



**“Mediciones Simultaneas de Carbono Negro (BC) en Interior y Exterior
de Escuelas en la Cuenca Atmosférica de Tijuana B.C.”**

TESIS

Que para obtener el título de

QUÍMICO INDUSTRIAL

PRESENTA

ILZE LUCERO GÓMEZ RUIZ

Tijuana B. C. México, Enero 2019

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 032


Tijuana, B. C., a 12 de diciembre de 2018

C. Ilze Lucero Gómez Ruiz
Pasante de Químico Industrial
Presente

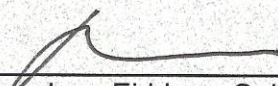
El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción Tesis

Es propuesto, por el Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones y la Dra. Penélope Jane Eiddwen Quintana quienes serán los responsables de la calidad del trabajo que usted presente, referido al tema "Mediciones Simultaneas de Carbono Negro (BC) en Interior y Exterior de Escuelas en la Cuenca Atmosférica de Tijuana B.C.", el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:


- I.- RESUMEN
- II.- INTRODUCCIÓN
- III.- PARTE EXPERIMENTAL
- IV.- DISCUSIÓN Y RESULTADOS
- V.- CONCLUSIONES
- VI.- REFERENCIAS
- VII. ANEXOS



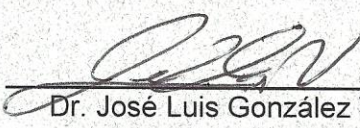
Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones
Director de Tesis



Dra. Penélope Jane Eiddwen Quintana
Co- Directora de Tesis



Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director



Dr. José Luis González Vázquez
Subdirector

Este trabajo se lo dedico especialmente a mis papás, por haberme guiado por el camino del conocimiento, apoyarme incondicionalmente en todas mis decisiones y carrera profesional A mi hermana por siempre tener un buen consejo para mí y ser un modelo a seguir. A mi abuelita Yolanda porque a pesar de no estar conmigo físicamente siempre ha sido una de mis principales motivaciones. A mis amigos, ya que tengo la fortuna de haberme encontrado con muy buenas personas que han impactado de manera positiva mi vida académica y personal.

Agradecimientos

Infinito agradecimiento a mi Alma Mater específicamente a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniera, por darme la oportunidad de expandir mi conocimiento en esta hermosa ciencia que es la química y verme crecer a lo largo de estos años, de igual manera a todos los docentes y personal que aportaron un granito de arena en mi formación académica y marcaron mi vida de alguna manera.

A mi asesor de tesis el Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones por las enseñanzas y experiencias compartidas, su invaluable apoyo en el presente trabajo y principalmente por haberme dado la oportunidad de conocer el área de investigación brindándome su confianza para llevar a cabo este proyecto.

A la Dra. Jenny Quintana de la Universidad Estatal de San Diego por brindarnos el desinteresado apoyo al prestarnos los equipos necesarios para la realización de este trabajo.

A la M.C. Rita María Zurita Frías y a la M.C. Lizeth Carolina Aguilar Dodier por darme la oportunidad de conocer físicamente lo que es el trabajo en laboratorio de un proyecto de investigación, compartir experiencias, responder mis dudas e inquietudes.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	iv
RESUMEN	1
Capítulo I. Introducción	3
Capítulo II. Antecedentes	8
II.1. Origen y propiedades	8
II.2 Composición y tamaño	9
II. 3. Fuentes de emisión	12
II.4. Dispersión de contaminantes en la atmósfera	14
II.5. Efectos en el medio ambiente	18
II.6. Efectos en la salud	19
II.7. Contaminación intramuros	21
II.8. Perfil global	23
II.9. Estudios realizados	25
II.10. Normatividad Nacional e Internacional	26
Capítulo III. Experimental	27
III.1. Sitio de estudio	27
III.2. Materiales	30
III.2.1. Carbono Negro (BC)	30
III.2.2. Meteorología	31
III.3. Métodos	32
III.4. Sitios de Muestreo	33
III.4.1. Sitio UABC	35
III.4.2. Sitio Colegio Inglés	36
III.4.3. Sitio Jardín de niños 15 de septiembre	37
III.4.4. Sitio Residencial Santa Fe	38
III.5 Control de Calidad de los datos	40
III.5.1 Tratamiento de Datos	41

III. 6 Pruebas estadísticas	41
Capítulo IV. Resultados y discusión	42
IV.1. Carbono Negro (BC)	42
IV.1.1. Prueba intercomparativa entre equipos	42
IV.1.2. Series de Tiempo en Interior	42
IV.1.3. Series de Tiempo en Exterior	43
IV.1.4. Sitio UABC	44
IV.1.4.1. Serie de Tiempo en Interior	44
IV.1.4.2. Serie de Tiempo en Exterior	47
IV.1.4.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior	47
IV.1.4.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior	49
IV.1.4.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior	51
IV.1.5. Kinder 15 de septiembre	53
IV.1.5.1. Serie de Tiempo en Interior	53
IV.1.5.2. Serie de Tiempo en Exterior	55
IV.1.5.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior	57
IV.1.5.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior	60
IV.1.5.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior	62
IV.1.6. Sitio Santa Fe	64
IV.1.6.1. Serie de Tiempo en Interior	64
IV.1.6.2. Serie de Tiempo en Exterior	68
IV.1.6.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior	71
IV.1.6.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior	73
IV.1.6.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior	75
IV.1.7. Sitio Colegio Inglés	76
IV.1.7.1. Serie de Tiempo en Interior	76
IV.1.7.2. Serie de Tiempo en Exterior	79
IV.1.7.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior	81
IV.1.7.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior	83
IV.1.7.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior	84

IV.1.8. Comparación con otros estudios	86
V. Conclusión y recomendaciones	89
VI. Referencias	93
ANEXO A. FIGURAS	105
ANEXO B. TABLAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Carbono negro recién emitido	8
2	Práctica tradicional de quema de biomasa en hogares	12
3	Composición química típica del material particulado (PM _{2.5}) proveniente de diésel	13
4	Efecto de inversión térmica	17
5	Deposición de BC sobre la capa de hielo en Groenlandia	19
6	Áreas del sistema respiratorio afectadas según el diámetro de partícula inhalado	20
7	Culturas étnicas de México practicando quema de biomasa para cocinar	23
8	Fuentes de emisión de BC a nivel global	23
9	Sitio de estudio; Tijuana Baja California, México	27
10	Vehículos de motor registrados en circulación de Baja California de 1980 a 2015	29
11	MicroAethalómetro	30
12	Mapa de ubicación geográfica de los sitios de muestreo	33
13	Primer sitio de muestreo: UABC Otay. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figura c y d).	36
14	Segundo sitio de muestreo: Colegio Inglés. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figuras c y d).	37
15	Tercer sitio de muestreo: Jardín de niños 15 de Septiembre. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figura c y d).	38
16	Cuarto sitio de muestreo: Residencial Santa Fe. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figura c y d).	39
17	Comparación de las concentraciones de BC por minuto entre los equipos de medición utilizados.	42
18	Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior para los cuatro sitios de muestreo (27 Marzo- 23 junio).	43
19	Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior para los cuatro sitios de muestreo (27 Marzo- 23 Junio).	44
20	Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para UABC.	45
21	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en UABC (27-31 de marzo)	48
22	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en UABC (27-31 de Marzo).	50
23	Gráfica de dispersión de las concentraciones de BC en Interior y Exterior en UABC.	51
24	Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para Kinder 15 de septiembre.	53
25	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las	59

	líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Kinder 15 de Septiembre (24-28 de abril).	
26	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Kinder 15 de Septiembre (24-28 de abril).	61
27	Gráfico de correlación en Interior y Exterior para Kinder 15 de Septiembre.	63
28	Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para Santa Fe.	64
29	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles) en Santa Fe (Junio 19- Junio 23).	71
30	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles) en Santa Fe (Junio 19- Junio 23).	74
31	Gráfico de correlación en Interior y Exterior para Santa Fe.	76
32	Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para Colegio Inglés.	76
33	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Colegio Inglés (3-7 de abril).	81
34	Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Colegio Inglés (3-7 de abril).	84
35	Gráfico de correlación en Interior y Exterior para Colegio Inglés.	85

ANEXO A.

1	Rosa de Vientos para UABC (27-31 de Marzo).	105
2	Rosa de Vientos para Kinder 15 de Septiembre (24-28 de Abril).	105
3	Rosa de Vientos para Santa Fe (19-23 de Junio).	106
4	Rosa de Vientos para Colegio Inglés (3- 7 de Abril).	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
I.	Emisiones de BC a nivel global en el año 2000 en Gg (1 Gg = 1000 toneladas)	24
II.	Niveles de BC en interior y exterior en diferentes países.	25
III.	Límites máximos permisibles establecidos por la República Mexicana y la OMS, con respecto a PM _{2.5} (NOM-025 SSA1-2014; OMS, 2006).	26
IV.	Descripción del equipo para mediciones de BC.	31
V.	Características y periodos de los sitios de muestreo.	34
VI.	Resumen de concentraciones promedio (mediana) de BC en interior para todos los sitios de muestreo.	43
VII.	Resumen de concentraciones promedio (mediana) de BC en exterior para todos los sitios de muestreo.	44
	ANEXO B.	
I.	Estadísticas descriptivas de BC promedio por hora del día en interior durante la semana de muestreo en todos los sitios.	107
II.	Estadísticas descriptivas de BC promedio por hora del día en exterior durante la semana de muestreo en todos los sitios.	108
III.	Estadísticas descriptivas de BC en interior y exterior para todos los sitios de muestreo.	109
IV.	Coefficientes de determinación (r^2) y correlación de Spearman (r_s) entre las concentraciones de BC en interior y exterior	109

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ATN	Atenuación
BC	Carbono Negro (Black Carbon, por sus siglas en inglés)
BrC	Carbono Café (Brown Carbon, por sus siglas en inglés)
CAL-MEX	California-México
CARB	Junta de Recursos del Aire de California (California Air Resources Board, por sus siglas en inglés)
CENICA	Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental
CIT	Centro de Información Tecnológica, Chile
EC	Carbon Elemental (Elemental Carbon, por sus siglas en inglés)
EPA	Environmental Protection Agency
EPOC	Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas
GHG	Gaseos de efecto invernadero (Green House Gases, por sus siglas en inglés)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía
NOx	Óxidos de Nitrógeno (Nitrogen Oxides por sus siglas en inglés)
OC	Carbono Orgánico (Organic Carbon, por sus siglas en inglés)
OMS	Organización Mundial de la Salud (World Health Organization; WHO, por sus siglas en inglés)
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PAH's	Hidrocarburo Aromático Policíclico (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, por sus siglas en inglés)
PM	Material Particulado (Particulate Matter, por sus siglas en inglés).
UABC	Universidad Autónoma de Baja California
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Resumen

La calidad del aire en la cuenca atmosférica de la ciudad de Tijuana, Baja California, al estar ubicada dentro de la franja fronteriza entre México y los Estados Unidos ha sido objeto de estudio en los últimos años por parte de instituciones de educación superior y autoridades de ambos países, lo cual ha arrojado información importante sobre el comportamiento espacio-temporal de muchos contaminantes ($PM_{2.5}$, UFP, BC, Metales Pesados entre otros), pero no hay registros de estudios que describan la calidad del aire intramuros, lo cual es de suma importancia debido a que la mayor parte del tiempo la población realiza sus actividades cotidianas dentro de edificaciones (oficinas, salones de clases, hogares, etc.).

El presente estudio es el primero de su tipo que se realiza en la ciudad de Tijuana, en el cual se midieron los niveles de Carbono Negro (BC) de manera simultánea en el interior y exterior de las instalaciones de tres escuelas de diferente nivel educativo y en una casa-habitación ubicadas en varios puntos a lo largo de la cuenca atmosférica de Tijuana. Los resultados de la calidad del aire en exterior mostraron un comportamiento similar a lo reportado en otros estudios, en el cual se observaron mayores niveles de BC en los sitios ubicados en la zona este de Tijuana comparado con los sitios ubicados en la zona oeste cerca de la costa del Océano Pacífico, coincidiendo con la dirección predominante del viento (NO-SE) característica de la región.

El sitio con la mayor concentración de BC en exterior, promedio (mediana) fue el kínder 15 de septiembre con $3.38 (1.39) \mu\text{g}/\text{m}^3$ seguido de UABC con $2.43 (0.90) \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que Residencial Santa Fe y el Colegio Inglés presentaron concentraciones de $1.89 (1.15)$ y $1.13 (0.91) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En cuanto a los niveles de BC en interior de los sitios, contrario a los resultados en exterior, el sitio con los mayores niveles promedio (mediana) fue UABC con $4.57 (2.91) \mu\text{g}/\text{m}^3$, dejando en evidencia la mala ventilación de la instalación muestreada, además de que los análisis estadísticos demostraron que, al compararse los niveles de BC en interior y exterior, se presenta un mayor impacto en interior debido a las actividades propias que se

realizan dentro de este espacio, el cual corresponde a la cafetería de la UABC, la cual es muy concurrida por estudiantes, maestros, trabajadores y visitantes los cuales están expuestos a este contaminante poniendo en riesgo su salud. El segundo sitio con niveles altos fue el kínder 15 de septiembre con 3.08 (1.87) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de Residencial Santa Fe y el Colegio Inglés con 1.97 (1.23) y 1.01 (0.79) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y a diferencia de UABC, la calidad del aire en el interior de estos sitios fue claramente influenciada por fuentes de emisión localizadas fuera de las instalaciones. De igual manera, al comparar los niveles en interior y exterior del resto de los sitios, los análisis estadísticos no mostraron diferencias en cuanto a los impactos en ambos escenarios (con excepción de UABC).

Es imperativo para mejorar la calidad del aire en interior, en el caso de UABC, que se implementen mejores sistemas de extracción y control de los contaminantes generados por las actividades que se realizan, además de mejorar su sistema de ventilación. En cuanto al resto de los sitios, los cuales claramente se ven afectados por fuentes de emisión externas, es necesario realizar acciones tales como dar mantenimiento al parque vehicular tanto público como privado, así como evitar realizar actividades de quema clandestina, lo cual mejoraría la calidad del aire que respiramos, tanto en interior como en exterior.

Capítulo I. Introducción

En las últimas décadas se ha observado un gran aumento demográfico, siendo China e India los países más poblados a nivel mundial. Una de las principales características del incremento en la natalidad es la explotación de los recursos naturales, generación de residuos sólidos y emisiones atmosféricas que traen como consecuencia una alteración en el equilibrio de los ciclos biogeoquímicos y el deterioro de la calidad del suelo, agua y aire.

Aunque el cambio climático es un proceso normal en nuestro planeta, este se ve acelerado debido a la rápida acumulación de gases de efecto invernadero y material particulado en la atmósfera. En la antigüedad la mayoría de los climatólogos eran escépticos acerca de la naturaleza antropogénica del cambio climático, pero hoy en día es indudable el aporte del hombre a este fenómeno (Greenpeace, 2010). Debido al comportamiento de los contaminantes, al ser emitidos quedan expuestos a los factores meteorológicos (radiación solar, dirección del viento, velocidad del viento, temperatura) y topográficos (montañas, valles y edificios en las ciudades) que condicionan el comportamiento fisicoquímico haciendo compleja la predicción de la concentración, transformación, reacciones fotoquímicas, sedimentación y dispersión de estos en la atmósfera. Debido a estas características las corrientes de aire se comparten entre los países y se vuelve un problema internacional.

Los efectos del cambio climático se pueden apreciar en todo el mundo, sin embargo, la distribución de la intensidad de sus impactos es desigual. En América Latina y el Caribe están aumentando las condiciones climáticas extremas y cada vez son más frecuentes fenómenos como sequías, fuertes lluvias, olas de calor, grandes incendios, etc. En México, de acuerdo con científicos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), los únicos estados de la República Mexicana que han mantenido estables sus temperaturas son Nayarit, Colima, Michoacán y Jalisco; mientras que el resto del territorio mexicano, particularmente el área del lado del Océano Atlántico y el norte del país, se ha calentado más rápidamente (La Jornada, 2009).

Baja California cuenta con parques industriales conformados por empresas extranjeras establecidas en su mayoría en Tijuana, ciudad que ocupa uno de los primeros lugares a nivel nacional con mayor cantidad de habitantes y por consiguiente su parque vehicular es bastante elevado, haciendo de esta ciudad un foco rojo para la acumulación de contaminantes atmosféricos. Si bien las emisiones industriales son de menor impacto debido a que se encuentran reguladas por las dependencias ambientales, las fuentes móviles y quema de biomasa aportan grandes concentraciones de Carbono Negro (BC, por sus siglas en inglés) al ambiente, formando aerosoles que afectan la visibilidad a distancia y repercuten de manera significativa al calentamiento global.

La mayor parte de la ciudad de Tijuana se encuentra urbanizada haciendo que el tráfico se vuelva un problema típico día con día. Por otro lado, al sureste de la ciudad es común encontrar fraccionamientos relativamente nuevos que apenas comienzan a desarrollarse y a las afueras de la ciudad aún hay cerros y lomas donde crece vegetación quedando como áreas muy susceptibles a incendios debido a la flora (siendo en su mayoría pastizales) y al clima mediterráneo de la ciudad.

En los últimos años se ha estudiado la más antigua forma de contaminación del aire, el hollín (o humo de combustiones incompletas) que contribuye significativamente con el cambio climático. Estudios han demostrado que BC, componente del hollín, puede ser el segundo o tercer contaminante más importante, después del CO₂ a nivel global, en los efectos del cambio climático (EPA, 2016) y aún más importante en ciertas regiones. A diferencia del CO₂ la reducción de emisiones de hollín causa resultados inmediatos debido a su corto tiempo de vida en la atmósfera (Bachmann, 2009).

Las regulaciones ambientales no incluyen una norma oficial mexicana en la que se establezcan límites máximos permisibles para BC, sin embargo, se le considera como una fracción dentro del material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}). Las directrices sobre calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecen que la concentración media

anual de $PM_{2.5}$ debe ser inferior a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas. El Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) realizó un estudio en la Ciudad de México donde se estimó que el 11% de peso en masa de $PM_{2.5}$ corresponde a BC (Salcedo et al., 2006).

Típicamente una corriente de aire que lleva material carbonoso —carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés) y carbono orgánico (OC, por sus siglas en inglés) — aporta la mayor cantidad de partículas a la atmósfera. El OC contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's, por sus siglas en inglés) y otros componentes con posibles efectos mutagénicos y carcinogénicos que pueden ser emitidos de fuentes primarias o bien generadas a partir de las reacciones de estas especies con otras en la atmósfera. En cambio, EC es emitido mediante procesos de combustión y sus transformaciones son limitadas; sin embargo, este es un buen indicador de contaminantes primarios de origen antropogénico (Wang et al., 2005).

Las emisiones que acarrearán partículas sólidas tienen impactos negativos en la salud, con efectos por unidad de masa que aumentan mientras el diámetro de partícula disminuye, estos efectos pueden ser agudos o crónicos y dependerán en su mayoría del grado de exposición. Las partículas con un mayor tamaño tenderán a quedar depositadas en la boca y garganta, mientras que las de menor tamaño (aquellas que entran en la categoría de material particulado ultrafino) serán acarreadas por los alveolos hasta el torrente sanguíneo (Morales, 2006).

Otro riesgo importante dentro de los efectos de la contaminación atmosférica es la contaminación intramuros que es influenciada por las concentraciones de contaminantes en exterior, fuentes que emiten BC en interiores, características y estructura de la construcción y los hábitos de los residentes (OMS, 2008). La contaminación en interiores podría ser un importante riesgo en la salud pública ya que en la actualidad la gente pasa hasta el 90% de su tiempo en interiores ya sea en el hogar, escuelas, oficinas, establecimientos públicos, etc. (Žuškin et al., 2009). Estudios han comprobado que en ocasiones se suelen encontrar concentraciones más

elevadas en interiores que en exteriores, dependiendo de las fuentes y condiciones de ventilación del lugar (Montoya et al., 2014).

Se han reportado algunas concentraciones de BC en la literatura para diferentes escenarios como lo es el interior del Museo Oscar Niemeyer localizado en la ciudad de Curitiba- Brasil, mostrando una concentración de $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de BC que disminuyó a $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un día donde el museo permanecía cerrado (Godoi et al., 2013). Otro estudio comparativo realizado en un hospital de Kavala- Grecia, arrojó valores promedio de $1.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el interior de las instalaciones y $1.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el exterior (Loupa et al., 2016). Mientras que, en una zona rural de China, donde las mujeres cocinan mediante la quema de biomasa la concentración promedio fue de $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las distintas estaciones del año (Baumgartner et al., 2013).

Debido a las repercusiones tanto en la salud de la población y las condiciones medioambientales que se viven en la actualidad surge la hipótesis de que las concentraciones de BC en interior de instalaciones son mayores o comparables que las del exterior y que las condiciones de ventilación y fuentes emisoras en interior de éste contaminante influyen directamente en los niveles de BC analizados, mientras que en exterior son afectadas por la dirección del viento y diversas fuentes de emisión ubicadas en la cuenca atmosférica de la ciudad de Tijuana, Baja California.

El objetivo general de esta investigación es conocer los niveles de exposición y las diferencias de las concentraciones de BC en instalaciones de diferentes niveles educativos ubicados en diversos puntos de la cuenca atmosférica de la ciudad de Tijuana, realizando mediciones continuas y de manera simultánea en el interior y exterior.

En cuanto a los objetivos específicos se plantean los siguientes:

- Analizar las concentraciones obtenidas de BC en interior y exterior de los sitios de muestreo.
- Identificar si las áreas de muestreo presentan similitudes o diferencias en los impactos originados por las fuentes de emisión en interior y exterior.

- Identificar las fuentes generadoras de BC en los diferentes puntos de muestreo.
- Correlacionar los niveles de BC en interior y exterior para conocer si existen similitudes o diferencias en cuanto a cómo son impactados por las fuentes emisoras.

Como metas de este proyecto se plantea la divulgación de los resultados obtenidos mediante pláticas informativas en las escuelas en donde se realizaron las mediciones, presentación en congresos de carácter nacional o internacional, publicación en revistas científicas, fomentar una cultura de prevención de emisiones enfocada a sectores con niveles educativos preescolar y básico sobre la problemática ambiental que se vive en la actualidad así como estrategias y hábitos de mejora que se pueden llevar a cabo a nivel personal, entregar un reporte técnico a la Secretaría de Protección al Ambiente con el fin de enriquecer la base de datos de esta dependencia y por último la redacción de una tesis para la obtención del título de licenciatura en Químico Industrial.

El presente estudio tiene como alcance la obtención de resultados adquiridos durante un periodo de cuatro semanas de muestreo en la cuenca atmosférica de Tijuana distribuidas de marzo a junio del 2017 para dar a conocer la calidad del aire en instalaciones escolar- habitacional, así como los posibles efectos en la salud de las personas que se encuentren expuestas, con el fin de abogar por una atmósfera intra y extradomiciliaria más limpia a través de la difusión del conocimiento.

Capítulo II. Antecedentes

II.1. Origen y propiedades

El hollín es una sustancia carbonosa generalmente definida por la fuente de emisión de la que proviene; combustión incompleta, en lugar de sus propiedades físicas o químicas. El carbono negro y orgánico (al igual que SO_2) son componentes del hollín que no presentan una definición química precisa. El término BC en general incluye la forma sólida de carbono emitido (Figura 1), mientras que OC es una forma menos reflexiva de carbono que tiende a dispersar la luz solar y por tanto contribuye al enfriamiento de la atmósfera en la mayoría de las condiciones. Tanto BC como OC son parte de la categoría de partículas en suspensión conocidos como aerosoles, los cuales presentan propiedades como absorción, dispersión de la luz e influyen significativamente el cambio climático.



Figura 1. Carbono negro recién emitido (Brown, 2013).

Existe un consenso general en el ámbito científico que afirma que el BC contribuye con el cambio climático tanto a nivel regional como mundial, este es generado a través de la quema de carbono en forma de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa, formando parte de la mezcla de material particulado liberado durante la combustión incompleta de estos combustibles (Bice et al., 2009). El carbono negro es un contaminante de efecto invernadero de vida corta, a diferencia de del CO_2 que permanece en la atmósfera por miles de años, BC por ser una partícula

perdura por tan solo días o semanas. Asimismo, promueve el derretimiento de la nieve y el hielo, y una disminución de las precipitaciones (Cruz et al., 2014).

El forzamiento radiativo es la medida de la influencia de un contaminante en particular sobre el cambio neto en el balance energético de la Tierra. Las partículas que no absorben radiación solar tienen un forzamiento radiativo negativo (enfriamiento) mientras que partículas que si presentan absorción presentarían forzamiento radiativo positivo (calentamiento) (Bergstrom et al., 2000).

Contaminantes como los gases de efecto invernadero y algunos aerosoles contribuyen con un forzamiento radiativo positivo (el cual conduce a un calentamiento atmosférico), en el caso de los aerosoles el forzamiento radiativo es negativo (responsable de un enfriamiento atmosférico). Algunos contaminantes afectan el forzamiento radiativo de múltiples maneras que se compensan parcialmente entre sí. En tales casos, es útil considerar los efectos de forzamiento radiativo neto de los contaminantes (EPA, 2016).

Entre los componentes del material particulado, BC es el más eficaz en cuanto a la absorción de luz solar mostrando un efecto de forzamiento radiativo positivo similar a los gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) como el CO₂ y el metano (CH₄) (Zhang et al., 2015; Penner et al., 1999), mientras que componentes como sulfatos, nitratos y carbono orgánico (OC) generalmente reflejan la luz. Se dice que, por unidad de masa en la atmósfera, BC puede absorber un millón de veces más energía que el CO₂ (Bond et al., 2005), convirtiéndolo en un contaminante climático significativo en las regiones afectadas por estas emisiones.

II.2 Composición y tamaño

La composición química del BC así como el tamaño dependerán del proceso o fuente de emisión. Algunas fuentes pueden generar EC (grafito) o OC (Johnson et al., 2006). Según la proporción de carbono elemental u orgánico la partícula carbonosa será o no soluble en agua o en algún solvente orgánico. Esto engloba el carácter

hidrofílico o hidrofóbico y resulta importante porque de esto depende la permanencia y eliminación de la partícula en la atmósfera; si resulta de carácter hidrofílico se mantendrá suspendido menor tiempo que si es hidrofóbico (Johnson et al., 2005).

Una combustión eficiente es aquella en la que se encuentra en abundancia el oxígeno. En la composición promedio de las partículas de combustión se muestra dominante al carbono con 85-95 %; oxígeno 3-8 %; e hidrógeno 1-3 %. El proceso de combustión puede variar la cantidad de oxígeno contenido en el carbono negro donde a mayor oxígeno, se origina una superficie más irregular, incrementando la reactividad de la partícula (Andreae et al., 2006).

Las partículas de BC varían de tamaño, generalmente son mucho más pequeñas que 2.5 μm , pero suelen incluirse dentro de la categoría de material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$), sin excluir algunas partículas que llegan a ser ultrafinas o submicrónicas ($< 0.1 \mu\text{m}$). A pesar de esta distribución de tamaño, se pueden formar agregados de partículas de mayor tamaño en forma de esférulas hidrófobas con geometría irregular que proporcionan sitios activos para deposición de especies químicas (Li et al., 2015). La disminución del tamaño de partícula aumenta la capacidad de permanecer en la atmósfera, promoviendo el transporte a larga distancia. Inmediatamente después de un incendio el BC emitido con un tamaño mayor a 1 μm puede ser transportado en el aire o sedimentar en la superficie más cercana. Los eventos de precipitación pueden lavar las partículas que permanecen en la superficie del suelo dirigiéndolas a ríos y océanos, a menos que la deposición ocurra más allá de 1 km de los cuerpos de agua significativos (Traina et al., 2010).

El tamaño de las partículas de BC generalmente se extiende a unos cuantos micrómetros para los aerosoles atmosféricos y unos cuantos más para los fragmentos de carbón vegetal precedentes de la quema de biomasa. A pesar de sus fuentes comunes y composición química deficiente en hidrógeno muestran importantes variaciones físicas y químicas. La mayor parte de la composición de BC está dominada por anillos aromáticos condensados y unos pocos grupos funcionales que lo hacen resistente (Daia et al., 2005).

Cabe mencionar que la fuente de emisión está directamente relacionada con la estructura que va a presentar la partícula, estas variantes pueden ser desde el tipo de vegetación (si proviene de la quema de biomasa), duración, temperatura, combustión en ausencia de oxígeno y el envejecimiento en la atmósfera (Goldber, 1985).

La mezcla de partículas de hollín, tienen diferentes proporciones de OC y BC e incluso incluyen materia inorgánica como metales y sulfatos, por ejemplo, la proporción promedio de OC:BC entre las fuentes de escape de diésel, quema de biocombustible y quema de biomasa es de aproximadamente 1:1, 4:1 y 9:1 respectivamente (Lamarque et al., 2010). Como es de esperarse el hollín de una coloración negra intensa indica baja presencia de OC con respecto a la de BC. Con forme la fracción de OC domina, el color de la mezcla de hollín cambia a un color marrón amarillento. El hollín café es dominado por carbono en forma orgánica también conocido como carbono café (BrC o Brown Carbon). El BrC es otro producto de combustión incompleta, absorbe parte del espectro visible, pero es menos eficaz en la captura de energía solar que BC (Alexander et al., 2008; Novakov et al., 1995).

Cuando la fuente de emisión ya no produce BC ni BrC, la mezcla cambia a un color amarillo. El carbono amarillo es otra forma de OC y también es capaz de absorber la radiación en el rango visible, pero en menor medida que el BrC (Bond, 2001; Andreae et al., 2006).

Gracias a los avances tecnológicos se han desarrollado instrumentos de medición para este contaminante conocidos como aethalómetros donde, a partir del cambio de la transmisión de luz a través de un filtro es posible conocer la concentración en masa de BC (Hansen, 2005). El principio de funcionamiento de este equipo se basa en la absorción de luz de las partículas y utiliza dos longitudes de onda, una a 880 nm la cual se ha demostrado que corresponde a la absorción de las partículas emitidas por fuentes móviles como lo son las emisiones de diésel (EC) y la segunda longitud de onda a 370 nm, la cual presenta una alta correlación con la

quema de biomasa (OC), debido a los componentes orgánicos de las partículas del humo de madera (Wang et al., 2011).

II. 3. Fuentes de emisión

BC se emite directamente a la atmósfera en forma de partículas finas ($PM_{2.5}$) y puede ser causado por fuentes naturales o antropogénicas. Entre las principales fuentes de emisión antropogénicas se encuentra la quema a cielo abierto, residencial (quema de carbón, estiércol, residuos de agricultura y madera para cocinar y/o calefacción), quema incompleta de combustibles fósiles y actividades industriales (Zhang et al., 2015; Bachmann, 2009), algunas de las antes mencionadas también se pueden presentar de manera natural en el medio ambiente.

Algunos países de Asia como China e India, al igual que regiones de África aún dependen de combustibles tradicionales (biomasa) para cubrir las necesidades básicas en el hogar como cocinar y fogatas para calentar los hogares, estas prácticas alarmantes están directamente relacionadas con niveles de pobreza (Figura 2). A pesar de que se espera que el porcentaje de personas dependientes de combustibles tradicionales disminuya en las siguientes décadas, el número agregado de personas dependientes de este tipo de combustibles aumentará a 100 millones de personas para el 2030 según estimaciones demográficas (International Energy Agency, 2010).

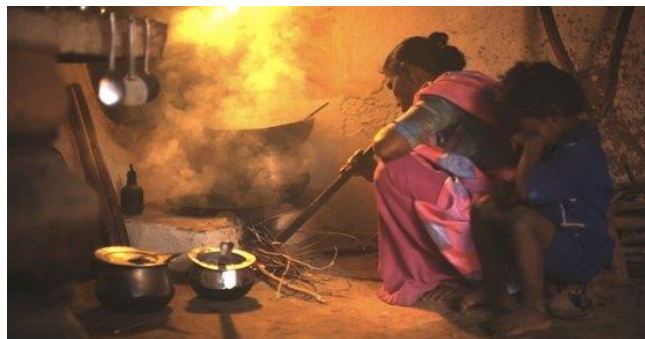


Figura 2. Práctica tradicional de quema de biomasa en hogares (cleancookstoves.org).

