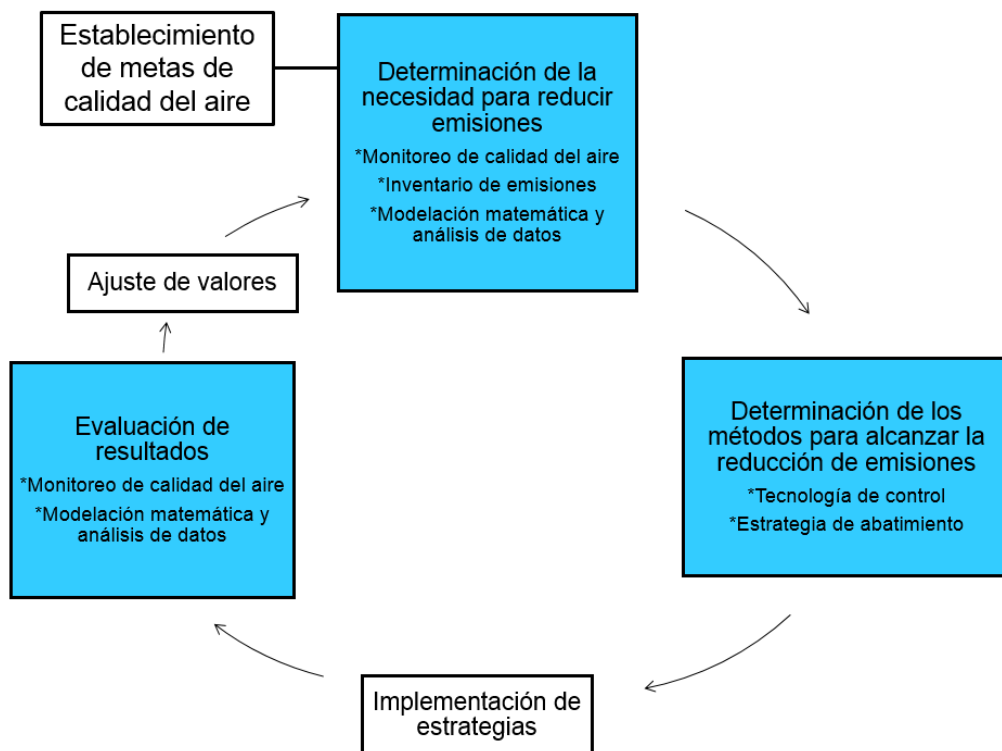
### 1.3 Inventarios de emisiones

Considerando que la contaminación atmosférica engloba muchos procesos (como los son las emisiones de contaminantes por distintas actividades antropogénicas) y tiene consecuencias importantes tanto al ambiente como a la salud, es necesario encontrar herramientas que permitan reducir los niveles de contaminación en un área determinada, es decir, mejorar la calidad del aire. Este término es definido como el grado de afectación por determinados contaminantes (para los cuales se ha establecido una normatividad sobre sus concentraciones) sobre un lugar específico. Los contaminantes considerados para indicar la calidad del aire son los llamados criterio, estos son ozono ( $O_3$ ), material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) (EPA, 2018a).

Si bien contaminantes como el BC o ciertos compuestos orgánicos volátiles como algunos aromáticos y carbonilos no son considerados dentro del grupo de los contaminantes criterio, debido a sus características fisicoquímicas y por ende, dado al riesgo potencial que representan tanto para la salud humana y para el medio ambiente, actualmente son considerados como parte esencial del monitoreo para la evaluación de su potencial de afectación y en estrategias de evaluación y control de la contaminación.

Una de las bases de las estrategias de control de la contaminación, son los inventarios de emisiones (IE). Los IE son instrumentos de gestión de la calidad del aire, en los que se determinan las emisiones de contaminantes provenientes de distintos tipos de fuentes localizadas en un área geográfica determinada. Son elaborados con una resolución espacial a nivel municipal, estatal o nacional y con una temporalidad en un año específico de actividad (también llamado año base) (SEMARNAT, 2019b). Con estos IE se aplican modelos matemáticos avanzados que simulan la interacción entre el conjunto de las emisiones calculadas y la meteorología regional con la calidad del aire esperada. Generalmente, los resultados de la modelación son comparados con las mediciones del monitoreo en un caso base a fin de validar si las emisiones de los IE fueron correctas. En caso de existir una discrepancia, el siguiente paso es ajustar el inventario hasta aproximar los resultados reportados. No obstante, otro camino es utilizar las mediciones de contaminantes para evaluar el IE a fin de que la modelación tenga una base más sólida para ajustar (o aceptar) los inventarios. Una vez calibrado el modelo, (básicamente mediante el ajuste del IE) el siguiente paso es reducir las emisiones de un contaminante o conjunto de contaminantes en particular para encontrar el grado de reducción necesario en las emisiones que resulten en una calidad del aire aceptable (Chameides et al., 2000).

Por lo tanto, los IE son instrumentos estratégicos de gestión ambiental que permiten identificar a los principales generadores de contaminantes atmosféricos y su aporte por sector, convirtiéndose así en una herramienta útil en el diseño de estrategias, planes y programas para el mejoramiento de la calidad del aire (Figura 8).



**Figura 8** Esquema típico del proceso de gestión de la calidad del aire.  
Adaptado de (Chameides et al., 2000)

De esta manera, un IE puede ser visto como una base de datos que enlista la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera por tipo de fuente en un periodo de tiempo determinado (EPA, 2018b). Por lo tanto, su objetivo principal es estimar esa cantidad de contaminantes emitidos y, en dado caso, distribuir las emisiones geográficamente con una desagregación estatal y/o municipal (SEMARNAT, 2019b).

Como se mencionó anteriormente, no solo se consideran a los contaminantes criterio para la elaboración de los IE, por ello, existen otras clases de IE con distintos propósitos, por ejemplo, los inventarios de gases de efecto invernadero o los de sustancias tóxicas (SEMARNAT, 2019b). El enfoque de la presente investigación se basó en un reporte a través del cual se detectaron tanto las fuentes de emisión como la cantidad emitida de BC, al ser el único documento en su tipo es considerado como el inventario de emisiones de BC para el Valle de Toluca.

### *1.3.1 Elaboración de un IE*

La Tabla 4 muestra de manera simplificada y generalizada, las etapas a través de las cuales se elaboran los distintos tipos de IE mencionados anteriormente. La elaboración de los IE se da con base en el cumplimiento legal bajo el que se rigen los distintos países, incluyendo el marco jurídico propio y los acuerdos internacionales de los que sean partícipes.

En México, la realización de los IE involucra a cada orden de gobierno; municipal, estatal y federal. Sus competencias se encuentran plasmadas en la Ley General de Cambio Climático en los artículos 7° fracción XIV, 8° fracción XII y 9° fracción X y es competencia de cada gobierno formular e instrumentar políticas para enfrentar el cambio climático. De manera que la información recopilada puede formar parte del inventario nacional o dejarlo a menores escalas (por ejemplo, un inventario estatal) (LGCC, 2018).

Por otro lado, esta ley también indica cuales son los plazos en los que se deben elaborar los IE según los contaminantes que reporte. El artículo 74 indica que el plazo para la estimación del IE es anual para la quema de combustibles fósiles, cada dos años para las emisiones distintas a combustibles fósiles (exceptuando las relacionadas con el cambio de uso de suelo) y cada cuatro años para el total de las emisiones por las fuentes y las absorciones por los sumideros de todas las categorías incluidas en el IE (LGCC, 2018).



**Tabla 4** Etapas de elaboración de un inventario de emisiones

#### Planificación y gestión

- Se especifican los roles de cada institución y/o miembros participantes durante la elaboración del IE.
- Se establecen los acuerdos respecto al suministro de datos.
- Se busca garantizar la calidad de los datos con los que se trabajarán.

#### Participación de los interesados

- Realización de reuniones de las partes interesadas.
- Se llega a acuerdos para la entrega de resultados del IE.
- Se establecen las metodologías a utilizar.
- Dentro de las partes interesadas, se incluye a departamentos gubernamentales así como proveedores y usuarios de datos, por ejemplo, modeladores de contaminación del aire.

#### Compilación del IE

- Aplicación de metodologías (cálculos) para actualizar u obtener por primera vez (según sea el caso) la cuantificación de las emisiones.
- Todos los cálculos son sujetos a un estricto control de calidad para asegurar la precisión de los resultados.

#### Informe

- Se realiza un reporte por parte de l gobierno (generalmente) y en ocasiones se entrega la información a diversas organizaciones.

#### Revisión

- Algunos inventarios nacionales de países miembros de ciertos convenios, deben ser revisados periódicamente. Por ejemplo, los IE de gases de efecto invernadero de países que pertenecen al protocolo de Kyoto.

#### Proyecciones

- Con base en las emisiones reportadas, se realizan estimaciones para conocer la cantidad de contaminantes que habrá en determinado año, considerando distintos escenarios de modelación.

Fuente: (Aether, 2020)

Otra ley que se encarga de la regulación en materia ambiental en México es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). En su reglamento en materia de contaminación atmosférica, también se dan a conocer algunas obligaciones de los distintos órdenes de gobierno respecto a los IE:

- Artículo 17 Fuentes fijas de jurisdicción federal: obligados a integrar un inventario de emisiones.
- Artículo 41.- La Secretaría establecerá y mantendrá actualizado un Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire. Este sistema se integrará con los datos que resulten de los inventarios de las fuentes de contaminación de jurisdicción, federal y local, así como de sus emisiones.
- Artículo 45.- La Secretaría elaborará y mantendrá actualizado el Inventario de Fuentes de Jurisdicción Federal, así como de sus emisiones, con el propósito de contar con un banco de datos que le permita formular las estrategias necesarias para el control de la contaminación atmosférica.

(Reglamento LGEEPA, 2014).

Actualmente la elaboración de IE's que incluyen al BC (y en algunos casos, sustancias co-emitidas), representa un avance importante en la estimación de efectos netos tanto en el clima como en la salud humana (Raga et al., 2018).

### ***1.3.2 Incertidumbre y validación***

#### ***1.3.2.1 Incertidumbre asociada a un IE***

La cuantificación de emisiones implica el uso de factores de emisión y datos de actividad. El primero representa la masa de un contaminante emitido por unidad de actividad; mientras que la actividad indica una medida cuantitativa de la emisión de un evento, por ejemplo, la elaboración de un producto en cierto periodo de tiempo o cantidad de kilómetros recorridos (Raga et al., 2018). Los inventarios de contaminantes presentan emisiones másicas; esto representa cierta limitación a las estimaciones del BC, ya que generalmente éste es basado en sus propiedades ópticas y los factores de emisión no proporcionan información completa de esas propiedades (CEC, 2015).

El hecho de que exista variación en la forma de medir el BC, implica la adición de incertidumbre en la elaboración de los IE. La incertidumbre siempre estará ligada a la elaboración de inventarios (Raga et al., 2018). Esto generalmente se debe a la falta de conteo en ciertas emisiones (por omisión de algunas fuentes) o un conteo duplicado (en el caso en que determinadas fuentes puedan contarse en dos o más categorías), así como falta de entendimiento de los procesos contaminantes o error en los cálculos (Sanz et al., 2006).

La guía metodológica para la elaboración de inventarios propuesta por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) (Sanz et al., 2006) menciona que las principales fuentes de incertidumbre en la elaboración de los IE son:

- Los datos (o mediciones de concentración de contaminantes) no se encuentran disponibles por que el proceso no es reconocido o aún no existe una metodología para realizar la medición.
- Incertidumbre inherente asociada a la aplicación de modelos.
- Falta de datos
- Falta de representatividad en los datos o en el manejo de estos. Referido a si en cierta fuente se cuenta con una cantidad limitada de información, un periodo corto de datos que servirá para estimar las emisiones de un periodo más largo, así como aplicación de factores de emisión que hayan sido calculados con características distintas a las del sitio analizado (por ejemplo, usos de tecnología distinta).
- Errores implícitos en las mediciones, transmisión de la información y cálculo de las emisiones.

Adicional a lo anterior, otra fuente de incertidumbre para la cuantificación de las emisiones de BC (y otros contaminantes co emitidos por procesos de combustión incompleta), es la naturaleza de la emisión, ya que generalmente se debe a instalaciones y/o procesos ineficientes que trabajan con combustibles de baja calidad, obteniendo así una emisión compleja (Bond et al., 2004; Klimont et al., 2017; Hoesly et al., 2018).

### 1.3.2.2 Validación de un IE

Como consecuencia de la incertidumbre ligada a los IE y, considerando que son herramientas para gestionar la calidad del aire, es frecuente que estos se evalúen. La finalidad de la evaluación de un IE es comprobar si los resultados que estos reportan reflejan el comportamiento real de las emisiones en el área de estudio.

La validación de un inventario de emisiones implica un trabajo muy complejo. Generalmente existen dos técnicas para realizar una validación completa, las técnicas bottom up y la top-down. La primera técnica mejora la precisión de las emisiones reportadas, ya que se basa en el cálculo detallado de las emisiones de todas las fuentes individuales de un área y posteriormente se agregan para obtener las emisiones del área total (Dios et al., 2012). Por ello, se requiere trabajo exhaustivo en el manejo de los datos, que incluye: la revisión de los protocolos de recopilación de estos, estudio de las incertidumbres de la información de entrada en los modelos así como la evaluación del modelo de estimación seleccionado (Aparicio, 2018). Por otro lado, la técnica top-down utiliza datos ambientales de calidad del aire para evaluar las emisiones (EPA, 2009) a través de la comparación entre el cociente obtenido con esos datos comparados con el cociente calculado entre dos especies reportadas en el inventario para el mismo sector o región (Ruíz et al., 2014). Si únicamente se aplica una de las dos técnicas, se puede obtener una evaluación adecuada más no una validación

completa. En el caso de esta investigación, se aplicó una técnica *top-down* para realizar la evaluación del inventario de emisiones de BC en Toluca.

#### 1.3.2.2.1 Técnica top-down y condiciones del modelo de caja

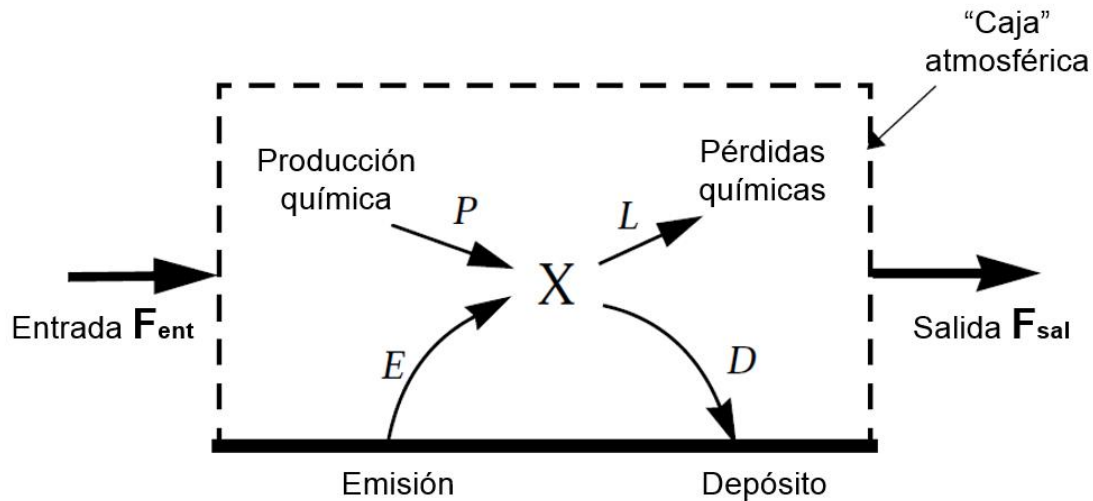
La aplicación de esta técnica requiere la comparación de la estimación de emisiones obtenida a través de datos ambientales de calidad del aire respecto a aquellos reportados en el inventario. Para ello, es necesario calcular el cociente (razón) entre los contaminantes implicados, generalmente son NO<sub>x</sub> o CO (Ruíz et al., 2014). Para realizar una evaluación correcta, se deben tener en cuenta algunas consideraciones implícitas en la técnica:

- Los niveles de concentración de fondo de los contaminantes deben ser tomados en cuenta.
- Las condiciones meteorológicas son fundamentales para el estudio.
- Las comparaciones solo pueden realizarse entre contaminantes primarios.

(EPA, 2009)

Asimismo, la evaluación top-down tiene como base la premisa de que las concentraciones ambientales de los contaminantes son influenciadas por emisiones recientes (Haste et al., 1998). Así, se requiere no tomar en cuenta de forma razonable la influencia del transporte de contaminantes en el sitio de medición y seleccionar áreas con altas tasas de emisión con actividad homogénea.

Dichos requerimientos coinciden con las características del modelo de caja simple. Este modelo describe la abundancia de la especie X en un dominio específico (por ejemplo, un sitio urbano, un país o la atmósfera de forma global). Esta delimitación espacial es considerada como una “caja”. Ahí, el transporte puede ser visto como la entrada ( $F_{ent}$ ) y la salida ( $F_{sal}$ ) del flujo de la especie X; si la caja se considera con un flujo estacionario, la entrada es igual a la salida  $F_{ent} = F_{sal} = 0$ . Dentro de la caja, la producción de la especie en cuestión deberá considerar las emisiones (E) y la producción química (P), por otro lado, las pérdidas deberán contemplar las pérdidas químicas (L) y el depósito (D). Las fuentes de la especie X son denotadas por  $F_{ent}$ , E y P, mientras que los sumideros son  $F_{sal}$ , L y D. Figura 9 (Jacob, 1999).



**Figura 9** Representación gráfica del modelo de caja simple Adaptado de: (Jacob, 1999)

Una vez que el área de estudio se ha delimitado como una “caja atmosférica”, se debe asegurar que las concentraciones de los contaminantes sean representativas del sitio, por ello, deben elegirse en un periodo de tiempo en el que:

- El transporte de contaminantes sea despreciable (es decir, se requiere baja velocidad de viento).
- La capa límite se encuentre reducida (para evitar la dilución de los contaminantes).
- Exista baja actividad fotoquímica (asegurando que la emisión de contaminantes predomine sobre la producción de contaminantes secundarios).
- Los contaminantes sean recién emitidos (evitando que se pierdan las propiedades de las especies estudiadas).

(Haste et al., 1998)

La manera en que se aplican estas técnicas de evaluación de IE es a través del cálculo de cocientes entre contaminantes primarios; los cuales son útiles para comparar la composición relativa de las emisiones reportadas en los inventarios (EPA, 2009). Además, al utilizar cocientes, algunos factores que podrían afectar la concentración individual de un contaminante como dispersión se anulan ya que ese mismo factor también afecta a los otros contaminantes.

Su uso implica algunas fuentes de incertidumbre, dentro de las que se incluyen:

- La exactitud de las mediciones ambientales de los contaminantes.
- La exactitud del inventario de emisiones.
- La pertinencia de las comparaciones.

(Funk et al., 2000)

Para que los cocientes reflejen la proporción de un contaminante respecto a otro, la relación calculada debe ser adimensional; esto implica que la concentración de ambas especies se encuentre en las mismas unidades o referidas a un mismo volumen y periodo de medición. Se requiere calcular los cocientes con los datos de las mediciones ambientales y también con la información que proporciona el IE, de esta manera, pueden compararse y determinar si el IE realmente es representativo del área reportada.



## 2.1.1 Características físicas

### 2.1.1.1 Orografía y relieve

El Valle de Toluca tiene una altitud promedio de 2600 msnm (PROMEXICO, 2015); cuenta con serranías importantes que lo rodean, entre ellas:

- Al suroeste: la Sierra Nevado de Toluca
- Al este: la Sierra de las Cruces y Sierra de Ocoyotepec
- Al noreste: la Sierra de Monte Alto
- Al sur: la Sierra Matlazinca

(SMAGEM, 2012b)

Por otro lado, también se cuenta con elevaciones aisladas, pero de tamaño considerable:

- Nevado de Toluca (4680 msnm)
- Volcán Molcajete (2900 msnm)
- Cerro de la Calera (3740 msnm)
- Volcán Gordo (3700 msnm)
- Cerro El Gavilán (3000 msnm)
- Cerro La Campana (3300 msnm)

(INEGI, 2015b)

Todas estas elevaciones juegan un papel muy importante en la dinámica atmosférica (dirección e intensidad de viento) y, por ende, en la distribución de contaminantes en la zona.

### 2.1.1.2 Clima

Con base en la caracterización del área de estudio realizada para sustentar los resultados del inventario de emisiones 2004, se sabe que en la ZMVT los climas predominantes (con base en la escala climática de Köppen) son: templado húmedo, semifrío subhúmedo y frío (SMAGEM, 2007).

Se distinguen 3 épocas climatológicas a lo largo del año (SMAGEM, 2007):

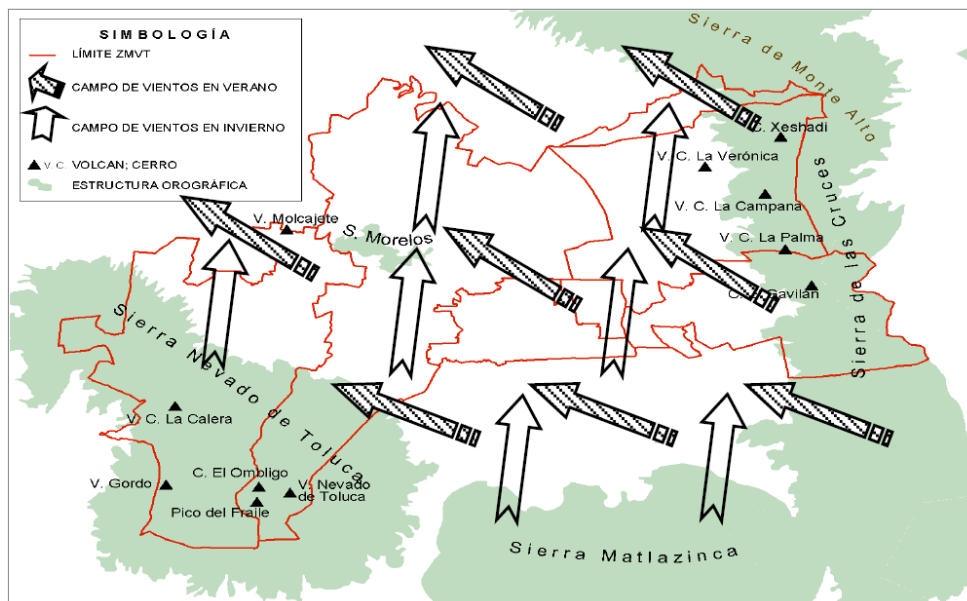
1. Época seca-fría. Se presenta entre los meses de noviembre a febrero, con temperaturas que van de los 9 a los 11 °C. Esta época se caracteriza por la presencia de heladas.
2. Época seca-cálida. Ocurre de marzo a mayo, la temperatura media se incrementa llegando a 15°C en promedio.



3. Época de lluvia. Dada de junio a octubre, se caracteriza por la ocurrencia de precipitaciones ente 160 y 210 mm, así como un ligero descenso de las temperaturas, siendo la media entre 11 y 13 °C.

### 2.1.1.3 Meteorología

Dentro del comportamiento meteorológico en la ZMVT (con consecuencias importantes en la calidad del aire), se destaca que, durante la época seca-fría la presencia de frentes fríos y masas de aire polar es recurrente en la zona, cuando éstos son intensos pueden generar inversiones térmicas. Sin embargo, como se muestra en la Figura 11, si bien la ZMVT cuenta con sistemas montañosos alrededor, no se encuentra completamente taponeada como la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que lo vientos que circulan en la primera permiten cierta ventilación de la zona.



**Figura 11** Campo de viento en el Valle de Toluca. (SMAGEM, 2007)

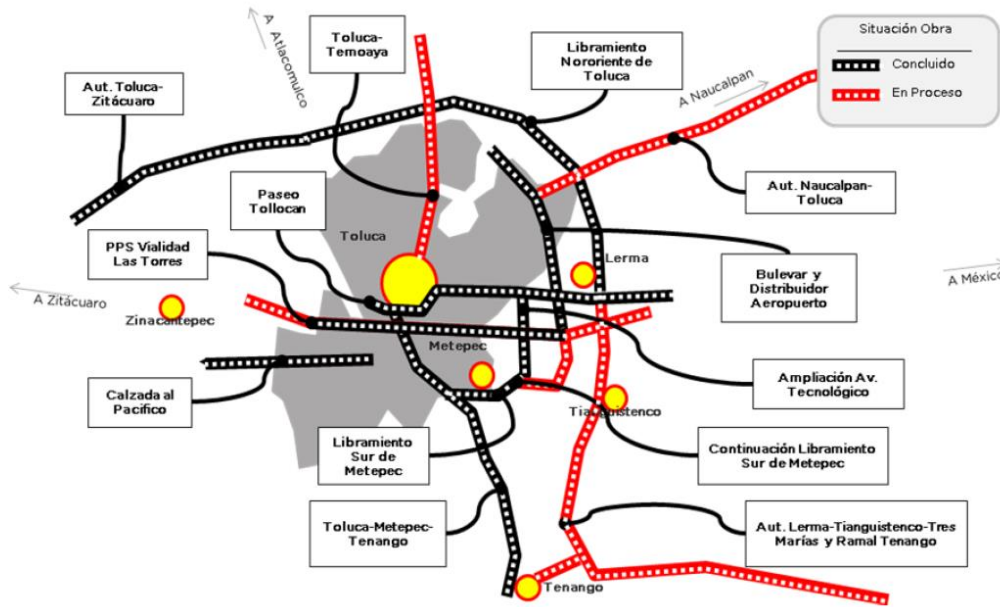
### ***2.1.2 Población***

En 2015 el Valle de Toluca contaba con 3.5 millones de habitantes (INEGI, 2015) superando la estimación que el Consejo Estatal de Población (COSEPO) realizó para 2017, año en el que se esperaba contar con 2 millones, 444 mil 743 habitantes (SMAGEM, 2012b). Es por ello, que la ZMVT es considerada como un área que requiere mayor atención para satisfacer las múltiples demandas que presenta dado su rápido crecimiento, entre las cuales se destaca la atención al problema de calidad del aire. Ante el problema de contaminación atmosférica, también es necesario considerar que el porcentaje de población sensible (niños y adolescentes entre 0 y 14 años y adultos mayores de más de 65 años) en 2010 era de 34.4% con potencial de incremento hacia años futuros.

### ***2.1.3 Actividades económicas y desarrollo***

Conforme se ha presentado el crecimiento en la ZMVT, ha ocurrido una transición de las actividades económicas del sector primario al terciario. Del total de actividades realizadas durante 2010, únicamente el 3.4% correspondió al sector primario, 35.9% al secundario y 56.8% al sector terciario (SMAGEM, 2012b). Con base en el Indicador Mensual de la Actividad Industrial por Entidad Federativa del INEGI, hasta 2019 se contabilizaron 61980 unidades económicas (establecimiento asentado que, en este caso, se dedica a la producción) en el sector manufacturero (INEGI, 2020); mostrando así que dentro del Valle de Toluca estas actividades económicas tienen un impacto representativo.

Como parte del crecimiento que presenta la ZMVT, es importante considerar que existen grandes vialidades, así como la planeación de construcción de otras. En la Figura 12 se muestran algunas de estas vías de comunicación, así como los centros poblacionales más grandes de la ZMVT. Cabe señalar que dos de los sitios poblacionales marcados fueron sitios de medición en la presente investigación (Toluca y Zinacantepec), y dado a que el análisis realizado fue altamente ligado a las fuentes móviles, se considera pertinente tener en cuenta cuáles son las vías de comunicación circundantes en el área.



**Figura 12** Principales vialidades en el Valle de Toluca. (SMAGEM, 2012b)

## 2.2 Calidad del aire en el Valle de Toluca

Con la finalidad de dar seguimiento a la calidad del aire, la ZMVT cuenta con una red de monitoreo atmosférico, la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA); que es operada por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. Cuenta con siete estaciones remotas, cuatro en el municipio de Toluca, dos en el municipio de Metepec y una en el municipio de San Mateo Atenco. Los parámetros registrados en las estaciones son  $O_3$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ . También se cuenta con una red de monitoreo meteorológico (REDMET), a través de la cual se detectan los parámetros de velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura ambiente, presión atmosférica, precipitación y radiación solar (SMAGEM, 2020).

