



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS

EXPOSICIÓN PERSONAL DE PEATONES Y CICLISTAS A
CARBONO NEGRO Y MONÓXIDO DE CARBONO
EN LA CIUDAD DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :

ANDREA XIMENA ÁVILA BECERRIL

DIRECTOR DE TESIS:

DR. OSCAR AUGUSTO PERALTA ROSALES

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Institucionales

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y la Facultad de Ciencias por brindarme años de formación académica que me han permitido adquirir el conocimiento científico necesario para llevar a cabo la presente tesis que busca contribuir a la sociedad y fomentar el cuidado del medio ambiente, así como la divulgación de información.

Agradezco al Dr. Oscar Augusto Peralta Rosales por aceptarme, asesorarme, brindarme su apoyo, tiempo e inmensa paciencia a lo largo de la realización de éste proyecto, así como abrirme las puertas de su laboratorio y oficina, al igual que guiarme en la construcción y ampliación del conocimiento científico.

Agradezco el apoyo y dedicación de todos aquellos contribuyentes en la tarea de la recolección de muestras durante el tiempo en que se llevó a cabo ésta investigación.

Agradezco a los miembros de mi comité: Dra. Karen Castro Nava, Dr. Harry Alvarez Ospina, Dr. José Abraham Ortíz Álvarez y Dr. Iván Hernández Paniagua por brindarme su tiempo, apoyo y comentarios respecto a éste trabajo

Agradecimientos Personales

Agradezco desde el fondo de mi corazón a mi padre, por su incondicional apoyo, soporte y compañía lo largo de éste largo y difícil proceso, por creer que siempre lograría mis metas. Gracias por estar a mi lado en los momentos más difíciles, por comprenderme y amarme a pesar de lo complicado que ha sido lo que hemos atravesado juntos. Gracias por estar a mi lado cuando más te necesitaba y por nunca dudar de mí.

Agradezco infinitamente a mi hermana, Lizbeth Ávila, gracias por tomar mi mano en cada paso y ayudarme a salir adelante, por permitirme tener altibajos y seguir a mi lado, por no dudar de mí ni de lo que quiero. Gracias por mostrarme como mejorar cada día no solo como estudiante y profesional, sino como persona, así como enseñarme a superar todas aquellas dificultades pasadas y presentes.

Agradezco a Darvelia Valenzuela, durante los últimos años te has vuelto como mi madre con tu apoyo, cuidados y preocupación, porque siempre estuviste para darme palabras de ánimo y consuelo cuando las necesitaba. Gracias por todo tu amor de madre.

Agradezco a la vida por poder tener a personas tan maravillosas a mi lado. Los amo.

“La educación es el desarrollo en el hombre de toda la perfección de que su naturaleza es capaz”.

Immanuel Kant

Índice general

1	<i>Introducción</i>	8
1.1	<i>Marco general</i>	8
1.2	<i>Objetivos</i>	9
2	<i>La atmósfera</i>	10
2.1	<i>¿Qué es la atmósfera?</i>	10
2.2	<i>Escalas meteorológicas</i>	10
2.3	<i>Importancia de estudios a micro-escala</i>	11
3	<i>Contaminación atmosférica</i>	12
3.1	<i>Calidad del aire</i>	12
3.2	<i>Etapas de la contaminación del aire</i>	16
3.3	<i>Contaminantes climáticos de vida corta</i>	17
3.4	<i>Dispersión de contaminantes atmosféricos</i>	20
3.5	<i>Factores geográficos y topológicos de México</i>	22
3.6	<i>Formas de transporte en la ciudad</i>	23
4	<i>Carbono negro y monóxido de carbono</i>	27
4.1	<i>Carbono negro</i>	27
4.2	<i>Monóxido de carbono</i>	30
4.3	<i>Efectos en la salud</i>	32
5	<i>Metodología</i>	36
5.1	<i>Equipo de monitoreo</i>	37
5.2	<i>Material y software de apoyo</i>	39
5.3	<i>Selección de rutas</i>	40
5.4	<i>Obtención de muestras</i>	42
6	<i>Resultados</i>	45
6.1	<i>Formas de movilidad en la CDMX</i>	45