El diésel es altamente utilizado como combustible para el transporte pesado, maquinaria de construcción y camiones, por consiguiente se emite material

particulado de la quema de este combustible en donde BC forma parte significativa en su composición (Kholod et al., 2015). Las emisiones de diésel son la fuente de BC más representativa en algunas regiones del mundo como Estados Unidos, donde en promedio le corresponde el 77% de las emisiones totales, aunque este valor varía dependiendo del modo de operación y la antigüedad del vehículo ya que en la actualidad se diseñan motores más eficaces. La composición química de la emisión proveniente del escape de los motores a base de diésel (humo negro u hollín) entra en la categoría de $PM_{2.5}$ y es identificada como se muestra en la Figura 3, donde el carbono negro representa el 75% del total de la emisión. Los vehículos ligeros que utilizan gasolina tienen una fracción mucho más pequeña de PM correspondiente a BC, aproximadamente 20-25% (EPA, 2002).

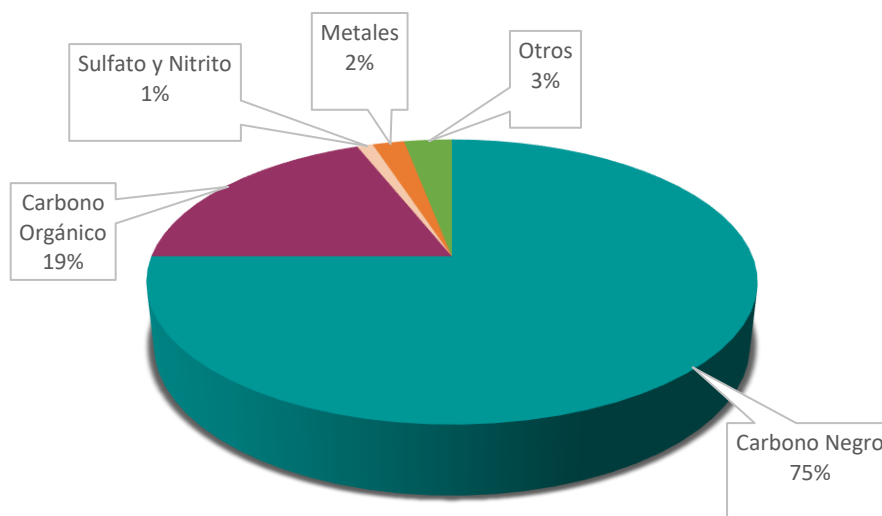


Figura 3. Composición química típica del material particulado ($PM_{2.5}$) proveniente de diésel (EPA, 2002).

En general, el material particulado generado de la combustión del diésel consiste en aproximadamente 70-80% de carbono negro y alrededor de 20% de carbono orgánico. La relación de carbono negro/material particulado (BC/PM) varía según el modo de operación, esto es, arranque frío, alta velocidad, cargamento pesado etc. A pesar de estas diferencias según el tipo de combustible (diésel o gasolina), las

partículas emitidas de ambos siguen siendo muy eficaces en cuando a la absorción de luz (Japar et al., 1984).

II.4. Dispersión de contaminantes en la atmósfera

Todos los contaminantes del aire, emitidos por fuentes puntuales o móviles, realizan un ciclo que inicia con la emisión, le sigue el transporte y difusión en la atmósfera, hasta ser depositado sobre la vegetación, flora, superficies del suelo y agua (Campos, 2000). Debido a las características de los propios contaminantes y la atmósfera como medio difusor, estos, además de lo mencionado anteriormente, pueden experimentar reacciones químicas y transformaciones físicas (Grijalbo, 2016).

A pesar de que la atmósfera tiene la capacidad sustancial de autodepurarse por mecanismos como la sedimentación por gravedad, floculación, absorción, lavado por lluvia y adsorción de contaminantes estos suelen encontrarse en mayor abundancia de lo que estos mecanismos pueden funcionar (Manahan, 2007). Algunos de los factores que influyen en el transporte y dispersión de contaminantes son:

1. Naturaleza fisicoquímica de los contaminantes: Propiedades peculiares del contaminante como forma, volumen y densidad de la partícula, peso molecular, polaridad y reactividad química (cuando se trate de contaminantes gaseosos) influyen en el transporte de estos (CIT, 1998). Las partículas más pequeñas tenderán a recorrer longitudes mayores antes de depositarse que las partículas de mayor tamaño (Traina et al., 2010).

Las partículas de hollín son de peculiar interés debido al largo alcance al momento de transportarse y gran área superficial que puede facilitar reacciones heterogéneas. Las propiedades del hollín pueden verse drásticamente modificadas mediante la interacción con especies gaseosas como los NO_x, O₃, OH, y la mezcla con otros aerosoles como los sulfatos inorgánicos y nitratos (Johnson et al., 2006). Las partículas de hollín son generalmente muy hidrofóbicas, pero este carácter puede variar debido a transformaciones físicas y químicas que ocurren durante el envejecimiento atmosférico, como lo

es la oxidación por especies gaseosas que crea grupos polares en la superficie de la partícula de tal manera que ahora tendrá un carácter hidrofílico y puede retener agua, en gran medida de este carácter dependerá el tiempo de vida en la atmósfera y la susceptibilidad de las partículas al lavado (Decesari et al., 2002).

2. **Movimientos del viento:** por definición, al movimiento horizontal del aire se le conoce como viento; mientras mayor sea la velocidad del viento, menor será la concentración de contaminantes ya que el viento los diluye y dispersa rápidamente en el área circundante (Contreras et al., 2011). Por otra parte, si la dirección de viento es constante, un área determinada estará continuamente expuesta a niveles relativamente altos comparados con el viento con un comportamiento cambiante, en este caso los contaminantes estarán dispersos sobre una mayor área dando como consecuencia concentraciones menores (Venegas et al., 2012).
3. **Deposición húmeda:** La niebla, lluvia y nieve ejercen un efecto de limpieza en la atmósfera absorbiendo y arrastrando contaminantes hacia la tierra (Castells, 2005). Consiste en el efecto combinado del arrastre de contaminantes hacia la superficie producido por las gotas de lluvia o la nieve y de la fijación de gases o partículas en gotas o cristales de hielo en las nubes productoras de precipitación (Martínez, 2004).
4. **Deposición seca:** Se produce a través de la transferencia directa por acción de la gravedad del gas o partícula a la superficie de la tierra. La deposición seca puede producirse por tres mecanismos distintos: difusión, impactación y sedimentación. Además, dependerá de las características del contaminante (CIT, 1998).
5. **Estabilidad y turbulencia atmosférica:** Este factor implica el movimiento vertical del viento permitiendo que las masas de aire se desplacen debido a los gradientes de temperatura y de presión de los gases presentes en la atmósfera (Hidy, 1972). Un contaminante emitido a la atmósfera es transportado en la dirección del viento predominante y dispersado por movimientos de aire

perpendiculares al viento, así como por turbulencia. Para entender este proceso se debe iniciar con los gradientes de temperatura, el aire caliente es menos denso y tiende a ascender, un ascenso de aire caliente produce una expansión del gas (porque la presión disminuye con la altura) (Orozco et al., 2003). La existencia o no de corrientes verticales (atmósfera estable o inestable) se deduce de la comparación entre el gradiente adiabático (variación de temperatura de una masa ascendente de aire) y el gradiente real de temperatura (aire circundante) (OPS, 2005).

- **Atmosfera estable:** El aire ascendente está a menor temperatura que el circundante por lo tanto vuelve a bajar, el volumen de aire regresa a su posición inicial, oponiéndose a los movimientos verticales. Esto genera regularmente mayor concentración de los contaminantes ya que no hay una buena dispersión.
 - **Atmósfera inestable:** El aire ascendente está a mayor temperatura que el circundante por lo tanto sigue subiendo, tiende a moverse continuamente hacia arriba o hacia abajo mejorando las condiciones de dispersión de contaminantes en la superficie terrestre.
 - **Atmósfera neutra:** No se propicia ni inhibe el movimiento del aire después del gradiente de calentamiento o enfriamiento adiabático
6. **Topografía:** La configuración de la superficie y rasgos de relieve de la superficie de la tierra pueden afectar frecuentemente a los vientos y las corrientes de aire, como sucede en las grandes ciudades rodeadas de topografía compleja como valles y montañas experimentan altas concentraciones de contaminantes (Manahan, 2007).
 7. **Radiación solar:** Este factor está fuertemente relacionado con el forzamiento radiativo ejercido en la tierra, de igual manera controla el calentamiento del aire, tiene efecto en el tipo y grado de reacción química en la atmosfera, su capacidad convectiva y estabilidad (EPA, 2012).
 8. **Inversión térmica:** En la tropósfera bajo condiciones normales la temperatura disminuye con la altitud, dando como resultado que las masas de aire durante las horas de radiación solar ubicadas en la parte baja de la tropósfera se

desplacen verticalmente a zonas de mayor altura bajo condiciones de presión y temperatura menores, sin embargo con el efecto de la inversión térmica sucede lo contrario, como se muestra en la figura 4, durante las noches despejadas la tropósfera baja se enfría y da como resultado que a nivel del suelo las masas de aire se enfríen y sean más densas que las que se ubican en la capa inmediatamente superior, impidiendo su ascenso vertical dado a que se ve afectado este movimiento por la disminución de la convección térmica (Campos, 2000). Este fenómeno meteorológico origina que los contaminantes ubicados en estas masas de aire no se dispersen dando como consecuencia una mayor concentración a nivel local o de la tropósfera baja (Contreras et al., 2011). Generalmente, la inversión térmica se termina (rompe) cuando se calientan las masas de aire que están en contacto con el suelo, restableciéndose la circulación normal de éstas en la tropósfera. Esto puede ser cuestión de horas, pero en condiciones meteorológicas desfavorables la inversión puede persistir durante días.

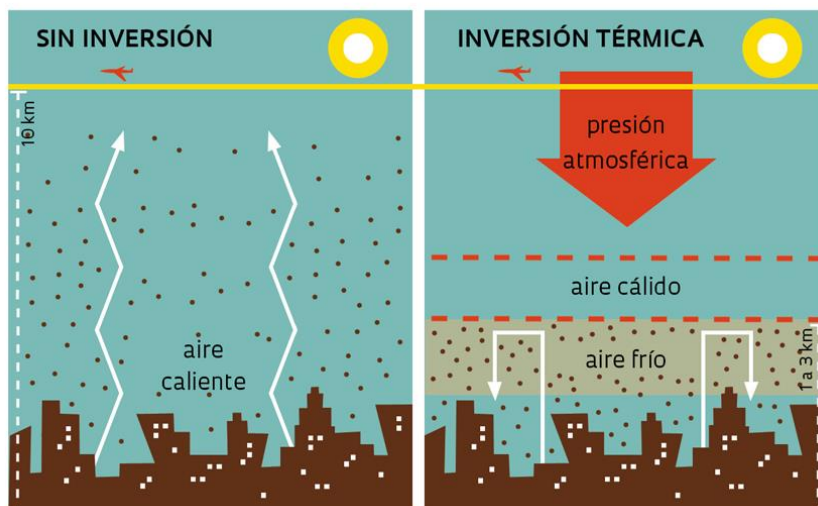


Figura 4. Efecto de inversión térmica (revistapesquisa.fapesp.br).

Mecanismos como el lavado de la atmósfera por deposición húmeda y la deposición seca eliminan contaminantes presentes, los depositan sobre el suelo, mar, ríos, lagos, estructuras o seres vivos, en particular las plantas (Puigcerver et al., 2008). El

problema de la contaminación atmosférica es que solo es una fracción en el gran e interminable ciclo que es la contaminación del medio ambiente.

II.5. Efectos en el medio ambiente

BC afecta principalmente al medio ambiente de tres maneras; calentamiento directo, el efecto nieve-albedo e interacciones con las nubes. El calentamiento directo de la atmósfera hace referencia a la manera en que las partículas de BC absorben la energía solar siendo posteriormente liberada en forma de calor. Los aerosoles tienen un papel importante tanto en la visibilidad como en la temperatura de la atmósfera debido a su propiedad de dispersión y absorción de la radiación solar (Marley et al., 2009).

En cuanto al efecto nieve-albedo se han encontrado recientes evidencias que demuestran que BC tiene una influencia desproporcional al afectar una región con emisiones y concentraciones generalmente bajas, como es el Ártico. Como se muestra en la figura 5, el BC se deposita sobre la nieve y el hielo de los glaciares que cubren la región oscureciendo estas superficies dando como resultado la reducción del albedo, facilitando la absorción de radiación solar aumentando la temperatura y acelerando la fusión de nieve y hielo. Estos efectos hacen que el Ártico sea una región excepcionalmente vulnerable en presencia de BC (Kholod et al., 2015). Este calentamiento ha sido acompañado por una fusión temprana del hielo en primavera, un alargamiento de la estación de fusión y un aumento de la descarga de la capa de hielo a Groenlandia. Aunque este comportamiento se puede justificar con ciertos fenómenos naturales, la fusión se ha atribuido principalmente al cambio climático inducido por el ser humano (Min et al., 2008; Holland et al., 2008).

El tercer efecto, pero no menos importante es la interacción del BC con las nubes, donde las partículas se pueden llegar a encapsular o permanecer entre las gotas haciendo que se absorba radiación solar y reduciendo la cantidad luz reflejada. Las nubes que se calientan mediante la energía absorbida tienden a tener un menor

tiempo de vida en la atmósfera y es menos probable que precipiten a comparación de las nubes limpias.

El fuerte poder de absorción, el corto tiempo de vida en la atmósfera y otras características de BC hacen que los impactos en el medio ambiente sean diferentes a los de los gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono (CO). Además, BC está involucrado en complejos procesos químicos y físicos que se llevan a cabo en la atmósfera, lo que hace aún más difícil conocer el efecto neto que tiene este contaminante. Un proceso de combustión también produce contaminantes como SO₂, NO_x, y CO que tienen un efecto de enfriamiento. Los impactos de BC se ven mezclados con estas sustancias co-emitidas, incluso a veces compensado. Esto se debe tomar en cuenta al evaluar los efectos de una fuente de emisión (EPA, 2010).



Figura 5. Deposición de BC sobre la capa de hielo en Groenlandia (www.amap.no).

II.6. Efectos en la salud

Debido a que el carbono negro forma parte del PM_{2.5}, el cual es asociado con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, por ende, el carbono negro puede penetrar en el organismo mediante la respiración, el tracto digestivo al ingerir alimentos o bebidas en contacto con el contaminante e incluso piel y mucosa. Un estudio comparativo de toxicidad concluyó que 1 µg/m³ de BC es ocho veces más dañino que de 1 µg/m³ de material particulado (Janssen et al., 2011).

Dentro de las partículas suspendidas se denomina “respirables” a las de un diámetro igual o menor a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias. Como se muestra en la Figura 6, entre más pequeñas son las partículas mayor será su capacidad de penetración en el tracto respiratorio. Las partículas finas cuyo diámetro aerodinámico es $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ alcanzan fácilmente los bronquiolos terminales y los alvéolos, desde donde pueden ser fagocitadas por los macrófagos alveolares y atravesar la barrera alvéolo-capilar para ser transportadas hacia otros órganos por la circulación sanguínea (Morales, 2006).

Existe un estrecho lazo entre las emisiones de material particulado e impactos negativos en el desarrollo infantil, afectando la salud respiratoria y cardiovascular (Schwartz, 1996; Schwartz et al., 2005; Schwartz et al., 2008; Pope III et al., 2002). La exposición temprana a contaminantes del aire relacionados con el tráfico y habitar en ubicaciones próximas a fuentes puntuales de emisión que contribuyan al material particulado aerotransportado se han asociado con un elevado riesgo de asma en niños (Rosa et al., 2014), incluso en junio del 2012, la OMS clasificó las emisiones provenientes de los escapes de motores de diésel como carcinógenas.

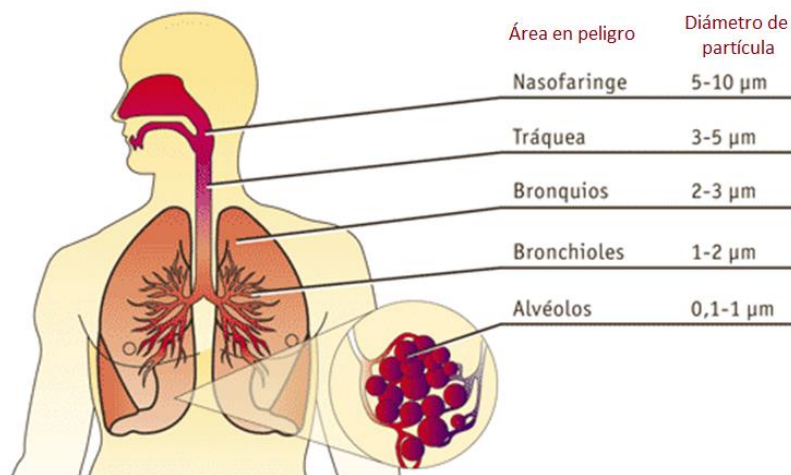


Figura 6. Áreas del sistema respiratorio afectadas según el diámetro de partícula inhalado (www.emaze.com).

A pesar de que la contaminación del aire se ha visto controlada en las últimas tres décadas en algunas regiones de América, las enfermedades sistémicas asociadas

con la contaminación ambiental han aumentado. En las comunidades de bajos recursos, a menudo ubicadas cerca de sitios industriales o junto a carreteras principales, las exposiciones residenciales tanto en interiores como al aire libre pueden ser muy elevadas y afectar adversamente la salud (Tunno et al., 2015).

El desplazamiento de un lugar a otro se ha considerado como uno de los periodos de mayor exposición entre diversas actividades diarias, especialmente en áreas metropolitanas con alta densidad de vehículos. Las concentraciones de contaminantes son a menudo muy altas en el microambiente del tráfico; las personas pueden obtener una contribución significativa a su exposición diaria cuando viajan en el tráfico, a pesar de que suelen viajar por no más de 1.5-2 horas por día, sin embargo, durante los viajes regulares se puede recibir hasta el 30% de la dosis diaria inhalada de BC y aproximadamente el 12% de la exposición personal a PM_{2.5} diaria (Li et al., 2015).

La exposición crónica a PM está asociada con una serie de enfermedades, así como con la muerte prematura por enfermedad cardiopulmonar y cáncer de pulmón. De acuerdo a estudios realizados por la OMS en Europa, la exposición a PM_{2.5} reduce el tiempo de vida de la población en unos 8.6 meses en promedio (Kholod et al., 2015).

II.7. Contaminación intramuros

El término de contaminación intramuros suele aplicarse a ambientes de interior no industriales como lo son oficinas, edificios públicos (hospitales, restaurantes, colegios, etc.) y viviendas particulares. Este tipo de contaminación tiene un impacto significativo en la salud ya que la mayoría de las personas pasa gran parte de su tiempo en instalaciones cerradas (Guardino et al., 1998). La concentración de contaminantes puede variar en órdenes de magnitud en un área urbana, atribuible a la proximidad de fuentes industriales y de tráfico, además de factores naturales tales como elevación o meteorología. Estas variaciones en la contaminación del aire exterior pueden afectar sustancialmente las concentraciones en interiores, sin excluir

las actividades que suelen generar partículas en el hogar como cocinar, fumar, encender velas, incienso y actividades de limpieza (Tunno et al., 2015).

BC es uno de los componentes de la contaminación intramuros, al que se le ha atribuido una serie de efectos adversos en la salud para aquellos que dependen de combustibles sólidos como la madera, estiércol o residuos de cultivos para cocinar cotidianamente y para la calefacción (Rehfuess et al., 2006). El utilizar combustibles sólidos en condiciones con poca ventilación implica niveles altos de contaminación intramuros, afectando mayormente a mujeres y niños (Bruce et al., 2000; Martin et al., 2011). Estudios recientes han sugerido que la contaminación intramuros está asociada con morbilidad respiratoria, incluyendo infecciones agudas de las vías respiratorias en niños (Smith et al., 2000; Smith et al., 2011) y enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) en mujeres (Orozco-Levi et al., 2006; Rinne et al., 2006; Regalado et al., 2006; Ezzati et al., 2004). Un estudio realizado en Guatemala mostró que la exposición al humo procedente de quema de biomasa aumenta la presión arterial en mujeres (McCracken et al., 2007).

No es necesario referenciar países de Asia o África para dar un ejemplo de la forma en que viven ciertas personas, en México (Figura 7) existen culturas étnicas como la Otomí, Zapoteca, Mixteca (entre otras) que no disponen de una vivienda digna, con servicios básicos como el acceso al agua potable y drenaje, mucho menos a cocinas de gas. La quema de biomasa en estas comunidades se encuentra persistente hoy en día, tanto por tradición como por falta de recursos.

Existen evidencias que relacionan la exposición al humo de biomasa con efectos desfavorables de nacimiento, incluyendo bajo peso y muerte fetal (Boy et al., 2002; Sram et al., 2005; Pope et al., 2010). La exposición a la contaminación intramuros que proviene de combustibles sólidos se ha ligado a la mortalidad, ya que este tipo de combustiones no sólo genera gran cantidad de carbono negro, si no gases como monóxido de carbono que llega a ser mortal si no se cuenta con la correcta ventilación (OMS, 2009).

La OMS estima que la contaminación intramuros es responsable de 1.6 millones de muertes anualmente y a su vez constituye el 2.7% de las enfermedades causantes de muerte (OMS, 2006).



Figura 7. Culturas étnicas de México practicando quema de biomasa para cocinar (www.elboomeran.com).

II.8. Perfil global

Aproximadamente 8 millones de toneladas de carbono negro son emitidas cada año a nivel mundial (Bond et al., 2004). Estas emisiones, principiante las provenientes de procesos de combustión afectaran al calentamiento global y provienen en su mayoría del hemisferio norte. Como se muestra en la Figura 8, las fuentes móviles son responsables de un 24% de las emisiones de BC, de las cuales 70% corresponden a la combustión de diésel (Zhang et al., 2015).

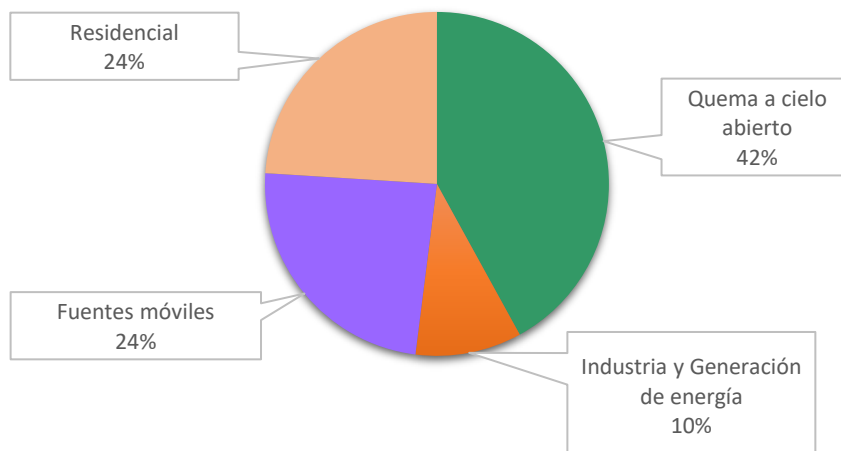


Figura 8. Fuentes de emisión de BC a nivel global (EPA, 2010).

En la tabla I se muestra un estimado de las emisiones globales en 36 regiones del mundo según 6 fuentes de emisión importantes, mostrándose China como el responsable de al menos 17% de las emisiones anuales.

Tabla I. Emisiones de BC a nivel global en el año 2000 en Gg (1 Gg = 1000 toneladas) (EPA, 2010).

Región	Energía	Industria	Transporte	Residencial	Incendio de pastizal	Incendio forestal	Total
África (Este)	0	5	7	119	210	7	348
África (Norte)	0	11	36	37	0	0	84
África (Oeste)	0	20	15	127	505	105	772
África (Sur)	1	10	14	16	16	0	57
África Austral	0	8	5	68	373	4	458
Alemania	1	13	48	5	0	0	67
América (Sur)	0	20	34	30	42	45	171
Argentina	0	12	26	6	14	4	62
Asia (Sur)	0	13	30	68	1	2	114
Asia (Sureste)	1	30	45	101	6	166	349
Australia	0	11	12	7	120	20	170
Brasil	1	53	91	30	70	215	460
Canadá	0	17	19	4	5	31	76
Centro América	0	15	16	12	2	35	80
China	12	669	72	539	5	9	1306
Europa (Central)	3	26	40	54	2	3	128
Europa (Oeste)	1	36	88	17	6	1	149
Francia	1	10	48	11	0	0	70
India	4	108	74	324	5	15	530
Indonesia	1	28	34	73	7	252	395
Italia	2	9	31	2	1	0	45
Japón	2	49	61	7	0	1	120
Korea (Norte)	0	11	1	16	0	1	29
Korea (Sur)	3	55	36	9	0	0	103
Medio Oriente	3	37	62	2	0	0	104
México	3	13	36	6	8	28	94
Nueva Zelanda	0	1	3	1	0	0	5
Países Bálticos	0	1	3	11	0	1	16
Reino Unido	1	10	31	4	0	0	46
Rusia	5	33	32	102	35	145	352
Tailandia	0	20	33	12	3	12	80
Taiwan	1	18	12	2	0	0	33
Turquía	1	12	10	2	0	0	25
Ucrania	0	14	9	40	1	1	65
USA	3	85	216	55	9	13	381
Venezuela	0	5	7	0	8	9	29
Total	50	1488	1337	1919	1454	1125	7373

II.9. Estudios realizados

Se han realizado estudios alrededor del mundo con el fin de evaluar los niveles de BC tanto en interior como exterior de diferentes instalaciones. En la Tabla II se reunieron algunos valores obtenidos en sitios de muestreo pertenecientes a zonas urbanas, donde Hong Kong fue el sitio de muestreo en interior con mayor concentración de BC y en Virginia se obtuvo la menor. En cuanto al estudio en exterior Virginia presentó la concentración más baja.

Tabla II. Niveles de BC en interior y exterior en diferentes países.

Interior				
Lugar	Zona de estudio	Año	BC Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Referencia
Barcelona, España	Escolar Urbana	27 de Enero- 22 Junio 2012 14 de Sep 2012- 22 Febrero 2013	1.3	Reche et al., 2015
Reston, Virginia	Residencial Urbana	14 Mayo 1998- 30 Abril 1999 15 Julio 1999- 30 Mayo 2000	0.46	LaRosa et al., 2011
Hong Kong	Escolar Urbana	22 Mayo- 23 Julio del 2014	2.6	Deng et al., 2016
Exterior				
Lugar	Zona de estudio	Año	BC Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Referencia
Barcelona, España	Escolar Urbana	27 de Enero- 22 Junio 2012 14 de Sep 2012- 22 Febrero 2013	1.4	Reche et al., 2015
Reston, Virginia	Residencial Urbana	14 Mayo 1998- 30 Abril 1999 15 Julio 1999- 30 Mayo 2000	0.74	LaRosa et al., 2011.
Hong Kong	Escolar Urbana	22 Mayo- 23 Julio del 2014	2.4	Deng et al., 2016

II.10. Normatividad Nacional e Internacional

Desafortunadamente en la actualidad no se cuentan con regulaciones ambientales aplicables para BC en donde se establezcan los límites permisibles de este contaminante, sin embargo, de manera indirecta se toma en consideración dentro de la normatividad aplicable para $PM_{2.5}$.

México cuenta con normatividad vigente donde se estipulan los límites máximos permisibles para $PM_{2.5}$ (Tabla III), los cuales no deben sobrepasar $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas una vez al año y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual para protección a la salud de la población susceptible, de igual manera la OMS establece que el parámetro anual no deben rebasar los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas (NOM-025-SSA1-2014; OMS, 2006).

Tabla III. Límites máximos permisibles establecidos por la República Mexicana y la OMS, con respecto a $PM_{2.5}$ (NOM-025 SSA1-2014; OMS, 2006).

Contaminante	NOM-025-SSA-2014	OMS
$PM_{2.5}$	$12\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual
	$45\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas

Capítulo III. Experimental

III.1. Sitio de estudio

Estudios del censo realizado por el INEGI, muestran que México en el 2015 contó con 119.5 millones de habitantes. De 2010 a 2015 la población se incrementó 7 millones más, lo que representa un crecimiento promedio anual de 1.4%. En el estado de Baja California hay 3.3 millones de habitantes de los cuales 1.6 millones pertenecen al municipio de Tijuana (Figura 9), convirtiéndola en la ciudad más poblada del estado y la quinta más poblada a nivel nacional, con una superficie de 879 km² (INEGI, 2015).



Figura 9. Sitio de estudio; Tijuana Baja California, México (www.istockphoto.com)

Sus coordenadas geográficas son 32°31'51" latitud Norte 117°01'12" longitud Oeste y una altitud de 20 metros a nivel del mar. A lo largo del territorio se encuentran elevaciones que forman pequeñas mesetas y predomina el suelo rocoso, cuenta con un clima semiárido o mediterráneo seco, una temperatura media anual de 17.5 °C, las lluvias son escasas dándose principalmente en los meses de noviembre a abril con un promedio de 250 mm anuales (Programa para Mejorar la calidad del Aire, 2012).

Los meses más frescos son diciembre y enero, mientras que agosto y septiembre (final del verano y principio del otoño) es la época más cálida, también es común que durante el otoño y a principios de primavera se presenten los Vientos de Santana, fenómeno que acarrea vientos cálidos, fuertes y secos que son característicos de California y el norte de Baja California (Winckell et al., 2005).

Tijuana forma parte de la región fronteriza de México-Estados Unidos y son las características orográficas, meteorológicas y la naturaleza de los contaminantes que permiten que estos sean aerotransportados, de esta manera se comparte una misma cuenca atmosférica entre Tijuana y San Diego.

Ya que las fuentes móviles son uno de los principales contribuyentes de BC y Tijuana a pesar de ser una ciudad pequeña comparada con ciudades como Guadalajara, Jal., Monterrey, N.L. o la Ciudad de México, cuenta con un parque vehicular consternante, favoreciendo la concentración de contaminantes derivados de la combustión de gasolina y diésel. Datos proporcionados por la Secretaría de Planeación y Finanzas del Estado de Baja California, durante el ejercicio fiscal del año 2009, hasta el mes de mayo de ese mismo año el parque vehicular registrado en la ciudad de Tijuana estaba conformado por 1,145,755 automóviles de servicio particular, mientras que para el servicio público se tenían 13,804 unidades, de las cuales el 80 y 79% corresponden a modelos del año 1999 y anteriores, respectivamente (Gobierno del Estado de Baja California, 2009), sin contar la flota de automóviles sin registro mejor conocidos como "carros chocolate".

Desgraciadamente la tendencia en cuanto a la antigüedad de los modelos en el parque vehicular de Tijuana no se ha modificado de manera significativa, lo cual se reflejó en un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en donde los resultados arrojados muestran que más de la mitad de los vehículos particulares (~60%) presentan más de 10 años de antigüedad (INECC-SEMARNAT, 2011). En este mismo estudio se hace mención que en el estado de Baja California el 80% de los automóviles son vehículos usados los cuales son importados de los Estados Unidos.

Principalmente en las zonas urbanas el transporte se vuelve indispensable, sin embargo, esta necesidad trae consigo desventajas como lo son las emisiones que generan. En 2011 se encontró que, en Baja California debido a la cercanía de la frontera, el 80% de los flota vehicular corresponde a unidades de segunda mano importadas de los Estados Unidos, además de que entre 48 y 60% de los vehículos en circulación tienen más de 10 años de antigüedad (INECC, 2011), situación de interés ya que en el estado no se cuenta con programas estrictos para evaluar el desempeño ambiental de estos.

Desgraciadamente, como se muestra en la Figura 10 (INEGI, 2015), la tendencia en cuanto al número de vehículos a gasolina y diésel en el estado de Baja California va en aumento al pasar de los años, aumentando el impacto negativo en la calidad del aire en sus principales ciudades.