Con base en la información recopilada a través del monitoreo, la RAMA ha detectado que los principales problemas de contaminación del aire son dados por las  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  seguido del  $O_3$ . Mientras que el  $NO_2$  ha presentado altas concentraciones únicamente de manera esporádica y el  $SO_2$  y  $CO$  no han tenido reportes de altas concentraciones; esta información hasta 2012 (SMAGEM, 2012b).

### *2.2.1. Inventarios de emisiones*

El trabajo que realiza la RAMA es esencial, sin embargo, para dar atención a los problemas de calidad del aire se requiere de instrumentos complementarios como lo son los inventarios de emisiones. La presente investigación tiene como base los dos documentos mencionados a continuación. Se destaca el hecho de que si bien el reporte “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México”, es un documento un tanto obsoleto (debido a que se han publicado inventarios de emisiones más recientemente), es el único documento enfocado en carbono negro en esta entidad federativa del país

#### 2.2.1.1 Inventario de Toluca 2004

En 2007 el Gobierno del Estado de México publicó el “Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004” (SMAGEM, 2007). Los contaminantes que integraron en dicho inventario fueron:

- PM<sub>2.5</sub>
- PM<sub>10</sub>
- SO<sub>2</sub>
- CO
- NO<sub>x</sub>
- COV
- NH<sub>3</sub>

Los contaminantes reportados fueron divididos según los tipos de fuente que los emiten, además, esta clasificación permitió la aplicación de distintas metodologías para la cuantificación de la tasa de emisión anual de cada uno de ellos. A continuación (Tabla 5), se mencionan brevemente la clasificación de las fuentes y las metodologías utilizadas

**Tabla 5** Metodologías de elaboración de inventarios de emisiones con base en el tipo de fuente evaluada.

<b>Tipos de fuente</b>	<b>Metodologías utilizadas</b>
Fuentes puntuales	Se consideró como base de información el reporte que el sector industrial entrega a las autoridades ambientales, la Cédula de Operación Integral (COI). Esta información permite calcular de manera indirecta las emisiones que son generadas en los procesos de producción. Las emisiones mostradas en el inventario 2004 reflejan la información de los reportes entregados en 2005.
Fuentes de área	Este tipo de fuentes incluyen a los comercios y servicios; son calculadas con metodologías establecidas en el Manual de Inventario de Emisiones para México, Volumen V, Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Fuentes de Área. A su vez, algunos modelos matemáticos como el TANKS versión 4.0 permitieron el cálculo de estas emisiones.
Fuentes móviles	Esta clasificación de fuente incluye a todos los vehículos automotores con autorización para circular por los caminos públicos. Sus emisiones totales se calculan como el producto del factor de emisión (dado en gramos/kilómetro) multiplicado por el dato de actividad por tipo de transporte (kilómetros recorridos/año). El dato de la actividad fue considerado como el kilometraje recorrido por día.
Fuentes erosivas	Se contempla la generación de partículas en suelos (campos agrícolas, cultivos, terrenos baldíos, cunetas, caminos sin pavimentar, etc.). Las emisiones son estimadas mediante una versión modificada de la ecuación de erosionabilidad del suelo desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Fuente: Adaptado de (SMAGEM, 2007)

Con base en lo anterior se estimó que en la ZMVT para 2004, se emitieron anualmente 752,531.9 Mg de contaminantes a la atmósfera, de ellos, 94.5% correspondieron a las fuentes móviles, 3.9% a las fuentes de área, 1.5% a la vegetación y suelos y 0.2% a las fuentes puntuales (SMAGEM, 2007).

### 2.2.1.2 Inventario de Carbono Negro 2010

El BC no es un contaminante que se encuentre normado, es por ello, que hasta hace poco tiempo no era considerado en los inventarios de emisiones. Sin embargo, dado el potencial daño que este contaminante representa tanto para el ambiente como para la salud, se empieza a tomar en cuenta conocer la cantidad de BC emitido en un área como la ZMVT.

Por ello, en 2010 la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica de la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México elaboró el reporte “Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México” (SMAGEM, 2010). Éste fue el primer esfuerzo documentado que dicho estado elaboró para conocer las emisiones de BC; si bien no es propiamente un inventario de emisiones, tiene el mismo objetivo: conocer las tasas de emisión del BC para gestionar la calidad del aire en el Estado de México.

Debido a que en el país no se realizan mediciones continuas de BC, las emisiones presentadas en el inventario de BC fueron estimadas a partir de las emisiones calculadas de monóxido de carbono y del material particulado PM<sub>2.5</sub> (las cantidades de BC originadas por separado se sumaron para calcular la emisión total) (SMAGEM, 2010), tomando como referencia los “Inventarios de emisiones de contaminantes criterio 2004” tanto de la ZMVT como de la Zona Metropolitana del Valle Cuautitlán-Texcoco. La estimación de la emisión de BC a partir de las emisiones de PM<sub>2.5</sub> se obtuvo mediante la aplicación de distintos porcentajes a las emisiones de cada categoría de fuente (Tabla 6) ( Battye et al., 2002; Aiken et al., 2009). A su vez, la emisión estimada de BC a través de las emisiones de CO consistió en multiplicar por un factor de 0.001 todas las emisiones de cada una de las categorías de fuente. Ese factor fue obtenido mediante la correlación de ambos contaminantes (Baumgardner et al., 2007).

**Tabla 6** Porcentaje de equivalencia de BC por tipo de fuente

<b>Fuentes</b>	<b>Porcentaje de equivalencia</b>
Puntuales	12%
Área	12%
Locomotoras de arrastre	43%
Vehículos con motor de gasolina	27%
Vehículos con motor de diésel	43%

Fuente: (SMAGEM, 2010).

Los resultados obtenidos mostraron que en el Estado de México se emitieron 1684.71 Mg/año de BC, de éstas, 93.9% fueron aportadas por las fuentes móviles, 5.4% a las fuentes fijas y 0.7% a la quema de biomasa (SMAGEM, 2010). De dichas emisiones, la ZMVT es responsable del 45% de emisiones totales, es decir, emite 753.19 Mg/año; por tipo de fuente (ver Tabla 7).

**Tabla 7** Emisión de BC por tipo de fuente

<b>Tipo de fuente</b>	<b>Tasa de emisión Mg/año</b>	<b>Porcentaje emitido %</b>
Fijas	8.87	1.2
Móviles	741.95	98.5
Biomasa	2.36	0.3
	Total: 753.19	100

Fuente: (SMAGEM, 2010)

En el inventario “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México 2010”, además de dar a conocer las emisiones de BC anuales, también se presentan los promedios de las concentraciones de BC en el periodo 2005-2008 (Tabla 8). La emisión muestra la cantidad de un contaminante (masa) generado en determinado tiempo, mientras que la concentración da información de la cantidad de ese contaminante (masa) en un volumen dado. La concentración promedio de BC fue obtenida a través del promedio anual de CO registrado en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico del Valle de México (SIMAT) ubicadas en el Estado de México y las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Toluca (RAMA ZMVT). Para ello, se tomó en cuenta que 1ppm de CO equivale a  $1.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Baumgardner et al., 2007) Se considera relevante incluir los valores de concentración de BC del reporte únicamente para conocer más a fondo la información que contiene este documento.

**Tabla 8** Promedio anual de BC en la ZMVT

<b>Año</b>	<b>Promedio anual de BC en la ZMVT (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
2005	2.53
2006	1.75
2007	2.53
2008	2.58

Fuente: (SMAGEM, 2010)

#### 2.2.1.3. Otros inventarios de emisiones

A continuación, se mencionan los documentos publicados posteriormente a los dos inventarios base de esta investigación.

1. **Inventario de Emisiones a la Atmósfera del Estado de México, 2006** (SMAGEM, 2012a). El objetivo de este trabajo fue actualizar las emisiones generadas en fuentes puntuales, de área, móviles y erosivas durante el año 2006. Cuenta con información para la Zona Conurbada del Valle de México (59 municipios de la entidad) y para el Valle de Toluca (22 municipios de la entidad).

2. **Inventario de Emisiones del Estado de México (2010)** (SMAGEM, 2014) Este inventario fue elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, a través del Departamento de Adaptación al Cambio Climático del Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático; para su realización, se contemplaron los contaminantes criterio emitidos durante 2010. En este documento se describen las emisiones por tipo de fuente, por contaminante y por zona metropolitana (Valle de México y Toluca).
3. **Programa para mejorar la calidad del aire. Valle de Toluca 2012-2017** (SMAGEM, 2012b). Dentro del programa se incluyó un inventario para los 22 municipios que conforman el Valle de Toluca, con año base en 2008. Se encontró que las fuentes móviles (transporte pesado y autos particulares) fueron las que aportaron la mayor parte de los contaminantes, siendo el CO el contaminante con mayor orden de magnitud.
4. **Programa de Gestión para mejorar la calidad del aire en el Estado de México ProAire 2018-2030** (SMAGEM, 2018). El programa da a conocer las estrategias que se realizarán en el Estado de México en el periodo 2018-2030 con el fin de reducir la emisión de contaminantes criterio, con un enfoque especial en ozono y partículas suspendidas menores a 10 y 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico.
5. **Inventario Nacional de Emisiones 2016** (SEMARNAT, 2019a). Este inventario reporta las emisiones de los contaminantes PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, COV, y NH<sub>3</sub>. La información es dividida en distintas maneras; por zonas metropolitanas en el país, por tipo de fuente (de área, fijas, móviles y naturales), así como por categorías y resúmenes estatales y municipales.

### 2.3 Validaciones de inventarios

Ante la poca certidumbre con la que (en algunas ocasiones) son elaborados los inventarios de emisiones, surge la necesidad de evaluarlos. La evaluación resulta primordial debido a que los inventarios proporcionan información para promover acciones de mejora de la calidad del aire, requiriendo que la información presentada sea lo más precisa posible. La manera más común de evaluarlos es a través de las técnicas top-down y bottom-up (explicadas anteriormente). Esta metodología se ha aplicado en varios casos para conocer si el inventario de dicha región representa realmente las emisiones existentes. Cabe señalar que la evaluación puede realizarse para contaminantes en fase gaseosa o particulada.



Un caso en el que únicamente se evaluaron gases contaminantes fue en la investigación realizada por Vivanco y Andrade, 2006 para el área metropolitana de Sao Paulo, Brasil. Los contaminantes evaluados fueron CO, NO<sub>x</sub> y NMOG (gases orgánicos no metano). Los datos utilizados fueron mediciones tomadas entre las 07:00 y 08:00 hora local y se obtuvieron los resultados a través de los cocientes CO/NO<sub>x</sub> y NMOG/CO; asumiendo que la estimación de las emisiones de CO eran correctas, detectaron que los NO<sub>x</sub> se encontraban ligeramente sobreestimados mientras que los NMOG estaban subestimados (Vivanco y Andrade, 2006).

Por otro lado, un estudio en dónde sí se consideraron contaminantes en forma particulada fue el del Valle de San Joaquín, California, Estados Unidos. En ese estudio, Haste et al., 1998; realizaron una evaluación para los contaminantes: CO, PM, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>. Utilizaron datos recolectados entre 06:00 y 09:00 hora local en 4 sitios de medición dentro de la región de estudio. Encontraron que el inventario de emisiones no consideró la variación entre las emisiones entre los días hábiles y los fines de semana, es decir, la diferencia entre las fuentes puntuales y de área contra las vehiculares (reducción del tráfico vehicular en fines de semana). También, que las emisiones de SO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub> se encontraban sobrestimadas en el inventario, mientras que las de CO, NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> concordaron con las mediciones; esto al considerar que las estimaciones de NO<sub>x</sub> eran correctas.

Otra manera de aplicar la técnica es a partir de cierta premisa. Fujita et al., (1992) partieron del hecho de considerar que las emisiones de CO y NMOG se encontraban subestimadas. Para confirmar o descartar esta idea, compararon los cocientes CO/NO<sub>x</sub> y NMOG/NO<sub>x</sub> derivados de mediciones ambientales contra los cocientes NMOG del inventario de emisiones en la Costa Sur de California. Adicionalmente se compararon las concentraciones observadas de CO, NMOG y NO<sub>x</sub> y los cocientes CO/NO<sub>x</sub> y NMOG/NO<sub>x</sub> contra las predicciones del modelo de calidad del aire ARB.

Los datos se recopilaron durante 11 días de medición en verano y 6 en otoño. Para asegurar las condiciones del modelo de caja, se consideraron únicamente las mediciones tomadas entre 7:00 y 8:00, debido a que durante ese tiempo es el pico de circulación vehicular y por lo tanto una mejor distribución espacial, además, dadas las condiciones meteorológicas y los patrones de emisión del sitio, las mediciones tomadas por la mañana representarían de mejor manera las emisiones generadas por las fuentes vehiculares. Se encontró que las discrepancias entre los cocientes CO/NO<sub>x</sub> y NMOG/NO<sub>x</sub> calculados respecto a los del inventario pudieron deberse a una subestimación de las emisiones de CO y NMOG o a una sobre estimación de NO<sub>x</sub>, Si esa diferencia entre los resultados encontrados con las mediciones respecto al inventario se debe principalmente a las emisiones de CO y NMOG generadas por las fuentes móviles, las emisiones que muestra el inventario serían 1 y 2-2.5 veces más altas.

Recientemente, Ruíz et al., 2014 aplicaron la validación top-down para evaluar los inventarios disponibles para varios estados del centro del país que integran la Comisión Ambiental de la Megalópolis (Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Morelos,

Puebla y Tlaxcala) en la investigación “Estudios de calidad del aire y su impacto en la región centro de México”. El objetivo principal de esta evaluación fue identificar los posibles problemas en los que se debe prestar atención para mejorar los inventarios y hacer de ellos una herramienta precisa para la toma de decisiones (Ruíz et al., 2014). Para el Valle de Toluca se obtuvo una validación respecto al inventario del 2008 como año base y se contrastó con la información de las estaciones de la red de Monitoreo del Estado de México; dichos resultados se retomarán más adelante.

Los estudios anteriores coinciden en la aplicación de la técnica top-down, donde destaca la importancia del uso de datos ambientales tomados durante un horario matutino; ya que, debido a la complejidad del sistema atmosférico, factores como emisiones en zonas aledañas a los sitios de medición, transporte de contaminantes y reacciones químicas, se tiene que asegurar alguna manera en que estos efectos sean minimizados. Considerando que por la mañana la tasa de emisión de contaminantes es alta y la velocidad de viento y reactividad química atmosférica son bajos, los efectos de transporte de contaminantes y fotoquímica son minimizados (Haste et al., 1998); haciendo hincapié en que el uso de datos tomados durante la mañana son los óptimos para realizar la evaluación de inventarios a través de esta técnica.

Con base en las características de la realización del inventario de emisiones de cada sitio, es posible definir qué contaminante es adecuado considerar como referencia para, a través de los cocientes, saber si un contaminante estará subestimado o sobre estimado. Por ejemplo, al saber que ciertas metodologías de estimaciones de emisiones tienen la menor incertidumbre, dicho contaminante podría servir como referencia (los  $\text{NO}_x$  en el caso del estudio de (Haste et al., 1998)). Por otro lado, los cocientes brindan información sobre si las mediciones se acoplan a los resultados presentados por el inventario o existen discrepancias, las cuales son corroboradas a través de la aplicación de modelos o de alguna metodología de cálculo. (Ruíz et al., 2014)

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

Para realizar la evaluación del inventario de emisiones del Valle de Toluca, se realizó una campaña de monitoreo y muestreo (Proyecto CCA-PT17) en el área de estudio durante febrero-abril de 2017. Los sitios en donde se realizaron las mediciones analizadas en esta investigación fueron Tollocan, San Antonio la Isla y Zinacantepec. Después de la obtención de datos se procedió al tratamiento estadístico de estos, iniciando con su validación y posterior cálculo de los cocientes de contaminantes primarios. Posteriormente se analizó la correlación CO-BC para realizar la estimación de la emisión de carbono negro. A continuación, se detalla el proceso que llevó a la obtención de resultados.

#### 3.1 Área de estudio

Actualmente, el Valle de Toluca está integrado por 22 municipios del Estado de México listados a continuación;

- |                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| 1. Almoloya de Juárez | 12. Rayón               |
| 2. Almoloya del Río   | 13. San Antonio la Isla |
| 3. Atizapán           | 14. San Mateo Atenco    |
| 4. Calimaya           | 15. Temoaya             |
| 5. Capulhuac          | 16. Tenango del Valle   |
| 6. Chapultepec        | 17. Texcalyacac         |
| 7. Lerma              | 18. Tianguistenco       |
| 8. Metepec            | 19. Toluca              |
| 9. Mexicaltzingo      | 20. Xalatlaco           |
| 10. Ocoyoacac         | 21. Xonacatlán          |
| 11. Oztolotepec       | 22. Zinacantepec        |

Si bien la mayoría de los municipios que conforman el Valle son de carácter rural, algunos otros se encuentran en transición hacia la urbanización y algunos más se encuentran totalmente urbanizados. Por lo tanto, para la investigación los sitios en donde se realizaron las mediciones fueron clasificados con base en su grado de urbanización en 3 categorías: urbano, suburbano y periurbano; considerando lo siguiente:

**Sitio periurbano:** Se caracterizan por tener un perfil económico basado en la agricultura y se localizan en la periferia de las zonas metropolitanas de los sitios con alto grado de urbanización (Torres y Rodríguez, 2005).

**Sitio suburbano:** Área que se localiza en las zonas metropolitanas de grandes sitios urbanos, las cuales se caracterizan por presentar cambios de uso de suelo, desarrollo de industrialización y expansión urbana (generalmente incontrolada) (Valencia y López, 2013).

**Sitio urbano:** Área con gran densidad poblacional (alrededor de 50,000 habitantes) y servicios económicos terciarios cuyas actividades se ven poco ligadas a la agricultura (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia UNICEF, 2012).

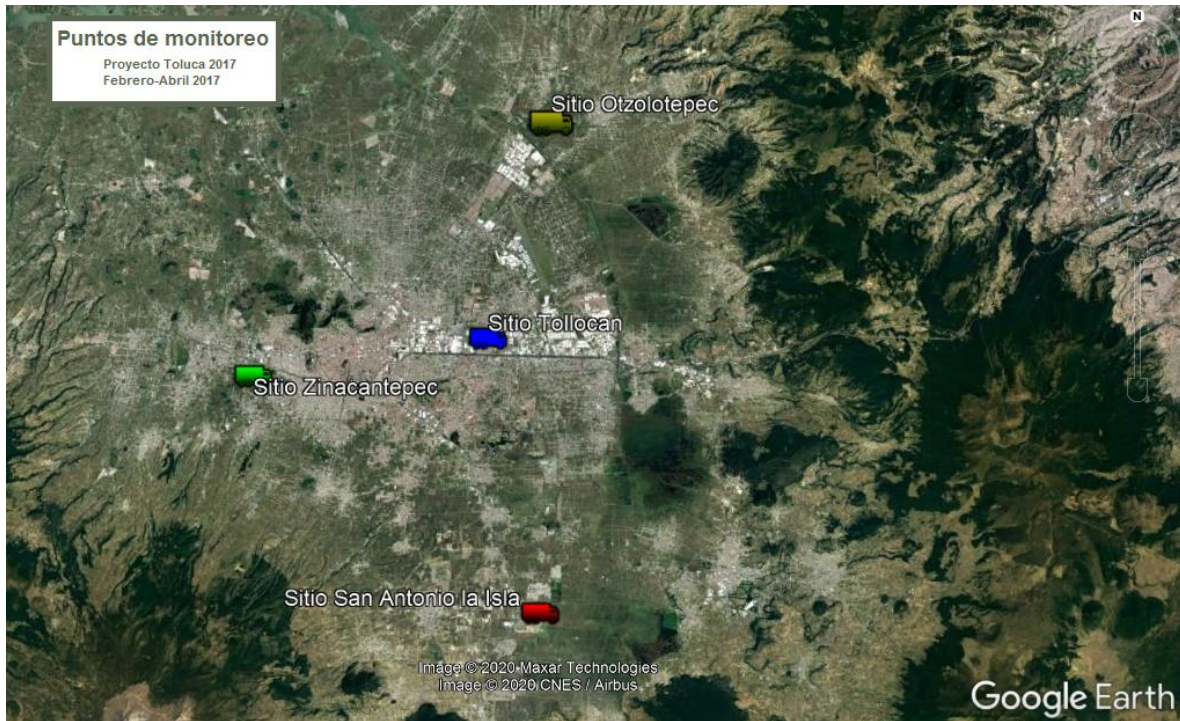
## 3.2 Monitoreo

### 3.2.1 Campaña de monitoreo

De febrero a abril de 2017 se realizó una campaña de muestreo y monitoreo en el Valle de Toluca organizada por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM) como parte del proyecto de investigación al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) denominada “Impacto de las emisiones móviles y fijas a la distribución de carbono negro y gases contaminantes en la vertical en zonas urbanas y periurbanas del centro de México” (Proyecto CCA-PT17), cuyos objetivos principales fueron tanto evaluar los inventarios de emisiones de las cuencas atmosféricas de la Megalópolis como entender la química de formación de ozono en cada una de las zonas urbanas que la conformaron, a fin de que la formación de estrategias de control de la contaminación en la megalópolis cuenten con mayor certidumbre (Comunicación personal Dr. Oscar Peralta CCA UNAM, 2019).

Para cumplir dicho objetivo, se realizaron mediciones de:

- Parámetros meteorológicos: radiación solar, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento.
- Concentraciones ambientales de contaminantes: carbono negro, gases criterio y material particulado.



**Figura 13** Ubicación de los puntos de monitoreo. (Peralta, 2018)

En la Figura 13 se observa la ubicación de los sitios de monitoreo, los cuales incluyen:

- 1 zona urbana-tráfico vehicular: vía carretera del Paseo Tollocan (Tollocan)
- 1 zona suburbana: Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, campus Toluca (Zinacantepec)
- 2 zonas periurbanas: Escuela Primaria “Adolfo López Mateos” en San Antonio la Isla (San Antonio la Isla) y la Universidad Politécnica de Otzolotepec en el municipio del mismo nombre.

Si bien la campaña se realizó en estos 4 sitios, únicamente en 3 de ellos se realizaron mediciones de BC siendo, por lo tanto, los sitios de interés en esta investigación.

### ***3.2.2 Descripción de los Sitios de monitoreo***

#### **3.2.2.1 Zona urbana**

Ubicación del sitio de medición: Latitud 19° 17' 11.21" N Longitud 99° 35' 2.38" O. Las mediciones de la zona urbana se realizaron en la orilla de la vialidad llamada “Paseo Tollocan”. Ésta es una de las principales avenidas de la zona urbana de Toluca, cruza a la

ciudad de este a oeste y se caracteriza por su alta carga vehicular, ya que cuenta con 4 carriles de baja, 6 de alta velocidad y una vía de tren (Figura 14). En este sitio, las mediciones de BC se realizaron del 20 de febrero al 31 de marzo de 2017, mientras que los parámetros meteorológicos y el resto de las concentraciones de contaminantes fueron tomados del 16 de febrero al 26 de abril. En la vía de baja velocidad se instaló un laboratorio móvil con instrumentación para medir parámetros meteorológicos, contaminantes atmosféricos (recolección de muestras de gases y partículas). Para la medición de BC se utilizó un espectrómetro fotoacústico (PAS) (Peralta, 2018).



**Figura 14** Sitio Tollocan.

### 3.2.2.2 Zona suburbana

Ubicación del sitio de medición: Latitud  $19^{\circ} 16' 9.0811$  N Longitud  $99^{\circ} 42' 25.7''$ . El monitoreo correspondiente a la zona suburbana fue ubicado en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, éste se ubica aproximadamente a 8 km al este del centro de Toluca, la zona que lo rodea se caracteriza por tener una densidad baja tanto en vehículos como en habitantes (Figura 15) (Peralta, 2018). Dentro de las instalaciones del campus universitario se instaló un laboratorio móvil que operó del 12 de febrero al 26 de mayo para obtener datos de parámetros meteorológicos y concentración de gases y partículas ambientales. Para el caso del BC, las mediciones fueron tomadas del 22 de febrero al 17 de marzo mediante un etalómetro.



**Figura 15** Sitio Zinacantepec.

### 3.2.2.3 Zona periurbana

Ubicación del sitio de medición: Latitud  $19^{\circ} 9' 18.39''$  Longitud  $99^{\circ} 33' 44.65''$ . La zona periurbana considerada en la investigación se localiza en el municipio de San Antonio la Isla, ahí el sitio de monitoreo fue ubicado en la escuela primaria “Adolfo López Mateos”, a 17 km al sur del centro de Toluca (Figura 16). En el sitio la densidad vehicular y habitacional es muy baja, incluso considerada como difusa, también se caracteriza por la existencia de zonas de cultivo (Peralta, 2018). Del 14 de febrero al 26 de abril se colocó otro laboratorio móvil para el registro de datos de meteorología y contaminantes criterio, para el caso del BC, las mediciones se realizaron del 01 al 31 de marzo con un etalómetro.



**Figura 16** Sitio San Antonio la Isla

### ***3.2.3 Equipos de medición***

#### **3.2.3.1 Mediciones de carbono negro**

A pesar de haber utilizado dos equipos distintos para realizar las mediciones de BC, el funcionamiento de ambos se basa en las propiedades ópticas del aerosol. A continuación, se describe brevemente el funcionamiento de ambos.

##### **3.2.3.1.1 Espectrómetro foto acústico**

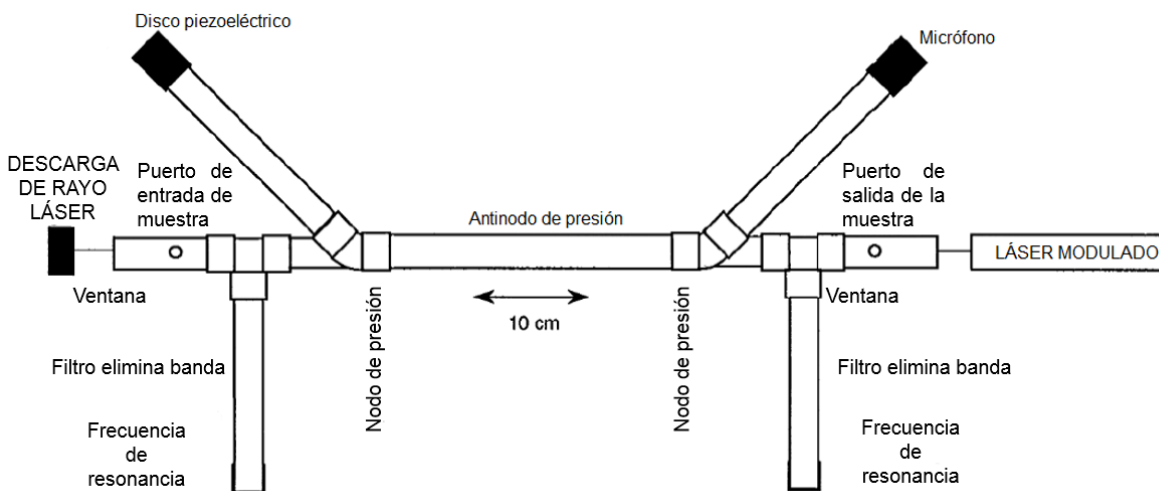
En la Figura 17 se observa el esquema de funcionamiento del espectrómetro foto acústico (PAS), el principio de operación se basa en la propiedad de las partículas de aerosol de absorber la radiación de un láser modulado (532 nm). Los componentes absorbentes de luz convierten el haz láser a una onda acústica de presión que promueve la expansión del gas que contiene la muestra. En el equipo los aerosoles se iluminan dentro de una cámara resonante con un rayo láser que se modula a la frecuencia resonante de la cámara, de manera que se forma una onda estacionaria que amplifica las variaciones de presión (Arnott et al., 1999).