6.2	<i>Estimación de niveles de concentración de carbono negro</i>	46
6.3	<i>Estimación de niveles de emisión de monóxido de carbono</i>	55
6.4	<i>Mapas de distribución de contaminantes</i>	64
7	<i>Conclusiones</i>	75
7.1	<i>Conclusiones generales</i>	75
7.2	<i>Conclusiones específicas</i>	76
8	<i>Referencias</i>	78

Índice de figuras

<i>Figura 1. Rutas seleccionadas.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2. Serie de tiempo de concentración de CN durante los recorridos en la ruta San Ángel.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3. Promedio de concentración de CN durante los recorridos en la ruta San Ángel.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4. Promedio dosis de exposición de CN durante los recorridos en la ruta San Ángel.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5. Serie de tiempo de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Reforma. ..</i>	<i>50</i>
<i>Figura 6. Promedio de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Reforma.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 7. Promedio dosis de exposición de CN durante los recorridos en la ruta Reforma.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 8. Serie de tiempo de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Insurgentes.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 9. Promedio de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Insurgentes.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 10. Promedio dosis de exposición de CN durante los recorridos en la ruta Insurgentes. .</i>	<i>55</i>
<i>Figura 11. Serie de tiempo de concentración de CO durante los recorridos en la ruta San Ángel.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 12. Promedio de concentración de CO durante los recorridos en la ruta San Ángel.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 13. Promedio dosis de exposición de CO durante los recorridos en la ruta San Ángel. ...</i>	<i>58</i>
<i>Figura 14. Serie de tiempo de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Reforma.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 15. Promedio de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Reforma.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 16. Promedio dosis de exposición de CO durante los recorridos en la ruta Reforma.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 17. Serie de tiempo de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Insurgentes.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 18. Promedio de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Insurgentes.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 19. Promedio dosis de exposición de CO durante los recorridos en la ruta Insurgentes. .</i>	<i>64</i>
<i>Figura 20. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 03/07/2020.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 21. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 04/07/2020.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 22. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 05/07/2020.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 23. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 06/07/2020.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 24. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 07/07/2020.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 25. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 08/07/2020.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 26. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 09/07/2020.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 27. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 10/07/2020.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 28. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 11/07/2020.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 29. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 12/07/2020.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 13/07/2020.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 31. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 14/07/2020.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 20/07/2020.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 33. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 21/07/2020.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 34. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 22/07/2020.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 23/07/2020.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 36. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 24/07/2020.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 37. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 25/07/2020.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 38. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 26/07/2020.</i>	<i>74</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Características generales de las rutas</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 2. Estadística básica para CN en para la ruta San Ángel.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 3. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CN en para la ruta San Ángel.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4. Estadística básica para CN en para la ruta Reforma.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CN para la ruta Reforma.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6. Estadística básica para CN para la ruta Insurgentes.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 7. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CN en para la ruta Insurgentes.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Estadística básica para CO en para la ruta San Ángel.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 9. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CO en para la ruta San Ángel.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 10. Estadística básica para CO en para la ruta Reforma.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 11. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CO en para la ruta Reforma.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 12. Estadística básica para CO en para la ruta Insurgentes.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 13. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CO en para la ruta Insurgentes.....</i>	<i>63</i>

1 Introducción

1.1 Marco general

Las mediciones de la concentración de CO₂ históricas señalan que ha aumentado significativamente desde la Era Industrial, a fines del siglo XVIII, como consecuencia del creciente uso de combustibles fósiles y la destrucción de los bosques y las selvas tropicales. El CO₂ tiene una vida media mayor a cien años; sin embargo, otros contaminantes tienen vida media más corta y se pueden controlar y disminuir rápidamente, como los Contaminantes Climáticos de Vida Corta. Además de contribuir al cambio climático son dañinos a la salud e impactan en los más vulnerables.