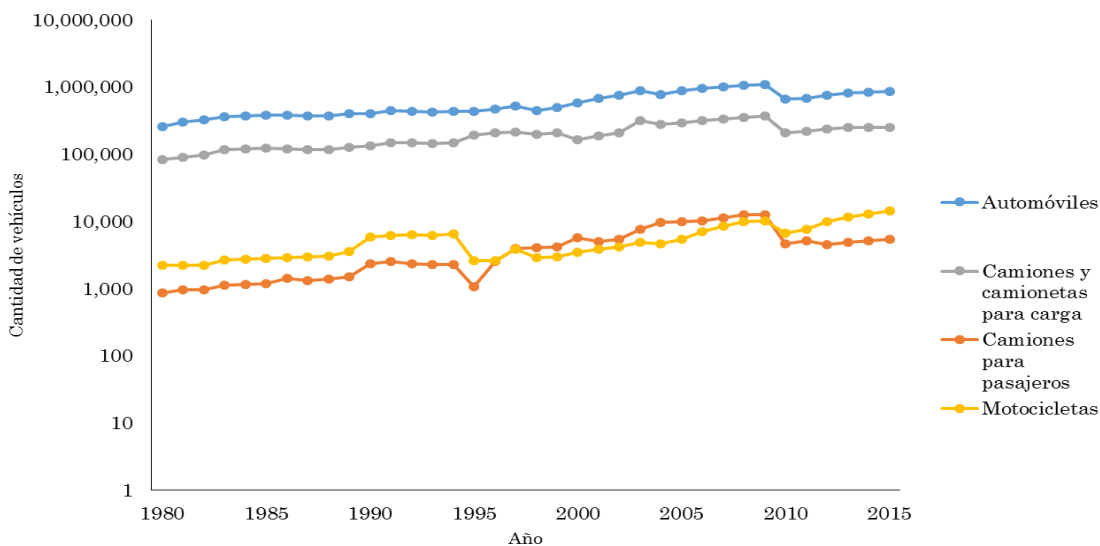


Figura 10. Vehículos de motor registrados en circulación de Baja California de 1980 a 2015 (INEGI, 2015).

Tanto Estados Unidos como México han desarrollado proyectos como el Programa Ambiental Frontera 2012 (SEMARNAT-EPA, 2012) donde entre sus objetivos se incluía la limpieza del aire a lo largo de la frontera, de igual manera la

Junta de Recursos del Aire de California (CARB, por sus siglas en inglés) ha participado en diferentes trabajos cooperativos con las dependencias ambientales de México (Molina Center for Energy and the Environment, 2011). Pero a pesar de los avances realizados en los últimos años, la calidad del aire sigue siendo de gran preocupación en toda la región fronteriza. Los factores asociados con la industria, el crecimiento demográfico y vehículos viejos representan un desafío para las comunidades, dependencias y gobierno de ambas naciones.

III.2. Materiales

III.2.1. Carbono Negro (BC)

Para el monitoreo de BC se utilizaron dos microAethalómetros (Aethlabs AE51) con el fin de medir simultáneamente las concentraciones en interior y exterior de los respectivos sitios de muestreo, los equipos son portátiles y de uso personal (Figura 11) con dimensiones de 11.6 cm de largo, 6.6 cm de ancho y 4 cm de alto.



Figura 11. MicroAethalómetro (<https://aethlabs.com/>).

El microAethalómetro sigue la misma tecnología de medición que ha sido utilizada en todo el mundo por más de 30 años, el dispositivo es un instrumento automático con una bomba incorporada, control de flujo, almacenamiento de datos y batería diseñada para el monitoreo de exposición personal, la muestra de aire se colecta en un filtro T60, el cual está fabricado con fibra de vidrio recubierta con teflón y se reemplaza cuando se encuentre muy impactado o, en otras palabras, muy obscuro

por la cantidad de material colectado. En este estudio y por motivos de control de calidad de los datos, el filtro se cambió cada 24 horas. En la Tabla IV se muestra la descripción del equipo.

Tabla IV. Descripción del equipo para mediciones de BC.

Equipo	Marca	Modelo	Límite de detección	Flujo	Intervalo de muestreo
Micro Aethalómetro	Aethlabs	AE51	0.001 $\mu\text{g BC}/\text{m}^3$	100 mL/min	1 minuto

Después de los muestreos, los datos en crudo se descargaron del equipo en formato MS Excel mediante archivos .exe, los cuales posteriormente se suben a la página AethLabs para realizar la corrección por efecto de carga además de “suavizar los datos” para la eliminación del ruido en las señales durante la medición dando como resultado los valores de BC corregidos o reales.

III.2.2. Meteorología

Datos meteorológicos fueron obtenidos de Weather Underground, un servicio comercial que proporciona información meteorológica en tiempo real vía internet cuenta con radares alrededor del mundo haciéndolo una herramienta ideal para el presente estudio. Mediante esta información se crearon rosas de viento para cada sitio con el fin de entender y atribuir de una manera más acertada las concentraciones encontradas en los sitios estudiados en este proyecto.

Para los datos de UABC se consultó la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Tijuana debido a su cercanía, para Colegio Inglés y Santa Fe se tomó información del radar ubicado en “Imperial Beach, CA.” debido a la cercanía de la costa en ambas ubicaciones y para el Kinder 15 de Septiembre se recolectó información de “Tijuana-Est. 8 Bomberos-Protección Civil”.

III.3. Métodos

El principio de operación se basó en que el BC absorbe la luz con mayor intensidad que otros constituyentes del material particulado. El equipo realiza mediciones a intervalos de tiempo establecidos de la atenuación de un haz de luz transmitido a través de un filtro en el cual el aerosol es acarreado y colectado en la superficie, la fuente de luz del instrumento es una lámpara incandescente estabilizada con una longitud de onda de operación de 880 nm (Hansen, 2005).

Debido a que el flujo de la corriente gaseosa es constante, el ritmo en el que se deposita el BC en el filtro es proporcional a la concentración en el aerosol y por lo tanto dará un aumento en la atenuación óptica. Según el nivel de atenuación se puede determinar el contenido de BC, el aumento en la atenuación óptica entre un periodo y el otro es debido al aumento del BC colectado durante este periodo (Morawska, 2003).

La atenuación (ATN) se mide a través de un punto de detección del filtro en el que se recoge el aerosol y un punto de referencia como control de la estabilidad de la fuente óptica, esto significa que solo una porción del filtro será expuesta al aerosol, el resto será usado como un blanco (Gelencsér, 2004).

Este instrumento tiene el objetivo de calcular las concentraciones de material ópticamente absorbente en la corriente de aire muestreada, que es la fracción de una corriente de aerosol carbonosa que absorbe luz por encima de una amplia región del espectro visible y se mide mediante la determinación de la atenuación de la luz transmitida a través de la muestra cuando se recoge en el filtro fibroso y posteriormente se aplica un factor de corrección por efecto de carga (Crowe, 2006).

Debido a que el equipo realiza el análisis óptico y la lectura de datos "in situ" los resultados están disponibles inmediatamente sin tener que esperar para analizar una muestra en laboratorio. Es un sistema automático, y no requiere materiales consumibles, cilindros de gas, ni atención del operador (Sedlacek, 2016). La único que

requiere es una verificación periódica de dos luces parpadeantes (verde y roja) que indican si el equipo se encuentra en correcta operación, si la batería está baja, necesita cambio de filtro, se está estabilizando o alguna irregularidad en el muestreo.

III.4. Sitios de Muestreo

Para la realización de este proyecto se seleccionaron cuatro sitios de muestreos ubicados de manera tal que abarcarán de manera significativa la cuenca atmosférica de la ciudad de Tijuana como se puede observar en la Figura 12, y en la Tabla V se podrán encontrar las características y periodos de muestreo.

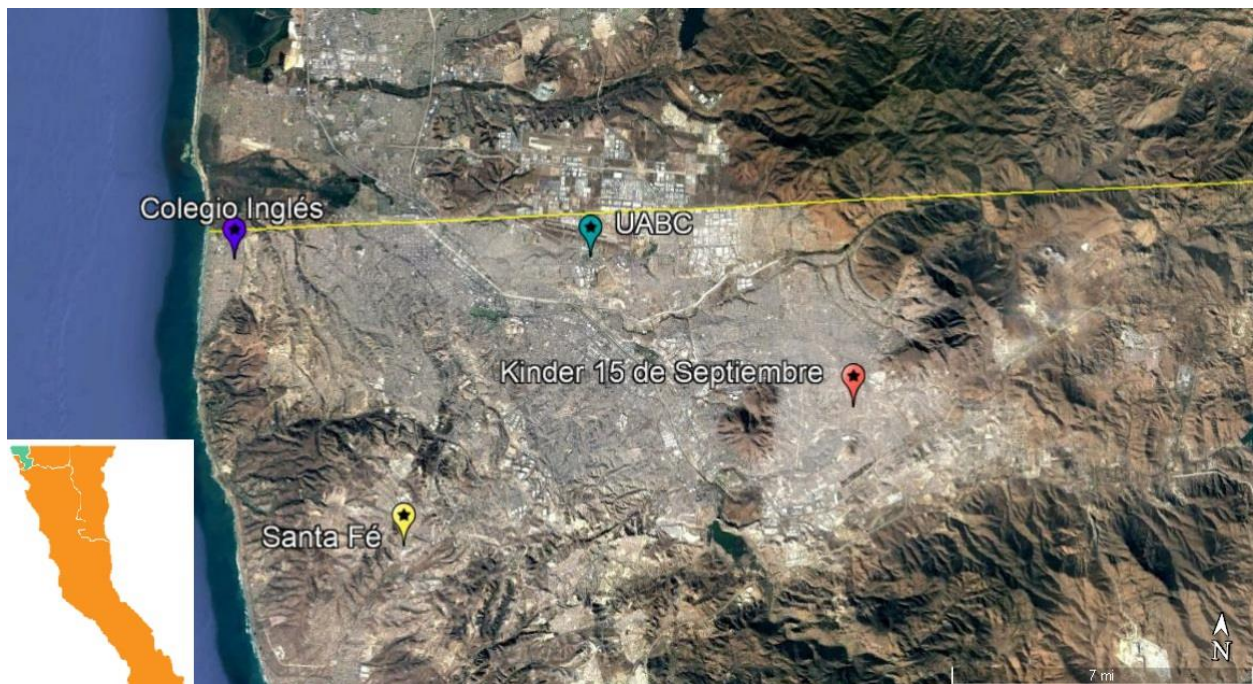


Figura 12. Mapa de ubicación geográfica de los sitios de muestreo (Google Earth).

Tabla V. Características y periodos de los sitios de muestreo.

Sitio	Elevación (m)	Coordenadas	Fecha (2017)	Descripción del sitio
UABC	1.49 (Interior)	32°31'56.14"N 116°57'56.12"O (Interior)	27 marzo-	Cafetería (Interior) y Edificio 6C de laboratorios (Exterior) de la Universidad Autónoma de Baja California-Campus Tijuana, adyacente a vialidad para tráfico local (Circuito Interno Universitario) y a ~250 m de la Calzada Universidad.
	1.69 (Exterior)	32°31'57.01"N 116° 57'53.44"O (Exterior)	31 marzo	
Colegio Inglés	1.24 (Interior)	32°31'30.39"N 117° 6'43.30"O (Interior)	3 abril-	Salón de clases (Interior) en el cuarto piso del edificio y patio de juego (Exterior) del Colegio Inglés situado a ~120 metros del Océano Pacífico y paralelo a Paseo Pedregal.
	1.32 (Exterior)	32°31'30.50"N 117° 6'43.33"O (Exterior)	7 abril	
Jardín de niños 15 de septiembre	1.06 (Interior)	32°29'7.93"N 116° 51'19.44"O (Interior)	24 abril-	Salón de clases (Interior) y patio de juego (Exterior) del Jardín de niños 15 de Septiembre dentro de un fraccionamiento ubicado a 450 metros del boulevard 2000.
	1.53 (Exterior)	32°29'7.89"N 116° 51'19.97"O (Exterior)	28 abril	
Residencial Santa Fe 5ta. sección	1.23 (Interior)	32°25'50.04"N 117° 2'0.60"O (Interior)	19 junio-	Comedor (Interior) y patio de servicio (Exterior) de una casa ubicada en Santa Fe, 5ta. Sección. A 850 metros de la carretera libre Tijuana-Rosarito.
	1.07 (Exterior)	32°25'49.94"N 117° 2'0.56"O (Exterior)	23 junio	

III.4.1. Sitio UABC

El primer sitio de muestreo se encuentra en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) campus Tijuana. Para el estudio en interior se instaló el equipo dentro de la Cafetería del Centro Comunitario Universitario en el local “Tortas Tonka” (Figuras 13a y 13b) y para el estudio en exterior se instaló fuera del Edificio 6C (antes conocido como Bioterio) de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (Figuras 13c y 13d).

El sitio corresponde a una institución de educación superior, pero la zona en la que se ubica corresponde a en parte a zona Industrial y Comercial. La altura en la que se posicionaron los equipos fue de 1.49 metros en interior y 1.69 metros en exterior para simular una altura representativa de las condiciones respiratorias de las personas que se encuentran a exposición. La cafetería es una instalación de dos pisos, cuenta con siete locales, todos con una cocina en funcionamiento por aproximadamente 15 horas diarias durante 6 días a la semana, las condiciones de ventilación son escasas, hay 4 puertas dobles; tres permanecen abiertas, una ocasionalmente se abre y ninguna ventana se abre.

El periodo de muestreo para este sitio se llevó a cabo del 27 al 31 de marzo del 2017, los equipos se instalaron y prendieron el día lunes a las 09:00 horas y se apagaron hasta el día Viernes a las 18:00 horas.

En el Bioterio no hay emisiones gaseosas representativas, sin embargo, la Calzada Tecnológico se encuentra a 250 metros en promedio para ambos puntos de muestreo, usualmente no se concentra tráfico en esta área pero si transita gran cantidad camiones de motor a diésel la mayoría de transporte publico así como privado a lo largo del día y la noche.

Otra importante fuente puntual de emisiones es el Aeropuerto Internacional de Tijuana situado aproximadamente a 1,200 metros de los puntos de muestreo, siendo sede de 342 vuelos semanales en promedio (<http://vuelos.idealo.es>). Además,

el área de Otay cuenta con varios parques industriales en los alrededores, siendo el más cercano a menos de 1 Km al sur del sitio.

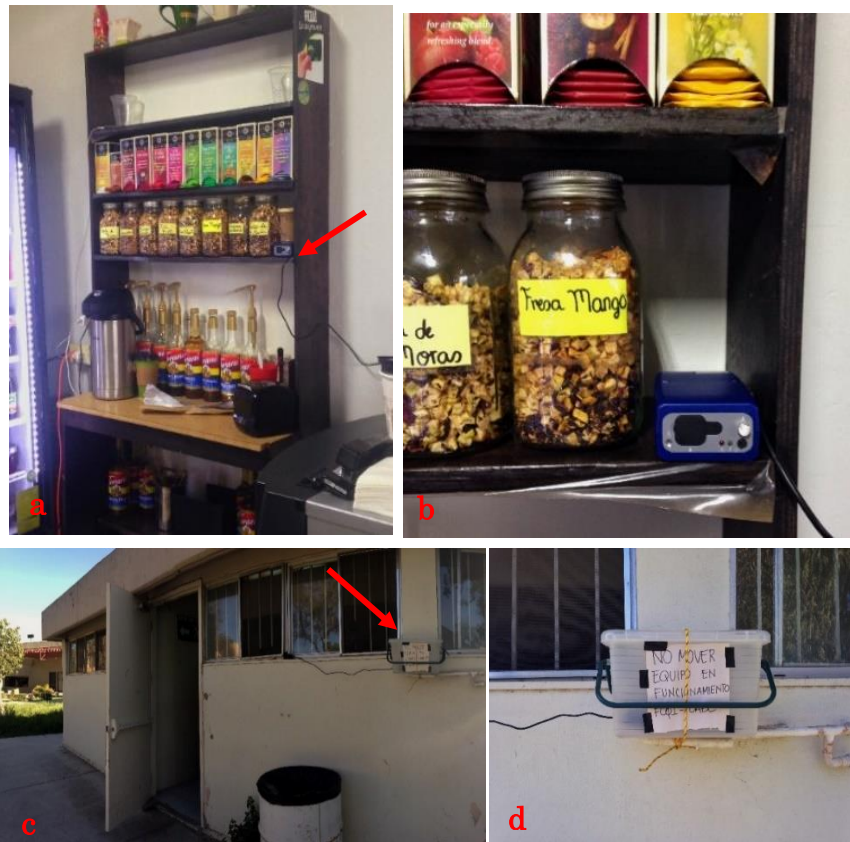


Figura 13. Primer sitio de muestreo: UABC Otay. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figura c y d).

III.4.2. Sitio Colegio Inglés

El segundo sitio de muestreo corresponde al Colegio Inglés, situado en Playas de Tijuana que es el fraccionamiento ubicado en la parte oeste de Tijuana. La categoría del sitio recae a zona Escolar-Residencial. La escuela primaria está ubicada a 120 metros del Océano Pacífico, justo frente a Paseo Pedregal, uno de los tres bulevares que conforman la delegación sin embargo no tiene un flujo vehicular significativo. Dentro de la escuela (Figuras 14a y 14 b), la cual está conformada por un edificio de cuatro niveles, se colocó el equipo para las mediciones en interior en el salón de clases del sexto grado de primaria en el último piso, instalado en un librero a altura de 1.24 metros. El salón cuenta con seis ventanas de las cuales dos se abren ocasionalmente y una puerta que se abre con regularidad, en este colegio solo hay

turno matutino y 24 niños estudian dentro de este salón de clases. El equipo para las mediciones en exterior (Figuras 14c y 14d) se colocó en el patio de juego del colegio a una altura de 1.32 metros sobre el nivel del suelo.

El periodo de muestreo para este sitio se llevó a cabo del 03 al 07 de Abril del 2017, los equipos se instalaron y prendieron el día Lunes a las 09:00 horas y se apagaron hasta el día Viernes a las 18:00 horas.

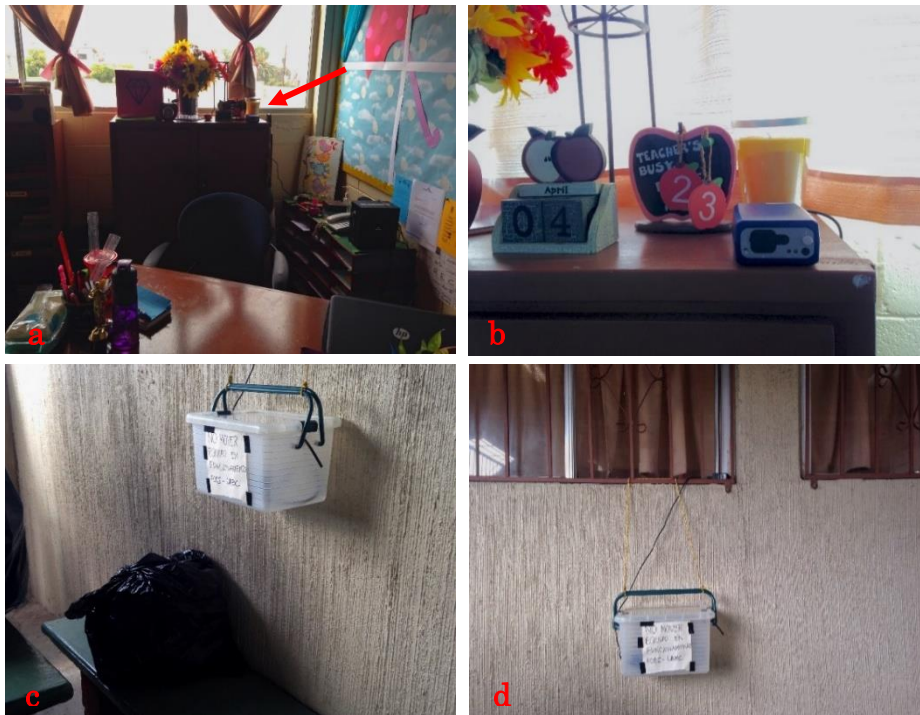


Figura 14. Segundo sitio de muestreo: Colegio Inglés. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figuras c y d).

III.4.3. Sitio Jardín de niños 15 de septiembre

El tercer sitio de estudio fue en escuela de educación preescolar “Jardín de niños 15 de septiembre” situada en el Fraccionamiento Real de San Francisco primera sección, clasificándola como zona Escolar-Residencial, la cual está rodeada de calles en donde fluye solo tránsito local. A 450 metros en dirección al este se encuentra el bulevar 2000 y a 1400 metros al norte del bulevar casa blanca. En los alrededores no existe urbanización, son áreas no habitadas donde crece vegetación, sin embargo, hay dos parques industriales importantes y de gran tamaño aproximadamente a 3 Km al

sur del sitio (Parque Industrial Florido I y II). Los equipos se instalaron para el muestreo en interior en el mueble de un salón de clases a una altura de 1.06 metros sobre el nivel del piso (Figuras 15a y 15b) y en exterior debajo de una ventana en la parte de afuera de la Dirección de la escuela a una altura de 1.53 metros sobre el nivel del piso (Figuras 15c y 15d). En el salón de clases en donde se ubicó el equipo cursan en el turno matutino 25 niños y en el vespertino otros 25 niños.

El periodo de muestreo para este sitio se llevó a cabo del 24 al 28 de abril del 2017, los equipos se instalaron y prendieron el día lunes a las 09:00 horas y se apagaron hasta el día Viernes a las 18:00 horas.



Figura 15. Tercer sitio de muestreo: Jardín de niños 15 de Septiembre. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figura c y d).

III.4.4. Sitio Residencial Santa Fe

El último sitio de estudio se localizó en el fraccionamiento Santa Fe 5ta. Sección dentro de una casa habitación la cual se encuentra aproximadamente a 54 metros de una guardería. La zona en la que se llevó acabo el muestreo entra dentro

de la categoría Residencial, sin embargo, a 175 metros se encuentra una fábrica (ABC Aluminum Solutions), aproximadamente a 200 metros una estación de distribución de gas LP (Gas Silza) y ambas instalaciones cuentan con transportes a diésel, por lo cual podría considerarse como Residencial-Industrial.

El equipo para el estudio en interior se situó en un mueble a una altura de 1.23 metros (Figuras 16a y 16b) y el utilizado para el muestreo en exterior a una altura de 1.07 metros (Figuras 16c y 16d), ambos equipos estaban relativamente cerca (pared interior con pared exterior). Por lo regular en este fraccionamiento hay tráfico ligero de carros, a medio kilómetro se encuentra una avenida en la cual transitan camiones de pasajeros y taxis con destino a diferentes puntos de la ciudad y a 850 metros se encuentra la carretera libre Tijuana- Rosarito. Cabe mencionar que en los alrededores hay algunos cerros y pastizales haciendo de esta una zona propensa a la quema de biomasa.

El periodo de muestreo para este sitio se llevó a cabo del 19 al 23 de junio del 2017, los equipos se instalaron y prendieron desde la primera hora del día Lunes hasta la última hora del día Viernes (debido a la accesibilidad que se tenía en este sitio).

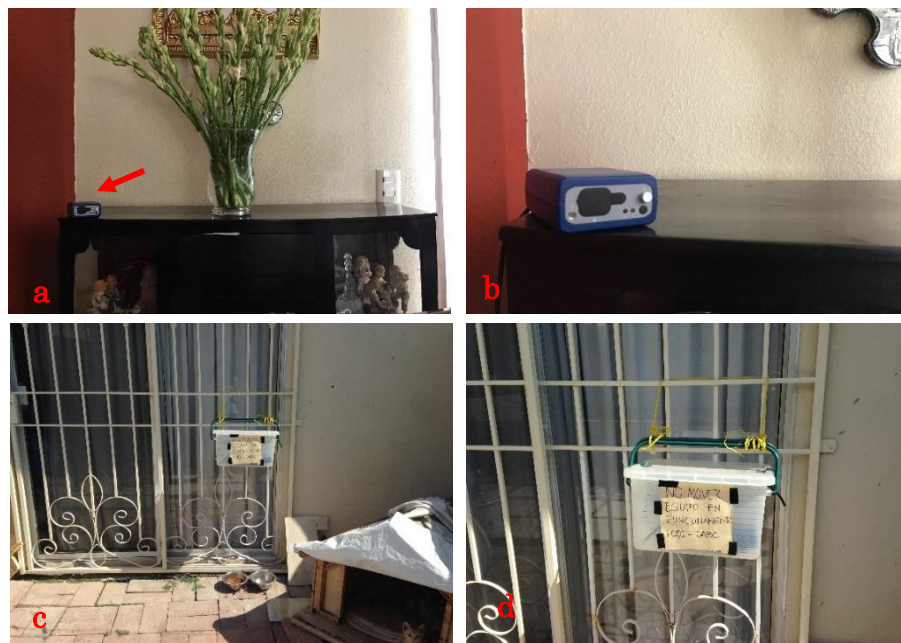


Figura 16. Cuarto sitio de muestreo: Residencial Santa Fe. Tijuana, Baja California (Interior figura a y b; Exterior figura c y d).

El microAethalómetro utilizado para las mediciones en exterior fue resguardado dentro de una caja plástica para proteger de la humedad, posibles lluvias o cualquier otro factor que pudiera intervenir con el estudio y la seguridad del equipo. Todas las alturas a las que se instalaron los instrumentos fueron medidas a partir de la entrada de aire hasta el nivel del piso, ya que es el punto en el que es acarreada la corriente gaseosa y las concentraciones serán correspondientes a esa exacta altura.

III.5 Control de Calidad de los datos

Con el fin de obtener mayor consistencia de los resultados para las pruebas estadísticas, aquellos datos menores o iguales al límite de detección ($0.001 \mu\text{g BC}/\text{m}^3$) se remplazarán por la mitad de este valor, esto es $0.0005 \mu\text{g BC}/\text{m}^3$.

Previo a los periodos de muestreo, los dos microAethalómetros utilizados en este estudio fueron colocados y operados de manera conjunta el día 23 de marzo del 2017 para realizar una prueba comparativa de los instrumentos con el fin de conocer si existían diferencias en las concentraciones registradas mediante el cálculo del coeficiente de determinación lineal (r^2). Esta prueba consistió en encender los equipos de manera simultánea dentro de una oficina en la misma posición para que la corriente de aire evaluada sea lo más parecida posible por aproximadamente 3 horas con el fin de evaluar si presentan correlación entre ellos.

Con los datos obtenidos de cada sitio de muestreo se realizaron series de tiempo de la concentración de BC, en interior y exterior, para evaluar de manera visual a los “picos” asociados con altas concentraciones y de esta manera observar si se ven afectados de la misma manera por alguna corriente de aire.

Los gráficos obtenidos en los resultados de las mediciones y pruebas (gráficos de caja y bigote o Box Plot, dispersión y series de tiempo) fueron hechos mediante MS Excel.

III.5.1 Tratamiento de Datos

Los datos obtenidos se promediaron por hora debido a que se realizaron mediciones por minuto durante 5 días, en los cuatro sitios de estudio y se contó con una cantidad aproximada de 26 mil mediciones en total.

De igual manera, se realizó el análisis de los patrones diurno (desde el amanecer hasta la puesta del sol, aproximadamente de 06:00 a 20:00 horas) y nocturno (de la puesta del sol al siguiente amanecer, aproximadamente de 21:00 a 05:00 horas) para cada sitio, tanto en exterior como en interior.

III. 6 Pruebas estadísticas

Los datos obtenidos durante este estudio se trataron con el software estadístico MINITAB 13.1 (Minitab Inc. 2000), para determinar los parámetros estadísticos y los coeficientes de determinación (r^2) y correlación de Spearman (r_s) entre las concentraciones de BC en interior y exterior.

De igual manera, con este mismo software se realizó el análisis estadístico para comparar y establecer si existen diferencias en los niveles de BC en interior y exterior durante el periodo de muestreo simultáneo, mediante el método estadístico no paramétrico de comparaciones pareadas de Mann-Whitney. En todos los análisis, un valor de $p < 0.05$ fue considerado como significativo.

Capítulo IV. Resultados y discusión

IV.1. Carbono Negro (BC)

IV.1.1. Prueba intercomparativa entre equipos

Como se observa en la figura 17, los dos equipos utilizados en las mediciones de este proyecto presentaron variaciones similares en las concentraciones en masa de BC, observándose una pendiente y un coeficiente de determinación (R^2) de 1.0124 y 0.9371, respectivamente, lo cual indica que, independientemente de la localización de los equipos, los resultados de concentración de BC obtenidos pueden compararse debido a que no presentaron variabilidad significativa dado a su buena correlación.

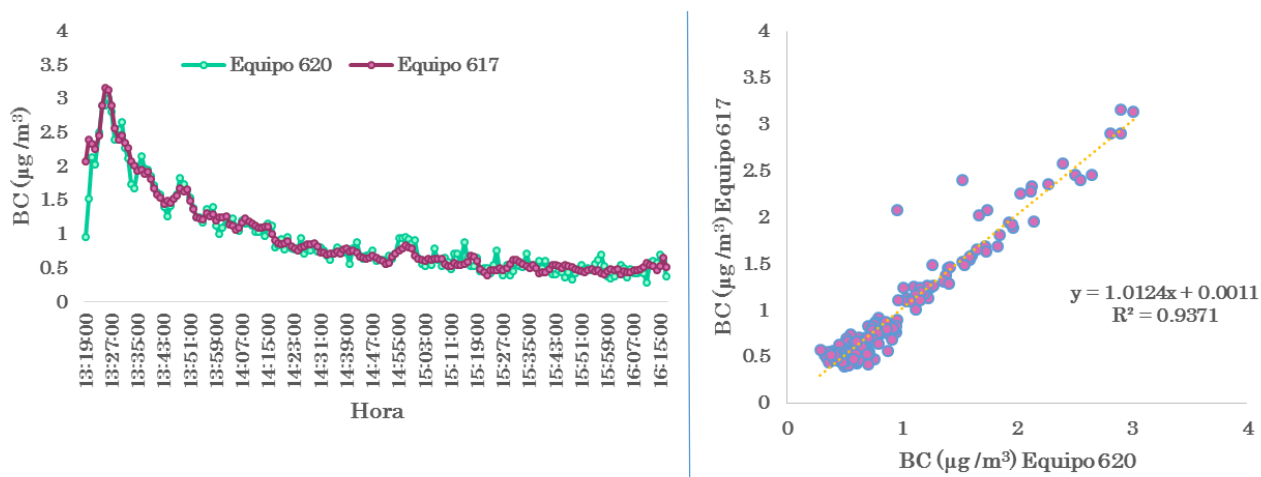


Figura 17. Comparación de las concentraciones de BC por minuto entre los equipos de medición utilizados.

IV.1.2. Series de Tiempo en Interior

En la Figura 18 se presenta la serie de tiempo promedio por hora de las concentraciones de BC en el interior de las escuelas, en donde se puede observar que el sitio que presentó eventos de mayor concentración fue UABC. De igual forma, como se observa en la Tabla VI el promedio (mediana) de BC en UABC fue de 4.57 (2.91) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del kínder 15 de septiembre con 3.08 (1.87) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Residencial Santa Fe con 1.97 (1.23) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y por último el Colegio Inglés con 1.01 (0.79) $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

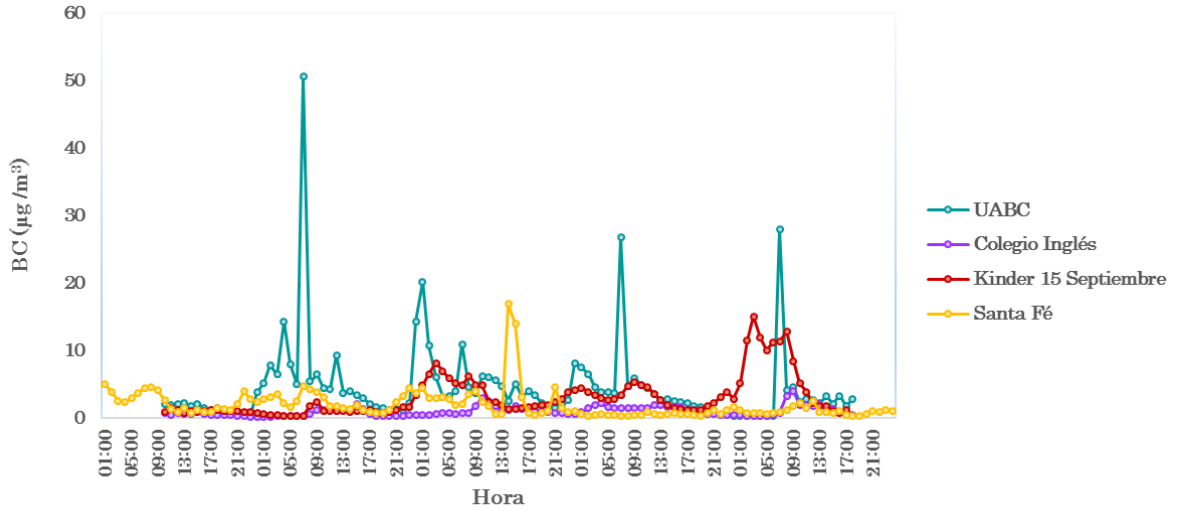


Figura 18. Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior para los cuatro sitios de muestreo (27 Marzo - 23 junio).