La intensidad del sonido producido en la cámara se mide a través de un micrófono que detecta esta señal acústica, produciendo una medida de absorción de la luz; reflejada en el coeficiente de absorción  $B_{abs}$ . El valor de este coeficiente indica la sección transversal del BC disponible para absorber luz (Lioussse et al., 1993; Martins et al., 1998; Bond y Bergstrom, 2006); a su vez, la absorción de BC por masa es descrita a través del término “sección transversal de absorción de masa” (MAE) (Knox et al., 2009). Por otro lado, a través de un nefelómetro se mide el coeficiente de dispersión de la luz.



Así, el equipo calcula la concentración de BC en la muestra de la manera siguiente:

$$\text{Masa de BC en } \mu\text{g/m}^3 = B_{\text{abs}} (1/\text{Mm}) / \text{BC MAC (m}^2/\text{g)} \quad \text{Ecuación 3}$$



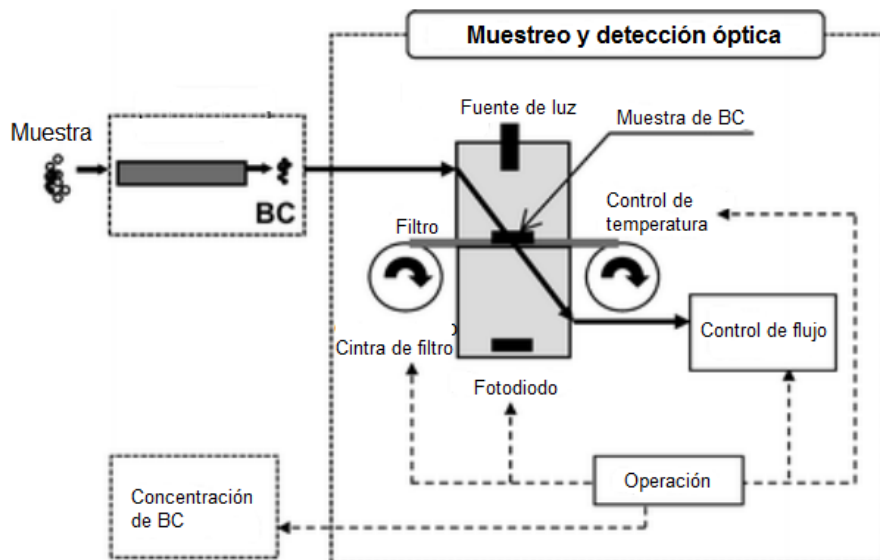
**Figura 17** Esquema de funcionamiento del PAS Adaptado de (Arnott et al., 1999)

### 3.2.3.1.2 Etalómetro

El principio de funcionamiento del equipo consiste en la medición de la atenuación de un haz de luz transmitido a través un filtro; el cual colecta la muestra de aerosol de manera continua. La recolección de la muestra ocurre en un filtro de fibra de cuarzo en forma de cinta. Durante este proceso la cinta se mantiene inmóvil, únicamente se mueve hasta que las partículas de aerosol colectado forman un punto de cierta densidad; la tasa de acumulación de BC en el punto es proporcional a la concentración de BC en el aire que ingresa al equipo. La medición de la concentración de BC es realizada de manera indirecta entre la diferencia de la cantidad de luz absorbida en el punto de muestra cuando el filtro está limpio y una vez que se ha colectado la muestra. La luz que penetra en las fibras de filtro pasa a un fotodiodo, conforme aumenta la cantidad de BC en la muestra, la cantidad de luz detectada por el fotodiodo disminuye (Hansen, 2005).

Se destacan 3 mediciones realizadas por el equipo: las intensidades de luz transmitidas por la sección de filtro que contiene la muestra y la sección de referencia (sección limpia), así como la tasa de flujo controlado que ingresa A través de estas mediciones y mediante el parámetro sigma, definido como la absorción óptica por sección (con un valor de 16.6 m<sup>2</sup>/g para una longitud de onda de 880 nm); el algoritmo del equipo calcula la concentración de BC que existe en la muestra. La medición puede realizarse en canales de longitudes de onda distintos que van desde los 370 a 950 nm. Debido a las características del BC, su detección

es realizada en el canal de 880 nm (Hansen, 2005). La Figura 18 muestra un diagrama general del funcionamiento del equipo.



**Figura 18** Esquema de funcionamiento del Etalómetro. Adaptado de (Sedlacek, 2016)

Si bien se utilizaron equipos distintos para la medición de BC, las características de estos permitieron tener datos certeros sobre la concentración de este contaminante. Para que cada equipo transformara la cantidad de material particulado absorbente detectado en concentración de BC, utilizó un valor de MAC específico para la longitud de onda ( $\lambda$ ) en la que operó. El valor de la absorción óptica por sección (el parámetro “sigma” en el etalómetro) tiene una dependencia inversamente proporcional a la longitud de onda (Hansen, 2005) es por ello que el PAS usó un MAC de  $10 \text{ m}^2/\text{g}$  con un  $\lambda$  de 532 nm y el etalómetro usó el parámetro sigma de  $16.6 \text{ m}^2/\text{g}$  y un  $\lambda$  de 880 nm.

Por otro lado, se han realizado varios estudios de inter comparación entre las mediciones realizadas por el etalómetro respecto a otros métodos (ópticos, térmicos y químicos). Se encontró que al comparar los resultados del etalómetro con el Particle Soot Absorption Photometer (PSAP) durante una campaña de medición con ambos equipos en Atlanta, USA del 3 de agosto al 1 septiembre de 1999, se tuvo un coeficiente de correlación  $R^2$  de (Pavia, 2017) 0.97 (Hansen, 2005) determinando que el uso del etalómetro y el de otros equipos ópticos proporcionan datos adecuados de BC.

La inter comparación específica de los equipos utilizados durante la campaña de muestreo en el Valle de Toluca también se ha determinado anteriormente, con base en los datos obtenidos

en la campaña “Aerosoles Atmosféricos en Ciudad Universitaria (ACU 15), realizada del 19 de enero al 20 de marzo de 2015. Durante esta campaña se recolectaron muestras de material particulado  $PM_{2.5}$  tomadas en la azotea del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM usando distintos equipos cuya operación es dependiente de las propiedades ópticas de los aerosoles; entre dichos equipos se encontraba el etalómetro y el PAS. A través del diagrama de dispersión de los promedios horarios de los coeficientes de absorción medidos por estos equipos, se encontró un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.93 (Pavia, 2017) considerando que la medición de equipos se encuentra en buen grado de concordancia.

Generalmente las mediciones de BC se basan en el uso de las propiedades ópticas de los aerosoles (Petzold et al., 2013), sin embargo, esto implica una gran complejidad en la detección de este contaminante, ya que partículas como el carbono orgánico pueden modificar la respuesta de las propiedades ópticas del BC. La interferencia del carbono orgánico en la medición del BC se aborda en el Anexo 1

### 3.2.3.2 Monóxido de carbono (CO), Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), $PM_{2.5}$ , velocidad y dirección del viento.

La instrumentación automática utilizada en los diferentes sitios consistió en analizadores comerciales de varias marcas aprobadas por la US EPA como apropiadas para la medición continua de contaminantes atmosféricos. La Tabla 9 presenta las características comunes de estos analizadores y a continuación se menciona brevemente el principio de funcionamiento de cada uno de ellos.

**Analizador de  $NO_x$ :** el equipo mide la cantidad presente de NO en una muestra gaseosa que ingresa a él mediante una reacción de quimioluminiscencia; la cual ocurre cuando el NO es expuesto a ozono ( $O_3$ ). Este proceso químico ocurre en dos fases; en la primera una molécula de NO reacciona con una molécula de  $O_3$ , produciendo una molécula de  $NO_2$  y una de  $O_2$ . Algunas moléculas de  $NO_2$  continúan en estado excitado, por lo que en la segunda fase regresan a su estado basal soltando el exceso de energía en forma de luz. A mayor cantidad de NO detectado, mayor cantidad de luz producida (Teledyne API, 2018).

Un tubo foto multiplicador detecta la cantidad de luz generada en la reacción química. Sin embargo, debido a que el equipo solo detecta el NO, el  $NO_2$  no es detectado por la reacción de quimioluminiscencia. Por lo tanto, éste es convertido a NO en un cartucho que contiene molibdeno (Mo). Para detectar el NO que proviene de la reacción química de quimioluminiscencia y la que viene del molibdeno, el equipo cambia periódicamente la corriente de gas alternando ambas reacciones químicas. Los  $NO_x$  reportados son la suma del NO y el  $NO_2$  (convertido) que se encuentran en la muestra (Teledyne API, 2018).

**Analizador de monóxido de carbono:** este analizador se basa en la técnica de espectroscopía no dispersiva por correlación de filtro. Es decir, utiliza la propiedad de

absorción de radiación infrarroja (IR) de las moléculas de CO (en una longitud de onda cercana a los 4.7 micrómetros).

Dentro del analizador existen dos áreas, una llamada “celda de reacción” y la otra “celda vacía”. En la primera se mantiene un flujo constante de aire ambiente (muestra) y la medición se realiza comparando la absorción de IR de una concentración de referencia de CO con la absorción de la muestra. Para ello, una fuente de radiación infrarroja emite un haz (IR) que llega hasta la cámara de reacción, ahí es reflejado internamente mediante la acción de espejos posicionados en los extremos de la caja (Torres Jardón, 2019).

El dispositivo permite que la muestra de aire pase alternativamente por la celda de reacción y por la celda vacía. Posteriormente la celda atraviesa un filtro óptico de interferencia antes de llegar al detector óptico (EPA, 2013).

**Analizador de PM<sub>2.5</sub>:** la medición de material particulado para ambientes cerrados y abiertos puede ser realizada a través de este equipo. La medición usa el principio de dispersión de la luz cercana de radiación infrarroja (IR) para detectar la concentración de partículas en mg/m<sup>3</sup>. La fuente de radiación IR se ubica a 90° del foto detector; al momento en que el flujo que contiene las partículas ingresa al equipo éstas atraviesan el haz IR, de modo que dispersan la luz. La cantidad de luz que percibe el foto detector es directamente proporcional a la concentración del aerosol (Environmental Devices Corporation, 1999).

**Dirección y velocidad de viento:** la velocidad de viento es medida a través de un sensor en forma de hélice de cuatro palas. La rotación de la hélice produce una onda sinusoidal con una frecuencia directamente proporcional a la velocidad de viento. A su vez, el equipo utiliza un potenciómetro para medir la dirección del viento. Los datos registrados proporcionan una tensión de excitación, ésta es una salida de señal analógica directamente proporcional al ángulo del acimut (Campbell Scientific, 2018).

**Tabla 9** Relación de equipos usados, principio de medición, resolución temporal aplicada en campaña, límite de detección y otras características de la medición.

<b>Especie o Parámetro</b>	<b>Método o principio de Medición</b>	<b>Límite de detección analizadores y de precisión en meteorología</b>
NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO	Quimioluminiscencia	0.4 ppb
CO	Correlación de filtro de gas por infrarrojo no dispersivo	0.05 ppm (50 ppb)
PM <sub>2.5</sub>	Dispersión de luz infrarroja	0.01 µg/m <sup>3</sup>
Dirección y velocidad de viento	Potenciómetro interno y sensores de hélice	±3° ±0.3 m/s 1% de lectura

Fuente ( Environmental Devices Corporation, 1999; Aparicio, 2018).

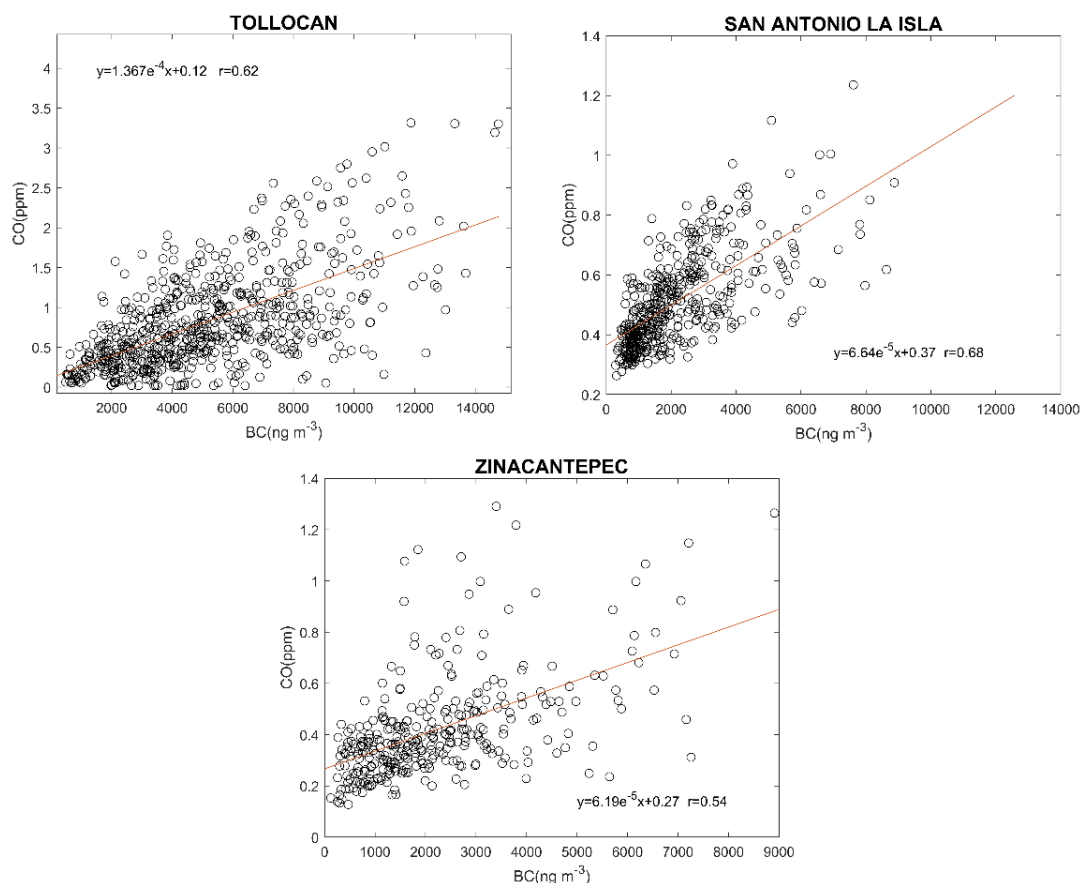
### 3.3 Validación de datos

La primera parte del análisis de datos para las mediciones de BC, PM<sub>2.5</sub> y los gases CO y NO<sub>x</sub> fue la validación de estos. Su objetivo fue asegurar la calidad de la información con la que se trabajó. Para ello, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Elaboración de un diagrama de dispersión de cada parámetro con un desfase y eliminar los datos que se encontraban considerablemente fuera de la tendencia lineal. Los criterios para la invalidación de datos fueron los siguientes:
  - Datos por debajo del límite inferior negativo.
  - Datos extremos aberrantes o con código de falta de registro.
  - Datos colectados durante operaciones de calibración, verificación de cero span, cortes de energía y fallas de equipo.
  - Datos de velocidad y dirección del viento con valores negativos.
  - Banderas “flags” emitidos por los equipos.
2. Cálculo de los promedios horarios, en caso de que el parámetro en cuestión se encontrara en una resolución temporal distinta.
3. Elaboración de histogramas y series de tiempo de los distintos parámetros en cada sitio.
4. Los parámetros registrados en cada sitio de monitoreo fueron:
  - a) Tollocan: carbono negro, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y PM<sub>2.5</sub>
  - b) Zinacantepec: carbono negro, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno
  - c) San Antonio la Isla: carbono negro, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y PM<sub>2.5</sub>.

Después de realizar la validación de datos se elaboraron series de tiempo de la concentración de contaminantes para cada sitio de monitoreo con la finalidad de detectar algún patrón de comportamiento en éstos. A través de estas figuras es posible detectar información importante como picos de emisiones máximas o reducción en la emisión de contaminantes.

Posteriormente se identificó el valor de la concentración de fondo del CO a través del ajuste lineal de la correlación CO-BC, utilizando como variable independiente al BC (eje x) y variable dependiente al CO (eje y). En la Figura 19 aparecen las representaciones gráficas de este ajuste para cada uno de los sitios analizados. Se encontró que los valores de las ordenadas al origen eran de 0.12 ppm en Tollocan, 0.37 ppm en San Antonio la Isla y 0.27 ppm en Zinacantepec.



**Figura 19** Concentración de fondo del CO.

Después de restar los valores de las concentraciones de fondo a las mediciones validadas de CO, se encontró que las nuevas ordenadas al origen eran muy cercanas al límite de detección del equipo (0.005 ppm), ya que para Tollocan se tuvo 0.0529 ppm, en San Antonio la Isla 0.0495 ppm y en Zinacantepec 0.0771 ppm. Debido a que en los sitios periurbano (San Antonio la Isla) y suburbano (Zinacantepec) se tuvo una disminución considerable en la

cantidad de datos al restar el respectivo valor de fondo, en el manejo de datos posterior no se descartó la concentración background de CO.

### ***3.3.1. Incertidumbre de las mediciones***

La expresión del resultado de una medición requiere dar a conocer la calidad de éste, por ello se introduce el concepto de incertidumbre; la cual puede ser entendida como un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que se podrían atribuir razonablemente a la medición (Miranda, n.d.). Según el tipo de medición, pueden involucrarse distintas fuentes de incertidumbre. Éstas deben expresarse de una manera estandarizada, usando un margen que puede pensarse como “más o menos una desviación estándar”(Bell, 1999).

Existen distintas maneras de estimar la incertidumbre de una medición, dentro de las que se incluyen la evaluación tipo A y la evaluación tipo B. La primera de ellas es un método obtenido a través de un análisis estadístico de una serie de observaciones. Incluye estadísticos como la media, varianza, desviación estándar, varianza experimental de la media, desviación estándar de la media y la incertidumbre estándar. La segunda implica medios distintos al análisis estadístico, por ejemplo, datos de mediciones anteriores, datos provistos en calibraciones u otros certificados o especificaciones del fabricante (Miranda, n.d.).

Se habla de incertidumbre estándar combinada cuando el resultado de una medición se obtiene de los valores de otras cantidades. Se utilizó este parámetro para expresar la dispersión de valores en las mediciones de la concentración de contaminantes, asociada a la incertidumbre propia de medir (uso de la evaluación tipo A) y la limitación del equipo, manejada como el límite de detección (uso de la evaluación tipo B).

En la Tabla 10 se muestran los valores de estimación de incertidumbre de los datos de concentración de contaminantes y en el Anexo 2 se encuentra de forma detallada la obtención de dichos valores de incertidumbres, es decir, los resultados de las evaluaciones tipo A y B para cada contaminante.

**Tabla 10** Incertidumbre de la medición de contaminantes

<b>Contaminante</b>	<b>Equipo</b>	<b>Sitio</b>	<b>Incertidumbre combinada</b>
Carbono negro	PAS	Tollocan	0.361 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Etalómetro	Zinacantepec	0.1180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Etalómetro	San Antonio la Isla	0.117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Monóxido de carbono	Analizador de monóxido de carbono	Tollocan	0.054 ppm
		Zinacantepec	0.0507 ppm
		San Antonio la Isla	0.0503 ppm
Óxidos de nitrógeno	Analizador de NO/NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub>	Tollocan	2.857 ppb
		Zinacantepec	0.5935 ppb
		San Antonio la Isla	5.605 ppb
Partículas menores a 2.5 $\mu\text{m}$	Analizador de PM <sub>2.5</sub>	Tollocan	0.605 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		San Antonio la Isla	0.430 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

### 3.4 Correlación carbono negro-monóxido de carbono

Siguiendo la premisa de que el CO y el BC son generados mediante la misma fuente de emisión y añadiendo el hecho de que las mediciones de CO son útiles para inferir la concentración de BC cuando las mediciones de éste no se encuentran disponibles (Baumgardner et al., 2007, 2002), una regresión lineal entre ambos contaminantes proporciona una relación para obtener dicha inferencia.

La correlación CO-BC se realizó de dos maneras distintas. En la primera de ellas se tomó como variable independiente al CO (considerando que es más probable que existan mediciones de este contaminante), y como variable dependiente el BC. Los datos se dividieron en 3 bloques de tiempo: 24 horas, de 06:00-10:00 horas y 06:00-18:00 horas, descartando los datos de fines de semana. Esto con la finalidad de detectar la influencia de las actividades antropogénicas en la emisión de los contaminantes estudiados.

La segunda manera en la que se elaboró la correlación fue a través de la agrupación de datos. Esta metodología busca compensar la dispersión de los datos cuando las poblaciones de éstos corresponden a promedios de periodos cortos de tiempo. Se utilizó el procedimiento “binned scatterplots” (Stepner, 2014) el cual es usado en la búsqueda de correlaciones de bases de datos con aparente gran dispersión y es generalmente aplicado en estudios de química atmosférica y calidad del aire, por ejemplo el aplicado por (Baumgardner et al., 2002) que involucra la relación CO-BC.



El procedimiento consiste en ordenar los pares de valores de “x” (CO) y “y” (BC) de menor a mayor con respecto a los valores de la variable dependiente (y); a partir de este ordenamiento se crean grupos (bins) de igual tamaño de valores, se obtiene el promedio y desviación estándar de cada grupo y se realiza una nueva correlación con estos datos (Cattaneo et al., 2019).

### ***3.4.1 Relación $\Delta BC/\Delta CO$***

Con la finalidad de analizar con mayor detalle la variación de la relación CO-BC a lo largo del día, se determinó la pendiente de la línea de regresión obtenida de graficar la concentración de BC respecto a la concentración de CO (Andreae y Merlet, 2001). Para ello, se empleó la metodología utilizada por (Kondo et al., 2006); es decir, se obtuvieron las pendientes  $\Delta BC/\Delta CO$  de 3 maneras distintas:

- Método 1: Pendiente del ajuste de mínimos cuadrados a través de diagramas de dispersión CO-BC.
- Método 2: Se determinó el valor de la concentración de fondo tanto para el BC como para el CO, valor equivalente al percentil 1.25. A los valores de concentración se les restó el valor de la concentración de fondo y se procedió de igual manera que en el método 1.
- Método 3. Restando los valores de fondo, se calcularon los valores de la mediana para cada hora. Este parámetro estadístico refleja los valores esperados en un conjunto de datos (más que el valor promedio dado a que éste último es afectado por valores mínimos o máximos), de esta manera se localiza el valor más esperado en la relación CO-BC por cada hora.

## **3.5 Cocientes de contaminantes primarios**

Considerando las características atmosféricas que indica el modelo de caja, se eligió trabajar con las concentraciones (promedio horario) en el lapso de las 06:00-10:00 horas. Además, elegir estos datos únicamente para los días hábiles da información más precisa. Ya que se analiza un contaminante generado principalmente por fuentes móviles, se infiere que los datos recopilados durante el fin de semana no son tan representativos de la actividad antropogénica como lo son aquellos de días hábiles.

Generalmente para la aplicación de la técnica, se hace una transformación de las concentraciones y emisiones de una base másica a una base molar, sin embargo, dada la

complejidad de la estructura química del BC, éste no cuenta con un peso molecular propio. Por ello, todas las concentraciones de contaminantes fueron manejadas en unidades de masa sobre volumen ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Para fines comparativos con valores de cocientes reportados en la literatura, el cociente CO/NO<sub>x</sub> se manejó tanto en base masa como en base molar. Los cocientes fueron realizados por bloques horarios, 00:00-05:00, 06:00-10:00, 11:00-17:00, 17:00-23:00 horas para analizar la variación de las proporciones a lo largo del día.

Los cocientes CO/BC que se utilizaron para la estimación de las emisiones fueron obtenidos de la siguiente manera:

$$\frac{[CO] \mu\text{g}/\text{m}^3}{[BC] \mu\text{g}/\text{m}^3} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde [BC] representa la concentración horaria de BC en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y [CO] representa la concentración horaria del CO en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Obtener el cociente a través de la división del promedio entre las concentraciones medidas no es común, sin embargo, brinda la información necesaria para realizar la validación del inventario (Ruíz et al., 2014). Si bien la pendiente de la correlación BC-CO ( $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ ) es un parámetro útil para validar los inventarios de emisiones de BC (Kondo et al., 2006), se decidió invertir el cociente para estimar las emisiones. Es decir: se usó CO/BC obtenido de la división de las concentraciones en lugar de la pendiente  $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$  únicamente con la finalidad de tener un manejo más fácil de los valores del cociente. El análisis de la pendiente  $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$  se realizó en la sección previa a la estimación de emisiones.

### 3.6 Estimación de la emisión de carbono negro

Mediante la aplicación de la técnica top-down no es posible verificar la cantidad absoluta en masa de los contaminantes, a menos que adicionalmente se aplique una metodología bottom-up (EPA, 2009). Sin embargo, sí es posible hacer una estimación de la emisión del contaminante estudiado a través de algunas aproximaciones.

La primera aproximación consistió en una proyección de emisión de BC a 2015 a través del cálculo del índice de motorización en el Valle de Toluca. Este índice (o tasa) mide la cantidad de vehículos motorizados por habitante en un lugar y periodo dado (Gartner, 2011).

$$\text{índice vehicular} = 1000 * \left( \frac{\text{Vehículos}}{\text{Habitantes}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Se tomó al 2015 como año base debido a que para entonces las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) tanto para población como para vehículos registrados en el Estado de México eran las más actualizadas. (Tabla 11). A través de la

ecuación 5, el índice fue calculado para los sitios en los que se realizaron las mediciones, obteniendo los siguientes valores: 144 para la zona Periurbana (San Antonio la Isla), 189 para la zona Suburbana (Zinacantepec) y 447 para la zona urbana (Toluca). De esta manera, los sitios con un índice mayor o igual a 447 serían urbanos, entre 145 y 447 suburbanos y con valores menores o igual a 145 serían sitios periurbanos. Una vez que cada municipio del Valle fue clasificado, se le asignó el valor del cociente CO/BC correspondiente (Ecuación 4); es decir, un valor de 281  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$  para los sitios Periurbanos (P), 219  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$  para los suburbanos (S) y 234  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$  para los sitios urbanos (U).

La segunda aproximación consistió en aplicar una relación entre la cantidad total de vehículos en el Valle de Toluca en 2010 y las emisiones de CO reportadas para ese año para estimar la emisión de BC correspondiente a 2015.

$$Emisión\ BC\ 2015 = \frac{(Parque\ vehicular\ 2015)(Emisión\ anual\ CO\ 2010)}{Parque\ vehicular\ 2010}$$

Ecuación 6

Finalmente, a través de la emisión estimada de BC en 2015 y el cociente CO/BC (Ecuación 4) se estimó la emisión de BC correspondiente a 2010.