El carbono negro (CN) es un contaminante climático de vida corta. Se libera directamente a la atmósfera y se encuentra en forma de partículas menores a 2.5 micrómetros en diámetro (PM_{2.5}) y se produce en procesos naturales, y en actividades humanas relacionadas con la quema incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Las principales fuentes de carbono negro antrópico incluyen motores a diésel, fuentes industriales, carbón doméstico y biocombustibles sólidos para cocinar y calentar, fuegos agrícolas y forestales, así como quemas abiertas de basura. El CN produce efectos adversos a la salud humana, los ecosistemas y la visibilidad asociados a las PM_{2.5}.

El monóxido de carbono (CO) es otro producto de la combustión incompleta y es considerado uno de los mayores contaminantes de la atmósfera terrestre. Sus principales fuentes productoras responsables de aproximadamente 80% de las emisiones son los vehículos automotores que utilizan como combustible gasolina o diesel y los procesos industriales que utilizan compuestos del carbono. Esta sustancia es bien conocida por su toxicidad para el ser humano. Sus efectos tóxicos agudos incluida la muerte han sido estudiados ampliamente; sin embargo, sus potenciales efectos adversos a largo plazo son pocos. En México, los vehículos automotores también son responsables de la mayor cantidad de emisiones de monóxido de carbono a la atmósfera; allí se ha fijado como concentración media de este compuesto para 1 hora el valor de 11 partes por millón, que equivale a 100 puntos del Índice Metropolitano de Calidad del Aire conocidos.

La exposición a altos niveles de contaminación del aire puede causar una variedad de resultados adversos para la salud: aumenta el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, derrames cerebrales y cáncer de pulmón las cuales afectan en mayor proporción a población vulnerable, niños, adultos mayores y mujeres.

El transporte ha tenido consecuencias socioeconómicas y ambientales que han provocado impactos diversos en la Zona Metropolitana del Valle de México, los cuales se han tratado de resolver mediante la política de movilidad de los gobiernos de la Ciudad de

México y el Estado de México por medio de una política de limitación de la movilidad; sin embargo, contrario a ella, desde hace varios años se ha privilegiado el desplazamiento en automóvil, que requiere de nuevas infraestructuras no sólo para la metrópoli del Valle de México, sino también para la región central del país.

El medio de transporte con mayor frecuencia de uso para ir al trabajo es el transporte público con 45% de los viajes, seguido por la población que exclusivamente camina al trabajo con 32%. Los viajes en automóvil privado representan 21% del total de viajes y sólo 2% de quienes viajan al trabajo, lo hacen en bicicleta.

Dos factores fundamentales para comprender la movilidad en la Ciudad de México; el primero de ellos es la estructura monocéntrica y extendida de la metrópoli, el segundo es el sobreuso de las vialidades por el automóvil privado, por último, la sobresaturación del transporte público.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Medir las concentraciones a nivel de calle de CN y CO, así como sus efectos en la salud.

1.2.2 Objetivos particulares

1. Revisión bibliográfica sobre la generación de CN y CO, así como sus efectos en el cambio climático y en la salud.
2. Determinar la concentración de CN y CO rutas específicas.
3. Investigar los posibles efectos en la salud relacionados con la exposición a estos contaminantes.

2 La atmósfera

2.1 ¿Qué es la atmósfera?

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea a la Tierra y constituye la principal defensa que tienen las diferentes formas de vida, de la incidencia de las radiaciones que provienen del espacio exterior, especialmente del sol. (Venegas, 2012)

Está constituida por aire seco (mezcla de gases, principalmente nitrógeno, oxígeno, argón, dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua) y diversas clases de sales y otras sustancias. El vapor de agua es un componente cuya importancia en la atmósfera es mucho mayor de lo que indica su cuantía. Mientras que la proporción de los otros componentes permanece esencialmente constante, la del vapor de agua es muy variable: la atmósfera recibe vapor de agua por evaporación de mares, ríos y lagos y por transpiración de las plantas, y lo pierde por condensación en forma de nubes, precipitación o rocío.