Tabla VI. Resumen de concentraciones promedio (mediana) de BC en interior para todos los sitios de muestreo.

	Promedio (mediana) de Concentraciones de BC en Interior $\mu\text{g}/\text{m}^3$
UABC	4.57 (2.91)
Colegio Inglés	1.01 (0.79)
Kinder 15 de septiembre	3.08 (1.87)
Residencial Santa Fe	1.97 (1.23)

IV.1.3. Series de Tiempo en Exterior

En la Figura 19 se presenta la serie de tiempo promedio por hora de las concentraciones de BC en exterior de las escuelas, en donde se puede observar, a diferencia de las concentraciones en interiores, que el sitio que presentó eventos de mayor concentración de BC fue el Kinder 15 de septiembre. De igual forma, como se observa en la Tabla VII el promedio (mediana) de BC en el Kinder 15 de septiembre fue de $3.38 (1.39) \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de UABC con $2.43 (0.90) \mu\text{g}/\text{m}^3$, Residencial Santa Fe con $1.89 (1.15) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y por último el Colegio Inglés con $1.13 (0.91) \mu\text{g}/\text{m}^3$.

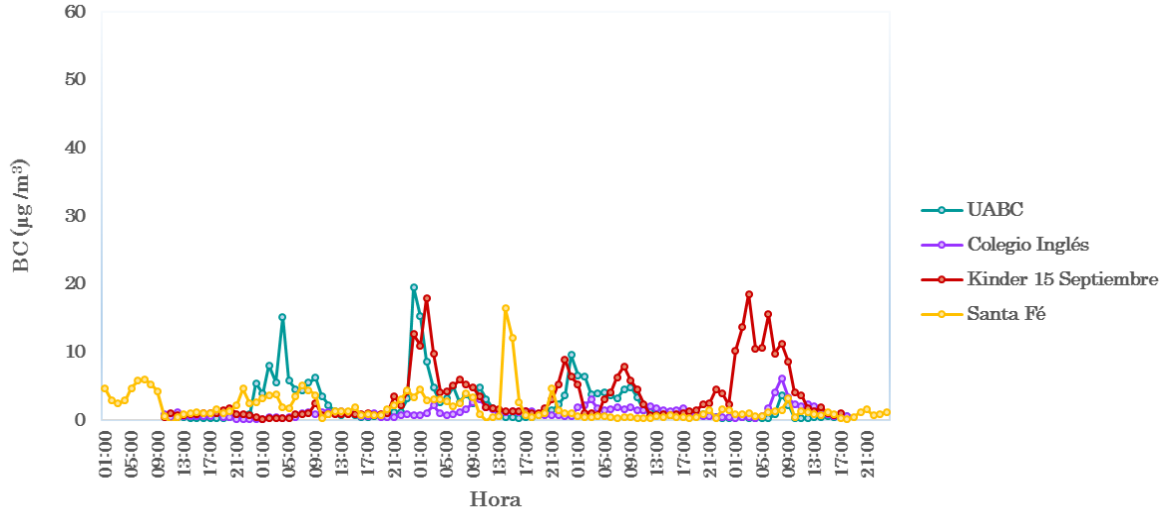


Figura 19. Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior para los cuatro sitios de muestreo (27 Marzo- 23 Junio).

Tabla VII. Resumen de concentraciones promedio (mediana) de BC en exterior para todos los sitios de muestreo.

Promedio (mediana) de Concentraciones de BC en Exterior	
	µg/m³
UABC	2.43 (0.90)
Colegio Inglés	1.13 (0.91)
Kinder 15 de Septiembre	3.38 (1.39)
Residencial Santa Fe	1.89 (1.15)

A continuación, en las siguientes secciones se presentarán los resultados de las concentraciones de BC en interior y exterior obtenidas, además de las discusiones para cada sitio de muestreo.

IV.1.4. Sitio UABC

IV.1.4.1. Serie de Tiempo en Interior

Como se observa en la serie de tiempo promedio por hora de BC en interior y exterior (Figura 20), podemos identificar que las concentraciones en interior son visiblemente mayores que las de exterior durante todo el periodo de muestreo, presentando cuatro picos de mayor magnitud en interior alrededor de las 07:00 horas,

coincidiendo con el horario en donde empieza la mayor actividad en las cocinas de los establecimientos, observándose la mayor concentración el día martes 28 de marzo durante este horario con $50.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

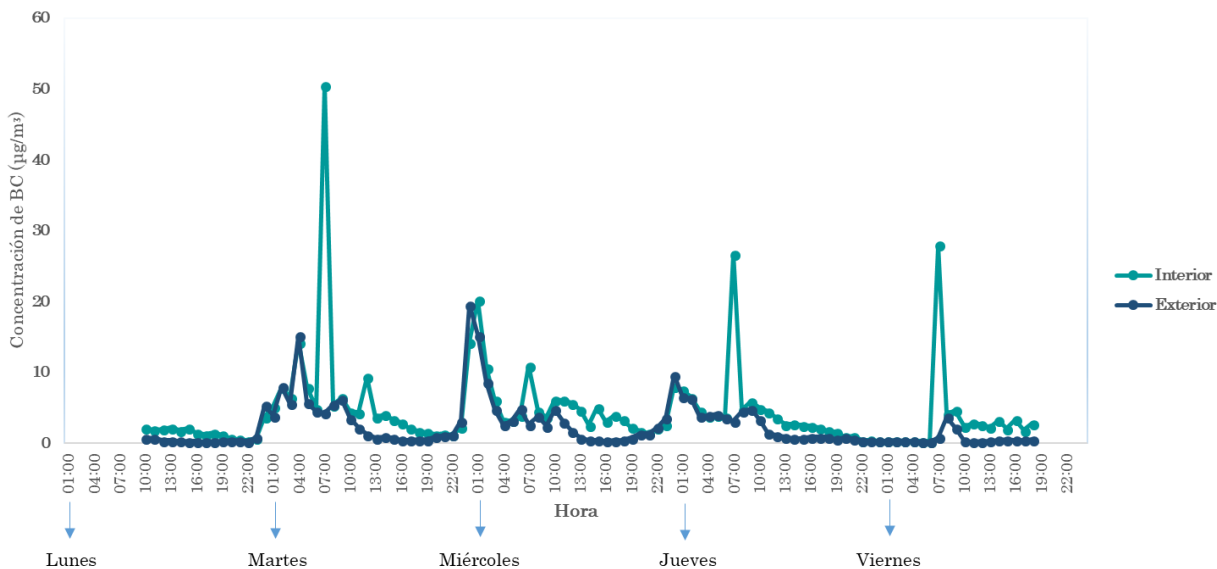


Figura 20. Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para UABC.

El resto de los picos se observaron los días 29 al 31 de marzo con concentraciones de BC de 10.95 , 26.71 y $27.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, influenciados por las mismas fuentes, pudiéndose observar que en este horario las condiciones de ventilación no son favorables para la correcta extracción de contaminantes. Estos resultados se deben a que las actividades dentro de la cafetería empiezan a las 06:00 horas, tiempo en que los locatarios encienden las estufas en las cocinas presentándose las emisiones de la quema de aceite y de los mismos alimentos ricos en grasas (por ejemplo, carne, tocino, etc.), quedando en evidencia que las cocinas posiblemente no cuenten con campanas de extracción en condiciones adecuadas.

En la misma Figura se observa un pico en interior con una concentración de $20.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el miércoles 29 de marzo alrededor de las 01:00 horas, probablemente influenciado por emisiones externas a la cafetería y al campus universitario, debido a que en este horario la cafetería permanece cerrada y no hay circulación de

automóviles dentro del circuito universitario. Lo anterior se corrobora por la presencia de un pico en exterior identificado una hora antes de este evento presentando una concentración de BC de $19.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Este comportamiento también se observó el martes en el mismo horario arrojando una concentración en interior de $5.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y al igual que el evento descrito anteriormente, se identificó una hora antes un pico en exterior de $5.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sustentando la influencia que ejercen las emisiones en exterior a los niveles en interior. Además, en esta misma fecha se identificó un pico en interior de $14.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en exterior de $15.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:00 horas. Esta misma tendencia se vuelve a identificar el día 30 de marzo, presentándose una concentración en interior de BC de $7.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 01:00 horas mientras que una hora antes se identificó un pico en exterior de $9.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sustentando aún más que en este horario probablemente se vean afectadas las concentraciones en interior por las concentraciones de fondo de BC originadas por el tráfico vehicular que circula cerca de este sitio o alguna otra fuente no identificada.

Cabe mencionar que existe un parque industrial pequeño ubicado aproximadamente a 700 metros con dirección al sur del sitio de muestreo y otro en dirección al este pero a una distancia mayor, estas no son consideradas fuentes fijas de emisión de BC ya que no se tienen identificadas, pero por el uso de camiones de carga, montacargas y demás maquinaria siempre puede ser una posibilidad en las variaciones de los niveles de BC.

Por el contrario, en los horarios donde se pueden observar concentraciones en interior estables y que no sobrepasan los $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ son de las 13:00 a las 22:00 horas en todos los días de muestreo, asumiéndose que en este horario baja la intensidad del trabajo en las cocinas y a su vez las emisiones de BC. Durante algunas madrugadas las concentraciones fueron bajas correspondiendo a este horario el valor más pequeño obtenido en la semana de muestreo siendo de $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, debido a la inactividad de la cafetería.

IV.1.4.2. Serie de Tiempo en Exterior

En contraste, los niveles registrados en exterior fueron bajos (Figura 20). Como ejemplo, al comparar la concentración máxima de BC en interior la cual fue de 50.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en exterior en el mismo horario fue de 4.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que nos da una clara idea de que en este caso la corriente de aire muestreada en exterior presenta niveles mucho menores de este contaminante, siendo mejor la calidad del aire para los estudiantes que realizan actividades académicas o de otra índole en exterior. Inclusive, en esta misma figura podemos ver que en los periodos en los cuales disminuyen las actividades en las cocinas dentro de la cafetería, es decir de 13:00 a 22:00 horas, los niveles en exterior son menores. El único periodo en donde los niveles de BC fueron bajos y comparables en interior y exterior fue durante el periodo de las 22:00 horas del día 30 de marzo a las 05:00 horas del día 31 de marzo, alcanzando niveles máximos en interior y exterior de 0.47 y 0.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

La menor concentración de BC registrada en exterior para este sitio fue de 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mayor de 19.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo esta última registrada el 28 de marzo a las 24:00 horas. Este comportamiento probablemente se atribuya a alguna fuente de emisión ubicada alrededor de este sitio de muestreo, ya sean fuentes móviles o la quema clandestina de biomasa o basura, actividad que es común en colonias aledañas en dirección viento arriba a este sitio. Las direcciones de viento con mayor frecuencia en este sitio fueron las que presentaron un componente Noreste Sureste (NO-SE), Oeste-Este (O-E) y en menor medida Suroeste Noreste (SO-NE) como se muestra en la Figura A1, lo que nos ayuda a corroborar que mayormente los vientos predominantes que impactan este sitio de muestreo vienen desde Estados Unidos y la costa del Océano Pacífico.

IV.1.4.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior

Como se muestra en la gráfica de caja y bigote para los niveles en interior (Figura 21) y en la Tabla BI, el patrón diurno en este sitio presenta una tendencia a la alza en las concentraciones de BC, pasando de una concentración promedio (media) de 3.26 (3.87) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el horario de las 06:00 horas a una de 29.05 (27.35) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a

las 07:00 horas, horario en la cual se observa una mayor dispersión en las concentraciones de BC, confirmando el inicio de las actividades de las cocinas en ese horario, bajando la concentración a 4.75 (4.68) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ partir de las 08:00 horas manteniéndose estable hasta bajar a sus niveles mínimos con una concentración de 1.12 (1.19) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ identificado a las 21:00 horas, horario en donde ya no hay actividades en las cocinas. De igual forma se observa que durante el horario de 08:00 a 21:00 horas una baja dispersión de los niveles de BC, en donde afortunadamente los niveles promedio y media son bajos.

En cuanto al patrón nocturno podemos observar en esta misma figura que a partir de las 22:00 horas, horario con la concentración promedio (mediana) más baja presentando 1.06 (0.83) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, hay un aumento gradual en las concentraciones hasta un nivel de mayor concentración identificado a las 01:00 horas con 8.32 (6.36) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para después disminuir de manera gradual hasta una concentración de 3.86 (3.57) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrándose a las 05:00 horas. A diferencia de la baja dispersión en el horario diurno, se observa una mejor dispersión de los niveles de BC durante el horario nocturno pero una mayor concentración, en especial a las 24:00 y 01:00 horas.

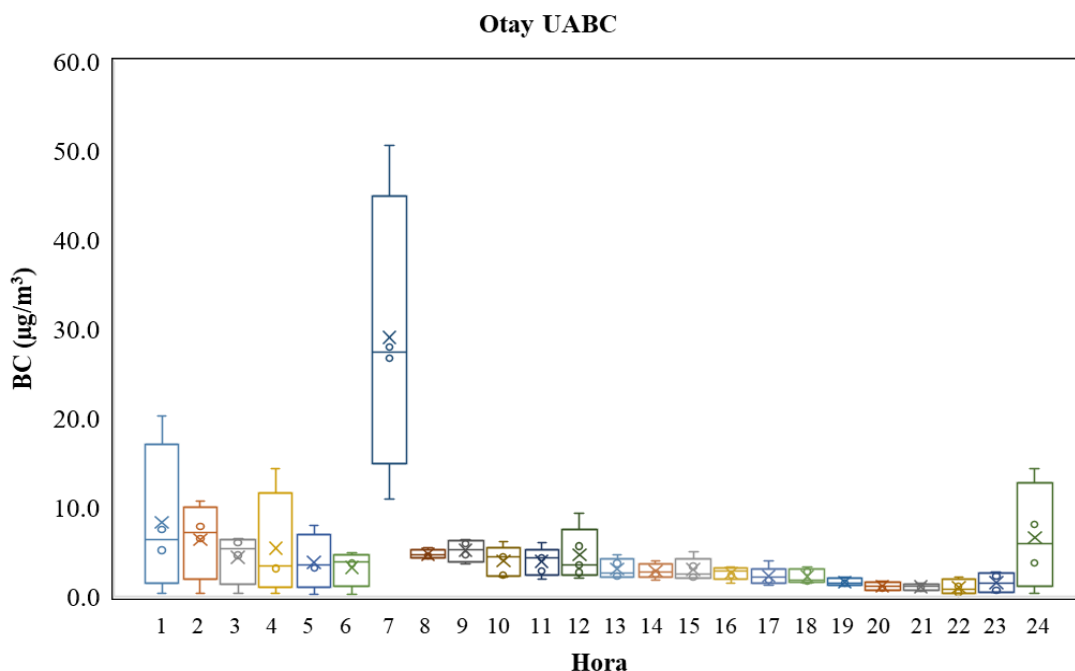


Figura 21. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior en UABC (27-31 de marzo) (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en UABC (27-31 de marzo).

Este comportamiento probablemente se deba a la concentración de fondo remanente en el exterior de este sitio, además de que estas concentraciones de fondo son mayores en este horario debido a que la capa de mezcla presenta una menor altura permitiendo que los niveles de BC en exterior sean mayores y, dado a que la cafetería no es un lugar que este herméticamente cerrado, afecten a los niveles en interior.

IV.1.4.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior

La gráfica de caja y bigote para los niveles de BC en exterior, la cual se muestra en la Figura 22 y los datos para su construcción en la Tabla BII, podemos observar una tendencia en la variación diurna y nocturna alcanzando picos con niveles altos durante la noche y madrugada (entre las 24:00 y las 04:00 horas) aumentando de manera gradual la concentración a partir de las 21:00 horas con 0.90 (0.90) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alcanzando una concentración promedio (mediana) más alta a las 24:00 horas de 8.72 (7.50) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de las 01:00 horas se observa que los niveles bajan gradualmente alcanzando en este horario 6.51 (5.21) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta los 3.33 (3.66) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante las 05:00 horas.

Este comportamiento probablemente se deba a que la capa de mezclado en la cuenca atmosférica de Tijuana durante ese horario presenta niveles de altura bajos en su capa límite, ocasionando este incremento en las concentraciones por falta del efecto de dilución, lo cual concuerda con lo reportado anteriormente por Takahama et al. (2013) durante la campaña CAL-MEX realizada en el año 2010, en donde mencionan que alrededor de las 06:00 horas la capa límite comienza a incrementar su altura.

Como se describió en el párrafo anterior, a partir de las 05:00 horas los niveles de BC bajan gradualmente, presentándose de 06:00 a 07:00 horas una disminución en la concentración promedio (mediana) de 3.33 (4.09) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 2.74 (2.92) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, para después ver un aumento a las 08:00 horas de 4.40 (4.20) $\mu\text{g}/\text{m}^3$

y de nuevo una disminución a las 09:00 horas con una concentración de 3.94 (3.65) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y mantenerse con esa tendencia hasta las 20:00 horas con una concentración de 0.88 (0.89) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual refleja este comportamiento el horario en el cual se llevan a cabo las actividades antropogénicas relacionadas con el tráfico vehicular.

Al transcurrir las horas del día volvemos a ver de manera gradual una disminución hasta llegar a niveles mínimos a partir de las 13:00 horas con una concentración de 0.65 (0.76) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ manteniéndose hasta las 19:00 horas con una concentración de 0.57 (0.58) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual este comportamiento no refleja el aumento de las actividades antropogénicas que es común que se observe alrededor de las 16:00 horas, horario en donde salen las personas de sus actividades laborales. También durante este mismo horario se puede observar una muy pobre dispersión de las concentraciones de BC. Este comportamiento, al igual que en el diurno y nocturno en interior, probablemente se deba a las concentraciones de fondo remanentes en el exterior de este sitio por fuentes móviles o fijas no identificadas, las cuales son mayores durante la madrugada debido a la altura mínima de la capa de mezcla permitiendo que los niveles de BC en exterior aumenten.

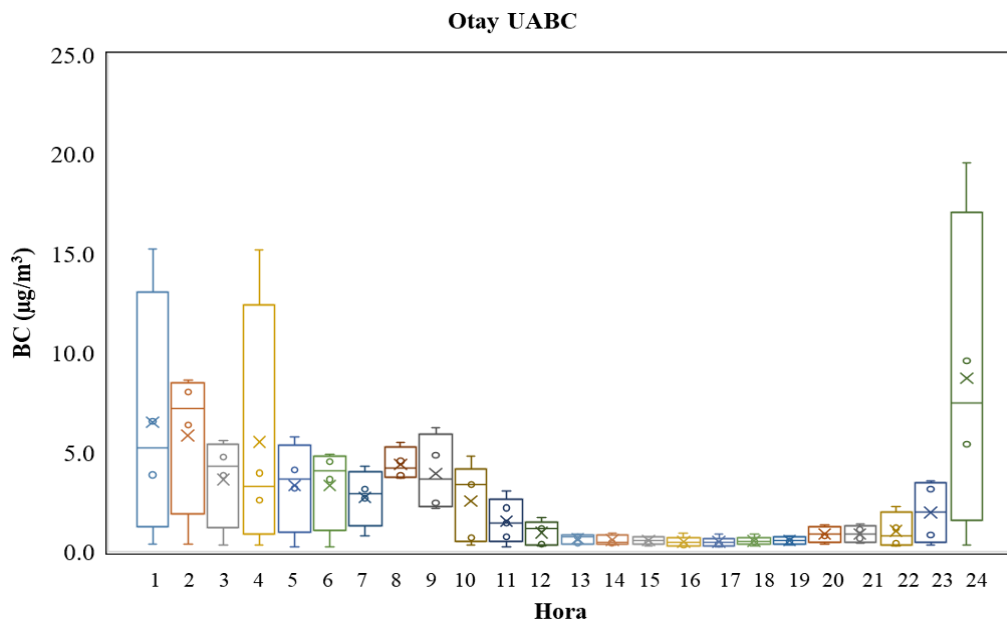


Figura 22. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en UABC (27-31 de marzo).

IV.1.4.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior

Como se observa en la Figura 23 y en la Tabla BIV, los niveles de BC en interior y exterior no presentan una relación lineal, corroborándose esto con el valor del coeficiente de determinación (r^2) obtenido, el cual fue de 0.2035. Este resultado nos indica que los niveles en ambos escenarios presentan diferencias las cuales son marcadas por las actividades dentro de la cafetería; como ya se discutió en los apartados anteriores, las emisiones originadas en interior presentan mayores concentraciones durante varios periodos y horarios con respecto a los niveles en exterior, explicando esto sus diferencias y la falta de linealidad al comparar su comportamiento.

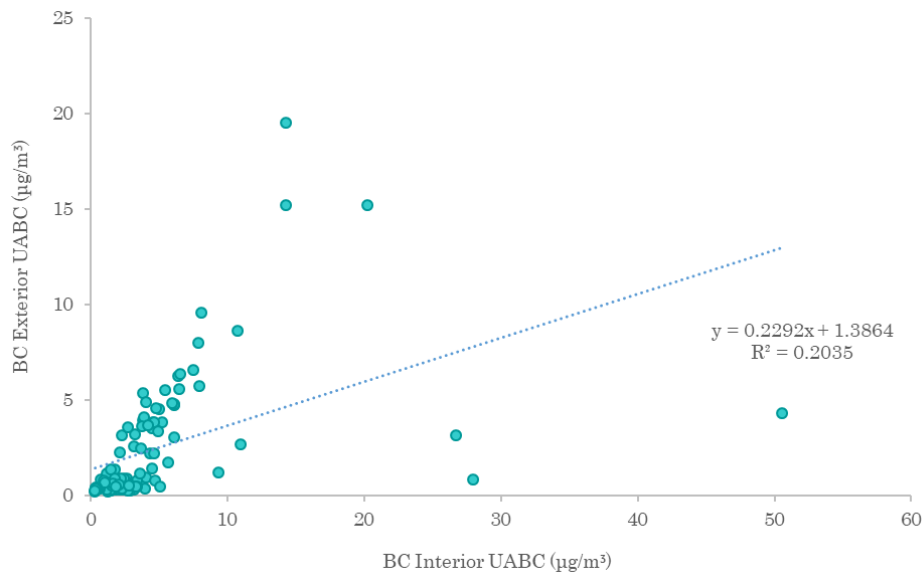


Figura 23. Gráfica de dispersión de las concentraciones de BC en Interior y Exterior en UABC.

Por lo general, los procesos de emisión en sitios urbanos obedecen a estadísticas no paramétricas las cuales se justifican debido al tipo de distribución que presentan, es decir, no presentan un comportamiento normalizado o de distribución normal debido a que la concentración de los contaminantes se encuentran en función de una serie de parámetros (meteorológicos, químicos, topográficos y de cantidad y velocidad de las emisiones) los cuales hacen que sea prácticamente imposible que su comportamiento sea el mismo día a día, por tal motivo a la serie de datos en interior

y exterior se les determino el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) para corroborar si existe una relación monótona entre ellos, es decir, si tienden a tener el mismo comportamiento en cuanto a sus niveles presentados (si ambos aumentan o disminuyen de la misma manera), pero no necesariamente en un mismo ritmo o magnitud. Como se observa en la Tabla BIV, esta prueba arrojó un resultado de 0.757 ($p < 0.05$) interpretándose esto como una buena correlación y nivel significancia entre los niveles presentados en ambos escenarios.

Este resultado nos indica que, independientemente de las diferencias en los procesos de emisión en ambos escenarios, existe una relación directa en las tendencias que presentan los niveles de BC de tal forma que hay similitudes en su comportamiento más no en su magnitud como se explicó anteriormente y, como se observa en la Figura 20, hay varios periodos en los cuales se puede apreciar como aumentan y disminuyen las concentraciones de BC de manera paralela.

En cuanto a la manera en que son impactados los escenarios en interior y exterior en UABC podemos ver que si hay diferencias significativas. Como se observa en la Tabla BIII, al comparar las medianas de las concentraciones de BC con la prueba estadística no paramétrica de comparaciones pareadas de Mann-Whitney, nos arroja un resultado estadísticamente significativo ($p < 0.05$), lo cual nos indica que existe evidencia para concluir que las fuentes de emisión que originan la concentración de BC impactan de manera diferente en la calidad de aire interior y exterior.

En este caso y como lo muestran los resultados en este sitio, las concentraciones de BC en interior fueron mayores así como su impacto, lo cual en gran medida podría producir un impacto adverso a la salud de sus usuarios y trabajadores por la mala calidad del aire dentro de la Cafetería comparándola con las concentraciones en exterior, lo que probablemente originaría que se manifestasen estos impactos a corto o largo plazo, lo cual dependería de la vulnerabilidad de la población expuesta al desarrollo de enfermedades, principalmente respiratorias.

IV.1.5. Kinder 15 de septiembre

IV.1.5.1. Serie de Tiempo en Interior

En la Figura 28 podemos observar la serie de tiempo de los niveles de BC para interior y exterior obtenidos para este sitio de muestreo donde nos encontramos con concentraciones bajas considerando la escala en el eje de la ordenada con respecto a la obtenida en UABC. De igual forma en esta figura se observa, a diferencia de UABC, que los niveles de BC en interior y exterior presentan mínimas diferencias en varios de los periodos muestreados.

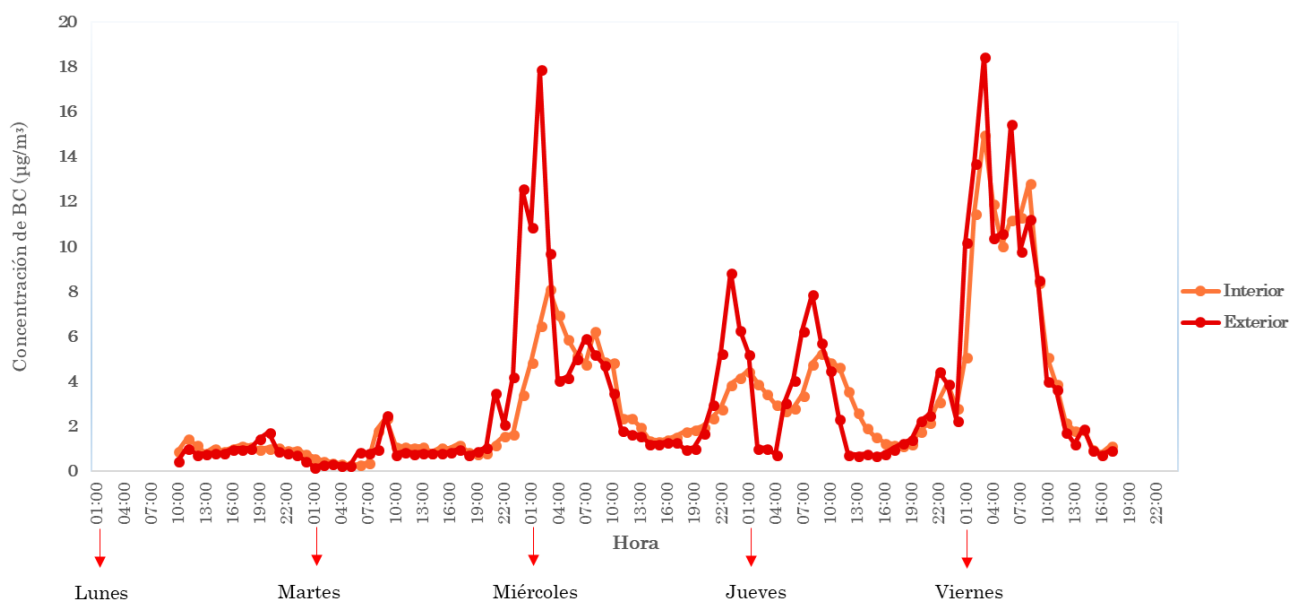


Figura 24. Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para Kinder 15 de septiembre.

En dicha Figura se pueden denotar valores de BC estables y bajos el día lunes desde que comienzan a registrarse los datos para este sitio de muestreo a las 10:00 horas, ya que la concentración de BC más alta fue de $1.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que se registró a las 11:00 horas.

Esta tendencia de bajas concentraciones se extiende hasta las 07:00 horas del martes para después registrarse un pequeño pico con un valor máximo de $2.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:00 horas el cual se puede atribuir a la actividad antropogénica originada por

la entrada de los niños al kínder. Posteriormente se presentan concentraciones estables y similares a las del día lunes, pero a partir de las 21:00 horas se puede observar que la concentración de BC empieza a subir poco a poco en un periodo prolongado alcanzando el punto máximo de este pico a las 03:00 horas del día miércoles con $8.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atribuyéndose esto a la quema de biomasa registrada de manera visual en la madrugada del martes que perduro hasta las 11:00 horas del día miércoles alcanzando una concentración promedio de $2.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ubicada el área del incendio cerca del sitio de muestreo, aproximadamente a 1.3 Km en dirección Norte-Noroeste (coordenadas: 32.49 N, -116.85 O), ya que el mismo pico se puede observar en exterior pero con mayor magnitud lo que da a entender que el salón de clases se vio directamente afectado por esta actividad la cual se desconoce si fue generada por alguna quema clandestina de manera intencional o accidental de biomasa ya que por el horario en que se presenta no hay actividad dentro del salón de clases y es muy ligera la actividad vehicular en las calles que rondan este sitio.

Se puede observar que la concentración de BC después de este evento disminuye gradualmente con el paso del tiempo alcanzando una concentración promedio a las 15:00 horas de $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dando a denotar que probablemente la concentración iría disminuyendo paulatinamente debido a que el incendio se controló y apago durante este horario.

En la noche del miércoles y las primeras horas del jueves se presentan un par de acontecimientos importantes, altas concentraciones se registran en exterior y se reflejan con el mismo comportamiento en interior, pero en menor magnitud. A partir de las 21:00 horas del miércoles se empieza a formar un pico hasta llegar a $4.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 01:00 horas del jueves y después la concentración desciende hasta un mínimo de $2.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas. Cabe mencionar que en este lapso de cuatro horas los valores obtenidos en interior fueron más elevados, por ejemplo a las 02:00 horas en interior se registró $3.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en exterior $1.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a las 03:00 horas en interior fue de $3.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior, a las 04:00 horas $3.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y en exterior tan solo $0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual nos ayuda a confirmar que una vez

que entran contaminantes a un área cerrada es más complicado que se dispersen y queden atrapados a casusa de una mala ventilación, como se ha sugerido por Trompeter et al. 2018 que encontró en promedio concentraciones 66% más altas para un salón de clases con poca ventilación con respecto a otro con ventilación controlada.

Por segunda vez se registra un pico visiblemente de la misma magnitud y duración que el anterior, pero este en su valor máximo alcanza $5.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:00 horas, ligeramente mayor que el primero y posteriormente disminuye gradualmente la concentración hasta $1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 18:00 horas. Para el primer evento entre el día miércoles y jueves no se tiene registrada alguna observación con respecto a que pudo haber causado las concentraciones elevadas, sin embargo, por la hora en que se presentaron y la zona en la que se ubica el sitio de muestreo puede ser quema clandestina de basura o algún tipo de material ya que por el día es menos probable que se de este tipo de actividades. El segundo pico coincide con el inicio de actividades antropogénica; tráfico local, actividad en las escuelas, transporte público, etc.

Para el día viernes el cual corresponde al último día de muestreo se identificaron picos bastante elevados, alcanzando un punto máximo a las 03:00 hora con $15.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual corresponde al valor más elevado registrado en interior para este sitio de muestreo, pero desgraciadamente no pudimos identificar de manera visual algún evento relacionado con algún tipo de actividad generadora de BC. Se puede notar como la concentración de BC baja poco a poco hasta $10.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas, pero interfiere la actividad en la escuela y calles dando como resultado que a las 08:00 horas se vuelve a elevar la concentración a $12.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, todos los valores restantes del día viernes correspondientes a este sitio de muestreo son de menores.