**Tabla 11** Clasificación de los municipios de Valle de Toluca respecto a su grado de urbanización

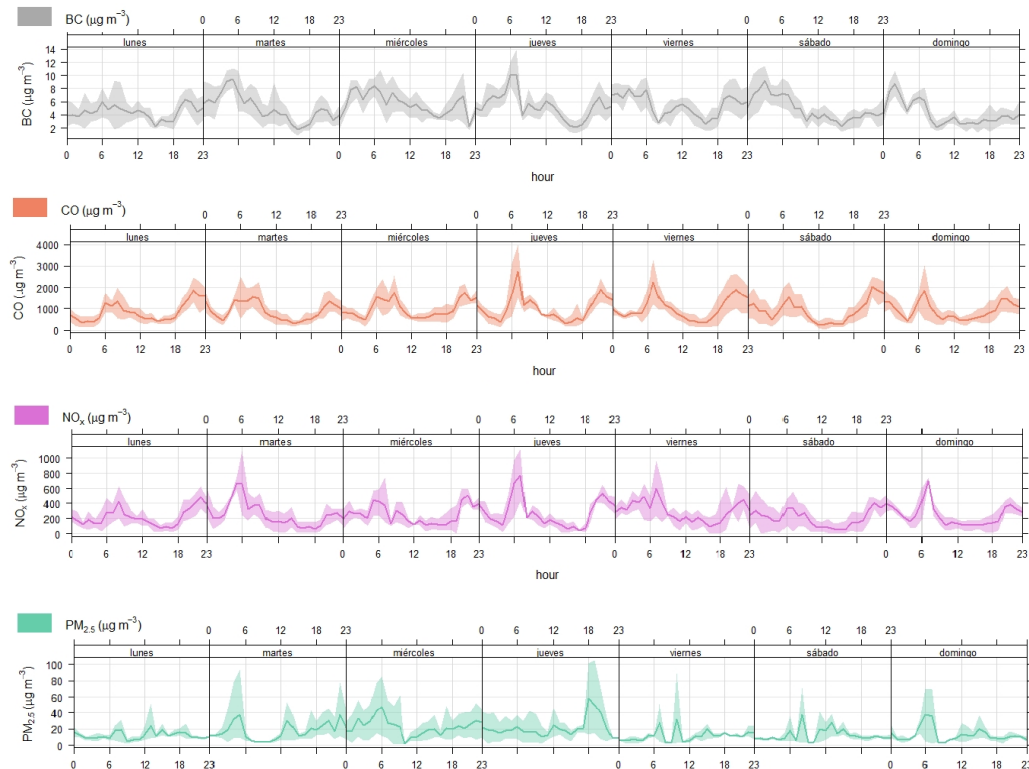
<b>Municipio</b>	<b>Habitantes 2015</b>	<b>Vehículos 2015</b>	<b>Índice</b>	<b>Clasificación</b>
Almoloya de Juárez	176,237	23,172	131	P
Almoloya del Río	11,126	2,837	255	S
Atizapán	11,875	17,244	1452	U
Calimaya	56,574	10,872	192	S
Capulhuac	35,495	10,872	306	S
Chapultepec	11,764	1,953	166	S
Lerma	146,654	43,489	297	S
Metepec	22,787	124,464	5462	U
Mexicaltzingo	12,796	4,379	342	S
Ocoyoacan	66,190	15,604	236	S
Otzolotepec	84,519	11,003	130	P
Rayón	13,261	1,847	139	P
San Antonio la Isla	27,230	3,920	144	P
San Mateo Atenco	75,511	24,799	328	S
Temoaya	103,834	15,643	151	S
Tenango del Valle	86,380	15,937	184	S
Texcalyacac	5,246	1,100	210	S
Tianguistenco	77,147	18,240	236	S
Tollocan (municipio de Toluca)	873,536	390,417	447	U
Xalatlaco	29,572	5,542	187	S
Xonacatlán	51,646	11,849	229	S
Zinacantepec	188,927	35,801	189	S

## CAPÍTULO 4

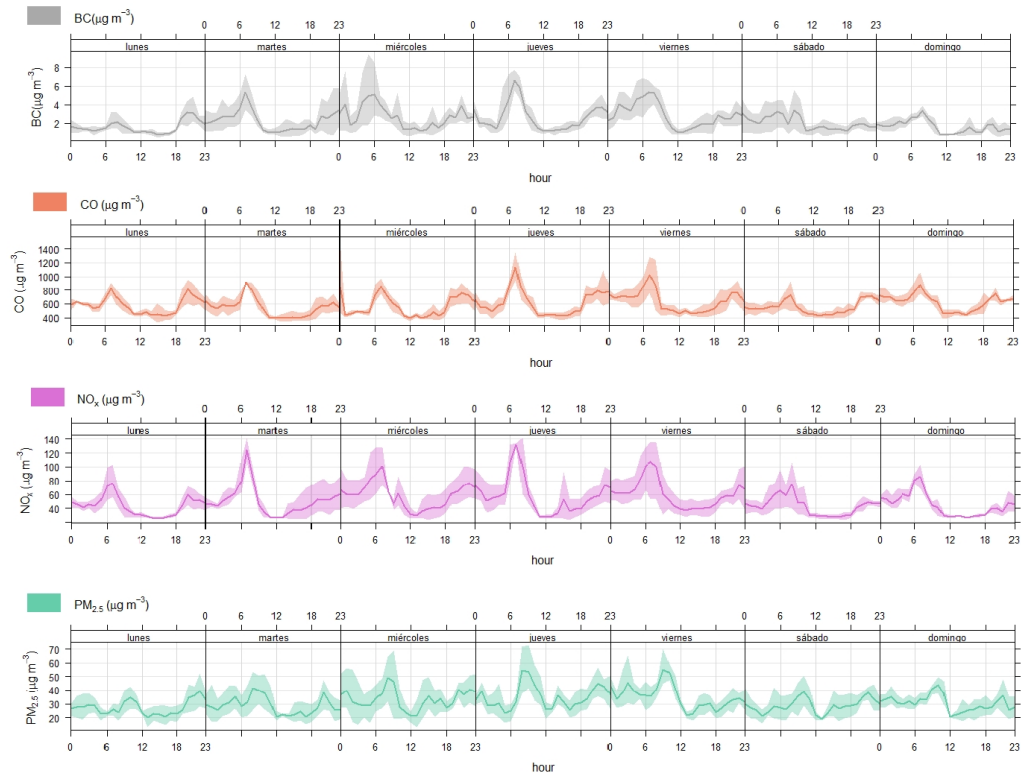
### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 Patrón de emisión de contaminantes

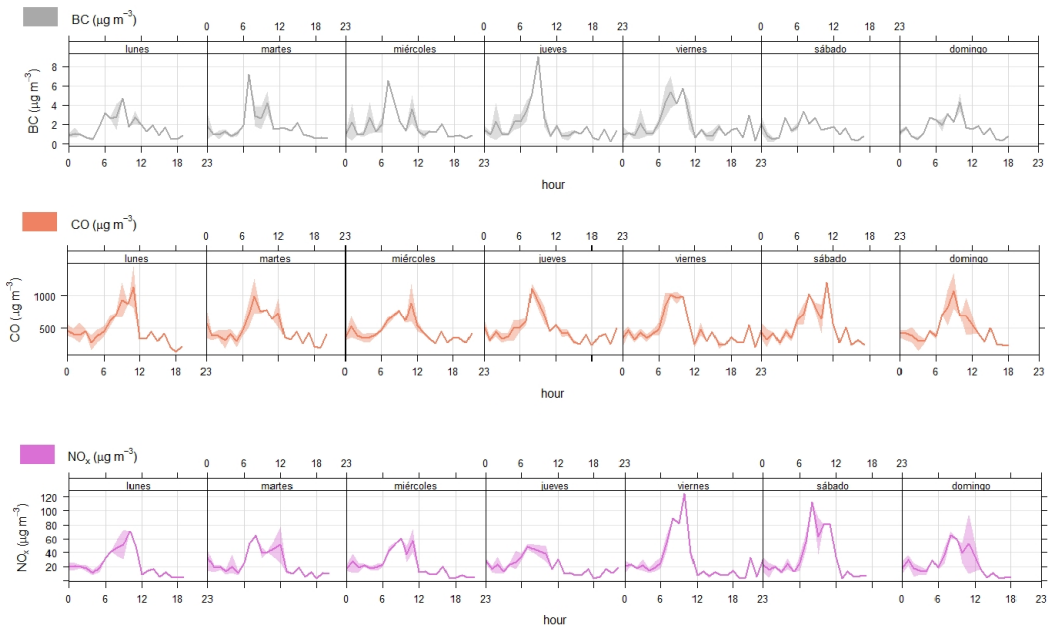
Como parte inicial del análisis de resultados, se muestran las series de tiempo de los contaminantes BC, CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> (en su caso) para cada sitio de monitoreo. Las Figuras 20 a 22 muestran la variación de la concentración de los contaminantes analizados respecto al paso del tiempo (línea sólida) divididos en los días de la semana para los tres sitios de interés: Tolloacan, San Antonio la Isla y Zinacantepec, respectivamente. La sombra que rodea a la línea sólida muestra el intervalo de confianza del 95% del promedio (Carslaw, 2014), es decir, muestra un rango de valores en los que existe un 95% de probabilidad en que dicho intervalo contenga la media real de la población. Es importante resaltar que las escalas de las concentraciones de los contaminantes fueron ajustadas para facilitar la lectura de los gráficos.



**Figura 20** Serie de tiempo (promedios horarios) de contaminantes en Tolloacan.



**Figura 21** Series de tiempo (promedios horarios) de contaminantes en San Antonio la Isla



**Figura 22** Series de tiempo (promedios horarios) de contaminantes en Zinacantepec

Algunos contaminantes presentaron un patrón de comportamiento muy similar entre sí. El BC y el CO tuvieron los mismos máximos y mínimos a lo largo del día en los 3 sitios de monitoreo; destacando un pico matutino entre las 6:00-10:00 horas y uno en la tarde después de las 18 horas. Al revisar algunos detalles particulares para cada lugar, se observa que en Tollocan (Figura 20), además de los picos antes mencionados, se tienen concentraciones considerablemente altas en el horario nocturno (18:00-23:00 horas) tanto de CO como de BC, asociado al tránsito pesado que circula por la vialidad que rodea al sitio donde se realizaron las mediciones.

La concentración de los NO<sub>x</sub> también se apegó mucho al comportamiento del BC y del CO en los 3 sitios; se sabe que las fuentes vehiculares representarían una notable fuente de emisión de este contaminante a la atmósfera (EPA, 1999) por lo que se intuye que en el Valle de Toluca también se presenta este fenómeno. El comportamiento de las PM<sub>2.5</sub> fue distinto para los dos sitios en los que se midió este contaminante, ya que en Tollocan no tuvieron un patrón muy similar al resto de los contaminantes, presentando algunos máximos después del medio día. En contraste, las PM<sub>2.5</sub> correspondientes a San Antonio la Isla (Figura 21) tuvieron una fluctuación más parecida al resto de los contaminantes en ese lugar. Tras encontrar patrones de comportamiento similares entre el BC y el CO, se considera pertinente analizar la correlación entre ambos contaminantes.

Al observar las Figuras 20 a 22 destaca el hecho de que las concentraciones de los contaminantes son mayores en todos los casos para el sitio Tollocan. Tanto en el periodo de 24 horas como a lo largo de la semana se presentaron los siguientes casos

- La concentración máxima de BC en los sitios San Antonio la Isla y Zinacantepec fue poco más de la mitad de la registrada en Tollocan (8 µg/m<sup>3</sup> contra 14 µg/m<sup>3</sup>).
- La concentración del CO en el sitio periurbano fue el 35% de la concentración registrada en Tollocan y en el sitio suburbano fue solo el 25%.
- La concentración de los NO<sub>x</sub> en San Antonio la Isla fue el 14% de la propia en Tollocan, mientras que en Zinacantepec fue únicamente el 12%.
- La concentración máxima de las PM<sub>2.5</sub> en San Antonio la Isla fue menor en un 30% respecto a dicha concentración en Tollocan.

## **4.2 Correlación CO-BC**

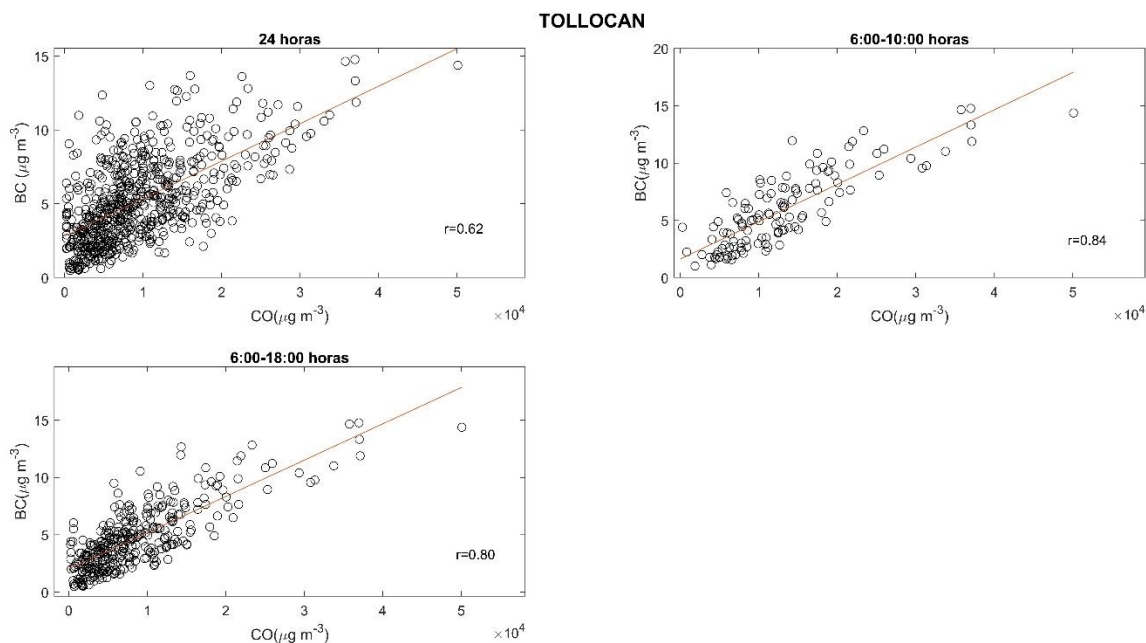
### **4.2.1 Relación lineal CO-BC**

En la Tabla 12 se muestran los resultados de los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) para cada sitio de monitoreo, obtenidos a través del ajuste lineal aplicado a diagramas de dispersión en donde al CO fue tomado como variable independiente y el BC como la variable dependiente. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) ya que se quería observar

qué tan relacionadas se encontraban las variables (concentraciones de CO y BC) en los bloques de tiempo estudiados, así como en cada sitio de monitoreo. En todos los casos se obtuvo una correlación positiva.

El sitio que presentó el comportamiento esperado fue Tollocan (Figura 23); ya que tuvo el mayor coeficiente de correlación de Pearson ( $r = 0.84$ ) entre las 06:00 – 10:00 horas, seguido del bloque 06:00 - 18:00 horas con  $r = 0.80$  de correlación y la menor fue al considerar las 24 horas ( $r = 0.62$ ). Este resultado indica que durante la actividad vehicular más intensa (06:00 – 10:00 horas) el CO y el BC son emitidos de manera conjunta. Al considerar una jornada laboral completa (06:00-18:00 horas) las variables BC y CO conservan una correlación positiva alta, sin embargo, al contemplar las 24 horas ésta disminuye, confirmado que en Tollocan las fuentes móviles son las que proporcionan la mayor cantidad de CO y BC.

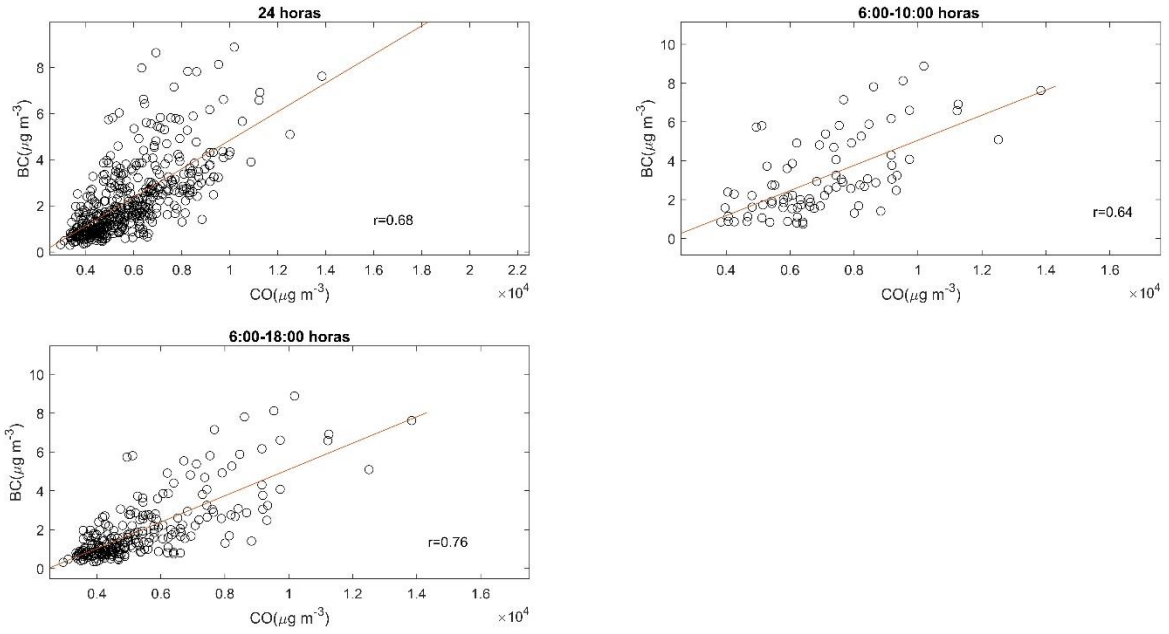
Sin embargo, los resultados de San Antonio la Isla (Figura 24) y Zinacantepec (Figura 25), no mostraron el comportamiento esperado. De hecho, fueron opuestos a la consideración de que en el horario matutino 06:00-10:00 se tendrían los valores más altos de correlación. Este comportamiento puede deberse a fuentes adicionales de CO, por ejemplo, quemas de biomasa, las cuales aportarían CO, pero otras cantidades de BC. También es necesario considerar que, a diferencia de Tollocan, en donde la fuente de emisión se encontraba muy cerca del sitio de medición, en San Antonio la Isla y Zinacantepec se tiene cierto grado de incertidumbre de la influencia de fuentes un tanto más alejadas al punto de monitoreo.



**Figura 23** Correlación CO-BC en el sitio urbano

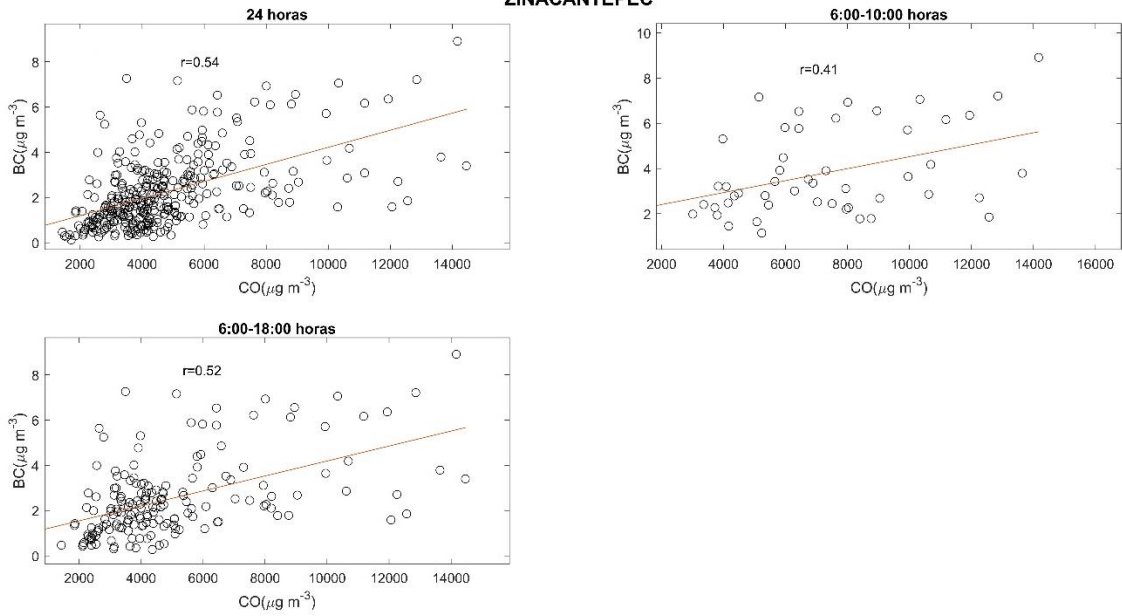


**SAN ANTONIO LA ISLA**



**Figura 24** Correlación CO-BC en el sitio periurbano

**ZINACANTEPEC**



**Figura 25** Correlación CO-BC en el sitio suburbano

**Tabla 12** Coeficientes de correlación de Pearson (*r*) CO-BC

<b>Sitio/Periodo de tiempo</b>	<b>24 horas</b>	<b>06:00-10:00 horas</b>	<b>06:00-18:00 horas</b>
Tollocan	0.62	0.84	0.80
San Antonio la Isla	0.68	0.64	0.76
Zinacantepec	0.54	0.41	0.52

Las gráficas de regresión lineal de la dispersión a través de las cuales se obtuvieron los coeficientes de correlación (Figuras 23 a 25), se realizaron en unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  tanto para el CO como para el BC para mantener la consistencia de las unidades a lo largo de la investigación. Sin embargo, esas gráficas también se realizaron en unidades de  $\text{ng}/\text{m}^3$  para el BC y ppm para el CO (Anexo 3) con la finalidad de comparar la equivalencia que se utilizó en el inventario “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México” a través de la cual se calcularon los promedios anuales de la concentración de BC (Tabla 8) en dicha entidad.

La equivalencia, que fue tomada del estudio de Baumgardner et al., 2007, indica que 1ppm de CO corresponde a  $1012 \text{ ng}/\text{m}^3$  de BC. En esa investigación se midió la masa del carbono absorbente (BC) y fue evaluado con respecto a las concentraciones de CO. Los equipos de medición operaron durante 24 horas en dos periodos de tiempo: del 27 de abril al 1 de mayo de 2003 y del 2 al 8 de abril de 2005. Se encontró que tanto el CO como el BC tuvieron una marcada tendencia diurna y fueron ligados a patrones de circulación vehicular y al crecimiento de la capa límite. El sitio de medición utilizado fue la azotea del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), dentro del campus de la Universidad Nacional Autónoma de México. La Universidad se localiza en el cuadrante sureste de la Ciudad de México, la zona en la que se encuentra se caracteriza por ser un área residencial con poca actividad industrial y comercial, sin embargo tiene actividad vehicular importante (Baumgardner et al., 2007) (aunque sin la circulación de vehículos pesados como en el Estado de México).

La relación  $1 \text{ ppm CO} = 1,012 \text{ ng}/\text{m}^3 \text{ BC}$  corresponde al valor de la pendiente de regresión lineal con datos de 24 horas obtenida en el estudio de Baumgardner et al., 2007. En la Tabla 13 aparecen los valores de las pendientes calculadas en esta investigación para cada sitio en los distintos periodos en los que se realizaron las correlaciones.

**Tabla 13** Equivalencia de 1 ppm de CO a ng/m<sup>3</sup> de BC

<b>Sitio/Periodo de tiempo</b>	<b>24 horas</b>	<b>06:00-10:00 horas</b>	<b>06:00-18:00 horas</b>
Tollocan	2842	3644	3547
San Antonio la Isla	6939	7242	7588
Zinacantepec	4228	2964	3705

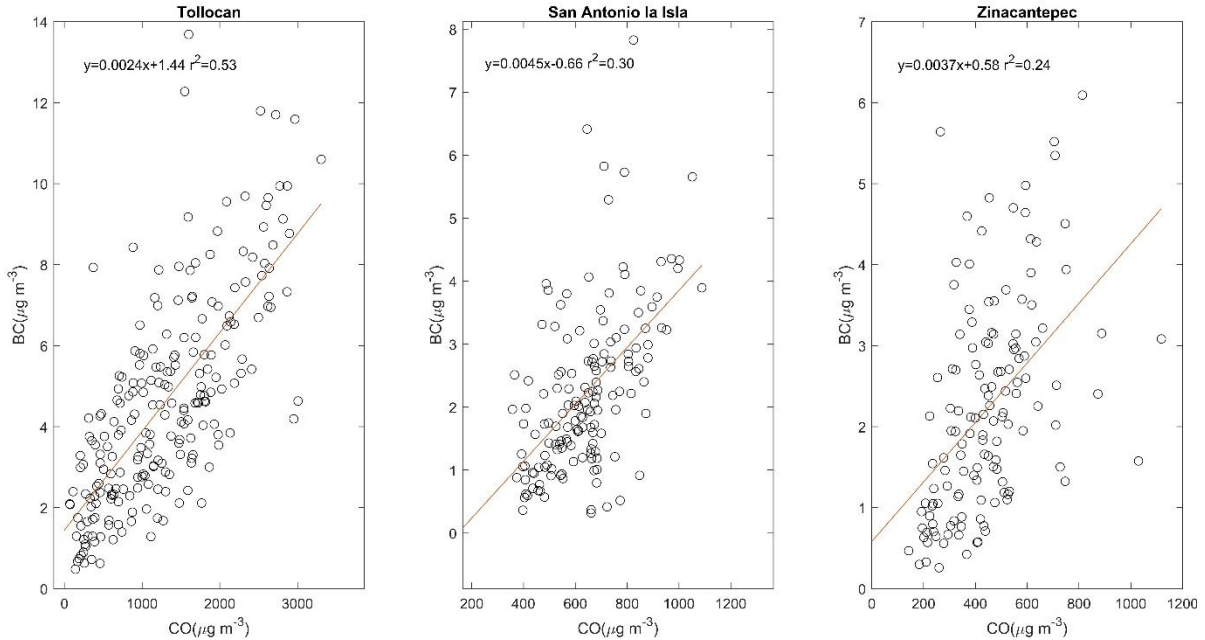
Estos valores muestran que, para todos los sitios, la cantidad de BC (en ng/m<sup>3</sup>) proporcional a 1 ppm de CO (tanto en el periodo de 24 horas como de 6:00-10:00 y 6:00-18:00) es al menos 2 veces superior a la reportada por Baumgardner et al., 2007; esto dadas las características de los sitios de medición respecto a las propias del CCA. Si bien a través de esta relación no se estimaron las emisiones reportadas en el inventario (sino las concentraciones anuales de BC), los valores de las pendientes (Tabla 13) indican una posible discrepancia entre los valores de concentración anual reportados y aquellos que se podrían tener al considerar equivalencias más ajustadas, es decir obtenidas a través de mediciones.

#### 4.2.1.1 Relación CO-BC en horario nocturno (18:00-23:00 horas)

Al haber identificado picos de concentración de BC y CO en el horario nocturno (18:00-23:00 horas), se consideró necesario analizar los datos durante ese periodo en los 3 sitios de monitoreo. A través de gráficos de dispersión y su correspondiente ajuste de regresión lineal (Figura 26). Al buscar la variabilidad del BC respecto a la del CO, se utilizó el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Se encontró que en Tollocan sí existe una relación moderada entre ambas variables, dado a que presentó un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.53. Sin embargo, para San Antonio la Isla y Zinacantepec se tuvieron valores de una correlación débil, con valores de correlación  $R^2$  de 0.30 y 0.24 respectivamente. Se atribuye la correlación moderada en Tollocan dado a que en la vialidad Paseo Tollocan circulan vehículos a diésel en dicho periodo.

Si bien una correlación con un coeficiente de determinación  $R^2$  mayor a 0.5 puede confirmar que los contaminantes provienen de las mismas fuentes móviles (Agudelo, 2014), las correlaciones en este periodo analizado no fueron lo suficientemente “fuertes” para ser consideradas en la estimación de las emisiones. A su vez, con base en las investigaciones realizadas por (Fujita et al., 1992; Haste et al., 1998), se sugiere que los cocientes a través de los cuales se basa la estimación de emisiones se realicen únicamente considerando el horario matutino para cumplir con las condiciones del modelo de caja (considerando en la presente investigación de 6:00 a 10:00 horas).