Además de estos gases, que son parte intrínseca de la atmósfera, hay otras variables que se introducen en ella como consecuencia de la actividad biológica, algunos fenómenos naturales (erupciones volcánicas, tempestades de polvo y arena, erosión de rocas, chispas eléctricas, etc.) y actividad humana, en particular procesos industriales. Entre estos gases se cuentan el dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (N₂O, NO, NO₂), amoníaco (NH₃), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y algunos compuestos orgánicos así como partículas en suspensión que constituyen los aerosoles. (Zanón, 2008)

Pero la atmósfera no es una masa de gases en reposo, sino una capa gaseosa fluida y turbulenta que se mueve en el espacio y en el tiempo con intensidad variable, donde son liberados los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas depende en gran medida de parámetros meteorológicos. (De Oca, 2010)

2.2 Escalas meteorológicas

Los movimientos atmosféricos muestran un amplio espectro de *escalas* o dimensiones características, en las que se puede considerar:

- *Movimientos a escala planetaria*, que corresponden a los grandes rasgos de la circulación global.
- *Movimientos a escala sinóptica*: ondas o células cerradas cuyas dimensiones se pueden caracterizar mediante redes de observación con distancias entre estaciones del orden del centenar de kilómetros o más (*red sinóptica*). A este dominio corresponden los fenómenos que determinan la *temperie* o tiempo atmosférico.
- *Movimientos en meso-escala (o escala intermedia)*: ondas, células cerradas o corrientes cuyas dimensiones horizontales están entre decenas y algunos centenares de kilómetros.

- *Movimientos a pequeña escala (o micro-escala)*: de extensión horizontal inferior a unas decenas de kilómetros; las nubes, tormentas, trombas y tornados, además de otros fenómenos, están incluidos en esta categoría. Mientras que los movimientos correspondientes a las componentes del viento, la componente vertical es en ella del mismo orden de magnitud que las horizontales. (Zanón, 2008)

2.3 Importancia de estudios a micro-escala

La capa más importante en el estudio de los fenómenos de dispersión es la troposfera, porque contiene el aire que respiramos y en ella también se producen los fenómenos meteorológicos que determinan el clima y los patrones de dispersión de los contaminantes.

Se caracteriza porque la temperatura desciende con la altura aproximadamente 1°C cada 100 metros, hasta un nivel en que el gradiente de temperatura negativo cambia, denominándose dicho nivel tropopausa. Sobre este nivel la temperatura comienza a ascender (estratosfera). (Zanón, 2008)

La capa inferior de la troposfera, afectada y modificada por los procesos de transporte e intercambio de magnitudes (masa, calor, cantidad de movimiento) se llama *capa fronteriza* de la atmósfera; su espesor, variable con el tiempo y las condiciones meteorológicas, puede oscilar entre 100 y 3000 m y el tiempo de respuesta a los estímulos del suelo (rozamiento, evaporación y transpiración, intercambio de calor, emisión de contaminantes y alteración de las corrientes por la topografía) es del orden de una hora o inferior.

Es frecuente llamar *capa de mezcla* a la porción de la capa fronteriza más próxima al suelo, en la que la estratificación es con frecuencia indiferente o inestable y la mezcla vertical tiene lugar fácilmente. (Zanón, 2008)

3 Contaminación atmosférica

3.1 Calidad del aire

El aire es una mezcla compleja de varias sustancias. Sus principales constituyentes son el nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Los contaminantes del aire pueden agruparse en dos categorías: los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera; y los contaminantes secundarios que se forman en la atmósfera a partir de precursores primarios debido a reacciones de hidrólisis, oxidación y fotolíticas.