IV.1.5.2. Serie de Tiempo en Exterior

Como se discutió en el apartado anterior, a lo largo de la semana de muestreo para este sitio se registraron cuatro eventos generados sin duda alguna por actividades en el exterior que impactaron de manera desfavorable la calidad de aire

dentro del salón de clases. El primer evento registrado comenzó el día martes a partir de las 23:00 horas, observándose como este pico aumenta hasta llegar a un valor máximo de $17.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 02:00 horas del miércoles, siendo este valor casi tres veces mayor que en interior el cual, como se discutió en el apartado anterior, pudo ser influenciado por el incendio antes descrito, pero de igual manera marca un efecto dentro del aula al elevar la concentración, desgraciadamente en la rosa de vientos para este sitio (Figura A1) no coincide las direcciones de mayor frecuencia con el área en donde se suscitó el incendio, excepto por una pequeña frecuencia del viento en dirección Noreste-Suroeste (NE-SO) a una velocidad de entre 0.5 a 2.1 m/s, la cual probablemente fue la que impacto a nuestro sitio de estudio.

El segundo y tercer pico prominentes se registraron el miércoles a las 23:00 horas con $8.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en su punto máximo, seguido de uno muy similar a las 08:00 horas con $7.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día jueves, en donde este pico probablemente pudo originarse en dirección viento arriba de este punto de muestreo como lo sugiere la rosa de vientos (Figura A1) en las frecuencias con dirección Noroeste-Sureste (NO-SE) y Oeste-Este (O-E). En el intervalo de tiempo entre estos dos picos se logra ver como la concentración de BC logra disminuir considerablemente hasta $0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:00 horas, simultáneamente en el muestreo en interior para este horario se registró una concentración de $3.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, casi cuatro veces mayor lo cual denota que en este periodo entre estos dos picos se logró una mejor dispersión de la emisión producida por eventos o actividades antropogénicas que no logramos identificar.

El último pico observado el viernes se registró a partir de la primera hora del día con concentraciones ascendentes, alcanzando una concentración máxima de $18.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 03:00 horas siendo este el valor más alto registrado en exterior para este sitio de muestreo. Se pueden notar ciertas actividades de quemas probablemente clandestinas las cuales no pudimos identificar, pero como se mencionó anteriormente suele ser una práctica común en esta área, se refleja prácticamente durante toda la mañana, lo que ayuda a reconocer que fue un evento de prolongada duración y que los niveles de BC tardaron mucho tiempo en disiparse y por ende en disminuir su

concentración, esto probablemente puede ser debido a las condiciones meteorológicas que por lo regular en las mañanas se presenta el fenómeno de inversión térmica, impidiendo la correcta dispersión vertical de contaminantes, o probablemente por la influencia de alguna otra fuente de emisión o fuentes móviles de los alrededores, las cuales presentan coincidencia con la dirección de las rosas de viento (Figura A2) en dirección Suroeste-Noreste (SO-NE) y Sur-Norte (S-N), direcciones que coinciden con áreas no urbanizadas en donde probablemente se presenten actividades de quema clandestina. A partir de las 08:00 horas comenzó a descender la concentración de BC hasta un mínimo de $0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00 horas.

Cabe mencionar que no todos los valores encontrados en este sitio de muestreo fueron altos, se llegó a registrar a una concentración de $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el martes a las 01:00 horas, que fue el nivel de BC más bajo encontrado en exterior para este sitio de muestreo, ya que en interior en este mismo horario se registraron $0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de BC, esto se puede denotar en la serie de tiempo el lunes y parte del martes con concentraciones constantemente bajas.

IV.1.5.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior

Como se muestra en la gráfica de caja y bigote para los niveles de BC en interior (Figura 29) y en la Tabla BI, el patrón diurno para este sitio de muestreo tiene un comportamiento muy diferente a UABC, diferencia que radica principalmente en que no hay actividades de combustión dentro del salón de clases, pero como se puede observar en esta figura, este sitio presenta una tendencia en la variación diurna y nocturna alcanzando picos con los niveles más altos y a su vez con los periodos de mayor dispersión durante la madrugada y la mañana (entre las 02:00 y las 09:00 horas) aumentando de manera gradual la concentración a partir de las 01:00 horas con valores promedio (mediana) de 3.78 (4.68) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta alcanzar su nivel más alto a las 03:00 horas con 6.77 (5.82) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual forma se observa que a partir de las 10:00 horas los niveles bajan gradualmente alcanzando en este horario un valor promedio (mediana) de 3.39 (4.87) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para bajar hasta 1.13 (1.07) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante

las 16:00 horas. Cabe mencionar que en el periodo comprendido de las 15:00 a las 17:00 horas se observó la menor dispersión de los niveles de BC.

Este comportamiento durante las horas de la madrugada hasta la mañana probablemente se deba a la pobre altura de la capa de mezclado por efectos de la temperatura, la cual en ese horario al registrarse menores niveles de temperatura da como resultado que la capa límite presente menores alturas permitiendo un menor efecto de dilución vertical de este y otros contaminantes, pero por otra parte también se puede deber el inicio de las actividades antropogénicas aunado a posibles actividades de quema clandestina durante la madrugada, en donde dichas emisiones son arrastradas por el viento desde el Oeste y Suroeste, como se observa en la rosa de vientos (Figura A1) originando que se registren las mayores concentraciones durante la madrugada.

En cuanto a los niveles identificados a las 07:00 y 09:00 horas probablemente se deba a que coincide con el horario en donde empieza la actividad antropogénica en esta zona, registrándose mayor movimiento de automóviles en las calles debido a la entrada de los alumnos de esta escuela y previamente de la escuela primaria ubicada a unos cuantos metros del jardín de niños, además de las personas que se dirigen a sus trabajos, actividades que inciden en los niveles registrados dentro del salón de clases. En ambos casos el efecto origina que los niveles en interior sean altos y, dado a que no es un lugar herméticamente cerrado, los procesos de emisión originados fuera de este inmueble lo afecten directamente exponiendo a los niños, maestros y trabajadores.

Por lo contrario, en el horario comprendido entre las 10:00 y las 19:00 horas se registraron los niveles más bajos por lo cual se ven favorecidos los procesos de dilución originado probablemente por las condiciones meteorológicas (aumenta la capa de mezcla debido al aumento de la temperatura) y porque la actividad en las calles es menor ya que las personas siguen desarrollando sus actividades laborales y es a partir de las 17:00 horas aproximadamente que la concentración se vuelve a elevar debido a que generalmente es el horario en el que los trabajadores terminan sus jornadas

laborales y se dirigen a sus hogares. Este comportamiento con alza de concentraciones se extiende a partir de las 18:00 horas continuando el resto de la noche debido a la dinámica de la capa de mezclado, viéndose reflejadas concentraciones remanentes del día anterior por la mañana siguiente, generando este comportamiento en esta zona.

Para ejemplificar lo antes mencionado, se puede observar que desde las 01:00 horas se tiene una concentración promedio (mediana) visiblemente elevada con 3.78 (4.68) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haciendo referencia a la contaminación remanente del día anterior, aumentando gradualmente hasta alcanzar una concentración promedio de 6.77 (5.82) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 03:00 horas. Posteriormente disminuye un poco la concentración llegando hasta 4.76 (4.32) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas dando paso al inicio de las actividades laborales y antropogénicas en las calles elevándose paulatinamente la concentración hasta llegar al punto máximo de concentración promedio de 6.45 (5.54) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:00 horas, una vez terminado este horario se observan concentraciones decrecientes hasta llegar a 1.13 (1.07) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00 horas lo cual denota que las calles se encuentran tranquilas y hay poco flujo vehicular que puede influir en los valores de BC en el interior del salón de clases.

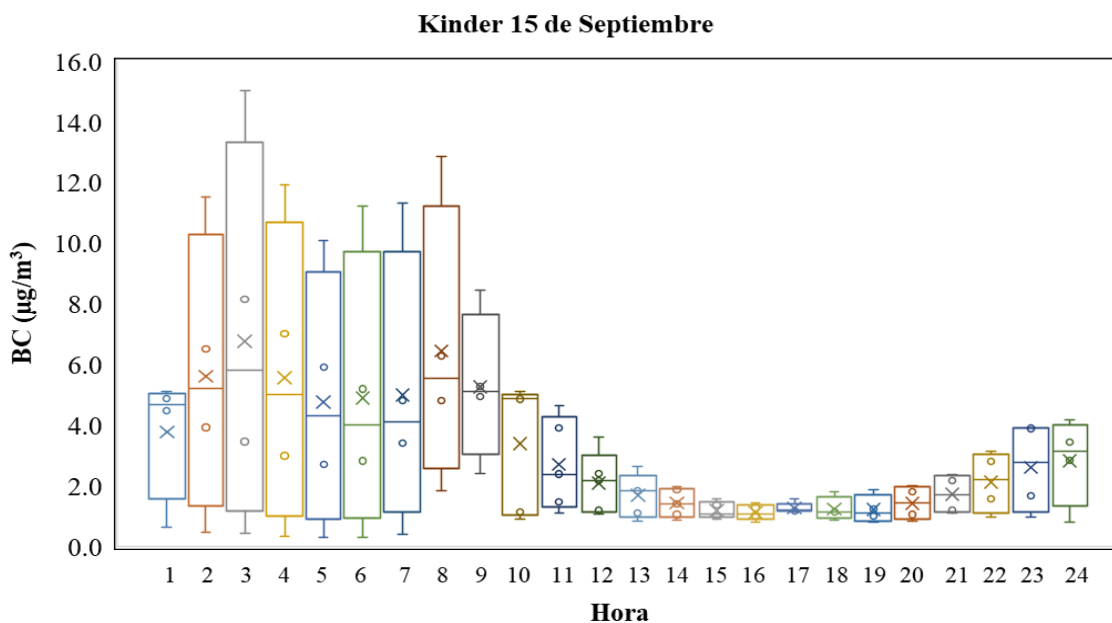


Figura 25. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Kinder 15 de Septiembre (24-28 de abril).

A partir de este punto se puede observar como las concentraciones comienzan a elevarse ligeramente, siendo más notable esto a partir de las 16:00 horas, en donde comienza de nuevo la actividad en las calles debido a la salida de los trabajadores de sus respectivas labores, los estudiantes de diferentes niveles educativos regresan a sus hogares y el tráfico alrededor del fraccionamiento se ve alterado por estos factores, pudiéndose observar una ligera alza a las 17:00 horas con 1.27 (1.21) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y posteriormente concentraciones que van en aumento hasta llegar a un valor de 1.44 (1.44) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 20:00 horas. Las cuatro horas restantes se observa la misma tendencia al alza en las concentraciones hasta llegar a un valor promedio de 2.83 (3.16) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 24:00 horas.

IV.1.5.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior

La gráfica de caja y bigote para los niveles de BC en exterior se muestra en la Figura 30 y los datos para su construcción en la Tabla BII, donde en general se puede denotar un comportamiento similar al patrón observado en interior, pero con la diferencia de que los niveles en exterior son ligeramente mayores.

Similar al patrón diurno en interior, se observa durante las primeras horas de la madrugada y la mañana los periodos de mayor dispersión y concentración de BC, registrándose en la primera hora del día un valor promedio (mediana) de 6.65 (7.74) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual aumenta posteriormente a 8.26 (7.39) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 02:00 horas. Este comportamiento durante las primeras horas de la madrugada se deba probablemente al pobre proceso de dilución por la baja altura de la capa límite lo cual da como resultado que los niveles de concentración de fondo emitidos el día anterior afecten las concentraciones de las primeras horas del día, siendo estas aún mayores probablemente por las actividades de quema clandestina que son comunes en esta área durante la noche y la madrugada.

Pasando esta hora, el comportamiento en la concentración de BC disminuye paulatinamente hasta llegar a un valor de 3.89 (2.24) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:00 horas para después volver a repuntar la concentración hasta llegar a 6.39 (4.57) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 06:00 horas manteniéndose así hasta las 09:00 horas en donde se registró un valor de 5.40

(5.26) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este resultado probablemente se relacione con el inicio de las actividades antropogénicas, en donde es común que las personas que laboran se dirijan a sus trabajos a partir de las 05:00 horas además de que en las escuelas empiezan a recibir a los alumnos entre las 07:00 y las 09:00 horas, cesando la actividad después de este horario.

Después de las 09:00 horas la concentración promedio de BC se ve reducida durante las siguientes horas hasta alcanzar su nivel más bajo a las 15:00 horas registrándose una concentración de 0.93 (0.85) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, manteniendo este comportamiento hasta las 18:00 horas. Cabe señalar que durante este periodo de tiempo, aparte de que se registraron los niveles más bajos de BC, se observó una pobre dispersión de los niveles de este contaminante. Este resultado probablemente se deba a la baja actividad antropogénica en este horario, además de se tiene mayor radiación solar la cual hace que aumente la capa límite permitiendo un mayor efecto de dilución lo cual tiene como efecto una menor concentración de BC.

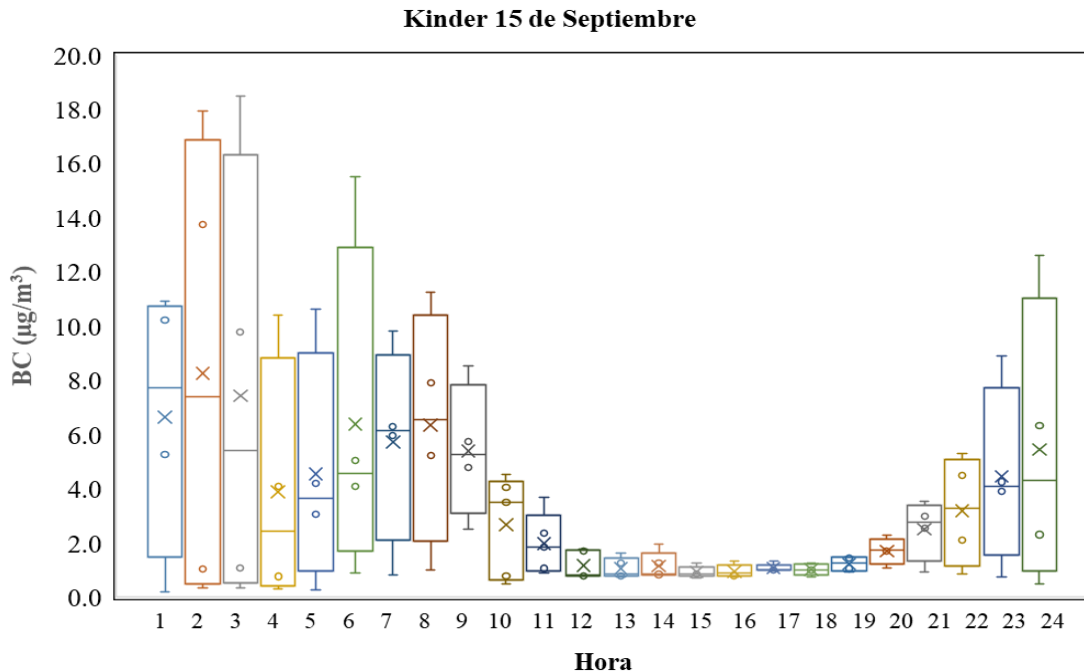


Figura 26. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Kinder 15 de Septiembre (24-28 de abril).

En cuanto al patrón nocturno se muestra un aumento en la concentración a partir de las 18:00 horas, registrándose un valor de 1.02 (1.02) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tendencia que se mantiene hasta las 24:00 horas en donde se alcanza un valor promedio (mediana) de 5.44 (4.32) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este resultado se deba probablemente a que la actividad antropogénica se reanuda a partir de las 16:00 horas, horario en el cual las personas salen de sus trabajos y culminan las actividades escolares, lo cual origina el aumento de los niveles de BC, además de que se observa una disminución de la temperatura lo cual disminuye la altura de la capa límite y el efecto de dilución de BC por lo que aumenta su concentración.

IV.1.5.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior

En la Figura 31 y en la Tabla BIV se muestra el gráfico de dispersión y el valor del coeficiente de determinación (r^2) respectivamente entre las concentraciones en interior y exterior de este sitio, en donde podemos observar que existe una relación lineal entre las concentraciones de BC, lo cual se corrobora por el valor de r^2 obtenido el cual fue de 0.7344. Este resultado indica que los niveles en ambos escenarios no presentan diferencias marcadas en las tendencias de los niveles de BC; a diferencia de UABC, esta escuela no presenta actividades de combustión en interior por lo cual las emisiones originadas en el exterior son las que afectan a los niveles registrados en interior, explicando esto su linealidad al comparar sus niveles.

Como se observa en la Tabla BIV, el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) de los niveles de BC en interior y exterior arrojó un resultado de 0.840 ($p < 0.05$), lo cual se interpreta como una buena correlación y nivel significancia entre las concentraciones presentadas en ambos escenarios. Este resultado nos indica que existe una relación directa en las tendencias que presentan los niveles de BC, lo cual era de esperarse debido a que, como se discutió anteriormente, los niveles de BC en interior y exterior son afectados por las mismas fuentes de emisión externas (como por ejemplo, las emisiones del tráfico vehicular o actividades de combustión clandestinas).

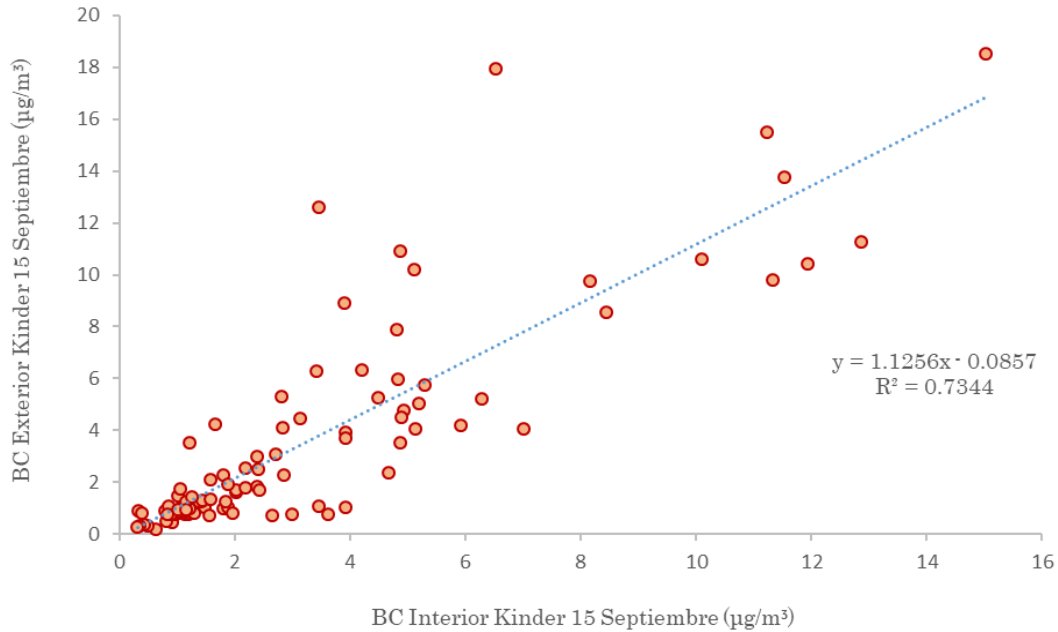


Figura 27. Gráfico de correlación en Interior y Exterior para Kinder 15 de Septiembre.

En cuanto a la manera en que son impactados los escenarios en interior y exterior en este sitio, podemos ver que, a diferencia de UABC, no hay una diferencia significativa. Como se muestra en la Tabla BIII, las comparaciones pareadas de Mann-Whitney no nos arroja un resultado estadísticamente significativo ($p > 0.05$), lo cual nos indica que existe evidencia para concluir que las fuentes de emisión que originan la concentración de BC impactan de la misma manera la calidad de aire interior y exterior.

En este caso y como lo muestran los resultados, los impactos en este sitio por las concentraciones de BC en interior y exterior son prácticamente iguales, por lo cual los posibles efectos a la salud que podría originar en los niños y trabajadores de este kínder tendrían su origen por las emisiones del tráfico vehicular, incendios de biomasa de las áreas abiertas no urbanizadas y otras actividades de quema clandestina.

IV.1.6. Sitio Santa Fe

IV.1.6.1. Serie de Tiempo en Interior

Como se muestra en la Figura 28, las concentraciones registradas para este sitio de muestreo tanto en interior como en exterior se logran ver muy similares a simple vista. A partir del lunes hasta la mitad del miércoles los niveles de BC son más altos comparados con la otra mitad de la semana, además, el contaminante parecía permanecer un periodo más prolongado en la corriente de aire muestreada debido al lapso de tiempo que requirió antes de que se notara un descenso significativo en la concentración, esto se puede deber como ya se ha mencionado con anterioridad, probablemente a la lenta dispersión del contaminante por motivo de las condiciones meteorológicas presentes en esos horarios, condiciones de ventilación o fuentes generadoras de BC dentro del hogar que impiden que la concentración disminuya.

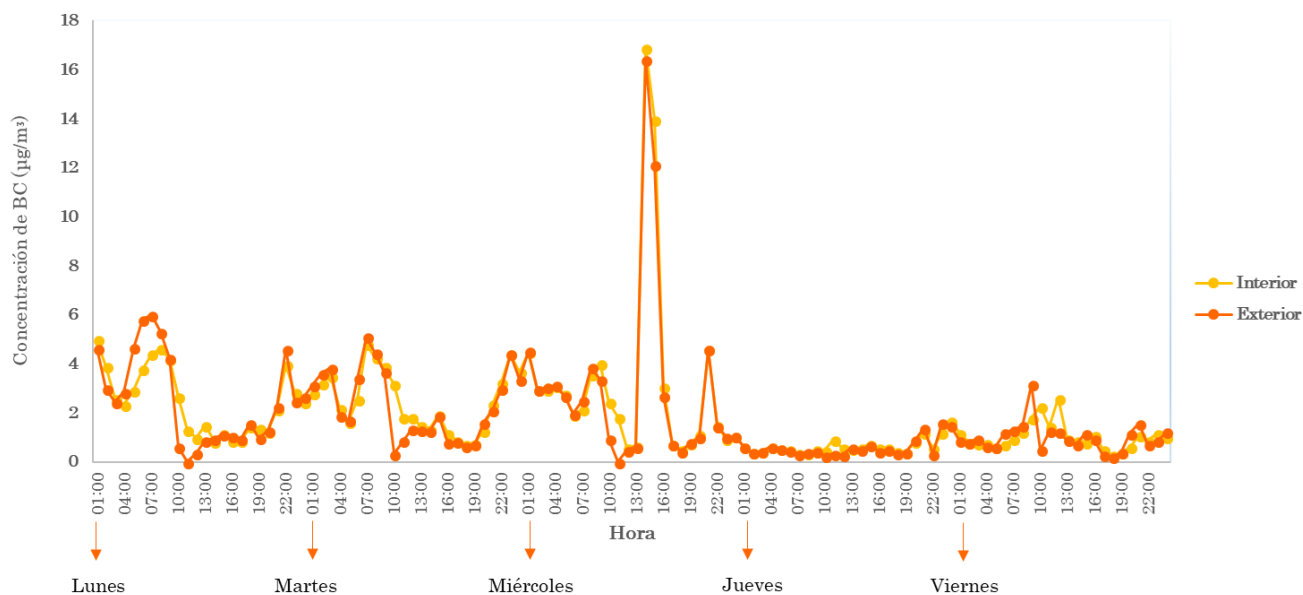


Figura 28. Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para Santa Fe.

Con el propósito de ejemplificar lo antes mencionado, el día lunes se comenzó el muestreo a las 01:00 horas y se registraron $4.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de BC, valor el cual logro disminuir hasta después de un tiempo con $2.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:00 horas, concentración

la cual probablemente pudo haber bajado aún más pero algún evento o condición no identificada en exterior comenzó a elevar los niveles de BC en los alrededores del sitio de muestreo ya que posterior a esto se encontró en constante ascenso hasta alcanzar $5.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:00 horas, comportamiento que se ve manifestado de la misma manera en interior aunque con un ligero retraso alcanzando su punto máximo a las 08:00 horas con $4.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Como se ha mencionado, cerca del sitio de muestreo hay una fábrica (ABC Aluminum Solutions) donde los trabajadores cuentan con servicio de transporte por parte de la empresa la cual cuenta con aproximadamente diez camiones de pasajeros a base de diésel con diferentes rutas que recogen a los empleados de sus casas, los transportan a la empresa y posteriormente al terminar la jornada laboral los dejan de nuevo en sus hogares, los horarios en que se presentan estas actividades pueden ser variados pero generalmente entre las 06:00 y 21:00 horas. Además, esta fábrica de manera interna cuenta con camiones de carga para transportar sus productos y montacargas los cuales se usan gran parte del día (y que es probable que no siempre se les dé un correcto mantenimiento).

El lunes a partir de las 08:00 horas se registran ligeros descensos constantes de concentración hasta un mínimo de $0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:00 horas. Para las 13:00 horas se puede observar un ligero aumento con $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en exterior se tiene un registro de $0.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mismo horario, denotando que probablemente la ventilación dentro del hogar no era la óptima o se generaron actividades que aportaron cierta proporción de BC en la corriente gaseosa muestreada.

Durante el martes se observaron niveles muy variados, comportamiento de altas y bajas concentraciones que dificulta atribuirlos a un fenómeno o causa específica, el valor más alto encontrado fue de $4.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:00 horas, en este caso si se pudiera atribuir este nivel a las actividades antropogénicas por el inicio de jornadas laborales y tráfico local. A las 10:00 horas se obtuvo una concentración de $3.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior mientras que en exterior de tan solo $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mismo horario, lo cual se atribuye a las actividades cotidianas de las personas dentro del

domicilio como lo es limpiar, cocinar o simplemente caminar provocando la resuspensión de polvo.

A las 15:00 horas se presenta un alza de concentración con $1.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior mientras que en exterior se ve reflejado ligeramente más bajo con $1.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual muy probablemente la poca variabilidad en los niveles de BC se deba a una mala ventilación dentro del hogar y no necesariamente a un evento se haya generado en interior impactando en exterior. A las 23:00 horas se presenta un pequeño pico con $4.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y en este caso se encontró el mismo nivel en exterior para el mismo horario. De esta manera se puede notar que en algunas ocasiones los valores que se registran dentro del hogar son casi iguales o mayores con respecto a los encontrados en exterior. Otro ejemplo se tiene a las 24:00 horas donde en interior se registraron $3.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en exterior $3.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No se observó algún evento en este horario que pudiera elevar los niveles de BC, sin embargo, debido a la característica de los alrededores del sitio, los eventos que generaron los niveles de BC en los periodos antes descritos impactan de manera comparable ambos escenarios.

Un pico muy similar al obtenido el martes a las 23:00 horas se observa el miércoles a las 01:00 horas con un valor de $4.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior, el cual fue ligeramente inferior al pico identificado en el mismo horario en exterior el cual fue de $4.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El miércoles se continuó con concentraciones variadas, pero hubo un evento que predominó durante el día elevando la concentración de BC a un pico muy prominente que se percibe a simple vista. A las 13:00 horas se registró un valor de $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y de $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ exterior, horario en el cual aún se encontraba la corriente de aire muestreada en concentraciones bajas, para la siguiente hora sin aumentos moderados o graduales se registra el pico más elevado de la semana con $16.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 14:00 horas en interior mientras que en exterior se obtuvo un valor de $16.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La fuente generadora de este evento fue un incendio observado aproximadamente a 500 metros en dirección al noreste del sitio de muestreo, el cual impactó de manera directa en el sitio de muestreo en interior ya que al no ser un

lugar herméticamente cerrado afectó notablemente la calidad del aire. A pesar de que se sabe que la dirección predominante del viento cerca de la costa va dirigida de noroeste a sureste (NO-SE) fue una quema de biomasa grande que se caracterizó por producir humo negro denso e impacto de manera negativa ambas ubicaciones de muestreo. Probablemente si el evento se hubiera ubicado al noroeste del sitio de muestreo (viento arriba) se hubieran obtenido niveles de BC aún mayores ya que los contaminantes serían acarreados al sureste o en dirección viento abajo pasando antes por el sitio de muestreo como lo sugiere Kozawa et al., (2009) en publicaciones anteriores, incluso se ha discutido la manera en que impactan los contaminantes acarreados desde el este de Asia con dirección a la costa oeste de Norteamérica (Ngo et al., 2018). Para las 15:00 horas se logra disminuir un poco la concentración con $13.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y de $12.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior, siendo aún más altos los niveles encontrados dentro del hogar. Es a partir de esta observación que en las horas siguiente los valores encontrados son considerablemente menores, a las 16:00 horas se registró un valor de $3.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y de $2.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior. El resto del día se mantienen concentraciones bajas de hasta $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 18:00 horas y se vuelve a encontrar un ligero pico a las 21:00 horas con $4.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que pudo haber sido producido por alguna actividad en exterior ya que también se ve reflejado casi en la misma magnitud con $4.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la serie de tiempo se logra observar que el jueves los niveles de BC son menores comparados con los días anteriores, la concentración más alta encontrada para este día no sobrepasa $1.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que se registró a las 24:00 horas mientras que la menor concentración obtenida fue de tan solo $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:00 horas. Dicho esto, se logra observar un ligero pico en interior a las 11:00 horas que no se aprecia para exterior, la concentración de BC se elevó de $0.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:00 y 11:00 horas respectivamente mientras que de manera simultánea en exterior el registro de BC pasa de $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 10:00 y 11:00 horas respectivamente, proceso que se atribuye a las actividades generadoras de BC dentro del hogar como lo es en este caso cocinar. A las 12:00 horas se obtuvo un descenso para ambas locaciones con $0.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior,

comportamiento que es contrario a lo que se aprecia en el horario de las 10:00 a las 12:00 horas en donde en el resto de los días se observan mayores concentraciones de BC en interior, vinculado directamente a una generación de BC y posteriormente una incorrecta ventilación dentro de las instalaciones del hogar.

En general el viernes se registraron concentraciones un poco más variadas, en este caso las observaciones más altas no sobrepasaron $2.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que fue obtenido a las 12:00 horas. En exterior se percibe un acontecimiento que influyó en la calidad de aire en interior, ya que en exterior se registró un aumento que partió de $1.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:00 horas hasta $3.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:00 horas siendo este horario el punto más alto del pico, para luego disminuir hasta $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera simultánea en interior, a las 09:00 horas se registraron $1.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el pico más alto se obtuvo a las 10:00 horas con $2.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y esto ayuda a relacionar que fue originada una fuente de emisión en exterior que logró aumentar las concentraciones de BC de manera retardada en el interior del hogar, aunque en menor medida ya que no sobrepasó los niveles encontrados en exterior. Esto se puede asociar a varias posibilidades, desde la dirección del viento y una buena ventilación las cuales probablemente favorecieron la correcta dispersión del contaminante, hasta que el lugar se encontraba cerrado y no se infiltró en gran medida la corriente que acarrea BC.

IV.1.6.2. Serie de Tiempo en Exterior

Como se discutió en el apartado anterior, los datos obtenidos para el sitio muestreado en interior son en repetidas ocasiones más elevados que en exterior. Otra cuestión que caracterizó esta semana de muestreo es que no se logran visualizar a simple vista los picos típicos que se generan en zonas urbanas a causa de la actividad antropogénica en las calles o en este caso se ven interferidos por niveles elevados en horarios que no corresponden a los que se reportan comúnmente dentro de las actividades antropogénicas usuales. Cual fuera el caso, las emisiones que afectaron los niveles en exterior durante el periodo de muestreo presentaron dirección de viento de mayor frecuencia con ubicación Noroeste-Sureste (NO-SE), seguido del

componente Oeste-Este (O-E), como se muestra en la Figura A3, por lo cual este sitio de muestreo lo afectan las actividades realizadas viento arriba en donde se ubican colonias y arterias viales con alto tráfico vehicular.

Como se observa en la Figura 28, el lunes se obtuvieron concentraciones altas por un tiempo prolongado el cual comenzó a ser más notorio a partir de las 05:00 horas con $4.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero es hasta las 07:00 horas que alcanza su punto máximo con $5.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por el horario en que se presentó esta alta de concentración podría especularse el arrastre de BC por quema de biomasa, tráfico pesado o remanente de actividades anteriores y que a su vez intervino con las actividades cotidianas en las calles, las cuales posiblemente se originaron viento arriba como lo sugiere la rosa de vientos de este sitio (Figura A2). Luego la concentración baja considerablemente a las 12:00 horas con $0.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en interior se registraron valores de $0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en este mismo horario, presentándose en ambos la menor concentración encontrada en exterior.

La mayoría de los picos obtenidos en este sitio registran el mismo comportamiento e impacto en ambas posiciones de muestreo, pero en algunas ocasiones se logra dispersar el contaminante correctamente en exterior como lo es el martes a las 10:00 horas donde la concentración de BC disminuye hasta $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en el mismo horario la concentración en interior fue casi diez veces mayor con $3.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mostrando así el impacto que puede crear únicamente en interior una actividad generadora de BC ya sea en escuelas, casas o cualquier construcción cerrada ya que la dispersión del contaminante no siempre será buena.