**Figura 26** Relación CO-BC en el horario nocturno.

#### 4.2.2 Análisis de correlación CO-BC por agrupación de datos

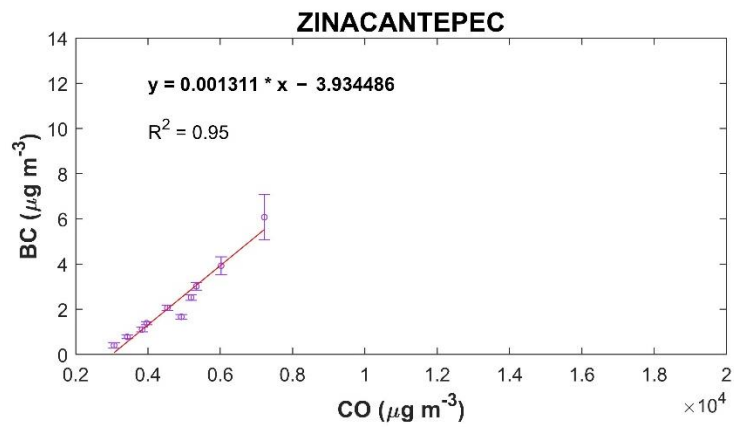
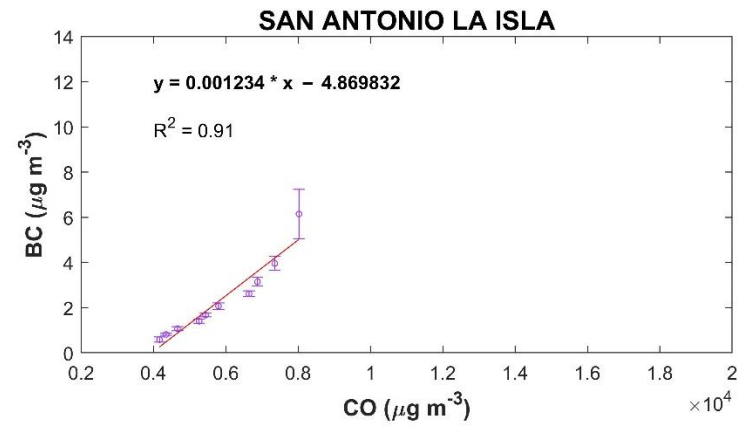
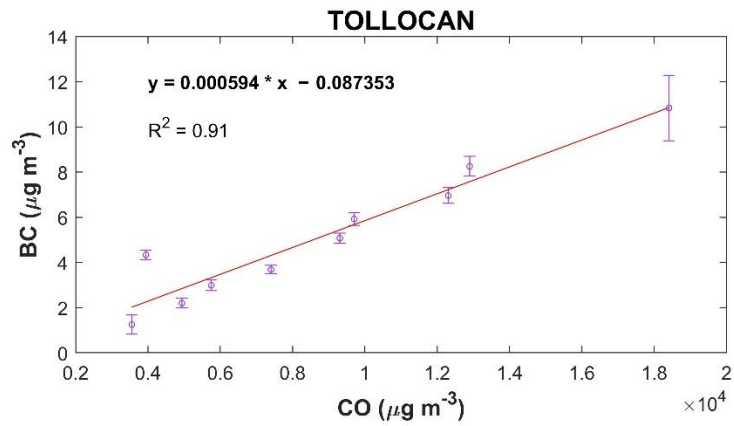
Para fortalecer el análisis de la correlación CO-BC, se realizó un análisis por agrupación de datos. La representación gráfica de este ejercicio se muestra en la Figura 27, para cada sitio hay una correlación con los datos en 24 horas. Se eligió este periodo de tiempo ya que, las emisiones de BC estimadas a través del CO y reportadas en el inventario no se calcularon solo para un horario específico. El análisis para el horario 6:00-10:00 horas (datos que se usaron para el resto del análisis en la presente investigación) aparece en el Anexo 4.

El coeficiente de determinación  $R^2$  indica la proporción de la variación o varianza de la variable y (BC) dada la variable x (CO) (Cattaneo et al., 2019), indicando que en todos los sitios se tiene una alta correlación y que más del 90% de la cantidad de BC puede ser explicada a través de la cantidad de CO. Si bien a lo largo del día existe una fluctuación en la proporción de CO y BC en cada sitio (variación de los coeficientes de correlación presentados en la Tabla 13), de manera general la presencia de ambos contaminantes se encuentra estrechamente relacionada; con coeficientes  $R^2$  de 0.91 para Tollocan, 0.91, San Antonio la Isla y 0.94 para Zinacantepec. Confirmando así que la emisión de BC puede ser estimada a través de la emisión de CO.

Por otro lado, al observar la proporción gráfica de las correlaciones, destaca el hecho de que Tollocan abarca un rango más amplio de valores de concentración tanto de BC como de CO respecto a San Antonio la Isla y Zinacantepec. Al analizar la gráfica de Tollocan se observa que las barras de desviación estándar son menores en un rango de  $0.5 \times 10^4 \mu\text{g/m}^3$  a  $1.4 \times 10^4$

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  de CO, indicando que ese sería el rango en que el ajuste lineal sería más adecuado para estimar la cantidad de BC a través del CO.

En el caso de San Antonio la Isla el ajuste lineal se mantiene con la desviación más baja entre  $0.4 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2.0 ppm) y  $0.5 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2.5 ppm) de CO y la desviación más grande se encuentra para las concentraciones más altas registradas en ese sitio, es decir  $0.8 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (4 ppm) de CO. En Zinacantepec se mantiene el mismo comportamiento, menores desviaciones en valores entre  $0.3 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1.5 ppm) y  $0.5 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2.5 ppm) y ésta aumenta a partir de  $0.6 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (3 ppm) de CO. Al observar que en los 3 sitios las desviaciones estándar son mayores en las concentraciones más altas, se infiere que factores externos como el transporte de contaminantes puede repercutir en la relación de ambas variables.



**Figura 27** Correlación de promedios horarios CO vs BC por agrupación de datos.

### 4.2.3 Relación $\Delta BC/\Delta CO$

En las Figuras 28 y 29 se muestra el comportamiento horario durante el día de las pendientes  $\Delta BC/\Delta CO$  con base en la metodología propuesta por (Kondo et al., 2006). La Figura 28 contiene la variación  $\Delta BC/\Delta CO$  con los datos de los días hábiles, mientras que la Figura 29 fue elaborada con la información correspondiente al fin de semana (sábados y domingos). En estas figuras el método 1 fue obtenido a través de la pendiente del ajuste de mínimos cuadrados a través de diagramas de dispersión, en el método 2 se siguió este procedimiento, pero contemplando las emisiones sin el valor de la concentración de fondo y descartando esta concentración, en el método 3 se calcularon los valores de la mediana para cada hora.

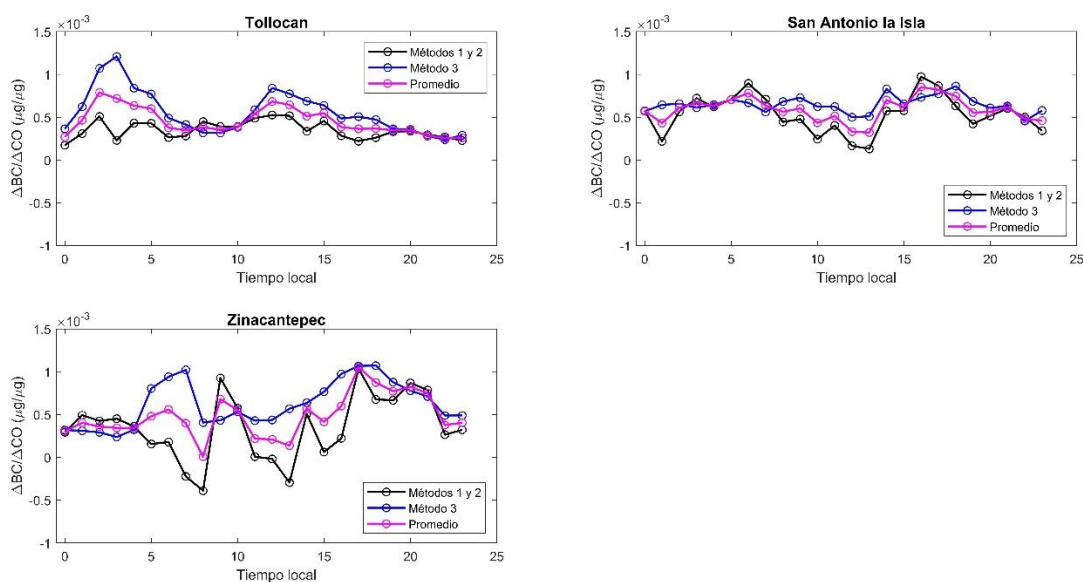
El caso del sitio Tollocan es analizado en la Figura 28a. Ahí, los valores de las pendientes oscilan entre  $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$  y  $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$  (valores promedio). Durante la madrugada (00:00 - 02:00 horas) dichos valores se incrementan rápidamente, indicando que, en ese periodo de tiempo, los vehículos a diésel predominan sobre aquellos que usan gasolina; ya que durante ese tiempo se incrementa el tránsito de vehículos pesados (a Diésel) y la circulación de vehículos a gasolina es mínima. Por el contrario, desde las 03:00 se observa un descenso de la pendiente que alcanza un mínimo a las 8 de la mañana, sugiriendo que conforme amanece se incrementa el flujo vehicular de automóviles a gasolina. Entre las 07:00 horas y hasta las 10:00 horas, periodo que se considera como “la hora pico”, se observa una estabilidad en los promedios en aproximadamente  $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$  que sugiere que la composición vehicular entre vehículos a gasolina y diésel es relativamente constante.

Poco después de las 10 de la mañana y hasta el mediodía los valores de la pendiente se incrementan posiblemente debido a la reducción de la cantidad de vehículos a gasolina que transitan en la vía Tollocan. Finalmente, en las últimas horas del día los valores de las pendientes nuevamente decrecen, asociado a la hora pico nocturna. El comportamiento que se observa en Tollocan es bastante representativo y claro; ya que el monitoreo se realizó muy cerca de la vialidad y, por lo tanto, el comportamiento de la flota vehicular es el que rige la variación del comportamiento de los contaminantes como el BC y el CO.

La Figura 28b muestra el caso de San Antonio la Isla. La curva promedio contiene valores entre  $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$  y  $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$ . Durante las primeras horas del día (02:00-06:00 am) se tienen ligeros incrementos en la razón  $\Delta BC/\Delta CO$ ; asociada a la emisión de motores a diésel. Al tener altos valores de concentración de contaminantes durante la madrugada y dadas las características del sitio (periurbano) se deduce que durante ese periodo de tiempo pudieron dominar quemas a cielo abierto. Mediante imágenes de satélite VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) recopiladas por Global Forest Watch (GWF, 2020), se sabe que durante febrero-abril 2017 se registraron cerca de 1,852 alertas de incendio en el Estado de México. Por lo cual existe una gran probabilidad de que muchos de esos incendios se hayan presentado en el sitio periurbano durante la madrugada.

Entre las 07:00 y 12:00 horas las pendientes decrecen, relacionando este hecho al aumento de actividades antropogénicas en el área. Entre las 13:00 y las 17:00 horas ocurre un incremento en la pendiente que implica mayor dominancia en las emisiones de BC (influencia de motores a diésel). Por la tarde-noche, se tiende a un decremento en la relación  $\Delta BC/\Delta CO$ , sugiriendo influencia de masas de aire ricas en CO, posiblemente transportadas de zonas con tráfico vehicular nocturno de vehículos a gasolina. Este comportamiento es parecido al que presenta Tollocan, no obstante, la variación horaria de los contaminantes analizados es menos evidente, ya que, al tratarse de un sitio periurbano, la influencia vehicular es menor respecto a la que tiene Tollocan.

Por otro lado, se esperaría que el sitio suburbano (Zinacantepec) tuviera un comportamiento con una notable influencia de las fuentes móviles, a pesar de ello, la curva promedio que se observa en la Figura 28c muestra un comportamiento similar y relativamente constante en las pendientes entre las 23:00 y 4:00 am, con valores cercanos a  $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$ , después hay un ligero incremento hasta las 6:00 am para posteriormente perderse la concordancia promedio.



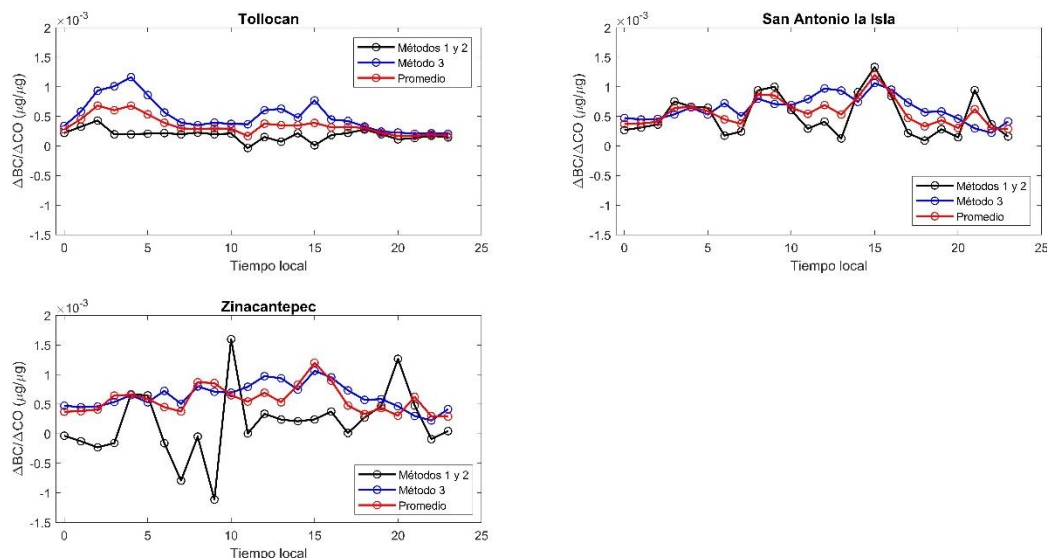
**Figura 28** Variación  $\Delta BC/\Delta CO$  ( $\mu\text{g BC}/\mu\text{g CO}$ ) durante los días hábiles.

Para el resto del día, los valores de las pendientes incrementaron (en promedio), sin embargo, una gran variabilidad con incrementos y decrementos. Incluso, al observar la curva en color negro, se destacan valores negativos de las pendientes, indicando una relación inversa entre el CO y el BC; es decir, un aumento de CO y decremento de BC.

Con esto, se reafirma la idea de que hay fuentes adicionales de CO en Zinacantepec. Se infiere que durante el monitoreo se detectó la presencia de fuentes de contaminación intermitentes



que emitieron contaminantes que se transportaron hasta el sitio de medición. Para comprobar esa idea, se realizó un análisis meteorológico mostrado más adelante.



**Figura 29** Variación  $\Delta BC/\Delta CO$  ( $\mu g BC/\mu g CO$ ) durante los fines de semana

Al analizar la información de los fines de semana (Figura 29); se observa que Tollocan (Figura 29a) conserva el mismo comportamiento en la variación  $\Delta BC/\Delta CO$ , aunque con valores de las pendientes menores a los que se presentaron durante los días hábiles. En San Antonio la Isla (Figura 29b), la variación de las pendientes fue oscilante a lo largo del tiempo, destacando el posible transporte tanto de BC como de CO, mientras que para Zinacantepec (Figura 29c) se observa el posible transporte mayormente de CO durante las primeras 12:00 horas del día.

### 4.3 Estimación de la emisión de carbono negro

#### 4.3.1 Cocientes de contaminantes

Con base en los resultados anteriores, se determinó que a través del cálculo de los cocientes de las concentraciones de contaminantes se encontraría una relación que permitiría estimar la emisión de carbono negro. Se realizó la división de una población de datos de concentración de contaminantes entre otra población para obtener los cocientes que se muestran en las Figuras 30 a 32. La representación gráfica de los cocientes a través de diagramas de cajas y bigotes permite observar su distribución estadística; el marcador en el centro de las cajas muestra el valor promedio de cada cociente en el bloque horario

correspondiente. A su vez, los extremos de los bigotes son calculados de la siguiente manera (mathworks, 2020):

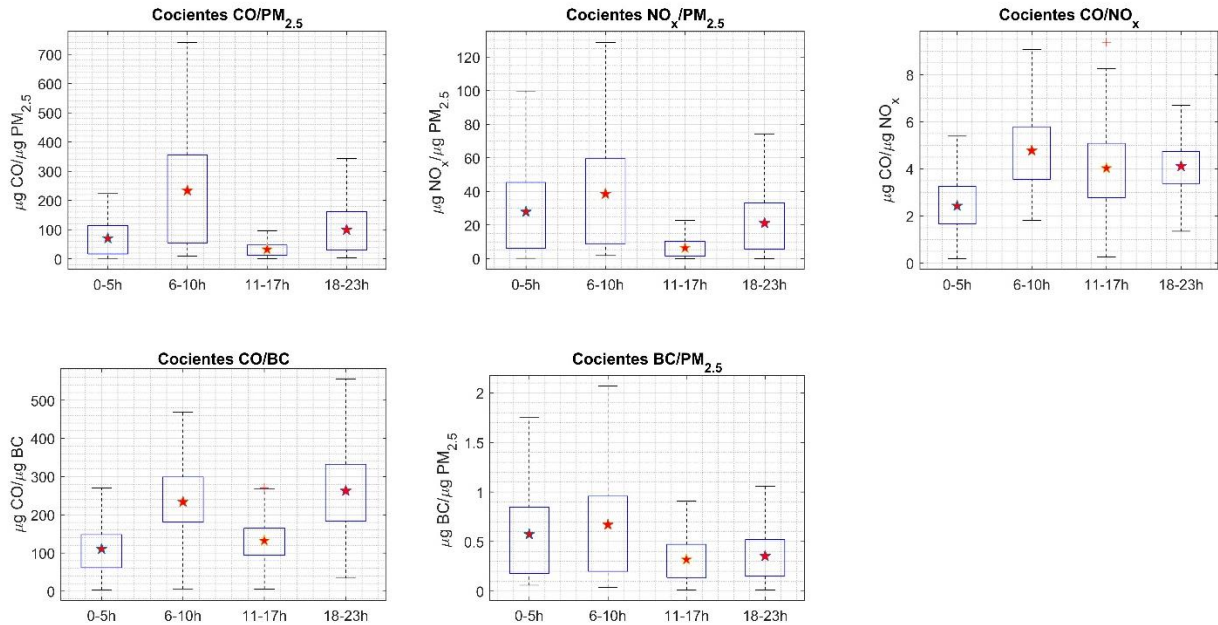
$$\text{Bigote superior: } Q3 + w(Q3 - Q1) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{Bigote inferior: } Q1 - w(Q3 - Q1) \quad \text{Ecuación 8}$$

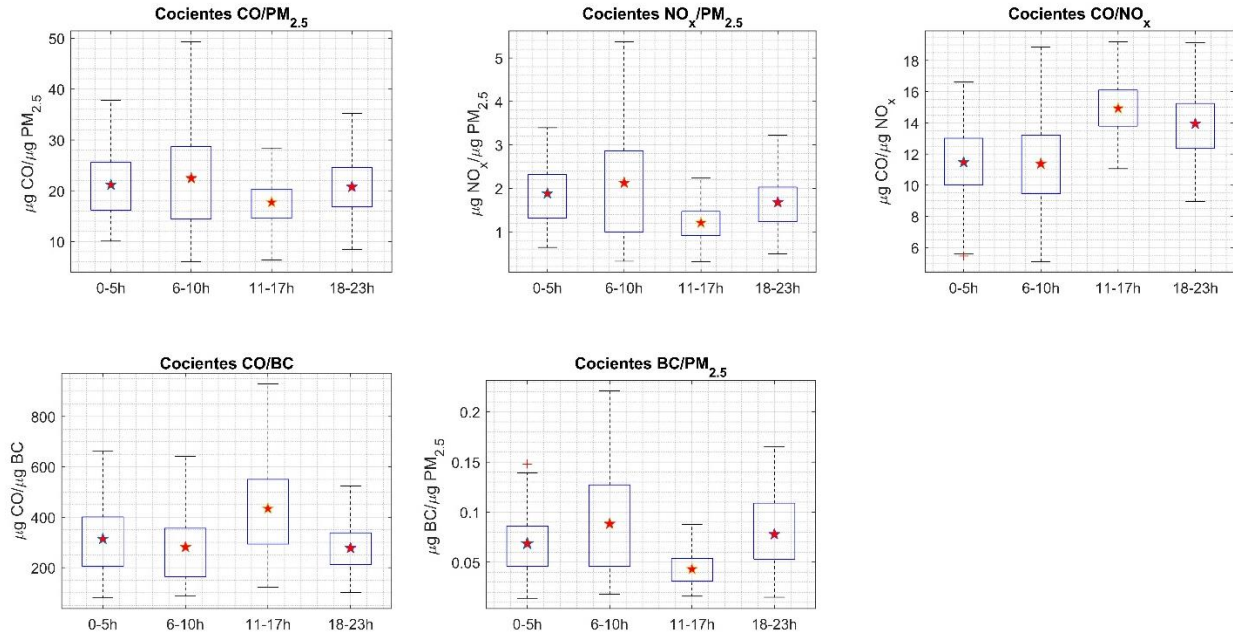
Dónde: Q1= Percentil 25; Q3= Percentil 75; w= longitud predeterminada del bigote.

$$\text{Longitud predeterminada del bigote} = \pm 2.7\sigma \quad \text{Ecuación 9}$$

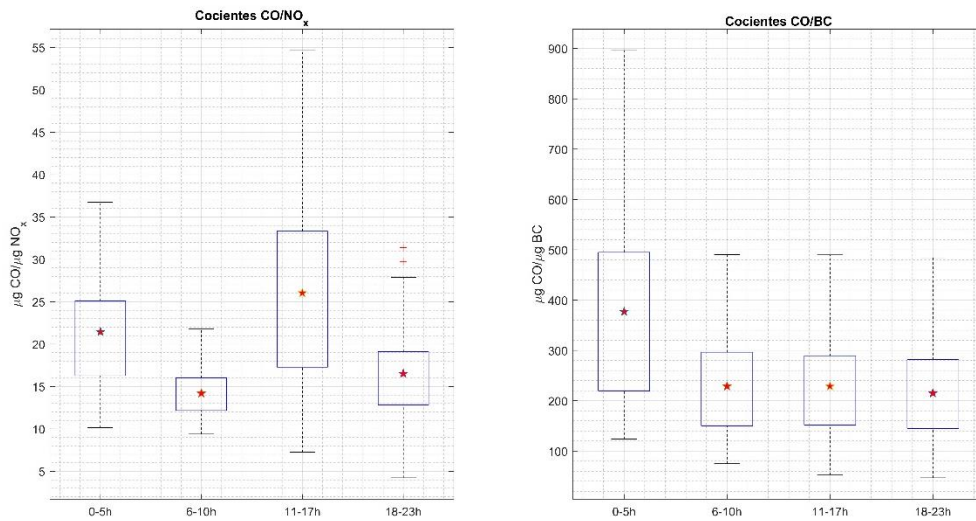
Dónde:  $\sigma$ = desviación estándar.



**Figura 30** Cocientes de contaminantes primarios en el sitio urbano



**Figura 31** Cocientes de contaminantes primarios en el sitio periurbano



**Figura 32** Cocientes de contaminantes primarios en el sitio suburbano

Se observa que durante el periodo de estudio (06:00-10:00 horas) para el sitio Tollocan (Figura 30), se tienen valores altos en los cocientes CO/BC y CO/NO<sub>x</sub> y asumiendo que durante ese periodo incrementa la circulación de vehículos a gasolina, se infieren incrementos en la concentración de CO y NO<sub>x</sub>. Para los demás sitios este comportamiento es similar, es decir el CO es la especie dominante en el cociente CO/NO<sub>x</sub> y el BC en la razón CO/BC.

#### 4.3.1.1 Cociente CO/NO<sub>x</sub>

Los cocientes CO/NO<sub>x</sub> en base mol (pendientes de la correlación NO<sub>x</sub> – CO) se muestran en la Tabla 14 y su representación gráfica aparece en el Anexo 5 (para la obtención de estos cocientes, se asumió que a los datos de CO se les había restado la concentración de fondo). Al ser calculados en base molar, estos pueden ser comparados con valores reportados en la literatura, ya que, en la mayoría de las investigaciones en donde se aplica la técnica top-down se estima el cociente CO/NO<sub>x</sub> en base molar.

**Tabla 14** Cocientes CO/NO<sub>x</sub> en base molar.

	<b>Tollocan</b>		<b>San Antonio la Isla</b>		<b>Zinacantepec</b>	
	24 horas	6:00-10:00	24 horas	6:00-10:00	24 horas	6:00-10:00
Pendiente	5.17	5.61	6.22	8.21	14.58	15.15
Intercepto	5.58	11.5	13.42	12.94	8.10	8.26
Coefficiente de correlación R <sup>2</sup>	0.72	0.85	0.31	0.65	0.78	0.80

Los cocientes incrementan su valor al considerar el horario 6:00-10:00 e incrementa la correlación, esto puede estar ligado al incremento de NO<sub>x</sub> o a la disminución de CO. Para tener una idea más clara de qué fenómeno es el que pudo predominar durante ese periodo de tiempo, la Tabla 15 muestra la comparación con cocientes reportados en la literatura.

**Tabla 15** Comparación del cociente CO/NO<sub>x</sub>

<b>Sitio de estudio</b>	<b>Valor del cociente CO/NO<sub>x</sub> (mol/mol) con base en mediciones</b>	<b>Referencia</b>
Toluca (aeropuerto) Estado de México	8.00	(Ruíz et al., 2014)
Toluca (centro) Estado de México	11.00	
Costa sur de California (EUA)	17.70 a 22.30	(Fujita et al., 1992)
Paso del Norte (EUA), Ciudad Juárez (México)	22.00	(Funk et al., 2000)
Tollocan	5.61	Este estudio.
San Antonio la Isla	8.21	
Zinacantepec	15.15	

Únicamente se comparan los valores obtenidos entre las 6:00-10:00 horas porque en las investigaciones de referencia se utilizan datos matutinos como criterio base a la aplicación de la técnica top-down. Los valores más parecidos fueron los obtenidos por (Ruíz et al., 2014) ya que se trata de la misma zona de estudio. En dicha investigación interpretan los cocientes como una subestimación de emisiones de NO<sub>x</sub> o sobreestimación de emisiones de CO; sin embargo, la segunda idea no coincidió con los resultados de la modelación en WRF-Chem, por lo que solo se mantendría la premisa de la subestimación de la emisión de NO<sub>x</sub>.

Considerando que el CO es un producto de combustión incompleta (Seinfeld y Pandis, 2006) y que los NO<sub>x</sub> tienen un origen más asociado a fuentes móviles (EPA, 1999), se entiende que los valores más grandes de los cocientes incluyen atribuciones de otras fuentes de CO (varios procesos de combustión distintos a los asociados a la circulación de fuentes móviles) en el sitio en donde fueron estimados. Tanto los cocientes de la Costa sur de California (Fujita et al., 1992) como los del Paso del Norte y Ciudad Juárez (Funk et al., 2000) son mayores que los obtenidos para los 3 sitios de monitoreo en el Valle de Toluca; indicando que, ya sea que la emisión de CO es mucho mayor, o que la emisión de NO<sub>x</sub> es muy baja. Por lo que se podría sugerir que en Tollocan y San Antonio la Isla, las emisiones de CO son relativamente bajas o que las de NO<sub>x</sub> son más altas dado que el cociente resultante es más bajo. A su vez, en Zinacantepec el cociente es un tanto similar a los de California y El Paso/Cd Juárez.

#### ***4.3.2 Estimación de la emisión de carbono negro***

Se encontró que en el Valle de Toluca se tuvieron  $9.17 \times 10^5$  Mg de CO en el año 2015 y, mediante el despeje de los cocientes, se obtuvo que la emisión estimada anual de BC fue  $3.96 \times 10^3$  Mg por año (Tabla 16). La Tabla 17 muestra las emisiones de los contaminantes reportados en el inventario de emisiones 2004 y 2010: PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, y BC respectivamente. Con base en esa información se calcularon los mismos cocientes que se obtuvieron a través de las mediciones. Por otro lado, la Tabla 18 muestra los valores del cociente CO/BC en cada sitio de medición y el calculado a través de los datos del inventario.