Los contaminantes atmosféricos que no están en forma de gas se denominan con el nombre genérico de partículas. En función a su tamaño se clasifican en dos grupos: a) las partículas de mayor tamaño que en condiciones normales se depositan por acción de la gravedad, y constituyen la materia sedimentable o polvo; y b) las partículas de diámetro menor que no sedimentan fácilmente y forman en el aire suspensiones estables. Se denominan con el nombre de partículas en suspensión o aerosoles. (Matus, 2002)

Existen diferentes tipos de fuentes fijas generadoras de emisiones:

- Fuentes fijas: Aquellas que operan en un punto fijo (el foco de emisión no se desplaza en forma autónoma en el tiempo). (Colman, 2018)
- Fuentes puntuales. Derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales como: química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de productos vegetales y animales, entre otras. Las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor dependen de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso (filtros, precipitadores y lavadores, entre otros). Los principales contaminantes asociados a la combustión son partículas (SO_2 , NO_x , CO_2 , CO e hidrocarburos). (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007)
- Fuentes de línea: generalmente se refiere a las emisiones procedentes del transporte a lo largo de una línea (Ej. Emisiones de los vehículos por carretera, ferrocarriles circulando por vías, rutas de aviación, barcos navegando en canales, etc.). (Colman, 2018)

- Fuentes móviles: Son las que pueden desplazarse en forma autónoma, emitiendo contaminantes en su trayectoria. (Colman, 2018)
- Fuentes de área. Incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP, principalmente. Esta fuente también incluye las emisiones de actividades como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre otros. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007).
- Fuentes naturales. Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007).
- Fuentes geogénicas: Las erupciones volcánicas representan una fuente natural concentrada y localizada de todo tipo de gases y partículas. Asimismo, el polvo y las partículas de la superficie que se arrastran durante los períodos de mucho viento pueden ser transportadas a grandes distancias y dar origen a altas concentraciones de partículas durante periodos breves en regiones remotas.
- Fuentes biogénicas: Las plantas emiten COVs, entre los que se incluyen compuestos oxigenados, como los aldehídos y cetonas, compuestos cíclicos y lineales generalmente insaturados, siendo el isopreno y terpenos los compuestos predominantes. (Colman, 2018)

El objetivo del control de la calidad del aire es doble: a) evaluar la calidad del aire y establecer objetivos que nos permitan, en las sociedades desarrolladas, exigir estrategias (tecnológicas y no tecnológicas) para reducir las emisiones y, por tanto, la exposición de la población a determinados contaminantes; b) investigar las relaciones causa efecto entre los niveles de exposición de la población permite definir umbrales de protección que luego sean utilizados en la normativa ambiental (Querol, 2008).

El aire que se respira en las principales ciudades mexicanas se encuentra contaminado por varios compuestos atmosféricos, que son generados tanto por procesos naturales como por actividades humanas (Zuk, 2007).

La contaminación puede definirse como cualquier modificación indeseable del ambiente, causada por la introducción a este de agentes físicos, químicos o biológicos (contaminantes) en cantidades superiores a las naturales, que resulta nociva para la salud humana, daña los recursos naturales o altera el equilibrio ecológico (Romero, 2006).

La contaminación atmosférica se define como la presencia de sustancias en el aire, en cantidades que pueden ser perjudiciales para la vida, afectar estructuras, materiales y ocasionar cambios en las condiciones meteorológicas o climáticas. (Vallejo, 2003)

Siempre ha existido contaminación atmosférica de origen natural, por erupciones volcánicas, incendios, tormentas de arena, descomposición de la materia orgánica o polen, pero es a partir del descubrimiento del fuego por el hombre cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica o contaminación atmosférica en sentido estricto, la cual ha cobrado importancia, sobre todo, a partir de la revolución industrial y el uso masivo de combustibles fósiles como fuente de energía. (Aránguez, 1999)

Las actividades que producen emisión de contaminantes atmosféricos incluyen desde el uso de fogatas y la combustión de madera hasta la industrialización y urbanización de las grandes ciudades.