El incendio localizado el miércoles por la tarde cerca del sitio muestreado afecto casi con la misma magnitud ambas ubicaciones de muestreo, sin embargo, se vio ligeramente menor la concentración en exterior tanto a la hora del evento como previo y posterior a éste, concentraciones que pudieron ser mayores si la dirección de viento se dirigiera directamente al sitio, cosa que no sucedió como lo muestra la Figura A2, pero dado a la cercanía del área en donde se suscitó el evento lograron impactar en los niveles identificados. A las 13:00 horas se registraron valores muy similares en

ambos sitios muestreados con $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior y $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior, a las 14:00 horas (que fue la hora en que sucedió el evento) se alcanzaron $16.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior mientras que en interior se obtuvo un valor mayor de $16.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La siguiente hora se logró disipar un poco el BC dando como resultado $12.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior y 13.95 en interior. Fue hasta las 16:00 horas que se alcanzó una concentración considerablemente baja (comparada con las horas anteriores) de $2.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior y de $3.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior, denotando que en todos los casos la concentración en exterior fue menor. Los niveles permanecen bajos por unas horas y se vuelve a generar un aumento en la concentración de BC a las 21:00 horas, aunque esta vez ligeramente mayor en exterior con $4.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en interior de $4.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El jueves se puede observar que es el día con menores concentraciones en cuando a eventos que generen altos niveles de BC, sin embargo, a las 11:00 horas un aumento de concentración se ve reflejada únicamente en interior con $0.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en exterior se obtuvo un valor de $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atribuido directamente a las actividades dentro del hogar que pueden afectar la calidad del aire. A partir de las 19:00 horas se puede notar que aumenta la concentración de BC en exterior pasando de $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 20:00 horas y encuentra su punto máximo a las 21:00 horas con tan solo $1.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras en interior se observa el mismo comportamiento, pero en menor magnitud ya que alcanza su máxima concentración en el mismo horario que en exterior con $1.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para el viernes se tienen de igual manera concentraciones bajas comparadas con los primeros días de muestreo, logra resaltar un pico a las 09:00 horas en exterior alcanzando una concentración de $3.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en interior de tan solo $1.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fue hasta las 10:00 horas que en interior se vio reflejado un mayor impacto ya que se registraron $2.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras tanto en exterior parecía haberse dispersado correctamente el BC presente en la corriente muestreada ya que se registró un valor de tan solo $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

IV.1.6.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior

Como se muestra en la gráfica de caja y bigote para los niveles de BC en interior (Figura 29) y en la Tabla BI los valores para la construcción de dicho gráfico, a simple vista el patrón diurno es el que se muestra con mayor variación en cuanto a la dispersión y concentraciones de BC. A las 06:00 horas se obtuvo un promedio (mediana) de 1.90 (1.94) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y fue incrementando de manera gradual hasta llegar a 2.88 (3.88) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 09:00 horas, evidenciándose en este periodo las actividades generadas en el interior del hogar, así como la probable influencia de las emisiones generadas en exterior las cuales produjeron un aumento en los niveles de BC. Posteriormente, en un lapso prolongado la concentración logra disminuir hasta obtener 1.02 (0.93) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:00 horas, lo cual se ve reflejado en el gráfico con una caja poco dispersa, en este horario por lo general la actividad en las calles es poca y dentro del hogar los habitantes se encuentran fuera realizando sus labores.

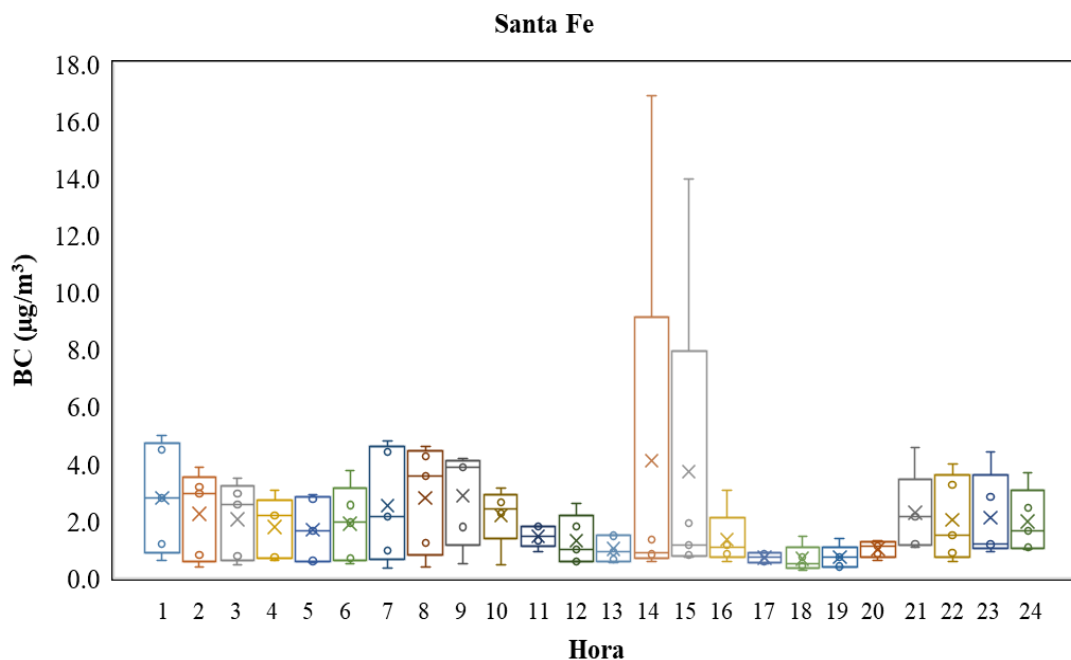


Figura 29. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles) en Santa Fe (Junio 19- Junio 23).

A las 14:00 horas se obtiene la observación más amplia y dispersa del gráfico con 4.10 (0.88) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y disminuye ligeramente a la hora siguiente con 3.71 (1.16)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, en donde este valor fue producido a partir del incendio registrado el miércoles que se explicó anteriormente y que aumento los promedios de BC en dichas observaciones. Para las 16:00 horas se nota que los niveles de BC ya se estabilizan disminuyendo hasta 1.35 (1.09) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que puede dar a entender que probablemente de no haber sido por el evento registrado los niveles de BC hubieran permanecido bajos o similares a los de las 16:00 horas.

Las siguientes observaciones comprendidas de las 17:00 a las 20:00 horas se caracterizan por tener cajas muy angostas y de concentraciones menores, haciendo referencia que en estos horarios es donde coincide para todos los días de muestreo niveles bajos de BC y por consiguiente la calidad de aire es buena. A diferencia de los sitios discutidos con anterioridad, por las tardes aquí no se ve reflejada la influencia de las “horas pico” manifestadas en las calles que son derivadas del tráfico vehicular generado por la salida de los trabajadores y estudiantes de sus labores, fenómeno antropogénico que por lo general comprende un horario de las 16:00 a las 20:00 horas, pero es importante resaltar que debido a la ubicación geográfica del sitio de muestreo es probable que se viera favorecida la calidad del aire muestreado debido a la cercanía a la costa y tráfico local moderado, sin olvidar que una correcta ventilación dentro de los lugares cerrados será de mucha ayuda para disminuir o evitar que los niveles de BC y otros contaminantes se contengan.

En cuanto al patrón nocturno obtenido se pueden notar niveles de BC no del todo bajos si se comparan con las observaciones anteriores, pero muy similares entre sí con respecto a su promedio (media) y la dispersión de las cajas. A las 21:00 horas se elevan los niveles registrándose 2.27 (2.15) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para después disminuir con 2.03 (1.49) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 22:00 horas, después vuelve a elevarse muy ligeramente la concentración con 2.11(1.19) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de manera continua en las siguientes horas se mantiene esta tendencia de altibajos, valores que se pueden atribuir a una permanencia de contaminantes en la capa baja de la atmósfera o corriente de aire muestreada debido a las condiciones meteorológicas que se caracterizan por las noches, donde, a pesar de que la temporada de muestreo fue verano por las noches el

sitio presenta un clima frío por la cercanía de la costa, además siempre se debe mantener en consideración que existen quemas de biomasa clandestinas en los alrededores.

A las 02:00 horas pasa de 2.24 (2.95) a 2.05 (2.58) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 03:00 horas, registrándose a partir de este valor descensos de concentración de BC hasta un mínimo de 1.70 (1.65) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas. De esta manera se puede evidenciar la variabilidad entre los niveles de BC que hay entre un sitio de muestreo y otro independientemente de que las temporadas de muestreo no fueron las mismas, así como la manera en que disminuyen o aumentan las concentraciones de BC debido a las características intra y extradomiciliarias del sitio.

IV.1.6.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior

Como se observa en la Figura 30, así como en la Tabla BI en donde se muestran los valores para la construcción del gráfico, se logran ver muy similares los niveles y dispersión de las cajas correspondientes al muestreo en interior. Justo iniciando el patrón diurno a las 06:00 horas se puede observar un repunte en los niveles de BC con 2.56 (1.97) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que ya venían elevándose de una hora anterior y se mantienen en un constante aumento llegando a su punto máximo a las 08:00 horas con 3.09 (3.86) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ atribuido esto a la actividad antropogénica en la localidad, en este punto la dispersión y amplitud de las observaciones es prominente comparado con las horas siguientes ya que a las 09:00 horas ya se encuentran en descenso estos niveles con 2.97 (3.37) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alcanzando un mínimo a las 11:00 horas de 0.50 (0.33) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ donde las cajas del gráfico ya son muy angostas.

A las 14:00 horas se registra la observación generada por el incendio ocurrido el miércoles, dejando en evidencia con el box plot correspondiente a dicho horario los altos niveles obtenidos tras el evento ya que contribuye a obtener una gran dispersión pero que logra disminuir en las horas siguientes, aunque de igual manera afectaron la tendencia a concentraciones bajas que parecían tener los datos en los horarios anterior y posteriores a este. A las 14:00 horas se registra un valor de 3.97 (0.95)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ disminuyendo rápidamente hasta que a las 16:00 horas ya se encuentra en 1.18 (0.93) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un rango entre el Q1 y Q3 considerablemente menor.

Lo que normalmente se debería observar como un alza de concentraciones dado por el tráfico vehicular no se logra visualizar para este sitio de muestreo, por el contrario, es el periodo en el que las concentraciones se denotan menos dispersas y con niveles bajos. Cabe mencionar que para las 17:00, 18:00 y 19:00 horas se presenta el mismo promedio de 0.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y lo que difiere es la mediana con 0.70, 0.44 y 0.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, lo que podría dar a entender que las fuentes de emisión que generaron estas concentraciones no se encuentran estandarizadas o mejor dicho no se presentaron en los mismos horarios para los cinco días de muestreo pero debido a las 24 observaciones obtenidas en el día se compensan unas con otras logrando el mismo promedio.

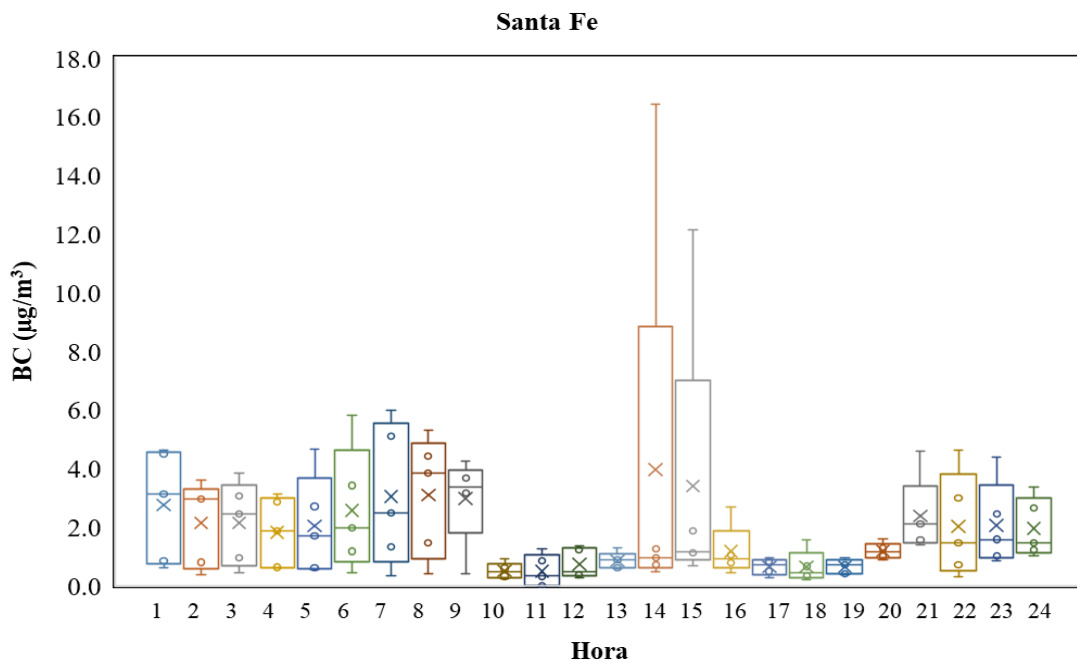


Figura 30. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles) en Santa Fe (Junio 19- Junio 23).

Con respecto al patrón nocturno, justo a las 20:00 horas comienza a elevarse la concentración partiendo de 1.19 (1.16) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de manera alterna sube y bajan los

niveles hasta llegar a las 02:00 horas con 2.15 (2.96) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, las cajas que representan los horarios antes mencionados son amplias y se puede notar como a partir de las 04:00 horas se van elevando los niveles, por una parte muy probablemente debido a que en la capa de mezcla se encuentran concentrados los contaminantes remanentes del día anterior ya que se presentan menores temperaturas o por otra parte se van generando emisiones de BC por el inicio de las actividades en los alrededores o quemas clandestinas.

IV.1.6.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior

En la Figura 31, así como en la Tabla BIV se muestra el gráfico de dispersión y el valor del coeficiente de determinación (r^2) con respecto a las concentraciones que se encontraron tanto en interior como exterior para este sitio de muestreo el cual como era esperado resulto tener una relación lineal con un valor de r^2 de 0.92, lo cual confirma la alta relación existente entre las emisiones o fuentes que acarrear BC e impactan de igual manera ambas ubicaciones de muestreo, esta correlación fue la más alta para los cuatro sitios de muestreo en este proyecto. En el interior del hogar existen procesos de combustión derivadas de la cocina, son comunes las tareas de limpieza y de igual manera la fracción infiltrada de la actividad antropogénica en los alrededores del sitio representan un impacto directamente negativo en la calidad del aire en interior, a pesar de esto los niveles obtenidos son menores que los discutidos en sitios anteriores.

En la Tabla BIV se puede encontrar el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) de los niveles de BC en interior y exterior que arrojó un resultado de 0.850 ($p < 0.05$), lo cual se interpreta como una muy buena correlación y nivel de significancia en las dos variantes en cuestión. Ambos escenarios de muestreo mantienen una similitud en la manera en que son impactados y esto se respalda con las comparaciones pareadas de Mann-Whitney que se pueden visualizar en la Tabla BIII, obteniendo un valor no significativo ($p > 0.05$), el cual confirma que no hay diferencias en cómo son impactados ambos escenarios por los niveles de BC.

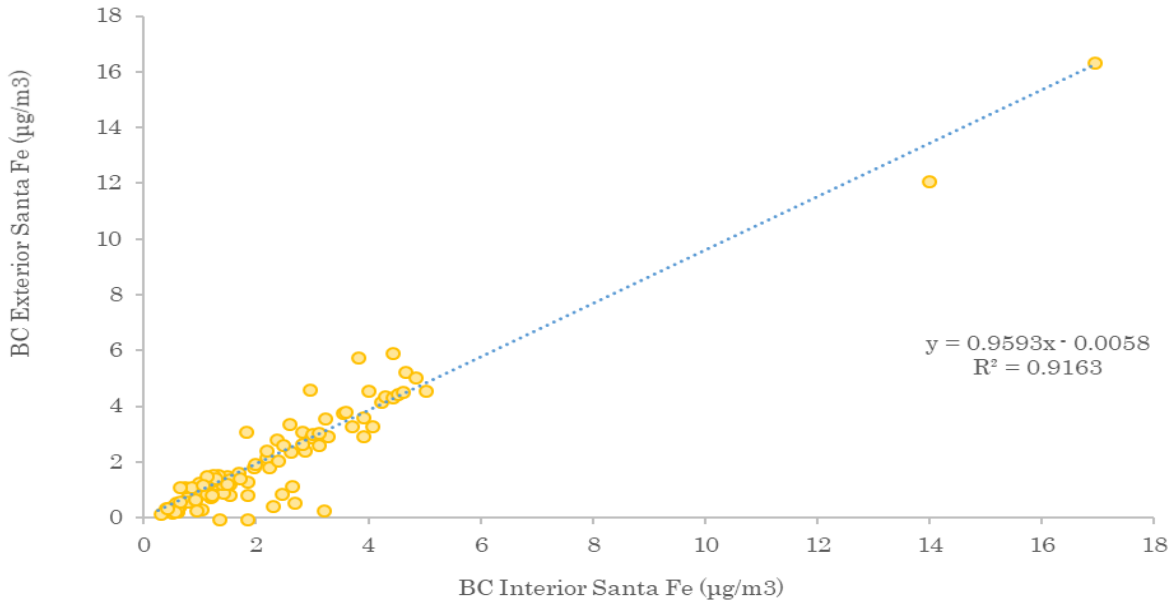


Figura 31. Gráfico de correlación en Interior y Exterior para Santa Fe.

IV.1.7. Sitio Colegio Inglés

IV.1.7.1. Serie de Tiempo en Interior

Como se observa en la serie de tiempo promedio por hora de BC en interior y exterior (Figura 36) las concentraciones obtenidas en este sitio son bajas comparadas con todos los sitios discutidos con anterioridad, en donde la menor concentración encontrada en interior fue de tan solo $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mayor de $3.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

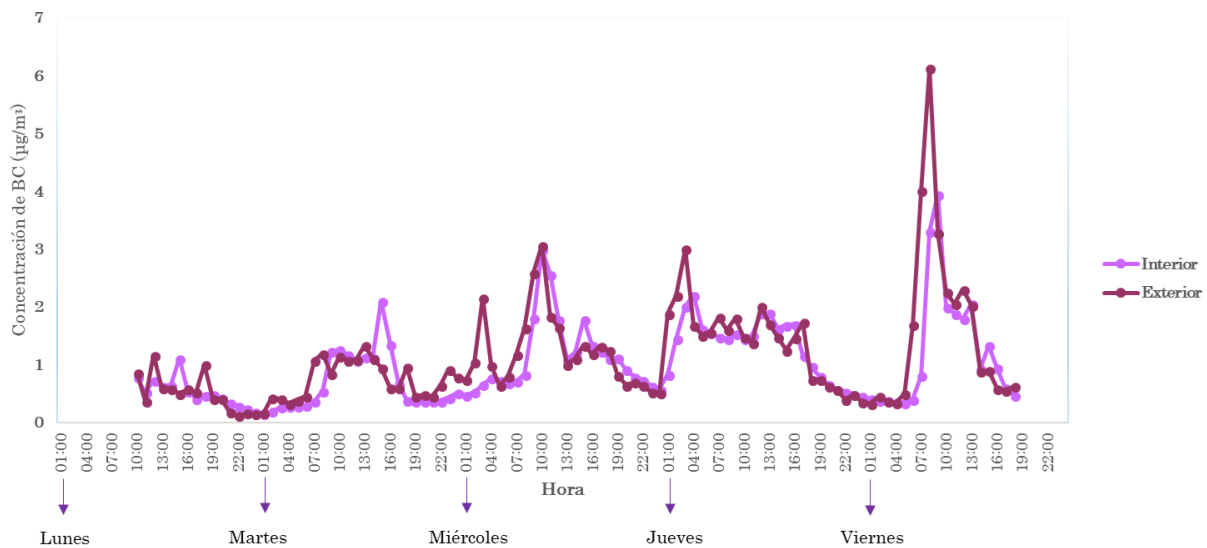


Figura 32. Serie de tiempo de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior y Exterior para Colegio Inglés.

Se pueden denotar ciertos picos en interior que sobrepasan los valores obtenidos de manera simultánea en exterior, el primero es el lunes a las 15:00 horas con un valor de $1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en exterior es de $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el día martes en el mismo horario se presentó otro pico de mayor magnitud que el anterior con un valor de $2.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en exterior se tiene un registro de tan solo $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Curiosamente este comportamiento se repitió el resto de los días hasta terminar la semana, el miércoles, jueves y viernes a las 15:00 horas en interior se registraron 1.80, 1.70 y $1.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente mientras que en exterior se obtuvieron valores de 1.35, 1.26, $0.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Estos valores son interesantes ya que se presentan exactamente en el mismo horario para todos los días de la semana y coincide con el horario de salida de los alumnos de la escuela primaria, lo que conduce a atribuir dichas concentraciones a la acumulación de tráfico vehicular por parte de los padres de familia. Algunos estacionan su carro en las calles ubicadas en los alrededores del colegio (ya que no cuenta con un estacionamiento), mientras que el resto, si no es que la mayoría de los padres utilizan un sistema en el que se forman en sus carros alrededor de la manzana donde se encuentra ubicado el edificio y los maestros encargados hacen un llamado al niño en cuestión mediante un micrófono. Muchas veces esta práctica no es adecuada ya que si un niño no se encuentra listo para salir retrasa la fila de carros que se encuentran prendidos, acumulando de esta manera una concentración de contaminantes derivados del tráfico de automóviles. Si recordamos la ubicación del sitio de muestreo en interior, es un salón de clases en el tercer piso del edificio y muy probablemente las emisiones generadas de esta acumulación de vehículos se eleven y sean más significativas a cierta altura que a nivel del piso, donde se encuentra el equipo en exterior, ya que en el interior del salón de clases no existe ninguna fuente generadora de BC.

Por otra parte, se puede observar que en ciertas ocasiones los niveles de BC en interior disminuyeron y permanecieron bajos por periodos prolongados, por ejemplo, el día martes de las 01:00 a las 08:00 horas la concentración en interior permanecía

por debajo de la registrada en exterior (aunque si mantenía el mismo comportamiento) dando así a denotar que los factores externos no estaban afectando considerablemente el interior del salón de clases probablemente debido a que en este horario es común el aumento de la humedad provenientes del océano lo cual da como resultado la disminución en las concentraciones de los contaminantes. Los valores obtenidos en interior mantuvieron un rango en la concentración de BC de 0.17 a 0.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en exterior iba desde 0.17 a 1.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual manera se vuelve a presentar esta baja de concentración en interior el martes desde las 18:00 horas hasta las 04:00 horas del miércoles, periodo de 11 horas en el cual el rango de BC fue de 0.38 a 0.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en exterior de 0.46 a 2.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ observando así rangos mucho mayores en exterior lo cual principalmente se debe a la nula actividad en el interior del salón de clases por las madrugadas y que las concentraciones encontradas en exterior no afectan significativamente las de interior ya que se encuentran puertas y ventanas cerradas, además de presentar poca actividad antropogénica en las calles en la localidad.

En el horario comprendido entre las 07:00 y las 16:00 horas se identificaron picos de mayor concentración y duración tanto en interior como exterior, atribuyéndose a que en este horario se presenta la mayor actividad antropogénica en los alrededores, la cual coincide con la entrada y salida de los alumnos de las escuelas en donde los padres de familia llevan y recogen a sus hijos en sus automóviles, actividad que es común en la delegación de Playas de Tijuana ya que mayormente es un área habitacional y escolar donde el horario de actividad en toda la zona va muy de la mano con las horas productivas de escuelas y trabajos, por lo regular después de las 19:00 horas disminuye el tráfico y actividad en las calles de esta área.

Existen otros tres picos importantes por discutir, el primero registrado el miércoles a las 10:00 horas el cual se eleva poco a poco desde las 07:00 horas hasta obtener 3.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y 3.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior. El segundo pico por discutir se ubica el jueves a las 03:00 horas con 2.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y con 3.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior, solo que esta vez el punto máximo para interior se obtuvo una hora después,

a las 04:00 horas con $2.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último, el pico más alto en toda la serie de tiempo para este sitio se obtuvo a las 08:00 horas del día viernes, registrando $3.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y $6.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior y de nuevo el punto máximo para interior se obtuvo una hora después con $3.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para exterior en este mismo horario ya comenzaba a bajar la concentración con $3.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe destacar que en las tres observaciones anteriores el alza de concentración de BC se origina en exterior ya que inicia antes debido a que el punto máximo del pico en interior se obtiene una hora después o en menor magnitud que en exterior.

IV.1.7.2. Serie de Tiempo en Exterior

Como se comentó en el apartado anterior, durante la semana de muestreo se registraron picos en exterior que después de aproximadamente una hora se ven reflejados con su punto máximo en interior y en ciertas ocasiones la concentración de BC se presenta en menor magnitud en exterior, por ejemplo, el martes a las 08:00 horas se registró un valor de $1.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior y a las 09:00 horas se ve reflejado con una concentración de $1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior. El jueves a las 03:00 horas se registra una concentración de $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior y a las 04:00 horas alcanza su punto máximo en interior con $2.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, esta vez se muestra en menor medida dentro del salón de clases. Estos horarios no coinciden con alguna actividad registrada cerca del área de muestreo, pero es importante resaltar la manera en que influyen los eventos de exterior con la calidad de aire en interior, ya que el retraso en el impacto de las concentraciones nos puede dar a entender que se originan una generación de BC en los alrededores del colegio. Cabe mencionar que las direcciones de viento con mayor frecuencia en este sitio fueron las que presentaron un componente Suroeste-Noreste (SO-NE) y Oeste-Este (O-E), como se muestra en la Figura A4.

En general, las menores concentraciones tanto en interior como en exterior para este sitio se encontraron por la noche y madrugada, aproximadamente de las 22:00 horas hasta la primera hora del día siguiente, conducta que se puede atribuir

a la casi nula actividad en las calles y a la humedad relativa que caracteriza esta zona de la ciudad, para posteriormente incrementar paulatinamente la concentración hasta las 07:00 horas que es donde se registran los picos por actividad antropogénica dando como resultado concentraciones elevadas. Esta conducta se observa en la mayoría de los días de muestreo a excepción del miércoles y jueves donde se observan dos de los cuatro picos más altos en exterior alcanzando un valor máximo de 2.17 y 3.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente ambos a las 03:00 horas lo cual probablemente se deba por el arrastre de los contaminantes en las direcciones antes mencionadas ya que como se mencionó anteriormente es casi nula la quema clandestina en la localidad y la actividad en las calles.

El día viernes se registró el pico más elevado en toda la semana de muestreo, el cual comenzó a elevar su concentración de BC a partir de las 05:00 horas, para llegar a su punto máximo a las 08:00 horas con 6.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor el cual si se compara con las concentraciones de los sitios discutidos con anterioridad es relativamente baja para ser el valor más alto. Sin duda este evento se atribuye al inicio y fin de las actividades matutinas de la localidad y que comienza a descender la concentración a partir de las 08:00 horas hasta llegar a 0.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 14:00 horas.

Por lo regular de las 06:00 a las 18:00 horas los camiones de transporte público y taxis colectivos pasan por la avenida paralela al sitio de muestreo (que está ubicada exactamente a 11.6 metros del sitio) aproximadamente cada 5 o 10 minutos, después de las 18:00 horas puede tardar hasta el doble y el último camión suele pasar a las 21:00 horas, siendo a partir de este horario ya escasos. Por la ubicación tan cercana a una de las tres avenidas principales de la localidad, el colegio recibirá gran parte de sus aportaciones de BC (si no es que todas) debido a esta constante presencia de contaminantes derivados de las combustiones de los vehículos de distintas clases y modelos.

Cabe destacar que este sitio fue donde se registraron las concentraciones de BC más bajas durante todo el proyecto, por lo cual este colegio presentó el ambiente escolar de mejor calidad de aire con respecto a los niveles de BC. Esto se atribuye

principalmente a la cercanía de la costa con respecto al sitio, en donde la brisa marina contribuye a los procesos de deposición húmeda los cuales ayudan a que sedimenten los contaminantes.

IV.1.7.3. Patrones Diurnos y Nocturnos en Interior

En la Figura 25 se muestra el patrón diurno y nocturno en interior para este sitio de muestreo, que es el último a discutir y como se ha venido mencionando a lo largo de los apartados anteriores es donde se encontraron menores niveles de BC.

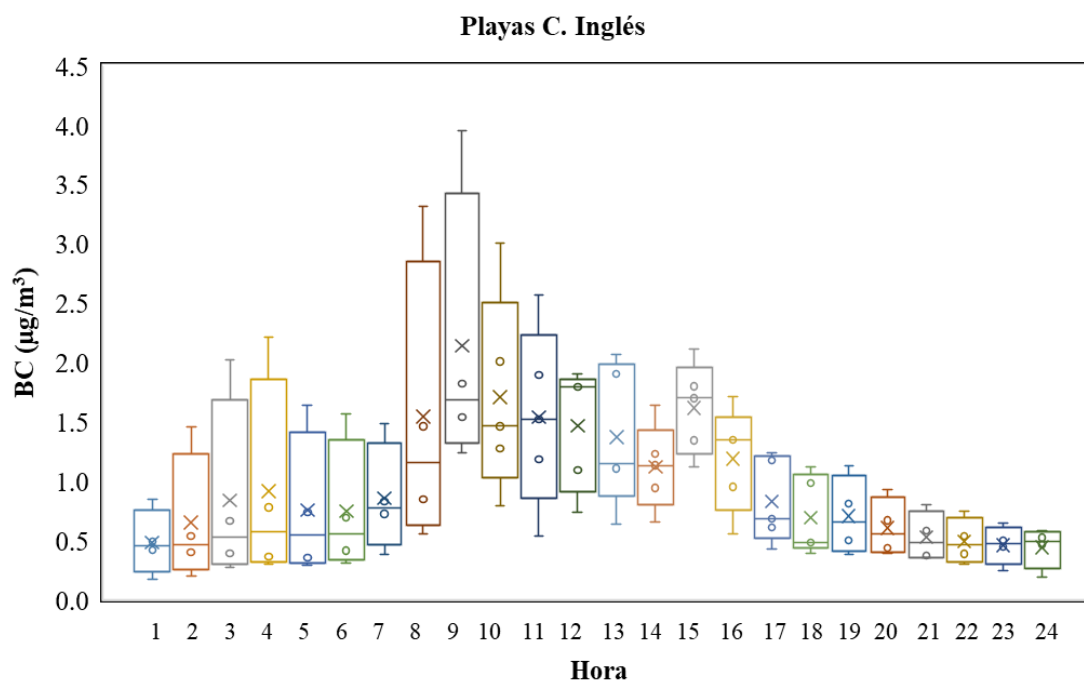


Figura 33. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Interior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Colegio Inglés (3-7 de abril).

En cuanto al comportamiento diurno en interior, que comienza a las 06:00 horas se obtuvo una concentración de 0.75 (0.55) µg/m³ elevándose poco a poco hasta 2.14 (1.68) µg/m³ a las 09:00 horas, que resultó ser la caja con observaciones más elevadas de BC y visiblemente una de las más amplias, este periodo atribuido sin duda al inicio de las actividades en las calles y su respectivo punto máximo derivado específicamente de la entrada de los alumnos al salón de clases y la acumulación de

carros pertenecientes a los padres de familia en los alrededores. Después a las 10:00 horas comienza a observarse un descenso en los valores promedio de BC partiendo con 1.71 (1.46) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta llegar a 1.12 (1.13) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 14:00 horas, periodo en el cual aún se observan cajas un tanto dispersas, pero con valores de BC menores.

Para las 15:00 horas se vuelven a elevar las concentraciones observándose una caja con una dispersión similar a la presentada en la hora anterior, pero con mayores concentraciones, recordando que en este horario se mostró un comportamiento similar para los cinco días de muestreo, donde se puede reflejar la salida de los alumnos del salón de clases con un alza de BC en este mismo horario. A partir de este punto, el resto de las horas correspondientes al patrón diurno se muestran en descenso con respecto a la concentración de BC, comenzando a las 16:00 horas con 1.19 (1.35) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ llegando hasta un valor de tan solo 0.61 (0.55) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 20:00 horas. Esto se argumenta en base a que ya que no existe actividad dentro del salón de clases ni de las instalaciones de colegio e incluso se comienzan a dar por terminadas las actividades del día para las personas que viven en los alrededores y por consecuente existe muy poca actividad en las calles por parte de las fuentes generadoras de BC.