**Tabla 16** Estimación de las emisiones de CO y BC en los municipios del Valle de Toluca

<b>Municipio</b>	<b>Habitantes 2015</b>	<b>Vehículos 2015</b>	<b>Índice</b>	<b>Clasificación</b>	<b>CO/BC</b>	<b>CO Mg/año</b>	<b>BC Mg/año</b>
Almoloya de Juárez	176,237	23,172	131	P	281	26856	95
Almoloya del Río	11,126	2,837	255	S	219	3288	15
Atizapán	11,875	17,244	1452	U	234	19985	85
Calimaya	56,574	10,872	192	S	219	12600	58
Capulhuac	35,495	10,872	306	S	219	12600	58
Chapultepec	11,764	1,953	166	S	219	2263	10
Lerma	146,654	43,489	297	S	219	50402	230
Metepec	22,787	124,464	5462	U	234	144249	617
Mexicaltzingo	12,796	4,379	342	S	219	5075	23
Ocoyoacan	66,190	15,604	236	S	219	18084	83
Otzolotepec	84,519	11,003	130	P	281	12752	45
Rayón	13,261	1,847	139	P	281	2141	8
San Antonio la Isla	27,230	3,920	144	P	281	4543	16
San Mateo Atenco	75,511	24,799	328	S	219	28741	131
Temoaya	103,834	15,643	151	S	219	18130	83
Tenango del Valle	86,380	15,937	184	S	219	18470	84
Texcalyacac	5,246	1,100	210	S	219	1275	6
Tianguistenco	77,147	18,240	236	S	219	21140	96
Tollocan (municipio de Toluca)	873,536	390,417	447	U	234	452480	1934
Xalatlaco	29,572	5,542	187	S	219	6423	29
Xonacatlán	51,646	11,849	229	S	219	13733	63
Zinacantepec	188,927	35,801	189	S	219	41492	189
						<b>9.17x10<sup>5</sup></b>	<b>3.96x10<sup>3</sup></b>

**Tabla 17** Emisiones contaminantes reportadas para 2004 y 2010

<b>Emisiones Mg /año</b>						
	Inventario 2004					Inventario 2010
Fuentes	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	BC
Área	26	225	43	118	486	
Puntuales	52	149	80	1048	1340	8
Móviles	369	431	829	590 276	30 767	742
Vegetación y suelos	93	849				2
Total	540	1654	952	591442	32593	752

Fuente: (SMAGEM, 2007, 2010)

Al observar los valores de los cocientes de la Tabla 18 para cada sitio de medición, destaca el hecho de que el cociente con el valor más grande es el sitio periurbano (281  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ ), seguido del urbano (234  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ ) y del suburbano (219  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ ).

Con ello, se mantiene la idea de que en el sitio periurbano existe alguna fuente adicional de CO, o posiblemente menos emisiones de BC en el periodo matutino (06:00-10:00 horas). A su vez, en el sitio suburbano predomina el BC sobre el CO, parece que hay un incremento mayor en BC dado que por las características del sitio, podría estar bajo influencia de quemas de biomasa realizadas cerca del punto de monitoreo. Por otro lado, dadas las características del sitio urbano difícilmente habría reducción en las emisiones de CO en el entorno de la estación, por lo que el valor del cociente más bajo que el de otros sitios podría deberse a una mayor emisión de BC de vehículos de transporte de carga pesada que circulan por la Avenida Tollocan.

En promedio el cociente CO/BC calculado a través de las mediciones es 244  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ . Considerando que el cociente del inventario asumiendo que las emisiones de 2004 fueron equivalentes a las de 2010, es de 795 Mg / Mg, el obtenido a través de las mediciones es alrededor de 3 veces menor. Al tener un coeficiente del inventario con un valor alto, podría inferirse con gran incertidumbre que los procesos de combustión de las fuentes móviles en el Valle de Toluca han sido bastante eficientes con respecto a la emisión reducida de CO, y/o bien que las emisiones de BC han sido bajas.

Esto debido a que el cociente indica que el CO predomina sobre el BC. Sin embargo, de acuerdo con (Haste et al., 1998), si el inventario de emisiones no es representativo de las actividades que emiten contaminantes en el área, se verán grandes discrepancias entre el cociente del inventario y los calculados con datos ambientales; por lo que esta suposición no

podría ser confiable sino hasta después de estimar la emisión total tanto de BC y CO en el Valle de Toluca en el año base del inventario y que el respectivo cociente coincida con el obtenido de mediciones.

**Tabla 18** Comparación entre cocientes CO/BC de las mediciones respecto al cociente del inventario.

Cocientes por mediciones			Cociente por inventario
Urbano	Suburbano	Periurbano	
234 µgCO/µgBC	219 µgCO/µgBC	281 µgCO/µgBC	795 Mg CO / Mg BC

Nota: La conversión de µgCO/µgBC de las mediciones es equivalente a Mg CO/Mg BC, por anulación y cambio de unidades.

Considerando el CO obtenido del índice de motorización y el cociente resultante de la combinación de los inventarios oficiales de 2004 y 2010, la emisión de BC para el año 2010 se estima de la manera siguiente:

$$Emisión\ BC = (917 \times 10^3\ Mg\ CO) \left( \frac{1\ Mg\ BC}{795.58\ Mg\ CO} \right) = 1.15 \times 10^3\ Mg\ BC$$

Mientras que el estimado de BC a través del índice de motorización utilizando el cociente obtenido a través de las mediciones es:

$$Emisión\ CO = (3.96 \times 10^3\ Mg\ BC) \left( \frac{795.58\ Mg\ CO}{1\ Mg\ BC} \right) = 3.15 \times 10^6\ Mg\ CO$$

En la Tabla 19 se muestra la comparación entre las emisiones estimadas mediante las mediciones y las que reporta el inventario del Gobierno del Estado de México.

**Tabla 19** Comparación entre las emisiones estimadas y las reportadas en el inventario.

Estimaciones con base en el cociente obtenido de mediciones y el índice de motorización		Reporte del inventario	
Mg BC/año	Mg CO/año	Mg BC/año 2010	Mg/año 2004
1,150	3.15E+06	742	5.9 E+05



De esta manera, considerando que las mediciones son más certeras que únicamente el uso de aproximaciones, el inventario de emisiones de Carbono Negro en el Valle de Toluca subestima las emisiones de este contaminante en un orden de magnitud; ya que reporta 742 Mg al año y, a través de la aplicación de la técnica top-down se estimaron 1150 Mg al año. Con base en los resultados encontrados, también se observa que la emisión de CO está subestimada en un orden de magnitud, con un reporte de 590,000 Mg/año contra una estimación de 3, 150,000 Mg/año.

Cabe destacar el hecho de que la comparación de las emisiones estimadas contra las reportadas se hizo considerando únicamente las fuentes móviles (742 Mg/año) y no con el total (750 Mg/año), ya que las fuentes móviles representan el 98.5% de la emisión de BC en el Valle de Toluca (SMAGEM, 2010). A su vez, el uso del índice de motorización para la estimación no considera el efecto de fuentes fijas y de área.

#### 4.3.2.1 Incertidumbre de las emisiones estimadas

Para reportar con mayor certeza las emisiones estimadas, se calculó su respectivo valor de incertidumbre como se hizo para las mediciones de concentración de contaminantes. Únicamente se realizó un análisis estadístico tipo A (Tabla 20), debido a que, no existieron factores externos que incrementen la incertidumbre (como el uso de un instrumento), sino solo se considera la incertidumbre de los datos resultante del cálculo de la emisión.

**Tabla 20** Incertidumbre de la estimación de emisiones.

Parámetros estadísticos	Evaluación tipo A (emisión de BC)		Evaluación tipo A (emisión de CO)	
Media	$1.80 \times 10^2$	Mg/año	$4.17 \times 10^4$	Mg/año
Varianza	$1.63 \times 10^5$	$(\text{Mg/año})^2$	$8.90 \times 10^9$	$(\text{Mg/año})^2$
Desviación estándar	$4.03 \times 10^2$	Mg/año	$9.43 \times 10^4$	Mg/año
Varianza Experimental de la media	$7.39 \times 10^3$	$(\text{Mg/año})^2$	$4.04 \times 10^8$	$(\text{Mg/año})^2$
Desviación estándar de la media	$8.60 \times 10^1$	Mg/año	$2.01 \times 10^4$	Mg/año
Incertidumbre estándar	$8.80 \times 10^1$	Mg/año	$2.06 \times 10^4$	Mg/año

Por lo tanto, la emisión estimada de BC para 2010 (la cual se comparó con el reporte del inventario), fue de  $(1.15 \pm 0.09) \times 10^3$  Mg/año; mientras que la de CO fue de  $(3.15 \pm 0.02) \times 10^6$  Mg/año. La cantidad de Mg/año de incertidumbre representa  $\pm 7.7$  % de la emisión estimada para el BC y  $\pm 0.65$  % para el CO. Estos porcentajes de variación también deben considerarse en las emisiones de cada uno de los municipios del Valle de Toluca (Tabla 16).

### ***4.3.3 Comparación con otros inventarios de emisiones***

A continuación, se muestra la comparación de la emisión calculada de CO respecto a la emisión reportada de este contaminante en distintos inventarios del Estado de México y nacional, así como en el Programa para mejorar la calidad del aire (Proaire) mencionados anteriormente (sección 2.2.1.3).

Para hacer la comparación entre los distintos inventarios, se utilizaron tanto la emisión calculada para 2015 a partir del índice de motorización (Tabla 16) como su ajuste (con el cual se comparó el inventario de BC). En la Tabla 21 se da a conocer la cantidad de CO en Mg/año para el Valle de Toluca, reportados en los distintos documentos mencionados. Para el caso del inventario de emisiones del Estado de México 2010 se tuvo un total de  $1.19 \times 10^5$  Mg/año, mientras que la emisión calculada fue de  $3.15 \times 10^6$ . Asumiendo que la emisión calculada es correcta, el inventario del Estado de México 2010 se encontraría subestimado en un orden de magnitud al igual que el inventario “Fuentes de emisión de Carbono Negro en el Estado de México”.

Por otro lado, el Proaire 2018-2030 reportó  $1.19 \times 10^5$  Mg/año y el Inventario Nacional de Emisiones  $1.0 \times 10^5$  Mg/año a su vez la emisión calculada en la presente investigación es  $9.17 \times 10^5$  Mg/año. Si bien las tres cantidades se encuentran en el mismo orden de magnitud, hay una diferencia considerable. La emisión reportada en el Proaire representa únicamente el 13% de la emisión calculada, mientras que la emisión del Inventario Nacional es el 11% de la emisión calculada. De esta manera, se inferiría que hay una ligera subestimación en la emisión de CO tanto en el Proaire como en el Inventario Nacional.

**Tabla 21** Comparación de la emisión estimada de CO con la reportada en distintos inventarios.

Documentos	Emisión por tipo de fuente CO (Mg/año)			Emisión total de CO (Mg/año)	Emisión calculada CO (Mg/año)
	Fuentes Puntuales	Fuentes De área	Fuentes Móviles		
Inventario de Emisiones del Estado de México (2010)	452	49791	250494	3.01E+05	3.15E+06 Emisión calculada para el año 2010
Programa para mejorar la calidad del aire en el Estado de México 2018-2030. Inventario año base 2016	432	23993	94612	1.19E+05	9.17E+05 Emisión calculada para el año 2015
Inventario Nacional de Emisiones 2016	482	23306	76255	1.00E+05	9.17E+05 Emisión calculada para el año 2015

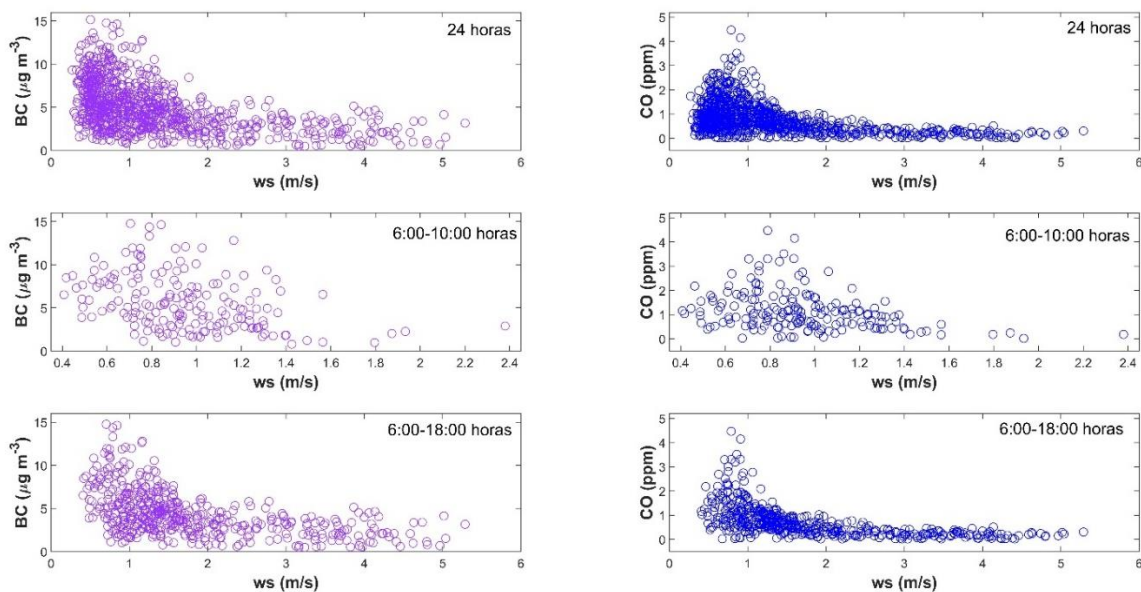
#### 4.4 Análisis meteorológico

Tras haber encontrado que posiblemente existieron fuentes adicionales de CO en el sitio Zinacantepec, se elaboraron las Figuras 33 a 35 en donde se graficaron las concentraciones de BC y CO respectivamente contra la velocidad del viento en cada uno de los sitios. El comportamiento esperado implica que las concentraciones más altas se encontrarían con las menores velocidades de viento; ya que cuando éstas se presentan, el fenómeno de transporte de contaminantes se vería limitado y se tendría la acumulación de la concentración de los contaminantes generados en el sitio de monitoreo.

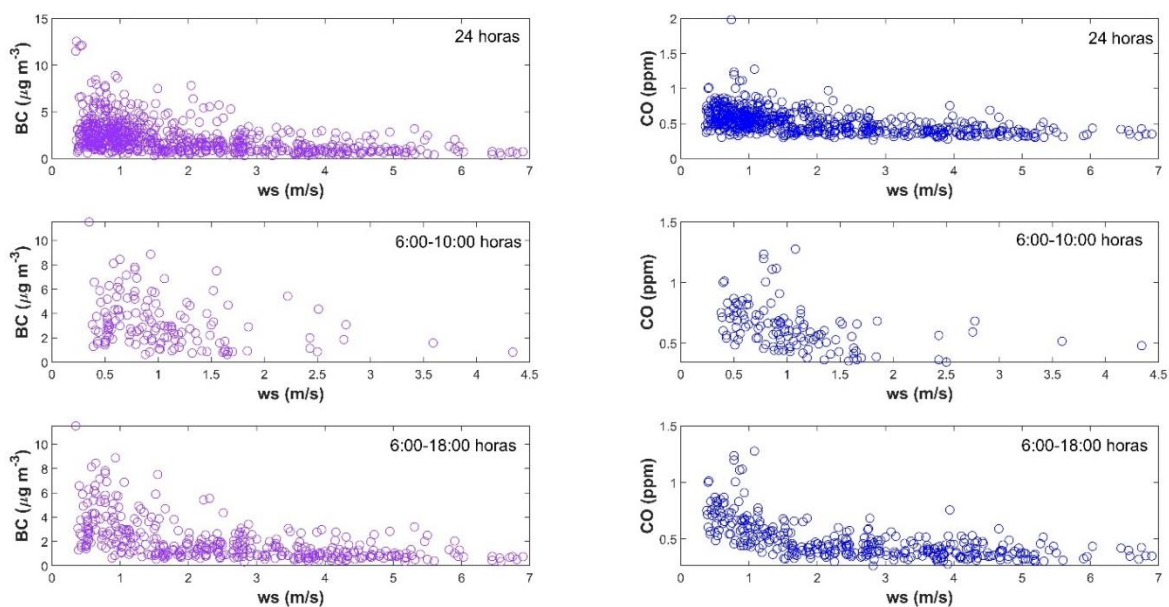
Tollocan mostró dicho patrón (Figura 33); para concentraciones de BC de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 4.5 ppm de CO en 24 horas, se registraron velocidades de viento entre 0.5 y 1.5 m/s. Al incrementar la velocidad de viento entre 3.5 m/s a un máximo de 5 m/s, las concentraciones de contaminantes se reducen considerablemente, siendo de 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de BC y 1 ppm de CO. El bloque que contiene los datos en el horario matutino 6:00-10:00 horas muestra las menores velocidades de viento (0.4 a 2.4m/s asociadas a las concentraciones más altas 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de BC y 4.5 ppm de CO. El patrón de comportamiento entre las 6:00-18:00 horas es igual al que se presentó durante las 24 horas.

San Antonio la Isla (Figura 34) también tuvo mayores valores de concentración de BC (12.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y CO (1.5 ppm) con velocidades de viento menores, entre 0.5 y 1.5 m/s y

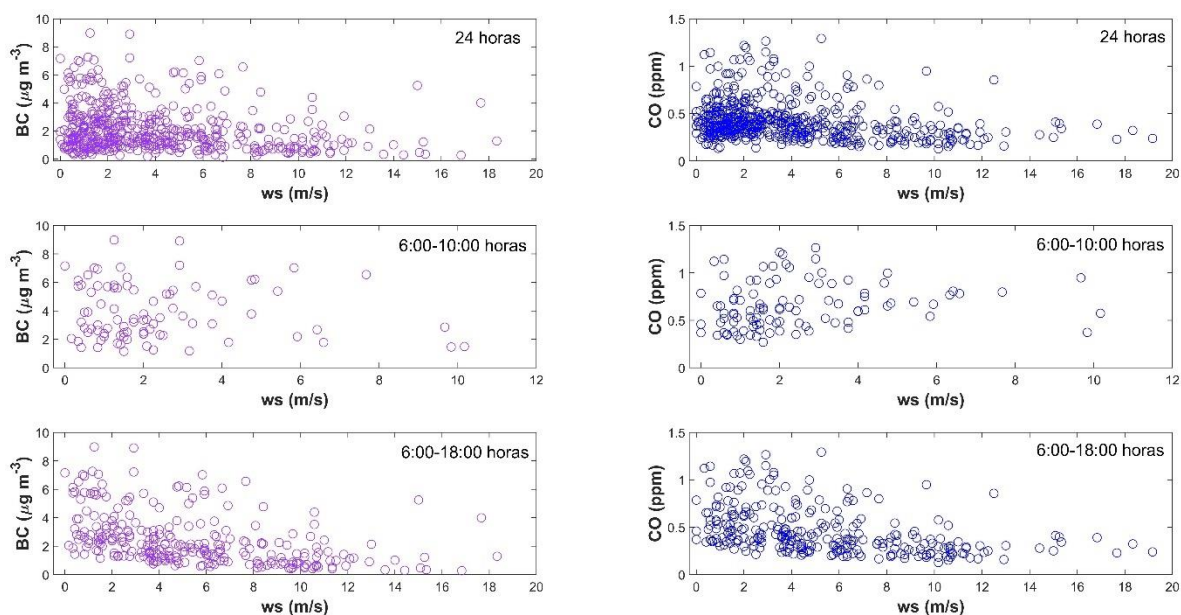
disminución en las concentraciones (BC 2.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y CO 0.4 ppm) a medida que se presentaron velocidades de viento más altas. En el horario matutino se agrupan las menores velocidades de viento con las máximas concentraciones y, al igual que en Tollocan, el comportamiento que se presenta en durante las 24 horas es igual al que se da entre 6:00-18:00 horas.



**Figura 33** Variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento en Tollocan.



**Figura 34** Variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento en San Antonio la Isla.



**Figura 35** Variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento en Zinacantepec.

El sitio suburbano (Zinacantepec) tuvo un comportamiento errático (Figura 35), ya que se tuvieron altas concentraciones con velocidades medias de viento;  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de BC con velocidad de  $8 \text{ m/s}$  y  $0.55 \text{ ppm}$  de CO con velocidad de  $6 \text{ m/s}$  en 24 horas. Para los sitios urbano y periurbano la variación de las concentraciones de BC y CO respecto a la velocidad del viento son bastante similares entre sí; pero no en el sitio suburbano.

Para tener una referencia más clara de la posible fuente de emisión de BC y CO, se analizaron las variables dirección y concentración de contaminantes en rosas de viento de contaminantes. Éstas son representaciones gráficas de la estadística circular de la frecuencia con la que diversos rangos de concentración de contaminantes se asocian a direcciones de proveniencia de viento. En esta investigación, dichas figuras fueron divididas en 3 bloques de tiempo; 24 horas, 06:00-10:00 horas y 06:00-18:00 horas.

La rosa de vientos de contaminantes para las 24 horas (Figura 36a y 36b) en el sitio urbano presentó el mayor aporte de BC y CO cuando el viento provino del arco suroeste-oeste-noroeste con una frecuencia conjunta de aproximadamente 45%, dominando las concentraciones mayores a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el caso del BC y por arriba de  $1 \text{ ppm}$  para el CO. Cuando el viento provino del arco sur-sureste, la frecuencia fue aproximadamente 35% pero con dominancia de concentraciones menores de  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en BC y menores a  $1 \text{ ppm}$  para el CO. Las mayores contribuciones provienen del área de influencia de la Avenida Tollocan

y de la zona de hospitales al poniente de la estación de monitoreo. Cuando el viento proviene del sector sur, se registran emisiones de una zona urbana de baja actividad vehicular. Esto implica que, dependiendo de la hora del día, es la contribución en los niveles de concentración.

Sin embargo, en el periodo de 06:00-10:00 de la mañana (Figura 36c y 36d), los vientos de arco SSO-S-SSE alcanzan una frecuencia conjunta del orden del 50% con dominancia del rango de concentraciones de BC menores a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y menores a 2 ppm para CO. Cuando el viento proviene del arco SO-SSO-O y ONO la frecuencia conjunta es menor al 40% pero domina el rango de concentraciones de mayores a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para BC y mayores a 2 ppm para CO; mostrando una mayor frecuencia de ocurrencias de concentraciones por arriba de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para BC y de mayores a 4 ppm de CO cuando el viento provino de este sector. Se observa una influencia clara de la Avenida Tollocan y del flujo de circulación hacia el oriente en las mediciones de la estación de monitoreo.

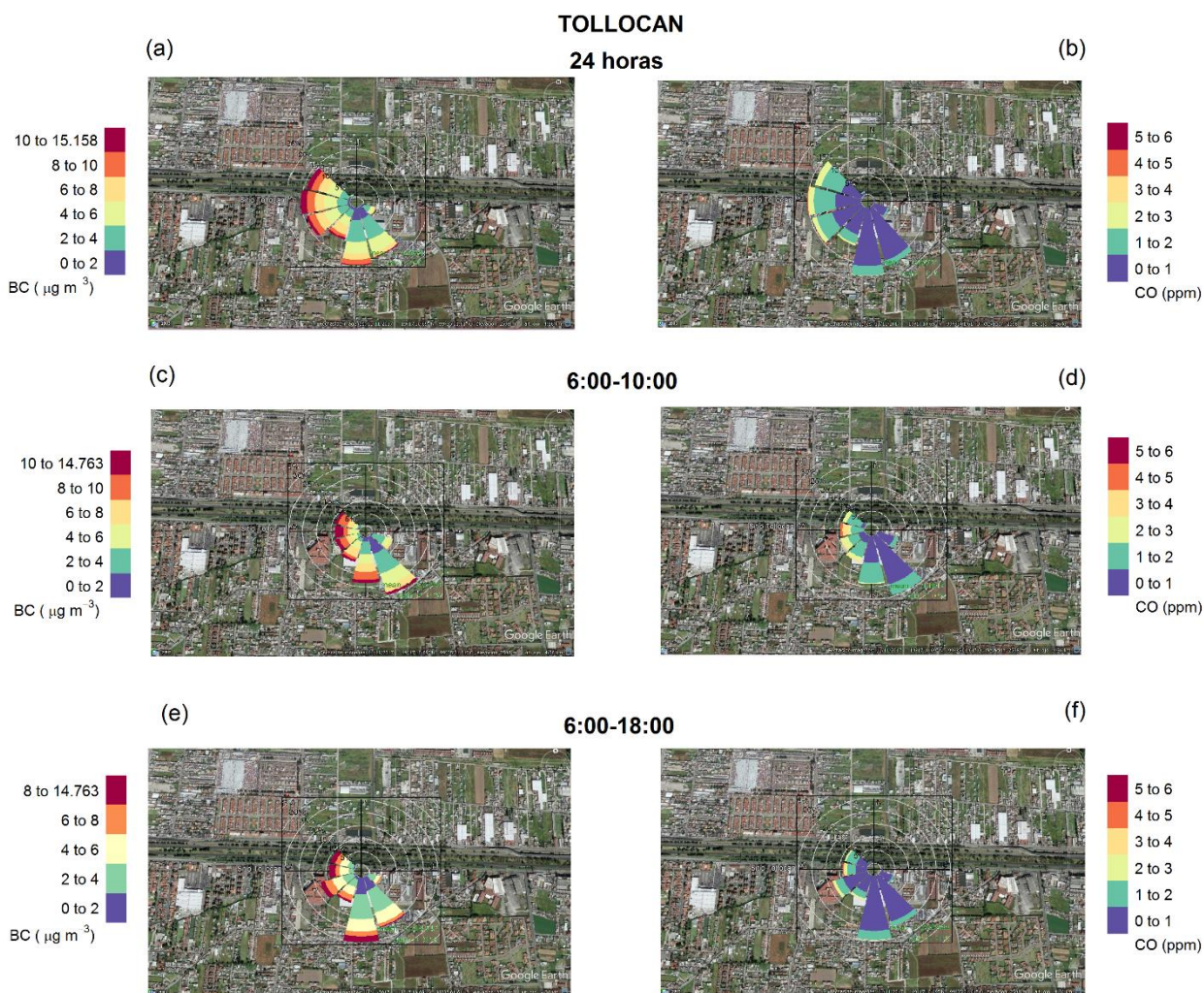
Este dominio continuó para el periodo 06:00-18:00 horas (Figura 36e y 36f), con la diferencia que hay una mayor frecuencia conjunta de vientos del sur con registros relativamente más frecuentes y altos de BC, pero con una frecuencia aún mayor de niveles de CO menores a 2 ppm, lo que sugiere que procesos de combustión diferentes a vehiculares son generados hacia ese sector. En general, las concentraciones de BC y CO registradas en Tollocan compartieron las mismas direcciones de viento, motivo por el cual en este sitio se tuvieron los mayores valores de correlación, sin embargo, el periodo de 6:00-10:00 horas es el que refleja con mayor claridad las emisiones de tráfico vehicular.

Con base en la Figura 37a y 37b, se observa que el mayor aporte de los contaminantes BC y CO en el sitio San Antonio la Isla provino del arco sur-suroeste con concentraciones cercanas a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el BC y cercanas a 1 ppm para el CO. De esta manera se infiere que la mayor contribución proviene de la vialidad más grande cercana al sitio: la autopista Lerma-Tenango del Valle, ubicada al sur de la estación de monitoreo. Al analizar el periodo comprendido entre 6:00-10:00 horas (Figura 37c y 37d), el comportamiento de las emisiones fue distinto, ya que la mayor contribución tanto para el BC como el CO provino de los arcos noreste-este y también del arco sureste-sur. Esto pondría indicar que la aportación de contaminantes desde las vialidades ubicadas al noreste de la estación de monitoreo (a las afueras del municipio de San Antonio la Isla) se vuelve significativa como resultado de la movilidad ciudadana matutina. Durante el periodo 6:00-18:00 (Figura 37e y 37f) se mantuvo la dominancia del aporte desde al arco sureste-sur-suroeste. Nuevamente coincidiendo con la ubicación de la autopista al sur de la estación de monitoreo.