En cuanto al patrón nocturno en interior se observa que a las 21:00 horas la concentración de BC se encuentra en 0.53 (0.48) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a lo largo de las horas restantes logra disminuir poco a poco hasta 0.44 (0.49) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 24:00 horas y que de igual manera en la Tabla BI se puede visualizar que es la menor concentración promedio para este sitio de muestreo en interior, esto gracias a la nula actividad dentro del salón de clases, y condiciones meteorológicas que caracterizan la localidad de Playas de Tijuana que favorecen la buena dispersión de contaminantes.

Justo a partir de las 24:00 horas vemos que los niveles vuelven a subir, a las 01:00 horas se tiene una concentración de 0.48 (0.45) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aumentando poco a poco hasta 0.75 (0.54) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas, niveles que probablemente se originen por actividades en la madrugada que no pudimos identificar.

IV.1.7.4. Patrones Diurnos y Nocturnos en Exterior

En la Figura 38 se muestra la gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en exterior para este sitio de muestreo, donde el patrón diurno se parte a las 06:00 horas con 1.14 (1.19) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, disminuye ligeramente a las 07:00 horas con 2.03 (1.51) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para volverse a elevar con 2.65 (1.63) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08:00 horas, alcanzando en este horario el punto máximo con la caja más amplia del gráfico y de igual manera mayor concentración, lo cual a diferencia de los valores obtenidos en interior este punto máximo se obtuvo a las 09:00 horas. En este horario se puede notar una gran dispersión de las cajas lo que conlleva a relacionarse con la actividad vehicular localizada en los alrededores del sitio de muestreo, además de ser el horario en el que mayor actividad de transporte público a base de diésel hay.

A las 10:00 horas se tiene un valor de 1.77 (1.49) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y va disminuyendo considerablemente (aunque con algunos altibajos) hasta obtener un valor mínimo de 0.90 (0.61) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00 horas, periodo en el que se logra ver un descenso de concentraciones y de igual manera va disminuyendo la dispersión de las cajas pese a ser el horario en el que se presenta la salida de los niños de la escuela primaria, donde a diferencia del interior del salón de clases estos niveles de BC se presentan en mayor proporción.

Para terminar el patrón diurno se muestra un descenso en el resto de las observaciones empezando con 0.93 (0.97) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 18:00 horas hasta 0.55 (0.57) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 20:00 horas, donde además la caja correspondiente a este horario se puede notar que tiene el rango intercuartílico más estrecho para las 24 observaciones, demostrando que para los cinco días de muestreo en este horario siempre se obtuvieron valores bajos y muy similares.

Para el patrón nocturno, que comienza a las 21:00 horas se tiene una concentración de 0.49 (0.52) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 22:00 desciende con 0.46 (0.53) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para posteriormente elevarse a 0.54 (0.52) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 23:00 y tener una pequeña interferencia de concentración baja a las 24:00 horas con 0.46 (0.45) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y

nuevamente sigue con la tendencia a elevarse a las 01:00 horas donde se registra un valor de 0.79 (0.55) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pero a diferencia de las últimas horas del día, aquí las cajas se muestran mucho más amplias al igual que los valores registrados. A las 02:00 horas se tiene un valor de 1.04 (0.76) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 03:00 horas de 1.50 (1.30) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que probablemente pudieron haber quedado remanentes (concentración acumulada) de la noche anterior y se ven reflejados en este periodo o fueron derivados del arrastre de contaminantes que llegan a la costa. Para las dos horas restantes se muestra un ligero descenso en la concentración de BC con 0.85 (0.67) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04:00 horas y por último de 0.77 (0.58) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 05:00 horas para posteriormente elevarse como se comentó anteriormente en el patrón diurno.

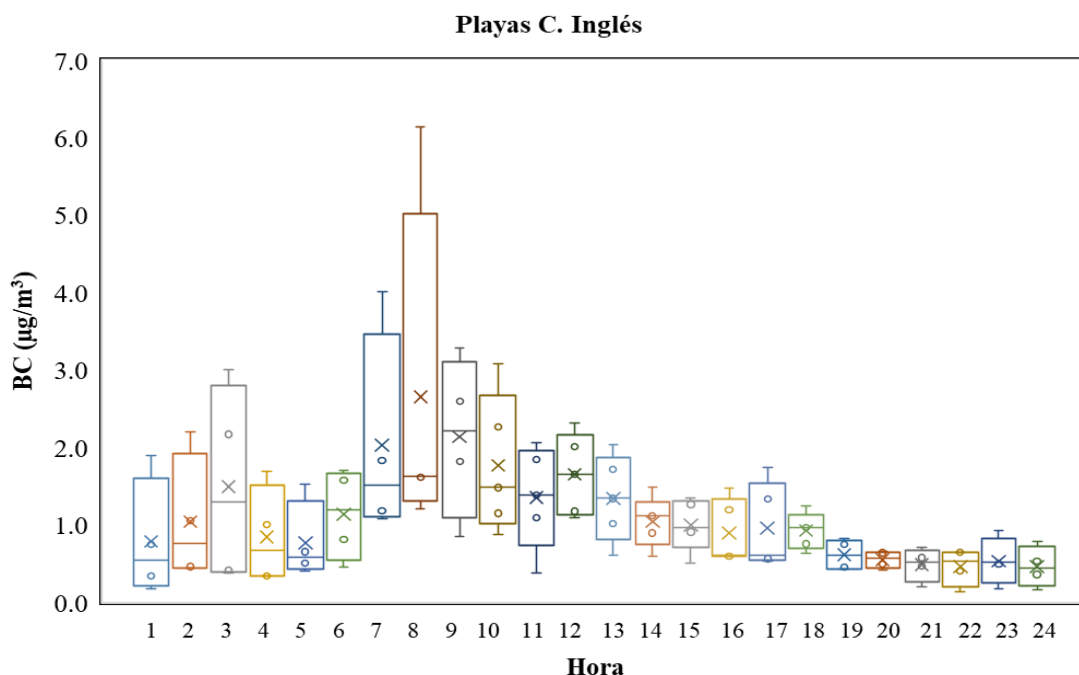


Figura 34. Gráfica de caja y bigote (Box plot) de las concentraciones de BC promedio por hora en Exterior (La cruz representan el promedio; las líneas y cajas son el 10, 25, 50, 75, 90 % de los cuartiles), en Colegio Inglés (3-7 de abril).

IV.1.7.5. Correlaciones de BC en Interior y Exterior

Los niveles encontrados en este sitio de muestreo fueron los más bajos durante el presente estudio reconociendo de esta manera la buena calidad de aire que se presenta en la localidad de Playas de Tijuana, pensó a esto, como se muestra en la

Figura 39 y en la Tabla BIV el valor del coeficiente de determinación (r^2) en esta estación no fue muy buena, obteniendo un valor de r^2 de tan solo 0.59, denotando así que existen diferencias entre los resultados obtenidos y la manera en que los contaminantes impactan tanto el interior como el exterior del Colegio Inglés.

De igual manera en la Tabla BIV se puede encontrar el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) para los niveles de BC en interior y exterior obteniendo un resultado de 0.818 ($p < 0.05$), lo cual presenta una muy buena correlación y nivel de significancia en las dos variantes en cuestión, lo cual se puede interpretar que las tendencias en las concentraciones de BC en interior y exterior presentan el mismo comportamiento.

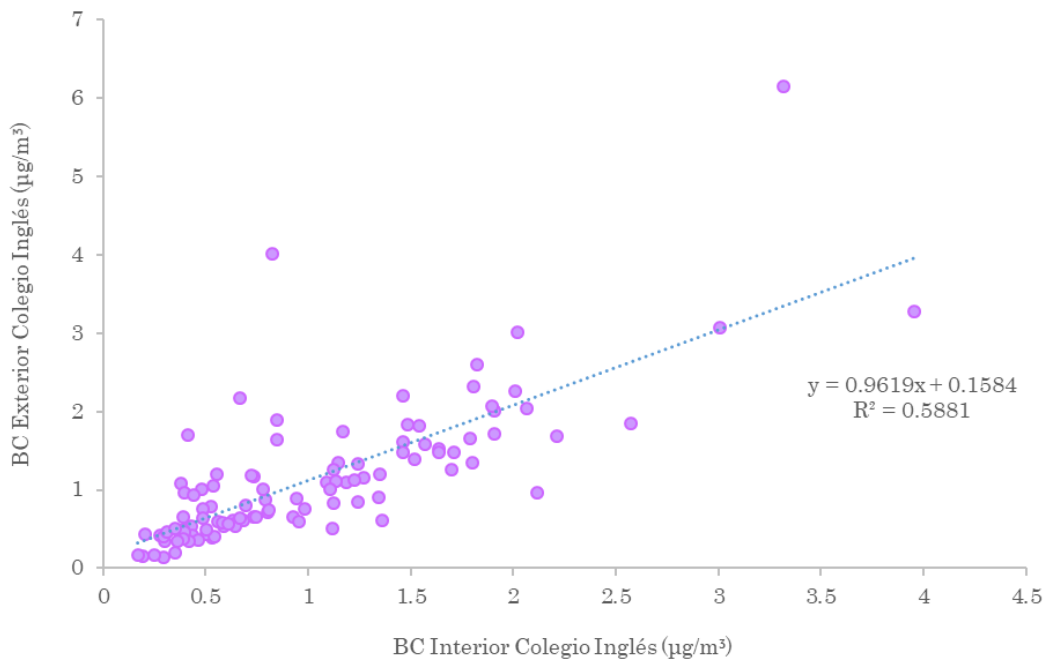


Figura 35. Gráfico de correlación en Interior y Exterior para Colegio Inglés.

IV.1.8. Comparación con otros estudios

Como se ha venido mencionado, BC es un contaminante que cada vez se investiga más a fondo debido a sus efectos tanto en el medio ambiente como en la salud de las personas.

A pesar de que a lo largo de este proyecto se abordan términos de “concentraciones elevadas o bajas” los niveles encontrados en exterior pueden verse menores si se comparan con otras ciudades, como por ejemplo en Nueva Delhi- India en donde se realizó un estudio dentro de un triciclo motorizado (vehículo típico de la zona) haciendo un recorrido de aproximadamente 19 km obteniéndose una concentración promedio de $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y también se analizó una estación fija donde obtuvieron una concentración promedio de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Apte et al., 2011).

Varias investigaciones en donde se cuantifican los niveles de BC en interior y exterior, al igual que el presente trabajo, se centran en dar a conocer los niveles de BC a los que se encuentran expuestos niños y jóvenes dentro y fuera de escuelas. En Barcelona, España se realizó un estudio a 39 escuelas de nivel primaria donde el valor promedio en interior para todos los establecimientos fue de $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en exterior de $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con concentraciones entre 30-35% más altas para sitios cercanos a avenidas con alto tráfico vehicular (Reche et al., 2015), siendo estos ligeramente mayores que en Colegio Inglés ya que se obtuvieron valores de 1.01 y $1.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y exterior respectivamente.

En Hong Kong se realizó un estudio a 5 escuelas de nivel preescolar donde se encontraron concentraciones promedio de $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con rangos de $0.95\text{-}6.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y en exterior una concentración promedio de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con rangos de $0.88\text{-}3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Deng et al., 2016) las cuales pueden ser comparables, pero aun así mayores que las concentraciones obtenidas en Santa Fe ya que presentaron promedios de $1.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y $1.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior, pero con rangos mucho más amplios derivados de ciertos eventos esporádicos como la quema de biomasa.

En Seúl, Corea se realizó un estudio donde 40 niños entre 10-12 años portaron un microAethalometro de la misma marca y modelo utilizado en este estudio en donde se monitorearon los niveles de BC, así como las actividades diarias y factores que pudieran influenciar estas concentraciones, obteniéndose un valor promedio general de $1.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el periodo en el que los niños se encontraban en horario escolar el valor promedio encontrado fue de $2.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jeong et al, 2017). Si se compara este último valor con los niveles encontrados en Colegio Inglés durante las horas en que los niños estaban dentro del salón (horario de 07:00-15:00 horas excluyendo hora de descanso; 11:00-12:00) el valor promedio obtenido es de $1.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual está por debajo del encontrado en Corea. Sin embargo, la concentración de BC encontrada en Kinder 15 de septiembre correspondiente al mismo horario anteriormente mencionado es de $3.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ quedando por encima de los niveles de Corea.

Buonanno et al. (2013) monitoreo los niveles de BC en escuelas primaria de Cassino, Italia obteniendo rangos de $1.9\text{-}13.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en interior y de $3.2\text{-}16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en exterior, estos pueden ser comparables, con los sitios de Kinder 15 de Septiembre y Santa Fe (como se muestra en la Tabla BIII).

Haciendo una retrospectiva sobre la calidad de aire en exterior que se presenta en la Ciudad de Tijuana, en un estudio realizados por Shores et al. (2012) en el año 2010 se obtuvieron promedios de $2.2 \pm 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el Parque Morelos (ubicado al este de la ciudad), $0.8 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Otay Mesa (en territorio Estadounidense, muy cerca de la Garita de Otay), UTT con $1.9 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (al este de la ciudad) y en el Museo el Trompo con $1.7 \pm 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (al centro de la ciudad), los cuales son menores con el valor promedio obtenido en el kínder 15 de Septiembre.

Takahama et al. (2013) realizó un estudio durante la campaña de CAL-MEX en diferentes puntos de San Diego y Tijuana cercanos a la garita de Otay (representando al norte y sur de la garita respectivamente), en donde se obtuvieron concentraciones de BC más elevadas para todos los sitios muestreados en Tijuana en contraste con los de San Diego ($1.8 \pm 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Parque Morelos y $2.6 \pm 9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$

en promedio para los demás sitios, entre ellos UABC) y al igual que las concentraciones promedio reportadas por Shores et al. (2012) los valores pueden ser comparables con los obtenidos para el exterior de UABC en el presente estudio. De igual manera reporta que las corrientes de aire que llegan a las regiones cercanas al Parque Morelos son principalmente del noroeste.

Otro estudio se realizó cerca de la garita de San Ysidro por Quintana et al. (2014) el cual arrojó un resultado de concentración más alta para el área cerca de este Puerto de Entrada en donde la acumulación de tráfico es mayor con un valor de 2.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por el contrario, para dos sitios ubicados al norte del Puerto de Entrada (a una distancia más lejana) presentaron concentraciones de 1.7 y 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual forma, en este estudio se realizó el análisis en diferentes estaciones del año y se encontraron niveles más elevados en los meses donde se caracterizan por un clima frío.

V. Conclusiones y recomendaciones

A pesar de las limitantes que se presentaron durante este proyecto como lo es la falta de datos meteorológicos consistentes o no haber realizado los cuatro muestreos de manera simultánea, gracias a los valores obtenidos nos podemos dar una idea muy clara de la calidad del aire actualmente en diferentes puntos de la ciudad de Tijuana, donde UABC presentó los mayores niveles de contaminación intramuros debido a los procesos de combustión presentes en el sitio haciendo de este un establecimiento crítico para la salud de las personas que lo frecuentan y principalmente para los trabajadores que pasan la mayor parte de su día ahí. En segundo lugar, se tiene el Kinder 15 de Septiembre donde las concentraciones obtenidas son derivadas de fuentes de emisión externas producidas por actividades de quema clandestina en áreas abiertas no urbanizadas cerca del sitio y tráfico vehicular, convirtiéndolo de igual manera en un foco rojo para la salud de los niños ya que principalmente a esa edad se encuentran más susceptibles a los efectos adversos de los contaminantes en el aire.

Los sitios restantes que corresponden a Santa Fe y Colegio Ingles obtuvieron menores concentraciones de BC concluyendo que gracias a estar ubicados viento arriba con respecto a la dirección predominante del viento y además de que se encuentran a una distancia muy corta de la costa del Océano Pacífico, se ven favorecidos con diferentes comportamientos en su dispersión y deposición de contaminantes. La pequeña diferencia en los niveles de BC mostrados en estos sitios se debe a que, en el caso de Santa Fe, se presenta una mayor actividad de tráfico vehicular tanto local como de camiones de carga y la usual quema de biomasa en los alrededores. Por el contrario, la zona en donde se ubica el Colegio Inglés no presenta una actividad antropogénica tan dinámica, en donde las fuentes de emisión que afectan a este sitio son únicamente de tráfico local presentándose esporádicamente.

De esta manera se puede confirmar que los cuatro sitios en cuestión cumplen con la hipótesis inicialmente planteada, donde los niveles de contaminación dentro de instalaciones cerradas suelen ser comparables o mayores respecto a los niveles en

exterior lo cual depende principalmente de las condiciones de ventilación presentes, influencia de emisiones exteriores y actividades generadoras de BC en el interior del sitio.

En cuanto a los niveles encontrados en exterior el orden de los sitios en cuanto a los mayores niveles de BC identificados obedece a su ubicación en la cuenca atmosférica de Tijuana con respecto a la dirección predominante del viento (Noroeste-Sureste), siendo el Kinder 15 de Septiembre el mayormente impactado, atribuyéndose principalmente a su ubicación geográfica, ya que al estar ubicado este sitio en dirección viento abajo en la cuenca atmosférica, éste se ve afectado por las emisiones transportadas desde zonas ubicadas al norte y oeste de Tijuana, además de presentar alto tráfico vehicular, en especial de camiones y vehículos pesados a diésel.

Después le sigue UABC obteniendo niveles más bajos con respecto a la calidad del aire en exterior en el kínder 15 de septiembre, pero no deja de ser una zona urbana con alto tráfico vehicular y ciertos parques industriales cercanos al sitio, además del aeropuerto como fuentes importantes de contaminación. Por último y al igual que en interior se tiene a Santa Fe y Colegio Inglés, los cuales como ya se ha mencionado se ven favorecidos debido a su cercanía a la costa y baja actividad antropogénica con niveles de BC menores y por consiguiente una mejor calidad de aire.

En cuanto a las comparaciones de los niveles de BC en interior y exterior en cada uno de los sitios, solo UABC presento niveles muy elevados en interior con respecto a los niveles en exterior por las actividades que se realizan dentro de la cafetería las cuales podrían representar un problema de salud ocupacional para los trabajadores como ya se discutió en los apartados anteriores.

Como se ha discutido a lo largo de este proyecto, las emisiones de BC se viven día con día en nuestros alrededores y a pesar de ser un contaminante atmosférico con apenas unos años de investigación, reforzar, investigar y difundir la importancia de este es esencial para prevenir enfermedades tanto cardiovasculares como respiratorias en diferentes sectores de la población. Tijuana es una ciudad sobrepoblada y que aun así se encuentra en constante crecimiento demográfico que

conlleve impactos difíciles de contrarrestar en el medio ambiente y por ende en la salud de la población.

Es importante crear conciencia empezando de manera individual para después poder compartir el conocimiento y crear un impacto mayor. Definitivamente la contaminación atmosférica la creamos todos y de todos debería de ser la tarea de crear cambios para mejorar la calidad de vida en el planeta. Acciones tan simples que realizamos día con día y que probablemente no tengan una generación directa de emisiones a la atmósfera en realidad causan un impacto, ya que toda acción o materia conlleve un ciclo que eventualmente tendrá un punto final, dejando a su paso pequeñas aportaciones adversas o que dañan el medio ambiente.

Lamentablemente en el mundo hay mucha pobreza y comunidades rurales aún se ven en la necesidad de cocinar con madera o sistemas de combustión poco eficientes, muchas veces se realiza esta práctica dentro de sus hogares y con poca ventilación ignorando el daño que se están causando, además existen muchas culturas alrededor del mundo que por tradición no dejan de realizar estas prácticas. En este punto nos topamos con un problema social y gubernamental que debería ser responsabilidad de los departamentos de salud y medio ambiente de cada país el tomar iniciativas y fomentar la investigación en estos temas, difundirla, crear conciencia y proponer cambios de mejora para contrarrestar los efectos que crean estas prácticas tan comunes alrededor de todo el mundo. Actualmente existe la Alianza Global para Estufas Limpias que tiene como objetivo la implementación de estufas y combustibles más eficientes disminuyendo los impactos en la salud, medio ambiente y calentamiento global. Afortunadamente México presenta objetivos en el Plan Nacional contra el Cambio Climático 2013-2018 de reducir emisiones de gases de efecto invernadero mediante la sustitución de fogones abiertos por estufas ahorradoras de leña en viviendas ubicadas en territorios con marginación y pobreza, sin embargo, siempre habrá nuevos temas que abordar y dar seguimiento.

En este proyecto la mayoría de los valores elevados encontrados de BC fueron atribuidos al tráfico vehicular, por lo cual se requieren medidas más estrictas por

parte de las autoridades para controlar estas emisiones mediante programas de control con parámetros adecuados, además de crear conciencia y exhortar a los padres de familia a que le den mantenimiento a sus vehículos, los cuales utilizan para llevar a sus hijos a la escuela o, si es posible, los utilicen lo menos posible ya sea llevándolos a pie o poniéndose de acuerdo entre ellos para que uno de los padres de familia recoja a varios de los niños y los lleven en un solo carro (carro comunitario, por llamarlo de alguna manera).

En cuanto al interior de instalaciones cerradas se recomienda tomar medidas por parte de la comunidad presente (estudiantes, maestros, miembros de una familia, compañeros de oficina etc.) para mantener una buena ventilación cuando existan actividades de cocina, limpieza o fumar para evitar que los contaminantes queden atrapados. De igual manera cuando las temperaturas desciendan o se generen quemadas de biomasa es recomendable mantener cerradas puertas y ventanas para que favorezcan la calidad de aire en interior. Por otra parte, como fue demostrado por Liu et al. (2018), establecer un sistema de filtración de aire en el interior del hogar puede mejorar la calidad de este hasta en un 35.3%, lo cual es una alternativa muy viable para prevenir enfermedades cardiovasculares principalmente en población en edades vulnerables.

Por último, cabe mencionar la importancia de tener al alcance más información sobre este contaminante, por lo cual se requieren más estudios como el presente, en diferentes zonas, estaciones del año, mayores tiempos de muestreo, condiciones meteorológicas variadas y monitoreadas. De esta manera poco a poco se podrá comprender y dar mayores propuestas de mejora en cuanto a la prevención de la salud poblacional y mitigación de impactos adversos al medio ambiente.

VI. Referencias

1. Aethlabs. San Francisco mobile black carbon sensors. www.aethlabs.com
2. Alexander D.T.L., Crozier P.A., and Anderson J.R. (2008). Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties. *Science*, 321, 833-836.
3. Andreae M., Gelencsér A. (2006). Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3131-3148.
4. Apte J., Kirchstetter T., Reich A., Deshpande S., Kaushik G., Chel A., Marshall J., Nazaroff W. (2011). Concentrations of fine, ultrafine, and black carbon particles in auto-rickshaws in New Delhi, India. *Atmospheric Environment*.
5. Bachmann J. (2009). *Black Carbon: A Science/Policy Primer*. Pew Center on Global Climate Change, Vision Air Consulting, LLC. Arlington, VA.
6. Baumgartner J., Zhang Y., Schauer J., Huang W., Wang Y., Ezzati M. (2013). Highway proximity and black carbon from cookstoves as a risk factor for higher blood pressure in rural China.
7. Bergstrom R., Russell P., Hignett P. (2000). On the Wavelength Dependence of the Absorption of Black Carbon Particles: Predictions and Results from the TARFOX Experiment and Implications for the Aerosol Single Scattering Albedo
8. Bond T.C. (2001). Spectral dependence of visible light absorption by carbonaceous particles emitted from coal combustion. *Geophysical Research Letters*, 28, 21.
9. Bice K., Eil A., Habib B., Heijmans P., Kopp R., Nogues J., Norcross F., Hamilton M., Whitworth A. (2009). *Black carbon. A Review and Policy Recommendations*.
10. Bond T.C., Sun H.L. (2005). Can reducing BC emissions counteract global warming? *Environmental Science & Technology*, 39, 16.
11. Bruce N., Perez-Padilla R., and Albalak R. (2000). Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge for

- the new millennium. *Bulletin of the World Health Organization*, 78, 9, 1078-1092.
12. Brown A. C. (2013). *Health Effects of Particulates and Black Carbon*. U.S. EPA Transport and Clean Air Seminar.
 13. Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Russi A. (2013). Children exposure assessment to ultrafine particles and black carbon: The role of transport and cooking activities. *Atmospheric Environment*.
 14. Campos I. (2000). *Saneamiento Ambiental*. Primera edición UNED.
 15. Castells X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Diaz de Santos. Madrid
 16. Centro de Información Tecnológica (CIT), Chile. (1998). *Información tecnológica* Vol. 9 No. 5.
 17. Contreras A., Molero M. (2011). *Ciencia y tecnología del medioambiente*. Edición digital, Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid.
 18. Crowe C. (2006). *Multiphase Flow Handbook*. Taylor & Francis Group. 14-109.
 19. Cruz X., Villers L., Gay C. (2014). Black carbon and organic carbon emissions from wildfires in Mexico. *Centro de ciencias de la atmósfera*. Universidad Nacional Autónoma de México.
 20. Daia X., Boutton T., Glaser B., Ansley R., Zech W. (2005). Black Carbon in a temperature mixed-grass savanna. *Soil Biology & Biochemistry*.
 21. Decesari S., Facchini M., Matta E., Mircea M., Fuzzi S., Chughtai A., Smith D. (2002). Water soluble organic compounds formed by oxidation of soot. *Atmospheric Environment* 36 (2002) 1827–1832.
 22. Deng W., Zheng H., Tsui A., Chen X. (2016). Measurement and health risk assessment of PM_{2.5}, flame retardants, carbonyls and black carbon in indoor and outdoor air in kindergartens in Hong Kong. *Environment International*.
 23. EPA. (2002). *Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust 2002*
 24. EPA. (2010). *Report to Congress on Black Carbon* Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act. EPA-450/R-12-001.

25. EPA. (2016). Methane and Black Carbon Impacts on the Arctic: Communicating the Science.
26. Ezzati M., Rodgers A., Lopez A.D., Hoorn S.V., and Murray C.J.L. (2004). Mortality and burden of disease attributable to individual risk factors. In Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Due to Selected Major Risk Factors, M. Ezzati, A.D. Lopez, A. Rodgers, and C.J.L. Murray, eds., World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2141-2166.
27. Garshick E., Grady S., Hart J., Coull B., Schwartz J., Laden F., Moy M., Koutrakis P. (2018). Indoor black carbon and biomarkers of systemic inflammation and endothelial activation in COPD patients.
28. Gelencsér A. (2004). Carbonaceous Aerosol. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer. Volume 30.
29. Godoi R., Carneiro B., Paralovo S., Campos V., Tavares T., Evangelista H., Van Grieken R., Godoi A. (2013). Indoor air quality of a museum in a subtropical climate: The Oscar Niemeyer museum in Curitiba, Brazil. Science of the Total Environment.
30. Goldber, E.D. (1985). Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution. Wiley, New York, NY, USA, p.198.
31. Greenpeace. (2010). México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación.
32. Guardino X., Obiols J., Rosell M., Farran A, Serra C. (1998). Determination of chlorpyrifos in air, leaves and soil from a greenhouse by gas-chromatography with nitrogen-phosphorus detection, high-performance liquid chromatography and capillary electrophoresis.
33. Grijalbo L. (2016). Elaboración de inventarios de focos contaminantes. UF1941. Editorial tutor formación.
34. Gobierno del Estado de Baja California, Secretaría de Planeación y Finanzas, Secretaría de Protección al Ambiente, Dirección de Gestión Ambiental,

- Departamento de Prevención de la Contaminación (2009). Número de Oficio SPA-TIJ-1752/09, 2009. Padrón de Vehículos, Ejercicio Fiscal 2009.
35. Hansen, A.D.A. (2005). The Aethalometer Operating Manual. Magee Scientific Company. Berkeley, California, USA. https://www.psi.ch/catcos/ProjectDetailCatcosOperationsEN/Aethalometer_book_2005.07.02.pdf
 36. Hidy G. (1972). Los vientos. Los orígenes y el comportamiento del movimiento atmosférico. National Center for Atmospheric Research. Editorial Reverté Mexican.
 37. Ideals Vuelos. <http://vuelos.idealos.es/aeropuerto/Tijuana-TIJ/#datos>
 38. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Dirección de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional (DGICUR) Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire (DICA). (2011). Estudio de emisiones y actividad vehicular en baja california, México.
 39. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Estudio de Emisiones y Actividad Vehicular en Baja california, México. www.inecc.gob.mx.
 40. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; INEGI. (2010). “Resultados del Censo de población y vivienda 2010”. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/>, http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=27770.
 41. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; INEGI, (2015). <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/>
 42. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; INEGI, (2015). Vehículos de motor registrados en circulación <http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>
 43. International Energy Agency. (2010). Energy poverty: how to make modern energy access universal.

44. Japar S.M., Szkarlat A.C., Pierson W.R. (1984). The determination of the optical properties of airborne particle emissions from diesel vehicles. *Science of the Total Environment*, 36, 121-130.
45. Jansen K.L., Larson T., Koenig J., Mar T., Fields C, Stewart J, Lippmann M. (2011). Associations between health effects and particulate matter and black carbon in subjects with respiratory disease. *Environ. Health Perspect.* 113 (12), 1741-1746.
46. Jeong H., Park D. Characteristics of elementary school children's daily exposure to black carbon (BC) in Korea (2017).
47. Johnson K., Zuberi B., Molina L., Molina M., Iedema M., Cowin J., Gaspar D., Wang C. Laskin A. (2005). Processing of soot in an urban environment: case study from the Mexico City Metropolitan Area.
48. Johnson K., De Foy B., Zuberi B. (2006). Aerosol composition and source apportionment in the Mexico City metropolitan area with PIXE/PESA/STIM and multivariate analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
49. Kholod N., Evans M. (2015). Reducing black carbon emissions from diesel vehicles in Russia: An assessment and policy recommendations. *Journal of [Environmental Science & Policy](#)*.
50. Kholod N., Evans M., Gusev E., Yu S., Malyshev V., Tretyakova S., Barinov A. (2016). A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk.
51. Kozawa K., Fruin S., Winer A. (2009). Near-road air pollution impacts of goods movement in communities adjacent to the Ports of Los Angeles and Long Beach.
52. La Jornada. (2009). *Sociedad y Justicia*, p. 34, publicado el 5 de enero de 2009.
53. Lamarque J., Bond T., Eyring V., Granier C, Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Owen B., Schultz M.G., Shindell D., Smith S., Stehfest E., Aardenne J., Cooper O., Kainuma M., Mahowald N., McConnell J., Naik V., Rishi K., and Vuuren D.P. (2010). Historical (1850-2000) gridded anthropogenic

and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application.

54. LaRosa L., Buckley T., Wallace L. (2011). Real-Time Indoor and Outdoor Measurements of Black Carbon in an Occupied House: An Examination of Sources. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
55. Li B., Lei X., Xiu G., Gao C., Gao S., Qian N. (2015). Personal exposure to black carbon during commuting in peak and off-peak hours in Shanghai.
56. Liu S., Chen J., Zhao Q., Song X., Shao D., Meliefste K., Dud Y., Wang J., Wang M., Wang T., Feng B., Wu R., Xu H., He B., Brunekreef B., Huang W. (2018). Cardiovascular benefits of short-term indoor air filtration intervention in elderly living in Beijing: An extended analysis of BIAPSY study.
57. Loupa G., Zarogianni A., Karali D., Kosmadakis J., Rapsomanikis S. (2016). Indoor/outdoor PM_{2.5} elemental composition and organic fraction medications, in a Greek hospital. *Science of the Total Environment*.
58. Lozada H. (2006). Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión.
59. Manahan S. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Primera edición, Reverté.
60. Marley N., Gaffney J., Tackett M., Sturchio N., Heraty L., Martinez N., Hardy K., Marchany-Rivera A., Guilderson T., MacMillan A., Steelman K. (2009). The impact of biogenic carbon sources on aerosol absorption in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* (9), 1537–1549.
61. Martin W.J., II, Glass R.I., Balbus J.M., and Collins F.S. (2011) A Major Environmental Cause of Death. *Science*, 334, 6053, 180-181.
62. Martínez E., Mera Y. (2004). *Contaminación atmosférica*. Colección ciencia y técnica 45, ediciones de la Universidad de Castilla- La Mancha.
63. McCracken J.P., Smith K.R., Díaz A., Mittleman M.A., and Schwartz J. (2007) Chimney stove intervention to reduce longterm wood smoke exposure lowers blood pressure among Guatemalan women. *Environmental Health Perspectives*, 115, 7, 996-1001.

64. Molina Center for Energy and the Environment; MCE2. (2011). Estudio de Caso de la Contaminación en la Cuenca Atmosférica Mexicali-Imperial Valley. Convenio No. INE/PS-028/2011 Informe Final.
65. Montoya L., Barraza F., Jorquera H., Valdivia G. (2014). Indoor PM_{2.5} in Santiago, Chile, spring 2012: Source apportionment and outdoor contributions. Atmospheric Environment.
66. Morales R. (2006). Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Universidad de Chile-Centro de Química Ambiental, Facultad de Ciencias. Primera Edición.
67. Morawska L., Salthammer T. (2003). Indoor Environment: Airborne Particles and Settled Dust. Center for Medical, Health and Environmental Physics, 61-62.
68. Ngo N., Bao X., Zhong N. (2018). Local pollutants go global: The impacts of intercontinental air pollution from China on air quality and morbidity in California. Environmental Research. Volume 165, August 2018, Pages 473-483.
69. Ngo N., Zhong N., Bao X. (2018). The effects of transboundary air pollution following major events in China on air quality in the U.S.: Evidence from Chinese New Year and sandstorms. Journal of Environmental Management Volume 212. Pages 169-175.
70. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. (2014). Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014
71. Novakov T. and Corrigan C.E. (1995). Influence of sample composition on aerosol organic and black carbon determinations.
72. Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. http://www.who.int/phe/health_topics/AQG_spanish.pdf

73. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2008). Indoor air pollution, Children's Health and the Environment.
74. Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2005). Curso de auto instrucción: Conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire.
75. Orozco C., Pérez A., González M., Rodríguez F., Alfayete J. (2003). Contaminación ambiental: una visión desde la química. Paraninfo.
76. Orozco-Levi M., Garcia-Aymerich J., Villar J., Ramirez-Sarmiento A., Anto J.M., and Gea J. (2006). Wood smoke exposure and risk of chronic obstructive pulmonary disease. *European Respiratory Journal*, 27, 3.
77. Penner J., Lister D., Griggs D., Dokken D., McFarland M. (1999). Aviation and the global atmosphere. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Prepared in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.
78. Pope III, C. A., et al. (2002), Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *Journal of American Medical Association*, 287(9), 1132-1141.
79. Programa *para* Mejorar la Calidad *del* Aire, de la zona *metropolitana* de Tijuana, Tecate y Playas de Rosarito 2012-2020. Gobierno del Estado.
80. Puigcerver M., Carrascal M. (2008). El medio atmosférico: meteorología y contaminación, Universidad de Barcelona.
81. Quintana P., Dumbauld J., Garnica L., Zohir M., Velascosoltero J., Mota-Raigoza A., Flores D., Rodríguez E., Panagon N., Gamble J, Irby T., Tran C., Elder J., Galaviz V., Hoffman L., Zavala M., Molina L. (2014). Traffic-related air pollution in the community of San Ysidro, CA, in relation to northbound vehicle wait times at the US-Mexico border Port of Entry.
82. Quintana P., Khalighi M., Castillo E., Patel Z., Guerrero J., Martinez P., Bryden M., Mantz A. (2017). Traffic pollutants measured inside vehicles waiting in line at a major US-Mexico Port of Entry.

83. Reche C., Rivas I., Pandolfi M., Viana M., Bouso L., Alvarez-Pedrerol M., Alastuey A., Sunyer J., Querol X. (2015). Real-time indoor and outdoor measurements of black carbon at primary schools. *Atmospheric Environment*.
84. Regalado J., Perez-Padilla R., Sansores R.H., Páramo Ramirez JI, Brauer M., Paré P., and Vedal S. (2006). The effect of biomass burning on respiratory symptoms and lung function in rural Mexican women. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 174, 901-905.
85. Rinne S.T., Rodas E.J., Bender B.S., Rinne M.L., Simpson J.M., R. G.-U., and Glickman L.T. (2006). Relationship of pulmonary function among women and children to indoor air pollution from biomass use in rural Ecuador. *Respiratory Medicine*, 100, 7, 1208-1215.
86. Rosa M., Yan R., Chillrud S., Acosta L., Divjan A., Jacobson J., Miller R., Goldstein F., Perzanowski M. (2014). Domestic airborne black carbon levels and 8-isoprostane in exhaled breath condensate among children in New York City. *Journal of Environmental Research*.
87. Rehfuess E., Mehta S., and Pruss-Ustun A. (2006) Assessing household solid fuel use: multiple implications for the Millennium Development Goals. *Environmental Health Perspectives*, 114, 3, A178.
88. Salcedo D., Onasch T., Dzepina K., Canagaratna M., Zhang Q., Huffman J., DeCarlo P., Jayne J., Mortimer P., Worsnop D., Kolb C., Johnson K., Zuberi B., Marr L., Volkamer R., Molina L., Molina M., Cardenas B., Bernabé R., Márquez C., Gaffney J., Marley N., Laskin A., Shutthanandan V., Xie V., Brune W., Leshner R., Shirley T., Jimenez J. (2006). Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
89. Schwartz, J. (1996). Air pollution and hospital admissions for respiratory disease. *Epidemiology*.
90. Schwartz J., Litonjua A., Suh H., Verrier M., Zanobetti A., Syring M., Nearing B., Verrier R., Stone P., MacCallum G., Speizer F., Gold D. (2005). Traffic

related pollution and heart rate variability in a panel of elderly subjects, Thorax.

91. Schwartz J., Coull B., Laden F., Ryan L. (2008). The effect of dose and timing of dose on the association between airborne particles and survival, *Environmental Health Perspectives*, 116, 64-69.
92. Sedlacek AJ. (2016). *Aethalometer Instrument Handbook*, Brookhaven National Laboratory. U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Biological and Environmental Research. https://www.arm.gov/publications/tech_reports/handbooks/aeth_handbook.pdf
93. SEMARNAT, EPA (2012). Programa Ambiental México-Estados Unidos: Frontera 2012 Perfeccionamiento a Mitad de Periodo (2008-2012). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100SM6L.PDF?Dockey=P100SM6L.PDF>
94. Shores C., Klapmeyer M., Quadros M., Marr L. (2012). Sources and transport of black carbon at the California- Mexico border.
95. Smith K., Samet J., Romieu I., Bruce N. (2000). Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children.
96. Smith K.R., McCracken J.P., Weber M.W., Hubbard A., Jenny A., Thompson L.M., Balmes J., Diaz A., Arana B., and Bruce N. (2011). Effect of reduction in household air pollution on childhood pneumonia in Guatemala (RESPIRE): a randomized controlled trial.
97. Takahama, S., Johnson, A., Guzman Morales, J., Russell, L.M., Duran, R., Rodriguez, G., Zheng, J., Zhang, R., Toom-Sauntry, D., Leitch, W.R. (2013). Submicron organic aerosol in Tijuana, Mexico, from local and Southern California sources during the CalMex campaign. *Atmospheric Environment* (70), 500-512.
98. Takahama S., Russell L., Shores C., Marr L., Zheng J., Levy M., Zhang R., Castillo E., Rodriguez-Ventura J., Quintana P., Subramanian R., Zavala M., Molina L. (2013). Diesel vehicle and urban burning contributions to black carbon concentrations and size distributions in Tijuana, Mexico, during the Cal-Mex 2010 campaign. *Atmospheric Environment*.

99. Tunno P., Naumoff K., Cambal L., Tripathya S., Holguin F., Liroy P., Clougherty J. (2015). Indoor air sampling for fine particulate matter and black carbon in industrial communities in Pittsburgh.
100. Traina S., Swanston C. (2010). Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review Gyami Shrestha. Journal of Sustainability.
101. Trompeter W., Boulic M., Ancelet T., Garcia-Ramirez J.C., Davy P., Wang Y., Phipps R. (2018). The effect of ventilation on air particulate matter in school classrooms. Journal of Building Engineering.
102. U.S. EPA (2002) Health assessment document for diesel engine exhaust. Report by the National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/8-90/057F. Disponible en internet: http://oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=36319.
103. Venegas L., Mazzeo N. (2012). La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
104. Wang X., Bi X., Chen D., Sheng G., Fu J. (2005). Hospital indoor respirable particles and carbonaceous composition. Building and Environment.
105. Wang Y., Hopke P., Rattigan O., Xia X., Chalupa D., Utell M. (2012). Characterization of Residential Wood Combustion Particles Using the Two-Wavelength Aethalometer.
106. Weather Underground. History for MTIXC1 NERRS meteorological site at Tijuana River, Imperial Beach, CA. <https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=MTIXC1#history/tgraphs/s20170329/e20170329/mdaily>
107. Winckell A., Le Page M., Vela R. (2005). *Cincuenta años en la historia pluviométrica de Tijuana*. El colegio de la frontera norte, Institut de Recherche Pour Le Developpement, 17-27.

108. Zavaleta G., Escamilla P., Valdez B. (2010). Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México. Secretaría del Medio Ambiente, Dirección general de prevención y control de la contaminación atmosférica.
109. Zhang H., Magara-Gómez K., Olson M., Okuda T., Walz K., Schauer J., Kleeman M. (2015). Atmospheric impacts of black carbon emission reductions through the strategic use of biodiesel in California.
110. Žuškin E., Schachter E., Mustajbegović J., Pucarín-Cvetković J., Doko-Jelinić J., Mučić-Pucić B. (2009). Indoor air pollution and effects on human health. Periodicum Biologorum UDC 57:61 VOL. 111, No 1, 37–40.
111. <http://revistapesquisa.fapesp.br> Última revisión: 22/06/2018
112. <https://www.amap.no/swipa2017> Última revisión: 23/06/2018
113. Global Alliance for Clean Cookstoves <http://cleancookstoves.org/> Última revisión: 04/11/2018.
114. <http://www.elboomeran.com/blog-post/7/4548/sergio-ramirez/cocina-de-muchas-manos/>. Última revisión: 27/08/2018.
115. <https://www.dw.com/es/mujeres-ind%C3%ADgenas-de-oaxaca-son-premiadas-en-madrid/a-41354632>. Última revisión: 27/08/2018.
116. <https://www.istockphoto.com/mx/fotos/tijuana>. Última revisión: 27/08/2018.
117. <http://fcqi.tij.uabc.mx/usuarios/meteoseacfic/> Última revisión: 04/11/2018.

ANEXOS

ANEXO A. Figuras

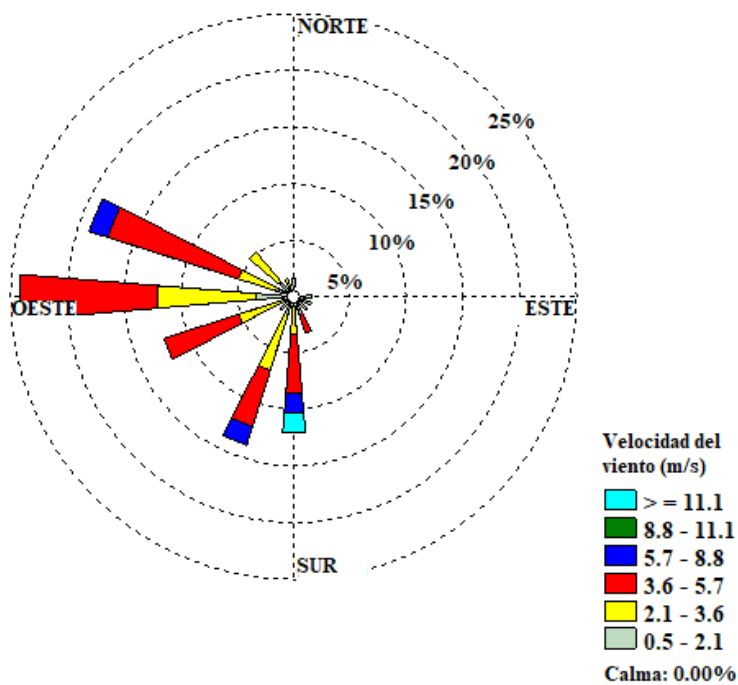


Figura A1. Rosa de Vientos para UABC (27-31 de Marzo).

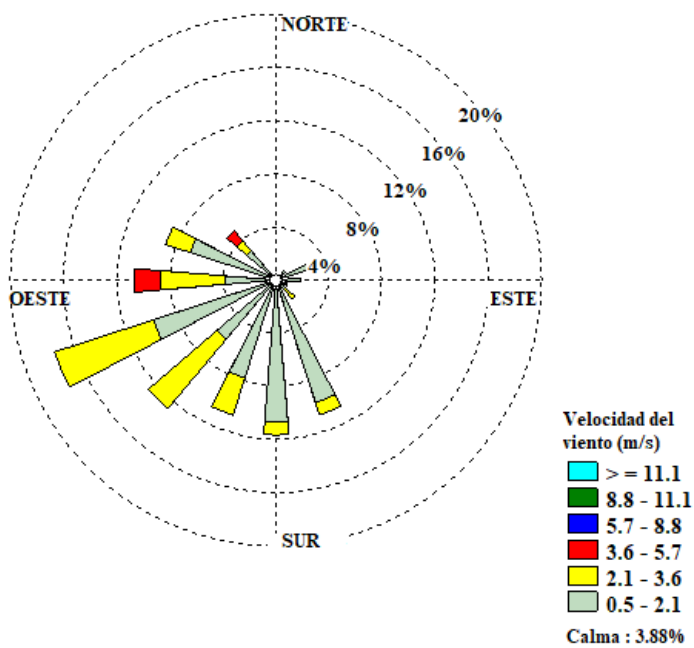


Figura A2. Rosa de Vientos para Kinder 15 de Septiembre (24-28 de Abril).

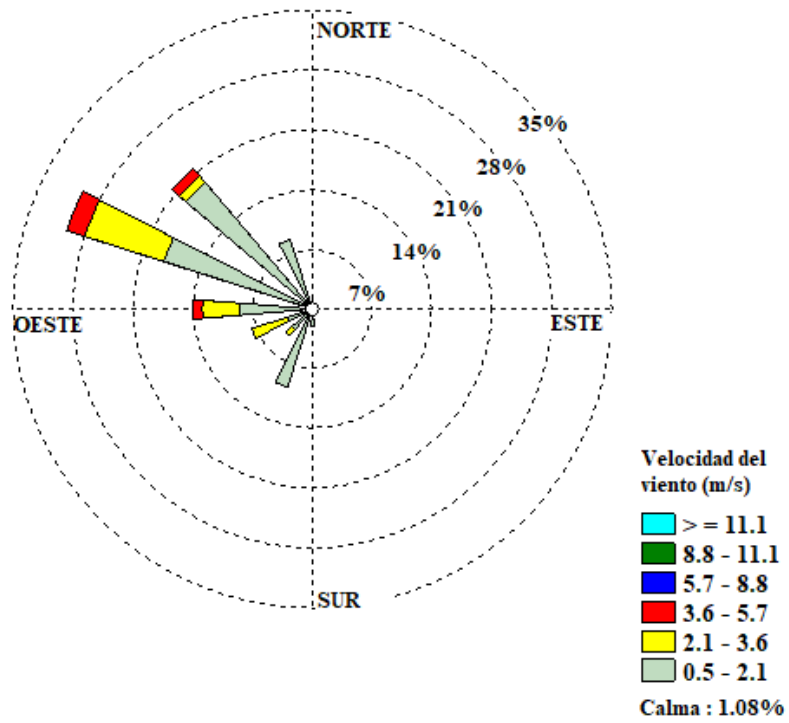


Figura A3. Rosa de Vientos para Santa Fe (19-23 de Junio).

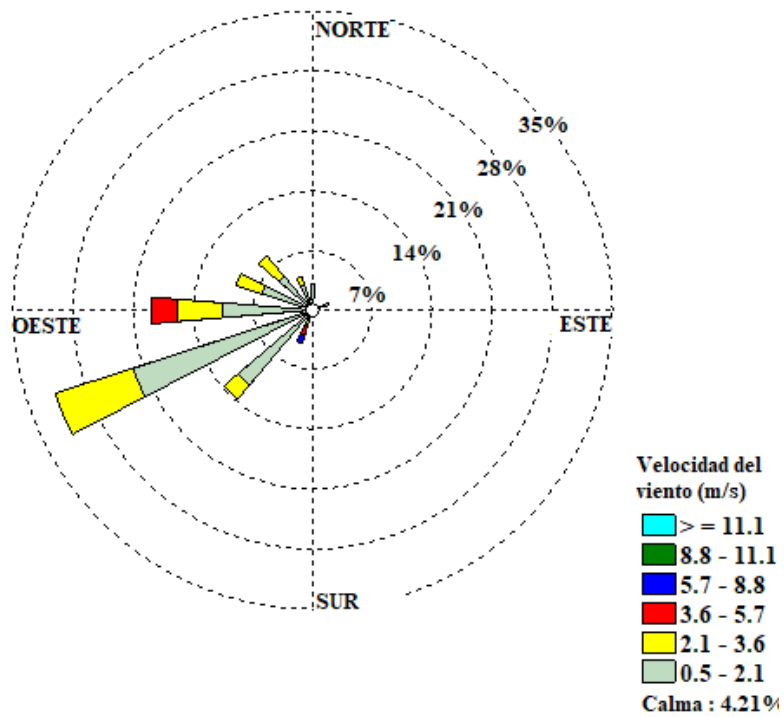


Figura A4. Rosa de Vientos para Colegio Inglés (3- 7 de Abril).

ANEXO B. Tablas

Tabla BI. Estadísticas descriptivas de BC promedio por hora del día en interior durante la semana de muestreo en todos los sitios.

Sitio	Parámetro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Hora																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
UABC, Otay.	Promedio	8.32	6.38	4.40	5.41	3.86	3.26	29.05	4.75	5.19	4.02	3.95	4.67	3.12	2.90	3.06	2.66	2.29	2.24	1.64	1.17	1.12	1.06	1.54	6.64	
	Mediana	6.36	7.20	5.36	3.48	3.57	3.87	27.35	4.68	5.30	4.47	4.37	3.59	2.68	2.76	2.57	2.91	2.17	1.81	1.56	1.13	1.19	0.83	1.49	5.94	
	Q1	1.55	1.92	1.44	1.07	1.04	1.16	14.90	4.30	3.95	2.27	2.40	2.38	2.24	2.23	2.13	1.97	1.57	1.61	1.26	0.76	0.72	0.43	0.53	1.23	
	Q3	17.05	10.02	6.39	11.67	6.97	4.74	44.90	5.28	6.32	5.55	5.28	7.51	4.22	3.63	4.23	3.23	3.08	3.10	2.09	1.62	1.44	1.93	2.60	12.75	
	Rango	0.34- 20.23	0.39- 10.73	0.38- 6.49	0.38- 14.29	0.31- 7.98	0.31- 4.98	10.96- 50.54	4.21- 5.45	3.71- 6.44	2.16- 6.15	1.94- 6.09	2.04- 9.35	2.20- 4.73	1.87- 4.04	2.10- 5.06	1.51- 3.32	1.27- 3.96	1.50- 3.36	1.17- 2.25	0.69- 1.74	0.63- 1.46	0.43- 2.17	0.47- 2.71	0.37- 14.30	
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	
Colegio inglés, Playas de Tijuana.	Promedio	0.48	0.65	0.84	0.91	0.75	0.75	0.85	1.55	2.14	1.71	1.54	1.47	1.37	1.12	1.61	1.19	0.83	0.69	0.71	0.61	0.53	0.49	0.46	0.44	
	Mediana	0.45	0.47	0.53	0.57	0.54	0.55	0.78	1.15	1.68	1.46	1.52	1.79	1.14	1.13	1.70	1.35	0.69	0.48	0.66	0.55	0.48	0.46	0.47	0.49	
	Q1	0.23	0.25	0.30	0.32	0.31	0.34	0.47	0.63	1.32	1.03	0.86	0.91	0.87	0.80	1.23	0.76	0.52	0.44	0.41	0.40	0.36	0.32	0.30	0.26	
	Q3	0.76	1.23	1.68	1.86	1.41	1.35	1.32	2.85	3.42	2.51	2.23	1.86	1.99	1.43	1.96	1.54	1.21	1.05	1.05	0.86	0.75	0.69	0.61	0.57	
	Rango	0.17- 0.85	0.20- 1.46	0.28- 2.02	0.30- 2.21	0.30- 1.64	0.31- 1.57	0.38- 1.49	0.56- 3.32	1.24- 3.96	0.79- 3.01	0.53- 2.57	0.74- 1.91	0.64- 2.07	0.66- 1.64	1.12- 2.11	0.56- 1.71	0.43- 1.24	0.39- 1.12	0.38- 1.12	0.39- 1.13	0.35- 0.93	0.30- 0.80	0.25- 0.74	0.19- 0.65	0.59- 0.59
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	
Jardín de niños 15 de Septiembre, Frac. Real de San Fco.	Promedio	3.78	5.62	6.77	5.58	4.76	4.90	4.99	6.45	5.27	3.39	2.72	2.10	1.70	1.44	1.19	1.13	1.27	1.25	1.24	1.44	1.73	2.13	2.62	2.83	
	Mediana	4.68	5.23	5.82	5.00	4.32	4.02	4.12	5.54	5.12	4.87	2.40	2.19	1.85	1.42	1.07	1.07	1.21	1.16	1.13	1.44	1.70	2.20	2.79	3.16	
	Q1	1.60	1.35	1.19	1.02	0.92	0.95	1.15	2.59	3.04	1.03	1.30	1.15	0.99	0.97	0.97	0.93	1.17	0.96	0.86	0.90	1.13	1.12	1.15	1.33	
	Q3	5.06	10.27	13.31	10.70	9.05	9.72	9.71	11.22	7.66	5.01	4.30	3.02	2.34	1.92	1.47	1.37	1.41	1.64	1.72	1.97	2.34	3.06	3.92	4.01	
	Rango	0.63- 5.12	0.48- 11.52	0.43- 15.03	0.36- 11.93	0.32- 10.09	0.33- 11.23	0.40- 11.33	1.85- 12.86	2.40- 8.45	0.92- 5.13	1.13- 4.67	1.10- 3.61	0.85- 2.65	0.87- 1.97	0.92- 1.57	0.83- 1.45	1.16- 1.59	0.89- 1.80	0.81- 1.88	0.85- 2.02	1.10- 2.39	0.97- 3.14	0.98- 3.93	0.82- 4.20	
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	
Residencial Santa Fe, Tijuana	Promedio	2.81	2.24	2.05	1.80	1.70	1.90	2.53	2.80	2.88	2.19	1.45	1.31	1.02	4.10	3.71	1.35	0.71	0.68	0.73	1.02	2.27	2.03	2.11	1.97	
	Mediana	2.79	2.95	2.58	2.18	1.65	1.94	2.14	3.56	3.88	2.42	1.44	0.99	0.93	0.88	1.16	1.09	0.71	0.51	0.74	1.11	2.15	1.49	1.19	1.66	
	Q1	0.89	0.60	0.60	0.68	0.56	0.60	0.65	0.80	1.14	1.37	1.10	0.58	0.59	0.69	0.76	0.71	0.55	0.35	0.40	0.72	1.14	0.71	1.05	1.04	
	Q3	4.73	3.54	3.26	2.71	2.86	3.16	4.60	4.43	4.11	2.90	1.81	2.20	1.50	9.12	7.94	2.11	0.87	1.09	1.07	1.26	3.47	3.61	3.62	3.05	
	Rango	4.97- 0.60	3.88- 0.38	3.49- 0.44	3.07- 0.62	2.93- 0.52	3.77- 0.49	4.79- 0.34	4.61- 0.36	4.19- 0.49	3.16- 0.47	1.81- 0.90	2.60- 0.56	1.50- 0.52	16.89- 0.55	13.95- 0.72	3.07- 0.57	0.87- 0.51	1.44- 0.26	1.37- 0.38	1.28- 0.60	4.57- 1.08	3.96- 0.55	4.40- 0.92	3.66- 1.01	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	

Tabla BII. Estadísticas descriptivas de BC promedio por hora del día en exterior durante la semana de muestreo en todos los sitios.

Sitio	Parámetro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Hora																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
UABC, Otay.	Promedio	6.51	5.86	3.63	5.53	3.33	3.33	2.74	4.40	3.94	2.55	1.54	0.96	0.65	0.59	0.57	0.50	0.49	0.55	0.57	0.88	0.90	1.05	1.98	8.72
	Mediana	5.21	7.16	4.30	3.28	3.66	4.09	2.92	4.20	3.65	3.37	1.44	1.16	0.76	0.49	0.57	0.47	0.47	0.51	0.58	0.89	0.90	0.81	2.00	7.50
	Q1	1.26	1.89	1.22	0.91	0.98	1.10	1.29	3.74	2.26	0.53	0.51	0.34	0.41	0.39	0.40	0.31	0.32	0.40	0.39	0.50	0.48	0.34	0.47	1.60
	Q3	13.06	8.48	5.39	12.39	5.35	4.82	4.02	5.27	5.89	4.17	2.63	1.49	0.84	0.84	0.74	0.71	0.68	0.71	0.71	1.25	1.32	2.01	3.48	17.06
	Rango	0.39- 15.22	0.40- 8.63	0.34- 5.60	0.35- 15.20	0.23- 5.77	0.25- 4.91	0.82- 4.30	3.70- 5.51	2.20- 6.24	0.34- 4.81	0.27- 3.05	0.28- 1.74	0.37- 0.90	0.33- 0.96	0.32- 0.77	0.28- 0.92	0.24- 0.88	0.30- 0.90	0.33- 0.78	0.40- 1.35	0.42- 1.39	0.31- 2.29	0.35- 3.59	0.34- 19.55
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
Colegio inglés, Playas de Tijuana.	Promedio	0.79	1.04	1.50	0.85	0.77	1.14	2.03	2.65	2.14	1.77	1.36	1.65	1.35	1.04	1.00	0.90	0.96	0.93	0.62	0.55	0.49	0.46	0.46	
	Mediana	0.55	0.76	1.30	0.67	0.58	1.19	1.51	1.63	2.21	1.49	1.39	1.66	1.34	1.12	0.96	0.61	0.61	0.97	0.61	0.57	0.52	0.53	0.52	0.45
	Q1	0.22	0.45	0.40	0.35	0.43	0.55	1.11	1.31	1.09	1.01	0.74	1.14	0.81	0.75	0.71	0.60	0.55	0.70	0.44	0.44	0.27	0.20	0.25	0.21
	Q3	1.61	1.92	2.80	1.52	1.31	1.67	3.47	5.02	3.11	2.67	1.96	2.17	1.88	1.30	1.31	1.34	1.54	1.13	0.81	0.65	0.68	0.65	0.83	0.73
	Rango	0.17- 1.90	0.44- 2.21	0.38- 3.01	0.35- 1.69	0.40- 1.52	0.46- 1.70	1.08- 4.02	1.21- 6.15	0.85- 3.29	0.88- 3.08	0.38- 2.06	1.10- 2.32	0.61- 2.04	0.60- 1.49	0.51- 1.35	0.59- 1.48	0.54- 1.74	0.64- 1.25	0.43- 0.83	0.42- 0.66	0.20- 0.71	0.14- 0.65	0.17- 0.93	0.16- 0.79
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4
Jardín de niños 15 de Septiembre, Fracc. Real de San Fco.	Promedio	6.65	8.26	7.42	3.89	4.45	6.39	5.73	6.35	5.40	2.67	1.97	1.17	1.06	1.14	0.93	0.96	1.07	1.02	1.22	1.71	2.50	3.18	4.45	5.44
	Mediana	7.74	7.39	5.42	2.42	3.64	4.57	6.13	6.57	5.26	3.51	1.84	0.82	0.87	0.84	0.85	0.88	1.01	1.02	1.25	1.74	2.77	3.30	4.08	4.32
	Q1	1.46	0.50	0.53	0.42	0.98	2.12	2.12	2.06	3.09	0.63	0.98	0.78	0.77	0.82	0.78	0.78	0.99	0.81	0.95	1.24	1.34	1.16	1.54	0.95
	Q3	10.75	16.88	16.31	8.84	9.01	8.94	8.94	10.42	7.85	4.29	3.03	1.75	1.44	1.61	1.12	1.17	1.18	1.21	1.47	2.15	3.40	5.09	7.73	11.05
	Rango	0.20- 10.92	0.32- 17.93	0.36- 18.50	0.31- 10.42	0.28- 10.61	0.90- 15.51	0.83- 9.82	1.00- 11.26	2.53- 8.55	0.48- 4.52	0.90- 3.69	0.77- 1.79	0.75- 1.62	0.80- 1.95	0.72- 1.26	0.76- 1.32	0.97- 1.33	0.75- 1.27	0.92- 1.47	1.08- 2.28	1.38- 3.53	0.93- 5.30	0.84- 8.89	0.76- 12.62
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4
Residencial Santa Fe, Tijuana	Promedio	2.75	2.15	2.14	1.82	2.05	2.56	3.04	3.09	2.97	0.52	0.50	0.74	0.85	3.97	3.40	1.18	0.65	0.65	0.65	1.19	2.38	2.02	2.06	1.95
	Mediana	3.14	2.96	2.45	1.88	1.70	1.97	2.49	3.86	3.37	0.48	0.33	0.47	0.88	0.95	1.17	0.93	0.70	0.44	0.71	1.16	2.11	1.46	1.58	1.47
	Q1	0.74	0.60	0.69	0.62	0.58	0.81	0.82	0.93	1.79	0.30	0.001	0.33	0.60	0.60	0.90	0.61	0.38	0.28	0.39	0.95	1.48	0.52	0.94	1.13
	Q3	4.57	3.30	3.44	3.00	3.69	4.62	5.54	4.86	3.95	0.76	1.06	1.28	1.09	8.84	7.01	1.87	0.89	1.11	0.87	1.44	3.42	3.80	3.43	3.01
	Rango	0.62- 4.63	0.38- 3.61	0.42- 3.83	0.61- 3.12	0.53- 4.66	0.44- 5.81	0.32- 5.29	0.39- 5.29	0.42- 4.23	0.25- 0.92	0.000 5 ^{-1.26}	0.28- 1.34	0.58- 1.29	0.49- 16.41	0.66- 12.13	0.43- 2.68	0.26- 0.94	0.20- 1.56	0.38- 0.95	0.89- 1.60	1.38- 4.58	0.31- 4.61	0.86- 4.39	1.03- 3.36
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabla BIII. Estadísticas descriptivas de BC en interior y exterior para todos los sitios de muestreo.

Sitio	Parámetro	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		Interior	Exterior
UABC, Otay.	Promedio	4.57	2.43
	Mediana	2.91 ^a	0.90 ^a
	Q1	1.73	0.45
	Q3	4.86	3.67
	Rango	0.31 – 50.54	0.23 – 19.55
	N	105	105
Colegio inglés, Playas de Tijuana.	Promedio	1.01	1.13
	Mediana	0.79 ^b	0.91 ^b
	Q1	0.47	0.53
	Q3	1.46	1.50
	Rango	0.16 – 3.95	0.14 – 6.15
	N	105	105
Jardín de niños 15 de Septiembre, Fracc. Real de San Fco.	Promedio	3.08	3.38
	Mediana	1.87 ^b	1.39 ^b
	Q1	1.09	0.85
	Q3	4.13	4.42
	Rango	0.31 – 15.03	0.20 – 18.49
	N	104	104
Residencial Santa Fe, Tijuana.	Promedio	1.97	1.89
	Mediana	1.23 ^b	1.15 ^b
	Q1	0.73	0.62
	Q3	2.74	2.70
	Rango	0.26 – 16.90	0.0005 – 16.41
	N	120	120

^a: Comparaciones pareadas de Mann-Whitney ($p < 0.05$).

^b: Comparaciones pareadas de Mann-Whitney ($p > 0.05$).

Tabla BIV. Coeficientes de determinación (r^2) y correlación de Spearman (r_s) entre las concentraciones de BC en interior y exterior.

Sitio	Coefficientes de determinación (r^2)	Correlación de Spearman (r_s)
UABC, Otay.	0.2035	0.757 ($p = 0.000$)
Colegio inglés, Playas de Tijuana.	0.5881	0.818 ($p = 0.000$)
Jardín de niños 15 de Septiembre, Fracc. Real de San Fco.	0.7344	0.840 ($p = 0.000$)
Residencial Santa Fe, Tijuana.	0.9163	0.850 ($p = 0.000$)