Por otra parte, el análisis del aporte de concentraciones del BC y CO para el sitio suburbano mostró que la dominancia de estos provino desde al arco sureste-sur-suroeste; con concentraciones menores a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el BC y menores a 1ppm para el CO (Figura 38a y 38b). Este patrón se hace más evidente durante el periodo de las 6:00-10:00 horas (Figura 38

c y 38d); se observa que el aporte en la dirección sur es dominante para el BC, mientras que la dirección suroeste lo es para el CO. Sin embargo, de manera general la dominancia encontrada indicaría que las vialidades que rodean a la estación de monitoreo fueron las más influyentes en el aporte de contaminantes. Finalmente, el análisis para el periodo 6:00-18:00 (Figura 38e y 38f) mostró un cambio en el patrón en la contribución de emisiones, ya que éstas provinieron del arco este-sureste-sur y suroeste; es decir desde las vialidades y la zona habitacional que se encuentran al este y sureste de la estación de monitoreo.

De esta manera se localizan algunas direcciones desde las cuales se pudo haber tenido transporte de contaminantes, sobre todo en el sitio suburbano; explicando así la disminución en los valores de coeficientes de correlación y el comportamiento errático tanto en la relación  $\Delta BC/\Delta CO$  como en el gráfico de concentraciones contra la velocidad del viento.



**Figura 36** Rosas de viento de contaminantes de para el sitio urbano.

SAN ANTONIO LA ISLA

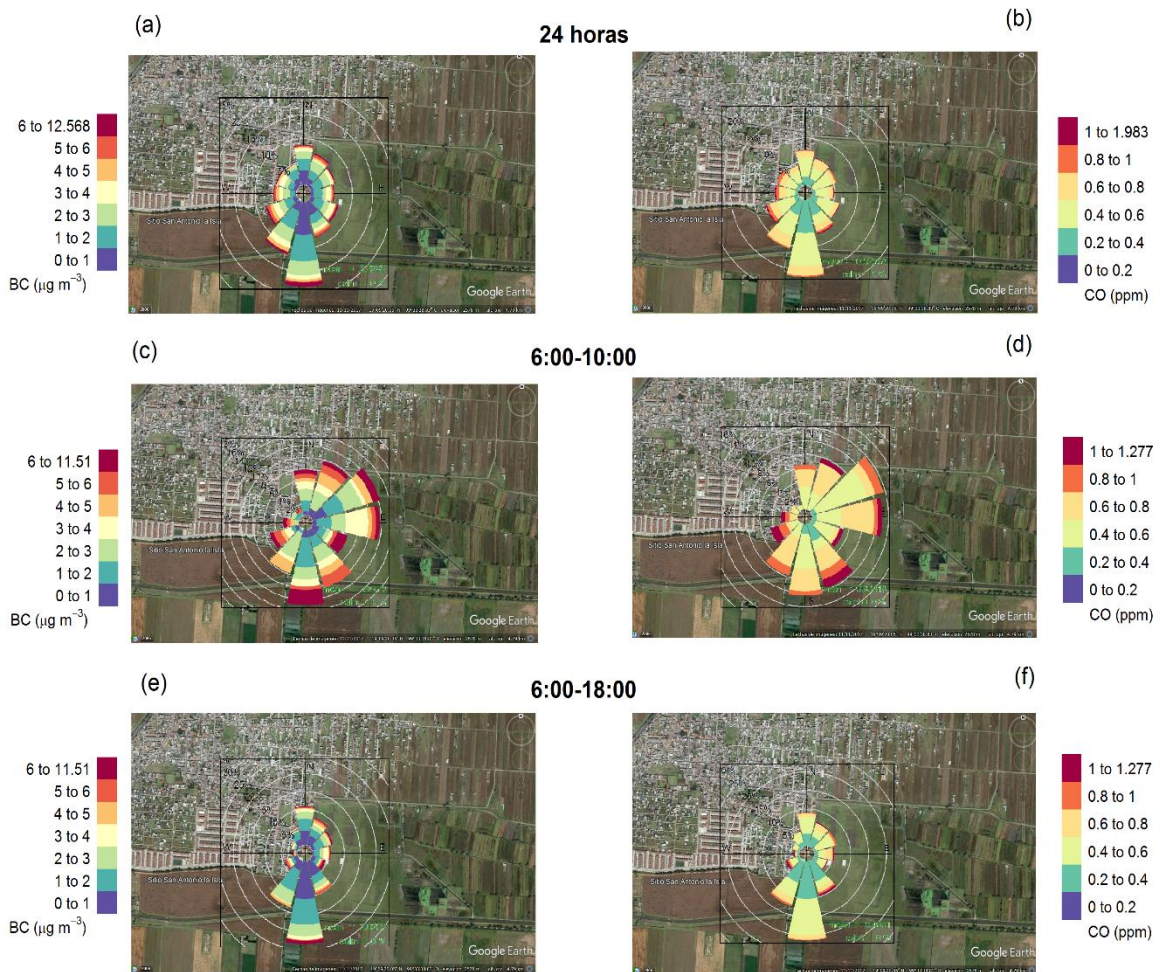


Figura 37 Rosas de viento de contaminantes para el sitio periurbano.



# ZINACANTEPEC

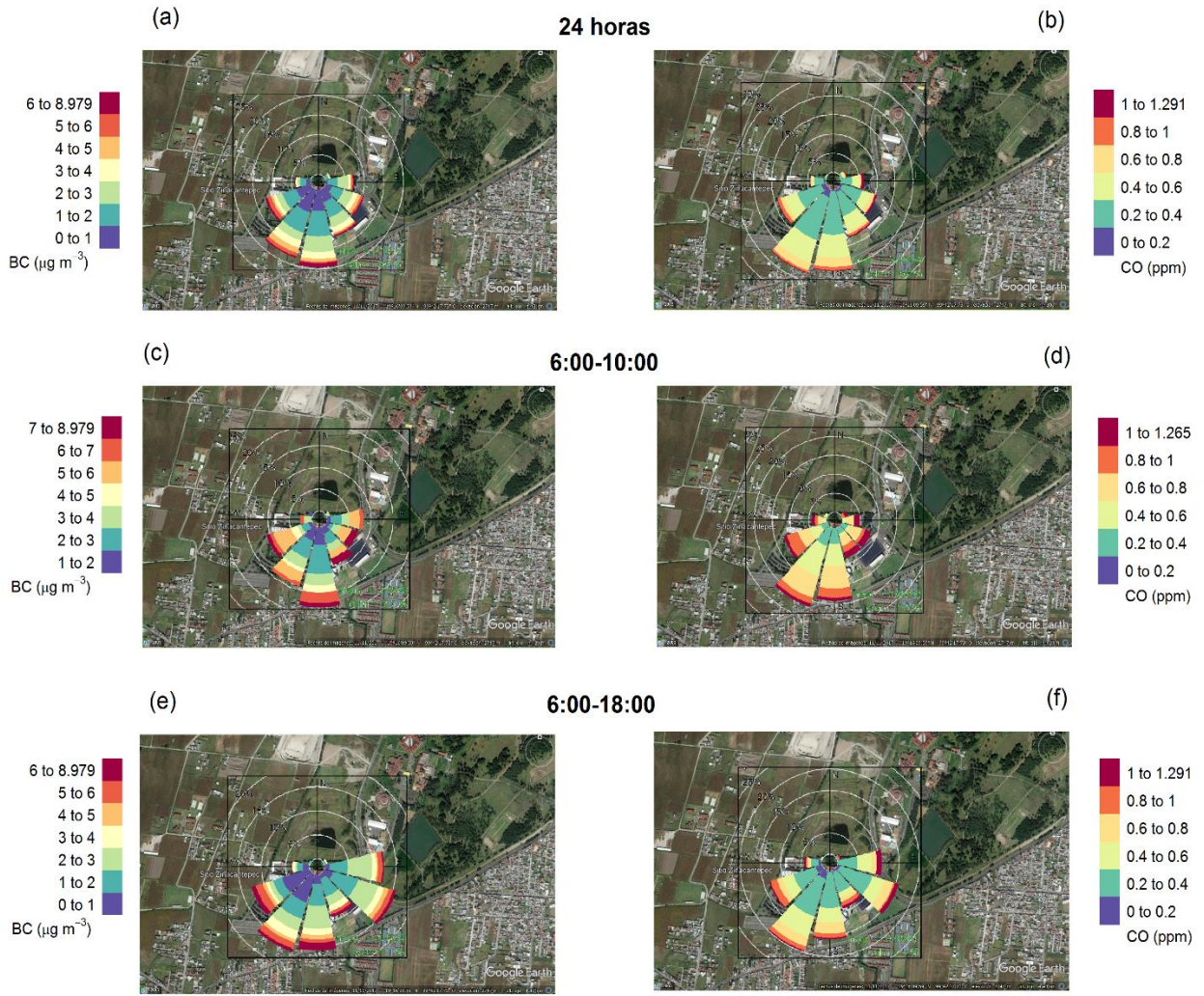


Figura 38 Rosas de viento de contaminantes para el sitio suburbano.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se investigó la consistencia del inventario de emisiones de BC disponible para el Valle de Toluca a través de la comparación del cociente CO/BC. Dicho cociente se obtuvo de dos maneras; en la primera de ellas se utilizó el llamado índice de motorización, calculado como parte del análisis de las mediciones de concentración de contaminantes de los sitios: Tollocan, San Antonio la Isla y Zinacantepec; obtenidas en la campaña de monitoreo “Proyecto CCA-PT17” realizada por la Universidad Nacional Autónoma de México durante febrero a abril de 2017. La segunda manera en la que se obtuvo el cociente fue a través de la integración de los inventarios oficiales de 2004 y 2010 publicados por la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México.

El análisis realizado permitió identificar que en el periodo matutino 6:00-10:00 horas, las concentraciones de BC y del CO fueron relativamente elevadas y que las fuentes móviles representaron las principales generadoras de ellas; coincidiendo con el hecho de que ambas son producidas por combustión incompleta: CO de vehículos a gasolina y BC de vehículos a diésel, principalmente. Bajo esta premisa se realizó un análisis de correlación lineal entre ambos contaminantes tomando como base el principio del método “top-down”; encontrando que para todos los sitios de monitoreo se tenía un coeficiente de correlación ( $r$ ) positivo, siendo Tollocan el sitio con el valor de coeficiente más alto ( $r=0.84$ ) en el periodo matutino (6:00-10:00 horas) de entre otros periodos analizados.

Aplicando el mismo análisis de regresión lineal mediante el método de agrupación de datos, se encontró que más de 90% de la cantidad equivalente de BC en las concentraciones medias podía ser explicada por medio de la cantidad de CO equivalente en las respectivas concentraciones. Confirmando que, a falta de datos de BC, el uso de datos de CO para estimar las emisiones de BC se considera una aproximación adecuada.

Mediante gráficas de regresión lineal y de la respectiva obtención de la pendiente, se encontraron las ecuaciones que relacionan al CO con el BC (asumiendo que la correlación sigue la ecuación de una línea recta). Dicha pendiente resultó equivalente a la cantidad de BC en nano gramos por metro cúbico asociada a 1 ppm de CO. Los resultados mostraron que para todos los sitios 1 ppm de CO correspondió a un rango entre 2842 y 7588 ng/m<sup>3</sup> de BC; valores que son superiores a la equivalencia utilizada de manera general en el inventario (1ppm CO =1012 ng/m<sup>3</sup> de BC). Se considera que este tipo de generalizaciones (el uso de una equivalencia o factor de proporcionalidad obtenida en un sitio muy distinto al Valle de

Toluca), pudo derivar la subestimación de las emisiones. El hecho de haber realizado mediciones en sitios representativos por su grado de urbanidad permitió distinguir la importancia en las variaciones dadas por el uso de este tipo de factores de proporcionalidad.

El uso del cociente  $\Delta BC/\Delta CO$  está basado en la suposición de que el CO es trazador de emisiones de vehículos a gasolina y el BC trazador de emisiones de vehículos a diésel, situación que pudo corroborarse mediante el análisis de la consistencia de este cociente en diversos periodos del día. Se observó que cuando los valores de las pendientes incrementan se tiende a tener un dominio de vehículos a diésel (mayor emisión de BC); mientras que la disminución en las pendientes indica el predominio de las fuentes con motores a gasolina.

En general, los 3 sitios de medición mostraron un comportamiento muy apegado al comportamiento vehicular; sin embargo, el sitio urbano (Tollocan) fue el que presentó el patrón más acorde a la influencia y variación vehicular. El sitio periurbano (San Antonio la Isla) fue parecido a Tollocan, con la diferencia de que ahí no se tiene la circulación de tránsito pesado con motores a diésel. Por otro lado, en el sitio suburbano (Zinacantepec) se dedujo la influencia de fuentes adicionales de CO, posiblemente de procesos de combustión de uso doméstico y/o mayor influencia de tráfico de motores de gasolina.

Considerando la abundancia matutina del BC y el CO, así como la buena correlación entre ellos, se calculó el índice de motorización. Si bien es adecuado el hecho de suponer que ésta es la fuente principal de BC, existe incertidumbre debido al censo vehicular; ya que la naturaleza de éste tiene dos implicaciones

1. No se considera la circulación de los autos o se considera que es muy limitada (únicamente dentro del Valle de Toluca).
2. Considera que todo el parque vehicular está registrado.

A través del índice de motorización, se encontró que la mayoría del territorio del Valle de Toluca es del tipo suburbano, con 15 municipios que entraron en esta categoría, mientras que hubo 4 sitios periurbanos y solo 3 urbanos, resaltando así la transición de urbanización en la que se encuentra el Valle.

Los valores promedio de los cocientes (CO/BC) fueron 281  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$  (rango 86-642  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ ) para el sitio periurbano, 234  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$  (rango 6-469  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ ) para el sitio urbano y 219  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$  (rango 123-490  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ ) para el sitio suburbano. En promedio el cociente CO/BC encontrado con las mediciones en los tres sitios fue de 244  $\mu\text{gCO}/\mu\text{gBC}$ . Al comparar este valor con la razón equivalente CO/BC obtenida de la integración de los inventarios de 2004 y de 2010 (que tuvo un valor de 795 Mg/año), se observó que el primero fue alrededor de 3 veces menor, por lo que se especuló que el inventario no representaba totalmente las emisiones en el Valle de Toluca; premisa que se confirmó al calcular los Mg de CO y BC emitidos en el año 2010 (año base). El inventario 2010 subestima la emisión de BC, ya que reportó 742 Mg/año de BC, mientras que en la

estimación se obtuvieron  $(1.15 \pm 0.09) \times 10^3$  Mg/año. El inventario de 2004 subestima la emisión de CO, con un reporte de  $5.90 \times 10^5$  Mg/año de CO contra la estimación de  $(3.15 \pm 0.02) \times 10^6$  Mg/año.

Con ayuda del breve análisis meteorológico realizado, se corroboró la hipótesis de que tanto el BC como el CO medidos en los sitios Tollocan y San Antonio la Isla, fueron generados en el entorno cercano a la zona de influencia de la estación de medición; ya que se tuvieron altos valores de concentración de contaminantes mientras se tuvieron bajas velocidades de viento. Las rosas de viento de contaminantes mostraron que, a lo largo de las 24 horas, en los sitios Tollocan y San Antonio la Isla, el BC y el CO fueron concurrentes en valores altos para las mismas direcciones de proveniencia del viento y que las fuentes de emisión fueron zonas con tráfico en el primero de ellos. En el sitio Zinacantepec se observó que las emisiones provinieron predominantemente desde el área de circulación vehicular y residencial, destacando el hecho de que en el periodo 6:00-10:00 se notó un aporte de CO ligeramente mayor al que se registró de BC.

## **5.2 Recomendaciones**

Tras haber encontrado que el inventario de emisiones “Fuentes de emisión de carbono negro en el Estado de México” subestimó las emisiones de BC y CO se reconoce que la evaluación de estos es una actividad importante para encontrar posibles diferencias entre los valores de emisiones reportados y los estimados con mediciones en superficie. Identificar este tipo de diferencias es necesario si se considera que a través del inventario de emisiones se establecerán estrategias para el mejoramiento de la calidad del aire.

Si bien lo ideal para reportar las emisiones de BC sería tener factores de emisión específicos y realizar un monitoreo continuo del contaminante, se debe tener en cuenta que, en muchos sitios la infraestructura y/o presupuesto no son suficientes. Por ello, se considera adecuado hacer una estimación de BC a través de valores de CO (idea que se fortaleció con base en los resultados del análisis por agrupación de datos); sin embargo, se tendría que tomar en cuenta la variabilidad de las relaciones BC-CO a lo largo del tiempo y considerar que habría un sesgo inherente en la emisión de BC estimada a través del CO. Así como asumir que el inventario de CO es totalmente confiable, ya que la incertidumbre que contenga éste, sería transferida a la estimación de la emisión de BC.

Se recomienda que al inferir las emisiones de un contaminante (BC) a través de otro (CO) se verifiquen algunos aspectos de manera previa a la estimación, dentro de los que se debería considerar:

- La representatividad de los datos a través de los cuales se va a estimar.
- Las condiciones o características de los sitios en donde se obtuvieron los factores o equivalencias a utilizar.
- Variación de actividades realizadas en ciertas zonas y que, por lo tanto, es posible que un solo factor de emisión no sea representativo para toda el área.
- Que las estaciones de monitoreo de donde se tomarán los datos se encuentren con la mejor ubicación posible y evitar que sea un sitio receptor por naturaleza.

## REFERENCIAS

- Aether. (2020). Emissions Inventory Lifecycle. Retrieved March 20, 2020, from <https://www.aether-uk.com/Emissions-inventories/Emissions-inventory-lifecycle>
- Agudelo, D., Calessio, E., & Pereira, F. (2014). Time-series analysis of surface ozone and nitrogen oxides concentrations in an urban area at Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 5, 411–420. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.048>
- Aiken, A. C., Salcedo, D., Cubison, M. J., Huffman, J. A., DeCarlo, P. F., Ulbrich, I. M., ... Jimenez, J. L. (2009). Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) - Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), 6633–6653. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6633-2009>
- Alexander, D. T. L., Crozier, P. A., & Anderson, J. R. (2008). Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties. *Science*, 321(5890), 833–836. <https://doi.org/10.1126/science.1155296>
- Andreae, M. O., & Gelencsér, A. (2006). Black carbon or brown carbon? the nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(10), 3131–3148. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3131-2006>
- Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955–966. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>
- Aparicio Plazas, D. E. (2018). *Caracterización de óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), carbono negro (CN) y ozono (O3) en el suroeste de Toluca, Estado de México durante el proyecto CCA-PT17*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arnott, W. P., Moosmüller, H., Rogers, C. F., Jin, T., & Bruch, R. (1999). Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: Instrument description. *Atmospheric Environment*, 33(17), 2845–2852. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00361-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00361-6)
- Barath, S., Mills, N., Lundbäck, M., Törnqvist, H., Lucking, A., Langrish, J., ... Blomberg, A. (2010). Impaired vascular function after exposure to diesel exhaust generated at urban transient running conditions. *Particle and Fibre Toxicology*, 7, 19. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-7-19>
- Battye, W., Boyer, K., & Pace, T. (2002). *Methods for Improving Global Inventories of Black Carbon and Organic Carbon Particulates*.
- Baumgardner, D., Kok, G. L., & Raga, G. B. (2007). On the diurnal variability of particle properties related to light absorbing carbon in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(10), 2517–2526. <https://doi.org/10.5194/acp-7-2517-2007>

- Baumgardner, D., Raga, G., Peralta, O., Rosas, I., Castro, T., Kuhlbusch, T., ... Petzold, A. (2002). Diagnosing black carbon trends in large urban areas using carbon monoxide measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(21). <https://doi.org/10.1029/2001JD000626>
- Bell, S. (1999). *Measurement: Good Practice Guide. A Beginner's Guide to Uncertainty of measurement*. (National Physical Laboratory, Ed.). Middlesex, United Kingdom: HMSO.
- Bockhorn, H. (1994). Soot formation in Combustion. *Soot Formation in Combustion*, p. 4.
- Bond, Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bond, T. C., & Bergstrom, R. W. (2006). *Light Absorption by Carbonaceous Particles : An Investigative Review*. 6826. <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>
- Bond, T. C., & Bergstrom, R. W. (2007). *Light Absorption by Carbonaceous Particles : An Investigative Review*. 6826. <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>
- Bond, T. C., Streets, D. G., Yarber, K. F., Nelson, S. M., Woo, J., & Klimont, Z. (2004). A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. 109, 1–43. <https://doi.org/10.1029/2003JD003697>
- Campbell Scientific. (2018). *Reliable , Accurate Wind Measurements* (pp. 4–7). pp. 4–7. Retrieved from [campbellsci.com/05103-1](http://campbellsci.com/05103-1)
- Cape, J. N., Coyle, M., & Dumitrean, P. (2012). The atmospheric lifetime of black carbon. *Atmospheric Environment*, 59, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.030>
- Carslaw, D. . (2014). *The openair manual open-source tools for analysing air pollution data*.
- Cattaneo, M. D., Crump, R. K., Farrell, M., & Feng, Y. (2019). On Binscatter. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3344739>
- CEC. (2015). *North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines : Recommended Methods for Estimating Black Carbon Emissions*. Montreal, Canada.
- Chameides, W. L., Demerjian, K., Albritton, D., Amar, P., Roldan, A. B., Dunker, A., ... Schultz, L. (2000). *An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution: A North American Perspective*.
- Chung, C., Lee, K., & Müller, D. (2012). *Effect of internal mixture on black carbon radiative forcing*. 0889. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.10925>
- Curci, G., Alyuz, U., Barò, R., Bianconi, R., Bieser, J., Christensen, J. H., ... Liu, P. (2019). *Modelling black carbon absorption of solar radiation : combining external and internal*

- mixing assumptions*. 181–204. <https://doi.org/10.5194/acp-19-181-2019>
- Danel, V. (2020). Airborne particulate matter and their health effects - Encyclopédie de l'environnement. Retrieved March 20, 2020, from Encyclopedia of the Environment website: <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects/>
- Dios, M., Souto, J. A., Casares, J. J., Gallego, N., Sáez, A., Macho, M. L., ... Vellón, J. M. (2012). A mixed top-down and bottom-up methodology in spatial segregation of emissions based on GIS tools. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 157, 225–236. <https://doi.org/10.2495/AIR120201>
- Emerson, E. W., Katich, J. M., Schwarz, J. P., McMeeking, G. R., & Farmer, D. K. (2018). Direct Measurements of Dry and Wet Deposition of Black Carbon Over a Grassland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(21), 12,277-12,290. <https://doi.org/10.1029/2018JD028954>
- Environmental Devices Corporation. (1999). *Haz-Dust Model EPAM-7500 User 's Guide*.
- EPA. (1999). *Nitrogen Oxides ( NOx ), Why and How They Are Controlled*. North Carolina.
- EPA. (2001). *Control of Air Pollution from New Motor Vehicles: Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements* (Vol. 66).
- EPA. (2009). *Air Toxics Data Analysis Workbook*. <https://doi.org/STI:908304.03-3224>
- EPA. (2013). *IR Gas Filter Correlation Carbon Monoxide Analyzer- model CO12M*.
- EPA. (2018a). Criteria Air Pollutants. Retrieved March 20, 2020, from <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- EPA. (2018b). Managing Air Quality - Emissions Inventories. Retrieved March 21, 2020, from <https://www.epa.gov/air-quality-management-process/managing-air-quality-emissions-inventories>
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2012). Niñas y niños en un mundo urbano. In *Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF)* (Vol. 1). Retrieved from [https://www.unicef.org/spanish/sowc2012/pdfs/SOWC-2012-Main-Report-LoRes-PDF\\_SP\\_01052012.pdf](https://www.unicef.org/spanish/sowc2012/pdfs/SOWC-2012-Main-Report-LoRes-PDF_SP_01052012.pdf)
- Fujita, E. M., Croes, B. E., Bennett, C. L., Lawson, D. R., Lurmann, F. W., & Main, H. H. (1992). Comparison of emission inventory and ambient concentration ratios of CO, NMOG, and NOx in California's South Coast Air Basin. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 42(3), 264–276. <https://doi.org/10.1080/10473289.1992.10466989>
- Funk, T. H., Chinkin, L. R., Roberts, P. T., Saeger, M., Mulligan, S., Páramo Figueroa, V. H., & Yarbrough, J. (2000). Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *Science of the Total Environment*, 276(1–3), 135–151. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00776-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00776-8)





- Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., ... Lu, Z. (2018). *Historical ( 1750 – 2014 ) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System ( CEDS )*. 369–408. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>
- INEGI. (2015a). Número de habitantes. Estado de México. Retrieved March 21, 2020, from <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/poblacion/default.aspx?tema=me&e=15>
- INEGI. (2015b). Relieve. Estado de México. Retrieved March 21, 2020, from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=15>
- INEGI. (2020, March 10). Indicador Mensual de la Actividad Industrial por Entidad Federativa (IMAIEF). Retrieved March 26, 2020, from <https://www.inegi.org.mx/programas/aief/2013/default.html#Herramientas>
- IPCC. (2013). Cambio climático 2013, bases físicas. Resumen para responsables de políticas. *Contribución Del Grupo de Trabajo I Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*, 27. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/news\\_and\\_events/docs/ar5/ar5\\_wg1\\_headlines\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf)
- IPCC. (2014). Anexo II: Glosario. *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II y III Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*, (7137), 127–141. <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Jacob, D. J. (1999). *INTRODUCTION TO ATMOSPHERIC CHEMISTRY*. Harvard University.
- Jacobson, M. Z. (2002). Aerosol Particles in Smog and the Global Environment. *Atmospheric Pollution*, 115–144. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511802287.006>
- Janssen, N. A. H., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., van Bree, L., Brink, H. Ten, ... Cassee, F. R. (2011). Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with pm10 and pm2.5. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1691–1699. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>
- Janssen, N., Gerlofs-Nijland, E., Lanki, T., Salonen, R. O., Cassee, F., Hoek, G., ... Krzyzanowski, M. (2012). Health effects of black carbon. In *Atmospheric Environment* (Vol. 41).
- Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., ... Schöpp, W. (2017). *Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon*. 8681–8723. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acp-17-8681-2017>
- Knox, A., Evans, G. J., Brook, J. R., Yao, X., Jeong, C., Godri, K. J., ... Slowik, J. G. (2009). *Mass Absorption Cross-Section of Ambient Black Carbon Aerosol in Relation to Chemical Age*. 6826. <https://doi.org/10.1080/02786820902777207>

- Kondo, Y., Komazaki, Y., Miyazaki, Y., Moteki, N., Takegawa, N., Kodama, D., ... Ehara, K. (2006). Temporal variations of elemental carbon in Tokyo. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(12). <https://doi.org/10.1029/2005JD006257>
- Kuhlbusch, T. A., Andreae, M. O., Cachier, H., Goldammer, J. G., Lacaux, J. P., Shea, R., & Crutzen, P. J. (1996). *Black carbon formation by savanna fires : Measurements and implications for the global carbon cycle.* (May 2017). <https://doi.org/10.1029/95JD02199>
- LGCC. (2018). Ley General De Cambio Climático. *Dof 13-07-2018*, 1–58. Retrieved from [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_130718.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf)
- Liousse, C., Cachier, H., & Jennings, S. ~G. (1993). Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: Variation of the specific attenuation cross-section,  $\sigma$  ( $\{\sigma\}$ ). *Atmospheric Environment*, 27(8), 1203–1211. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90246-U](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90246-U)
- Liu, S., Aiken, A. C., Gorkowski, K., Dubey, M. K., & Cappa, C. D. (2015). *Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter.* (October). <https://doi.org/10.1038/ncomms9435>
- López, J. J., Garcia-oliver, J. M., & Martín, J. (2012). *A soot radiation model for diesel sprays.* (November 2017). <https://doi.org/10.4271/2012-01-1069>
- Lucking, A. J., Lundback, M., Mills, N. L., Faratian, D., Barath, S. L., Pourazar, J., ... Newby, D. E. (2008). Diesel exhaust inhalation increases thrombus formation in man. *European Heart Journal*, 29(24), 3043–3051. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehn464>
- Martins, J. V., Artaxo, P., Liousse, C., Reid, J. S., Hobbs, P. V., & Kaufman, Y. J. (1998). Effects of black carbon content, particle size, and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in Brazil. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(98), 41–50.
- mathworks. (2020). boxplot. Retrieved November 11, 2020, from Centro de ayuda website: <https://la.mathworks.com/help/stats/boxplot.html>
- Mejía-Velázquez, G., & Páramo-Figueroa, V. H. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5* (Primera Ed). México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Miranda, J. (n.d.). *Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales.*
- Ogren, J. A., & Charlson, R. J. (1983). Elemental carbon in the atmosphere: cycle and lifetime. *Tellus B*, 35 B(4), 241–254. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1983.tb00027.x>
- Pavia Hernandez, R. (2017). *Eficiencia de absorción de masa de carbono elemental y propiedades óptimas de partículas atmosféricas PM2.5.* Universidad Nacional Autónoma de México.

- Peralta, O. (2018). *Impacto de las emisiones móviles y fijas a la distribución de concentraciones de carbono negro y gases contaminantes en la vertical en zonas urbana y periurbana del centro de México*.
- Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., ... Zhang, X. Y. (2013). Recommendations for reporting black carbon measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), 8365–8379. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013>
- Pósfai, M., & Buseck, P. R. (2010). Nature and Climate Effects of Individual Tropospheric Aerosol Particles. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38(1), 17–43. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100032>
- Pósfai, M., Gelencsér, A., Simonics, R., Arató, K., Li, J., Hobbs, P. V., & Buseck, P. R. (2004). Atmospheric tar balls: Particles from biomass and biofuel burning. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(6). <https://doi.org/10.1029/2003jd004169>
- PROMEXICO. (2015, December 21). Toluca . Retrieved March 26, 2020, from Gobierno de México website: <https://www.gob.mx/promexico/acciones-y-programas/toluca?state=published>
- Raga, G. B., Kuylenstierna, J., Dore, C., Claxton, R., Shindell, D., Foltescu, V., ... Borgford-Parnell, N. (2018). *Addressing Black Carbon Emission Inventories*. (May), 21. Retrieved from [http://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2018\\_Science-Update-Black-Carbon-Briefing\\_CCAC.pdf](http://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2018_Science-Update-Black-Carbon-Briefing_CCAC.pdf)
- Ran, L., Deng, Z. Z., Wang, P. C., & Xia, X. A. (2016). Black carbon and wavelength-dependent aerosol absorption in the North China Plain based on two-year aethalometer measurements. *Atmospheric Environment*, 142, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.014>
- Robitaille, P. (2008). *Blackbody Radiation and the Carbon Particle* (Vol. 3). Ohio, USA.
- Ruijgrok, W., Davidson, C. I., & Nicholson, K. W. (1995). Dry deposition of particles: implications and recommendations for mapping of deposition over Europe. *Tellus, Series B*, pp. 587–601. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1996.t01-3-00009.x>
- Ruíz, L. G., Calderón Ezquerro, M. del C., Delgado Campos, J. G., García Martínez, R., García Reyoso, J. A., Grutter de la Mora, M., ... Zavala Hidalgo, J. (2014). *Estudios de calidad del aire y su impacto en la región centro de México*.
- Sanz, M. J., Bhattacharya, S., & Mareckova, K. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reporting Guidance and Tables. Chapter 8*.
- Sarkar, C., Venkataraman, C., Yadav, S., Phuleria, H. C., & Chatterjee, A. (2019). Origin and properties of soluble brown carbon in freshly emitted and aged ambient aerosols over an urban site in India. *Environmental Pollution*, 254, 113077. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113077>
- Sasser, E., Hemby, J., Adler, K., Anenberg, S., Bailey, C., Brockman, L., ... Dawson, J. and Frank, N. (2012). *Report to Congress on Black Carbon - Environmental Protection*

- Agency. (March). Retrieved from <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>
- Sedlacek, A. J. (2016). *Aethalometer Instrument Handbook*. <https://doi.org/DOE/SC-ARM-TR-156> Acronyms
- Sehlstedt, M., Behndig, A. F., Boman, C., Blomberg, A., Sandström, T., & Pourazar, J. (2010). Airway inflammatory response to diesel exhaust generated at urban cycle running conditions. *Inhalation Toxicology*, 22(14), 1144–1150. <https://doi.org/10.3109/08958378.2010.529181>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change* (Second Edi; J. W. & Sons, Ed.).
- SEMARNAT. (2019a). Documentos del Inventario Nacional de Emisiones. Retrieved July 21, 2020, from <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>
- SEMARNAT. (2019b). Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM) . Retrieved March 20, 2020, from <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>
- SMAGEM. (2007). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004*.
- SMAGEM. (2010). *Fuentes de Emisión Carbono Negro en el Estado México*.
- SMAGEM. (2012a). *Inventario de emisiones a la atmósfera del Estado de México, 2006*. Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
- SMAGEM. (2012b). *Programa para mejorar la calidad del aire. Valle de Toluca 2012-2017*. Metepec, Estado de México.
- SMAGEM. (2014). *Inventario de Emisiones del Estado de México*. Metepec, Estado de México.
- SMAGEM. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México*.
- SMAGEM. (2020). Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. Retrieved March 21, 2020, from <http://rama.edomex.gob.mx/>
- Stepner, M. (2014). Binscatter : Binned Scatterplots in Stata. Retrieved July 14, 2020, from <https://michaelstepner.com/binscatter/binscatter-StataConference2014.pdf>
- Teledyne API. (2018). *Operation Manual Model T200 NO/NO2 /NOx Analyzer*.
- Torres Jardón, R. (2019). *Métodos de análisis en muestreo continuo y semicontinuo. Principio de un sistema de medición* (p. 42). p. 42. México, D.F.
- Torres, P., & Rodríguez, L. (2005). Dinámica agroambiental en áreas periurbanas de México.

- Los casos de Guadalajara y Distrito Federal. *Investigaciones Geograficas*, 60(1100), 62–82.
- Valencia, D., & López, F. (2013). *Zonas suburbanas* (pp. 75–86). pp. 75–86. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Viidanoja, J., Sillanpaa, M., Laakia, J., Kerminen, V., Hillamo, R., Aarino, P., & Kosekentalo, T. (2002). *Organic and black carbon in PM 2.5 and PM 10: 1 year of data from an urban site in Helsinki, Finland*. 36, 3183–3193.
- Vivanco, M. G., & Andrade, M. D. F. (2006). Validation of the emission inventory in the Sao Paulo Metropolitan Area of Brazil, based on ambient concentrations ratios of CO, NMOG and NOx and on a photochemical model. *Atmospheric Environment*, 40(7), 1189–1198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.041>
- Weingartner, E., Burtscher, H., & Baltensperger, U. (1997). Hygroscopic properties of carbon and diesel soot particles. *Atmospheric Environment*, 31(15), 2311–2327. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00023-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00023-X)
- Zhang, Y., Zhang, Q., Cheng, Y., Su, H., Li, H., Li, M., ... He, K. (2018). Amplification of light absorption of black carbon associated with air pollution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9879–9896. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9879-2018>
- Zwinkels, J. (2018). *Blackbody and Blackbody Radiation*. (January 2015). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8>

## ANEXO 1

### Interferencia del carbono orgánico en las mediciones de carbono negro

La concentración de partículas en la atmósfera se caracteriza por la complejidad de la composición química de éstas. Cuando una partícula contiene únicamente el material original del que se formó, se tiene una mezcla externa. Por otro lado, si la partícula tiene un contenido heterogéneo, se habla de una mezcla interna (Bond y Bergstrom, 2006; Pavia, 2017).

El mezclado interno se presenta mayormente en partículas secundarias, es decir, a medida que las partículas comienzan a envejecer, una o varias capas de sustancias diversas rodean a la partícula original (núcleo) por lo que la partícula tiende a crecer. Este fenómeno también se presenta en el BC, ya que si bien cuando es recién emitido se encuentra en forma de esférulas, (Petzold et al., 2013) durante el proceso de envejecimiento la partícula toma una forma más esférica y con un tamaño mayor (Chung et al., 2012).

Mientras la partícula se encuentra en el estado de mezclado interno ocurre el efecto de lente (lensing effect), es decir se incrementa la absorción del BC; ya que la radiación que incide en la partícula es desviada al núcleo (compuesto de BC) (Chung et al., 2012; Gyawali et al., 2009), de esta manera, este mezclado puede interpretarse como una “mejora” en la eficiencia de absorción de masa (Liu et al., 2015; Pavia Hernandez, 2017). Es decir, la absorción de masa por sección, que es de al menos de  $5 \text{ m}^2/\text{g}$  a una longitud de onda de 550 nm, se incrementa cuando el BC se encuentra cubierto por otros materiales, aunque estos sean materiales menos absorbentes (Curci et al., 2019).

En la quema de biomasa es común la producción de partículas con mezclado interno (Gyawali et al., 2009), sin embargo, las partículas no se encuentran en un estado en extremo interno o externo, sino en un término medio. Es por ello, que la medición de BC siempre tendrá asociada cierta incertidumbre por la presencia del carbono orgánico, que hasta el momento no es cuantificada por los instrumentos de medición. Para reducir esta incertidumbre, se utiliza cierto valor de longitud de onda más específico para la detección de ciertos compuestos; 880 nm para la detección de BC (cercana al IR) y 370 nm para la detección de compuestos orgánicos (sensibles al UV) (Hansen, 2005).

Por otro lado, para tener lecturas con menor interferencia del recubrimiento de otros compuestos, se recomienda la toma de muestras en horarios matutinos para favorecer el mezclado externo, es decir, que las partículas sean formadas en su mayoría por moléculas de BC.

## ANEXO 2

### Incertidumbre en las mediciones de concentración de contaminantes

<b>Carbono negro</b>							
<b>Equipo de medición</b>	<b>Sitio</b>	<b>Evaluación tipo A</b>			<b>Evaluación tipo B</b>		<b>Incertidumbre combinada</b>
PAS	Tollocan	Media	5.02436	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.35	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.361 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Varianza	7.838	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
		Desviación estándar	2.800	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Varianza Experimental de la media	0.008	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
		Desviación estándar de la media	0.090	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Incertidumbre estándar	0.087	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Etalómetro	Zinacantepec	Media	2.156	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Varianza	2.549	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
		Desviación estándar	1.596	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Varianza Experimental de la media	0.005	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
		Desviación estándar de la media	0.067	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Incertidumbre estándar	0.063	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Etalómetro	San Antonio la Isla	Media	2.263	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Varianza	2.921	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
		Desviación estándar	1.709	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Varianza Experimental de la media	0.004	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
		Desviación estándar de la media	0.063	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
		Incertidumbre estándar	0.061	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			



<b>Monóxido de carbono</b>				
<b>Sitio</b>	<b>Evaluación tipo A</b>		<b>Evaluación tipo B</b>	<b>Incertidumbre combinada</b>
Tollocan	Media	0.832 ppm	0.0500 ppm	0.054 ppm
	Varianza	0.420 ppm <sup>2</sup>		
	Desviación estándar	0.648 ppm		
	Varianza Experimental de la media	0.000433 ppm <sup>2</sup>		
	Desviación estándar de la media	0.021 ppm		
	Incertidumbre estándar	0.020255247 ppm		
Zinacantepec	Media	0.423 ppm	0.0500 ppm	0.0507 ppm
	Varianza	0.040 ppm <sup>2</sup>		
	Desviación estándar	0.201 ppm		
	Varianza Experimental de la media	0.000 ppm <sup>2</sup>		
	Desviación estándar de la media	0.008 ppm		
	Incertidumbre estándar	0.008287709 ppm		
San Antonio la Isla	Media	0.524 ppm	0.0500 ppm	0.0503 ppm
	Varianza	0.027 ppm <sup>2</sup>		
	Desviación estándar	0.164 ppm		
	Varianza Experimental de la media	0.000 ppm <sup>2</sup>		
	Desviación estándar de la media	0.006 ppm		
	Incertidumbre estándar	0.005611576 ppm		

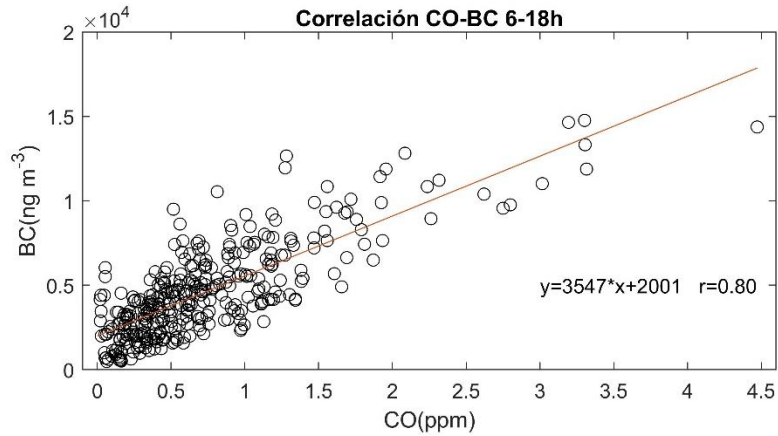
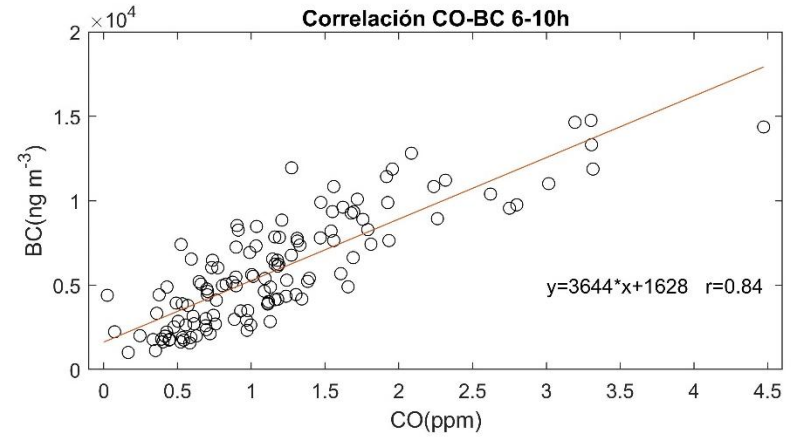
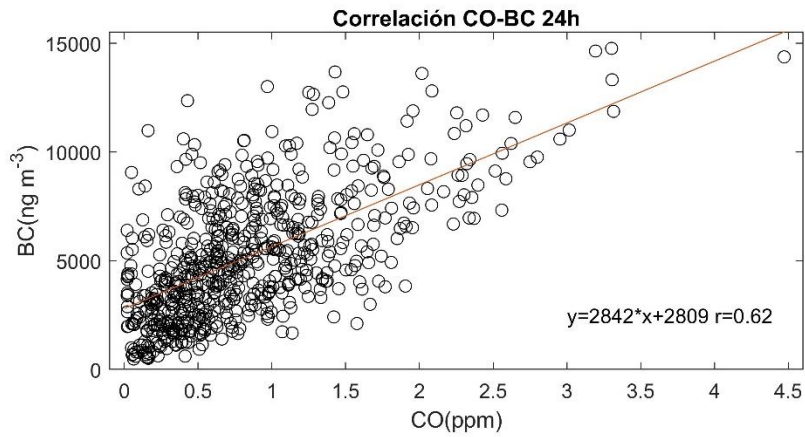
**Óxidos de nitrógeno**

Sitio	Evaluación tipo A		Evaluación tipo B	Incertidumbre combinada
Tollocan	Media	132.117 ppb	0.4 ppb	2.857 ppb
	Varianza	11359.880 ppb <sup>2</sup>		
	Desviación estándar	106.583 ppb		
	Varianza Experimental de la media	11.711 ppb <sup>2</sup>		
	Desviación estándar de la media	3.422 ppb		
	Incertidumbre estándar	2.82857769 ppb		
Zinacantepec	Media	13.788 ppb	0.4 ppb	0.5935 ppb
	Varianza	119.343 ppb <sup>2</sup>		
	Desviación estándar	10.924 ppb		
	Varianza Experimental de la media	0.213 ppb <sup>2</sup>		
	Desviación estándar de la media	0.461 ppb		
	Incertidumbre estándar	0.43842805 ppb		
San Antonio la Isla	Media	27.007 ppb	0.4 ppb	5.605 ppb
	Varianza	184.093 ppb <sup>2</sup>		
	Desviación estándar	13.568 ppb		
	Varianza Experimental de la media	0.247 ppb <sup>2</sup>		
	Desviación estándar de la media	0.497 ppb		
	Incertidumbre estándar	5.59117838 ppb		

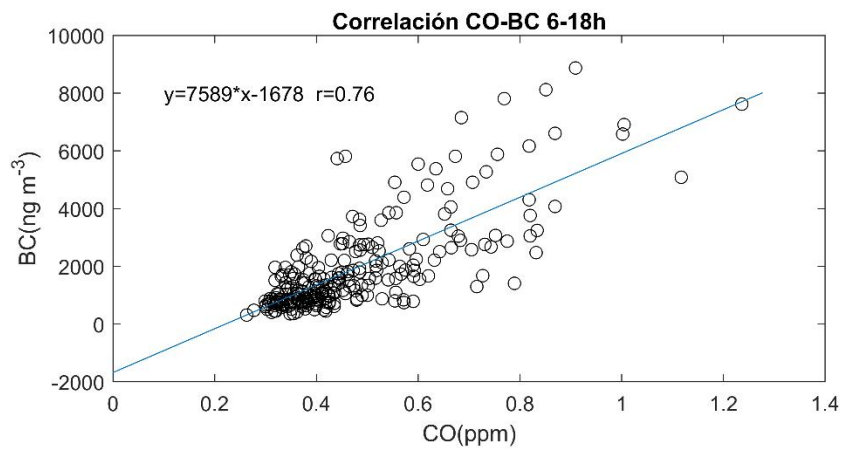
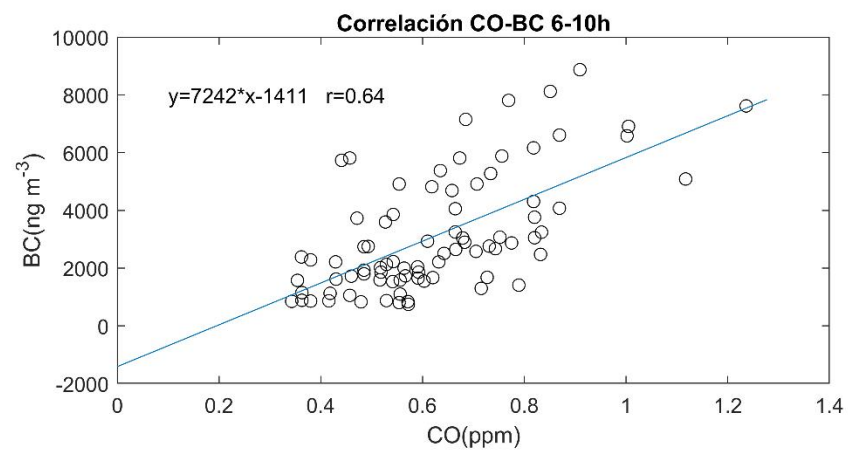
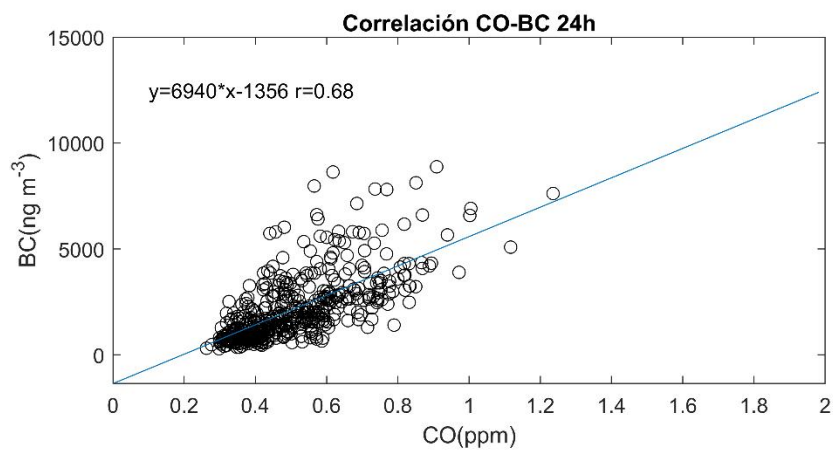
Material particulado menor a 2.5 micrómetros						
Sitio	Evaluación tipo A			Evaluación tipo B	Incertidumbre combinada	
Tollocan	Media	16.206	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.605 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Varianza	334.617	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
	Desviación estándar	18.293	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Varianza Experimental de la media	0.472	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
	Desviación estándar de la media	0.687	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Incertidumbre estándar	0.604950867693	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
San Antonio la Isla	Media	31.437	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.430 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Varianza	147.931	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
	Desviación estándar	12.163	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Varianza Experimental de la media	0.199	$(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$			
	Desviación estándar de la media	0.446	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Incertidumbre estándar	0.43006324	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			

### ANEXO 3

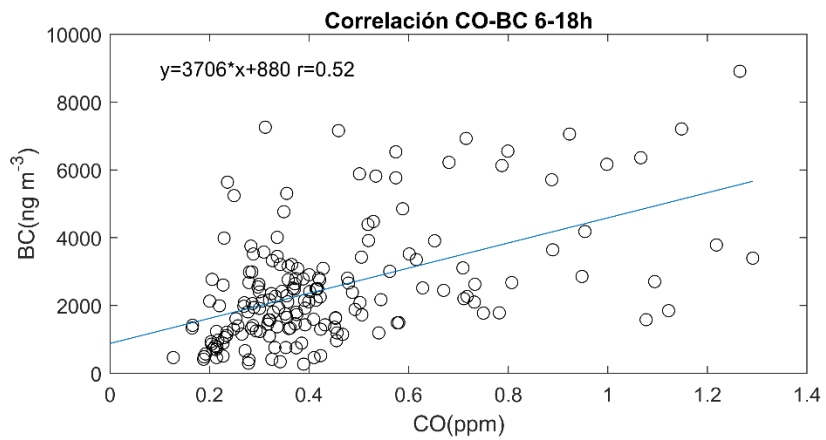
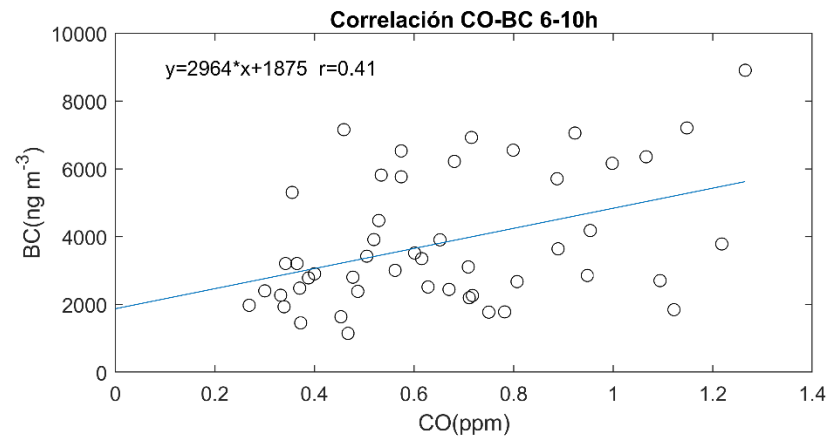
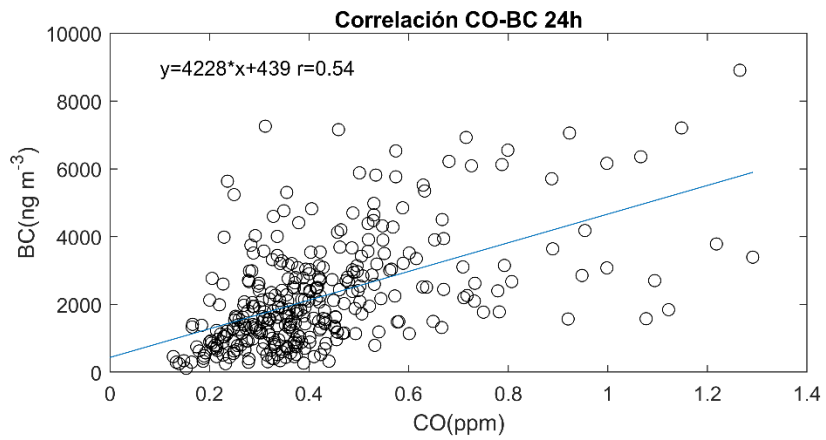
#### Análisis de correlación CO (ppm) vs BC (ng/m<sup>3</sup>)



Correlación CO-BC en el sitio urbano (Tollocan)



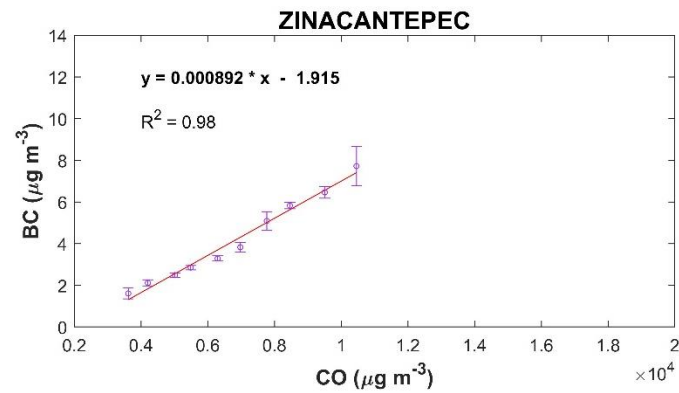
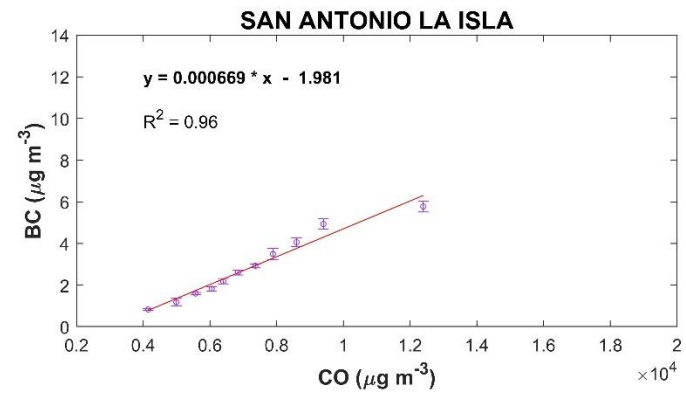
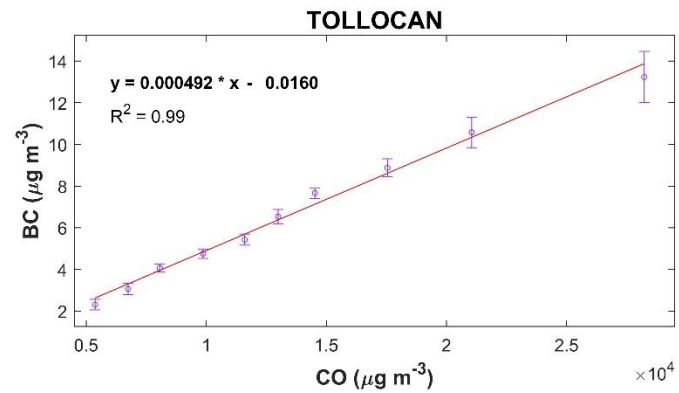
Correlación CO-BC en el sitio periurbano (San Antonio la Isla)



Correlación CO-BC en el sitio suburbano (Zinacantepec)

## ANEXO 4

### Análisis por agrupación de datos en periodo matutino (6:00-10:00 horas)



El análisis por agrupación de datos en el horario matutino mostró el mismo comportamiento, sin embargo, se destaca el incremento de los coeficientes de determinación  $R^2$  para Tollocan y Zinacantepec y un ligero decremento del mismo para San Antonio la Isla.

## ANEXO 5

### Cocientes $\text{NO}_x/\text{CO}$ en base molar