Un contaminante atmosférico es cualquier sustancia (química o biológica) que al agregarse al aire puede modificar sus características naturales, por ejemplo el humo, los polvos, los gases, las cenizas, las bacterias, los residuos y los desperdicios. Además de los contaminantes atmosféricos, los contaminantes del ambiente incluyen también a todo aquello que altere sus características naturales, como el calor, la radiactividad y el ruido. Los contaminantes atmosféricos se clasifican por su origen en primarios y secundarios. Los primarios están en la atmósfera tal y como fueron generados por procesos naturales o por actividades del ser humano, son ejemplos el monóxido de carbono (CO) y el bióxido de azufre (SO₂). Los contaminantes secundarios son los que se forman en la atmósfera por reacciones químicas o fotoquímicas en las que intervienen contaminantes primarios, por ejemplo el ozono (O₃) y los sulfatos. (Vallejo, 2003)

Se han reportado la existencia de diversos contaminantes atmosféricos que difieren en su composición química, propiedades de reacción, emisión, persistencia en el medio ambiente, capacidad de ser transportados en distancias largas o cortas y sus eventuales impactos en la salud humana y/o animal. Sin embargo, comparten algunas similitudes y pueden agruparse en cuatro categorías:

Los contaminantes gaseosos contribuyen en gran medida a las variaciones de composición de la atmósfera y se deben principalmente a la quema de combustibles fósiles. Los óxidos de nitrógeno se emiten en forma de NO que reacciona rápidamente con el ozono o los radicales de la atmósfera formando NO₂. El CO, por su parte, es un producto de la combustión incompleta. Su principal fuente es también el transporte por carretera. Mientras que el SO₂ antropogénico resulta de la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre (principalmente carbón y aceites pesados) y de la fundición de minerales que contienen azufre, los volcanes y los océanos son sus principales fuentes naturales. La principal clase de compuestos que la combustión y especialmente los procesos de combustión para la

producción de energía y el transporte por carretera son la principal fuente de emisión son los llamados compuestos orgánicos volátiles (COV). Se trata de una clase de compuestos que incluye especies químicas de naturaleza orgánica como el benceno. Aunque la mayoría de los contaminantes gaseosos se inhalan y afectan principalmente al sistema respiratorio, también pueden inducir problemas hematológicos (CO, benceno) y cáncer.

Los contaminantes orgánicos persistentes forman un grupo de sustancias químicas tóxicas. Persisten en el medio ambiente durante largos periodos de tiempo y sus efectos se magnifican a medida que ascienden por la cadena alimentaria (biomagnificación). Entre ellos se encuentran los pesticidas, así como las dioxinas, los furanos y los bifenilos policlorados. Las dioxinas se forman durante la combustión incompleta y siempre que se queman materiales que contienen cloro (por ejemplo, los plásticos). Emitidas en la atmósfera, las dioxinas tienden a depositarse en el suelo y el agua pero, al ser insolubles en el agua, no contaminan las fuentes de agua subterránea.

Los metales pesados incluyen elementos metálicos básicos como el plomo, el mercurio, el níquel, plata, cadmio, el vanadio, el cromo y el manganeso. Entran en el medio ambiente a través de una gran variedad de fuentes, como la combustión, los vertidos de aguas residuales y las instalaciones de fabricación. (Kampa, 2008)

Uno de los tipos de sustancias contaminantes de mayor consideración es el formado por las partículas o material particulado (PM). Se entiende por partículas cualquier sustancia, a excepción del agua pura, presente en la atmósfera en estado sólido o líquido bajo condiciones normales y cuyo tamaño se considera está comprendido entre los 0.002 μm y los 100 μm de diámetro.

Los términos aerosol y partícula se utilizan en general indistintamente definiéndose los aerosoles como suspensiones relativamente estables de partículas sólidas y líquidas en un gas. La diferencia pues, es la consideración añadida del medio gaseoso que contiene a las partículas. Incluso se habla a veces del aerosol atmosférico considerando a la atmósfera en su conjunto como un aerosol.

Las partículas se forman a través de dos mecanismos generales: subdivisiones o roturas de fragmentos mayores de materia y la aglomeración o reunión de fragmentos pequeños incluyendo moléculas. En consecuencia pueden tener un origen primario o secundario. Si es primario es debido a la emisión directa a la atmósfera de material particulado por actividades naturales (resuspensión de polvo, aerosol marino, actividades volcánicas) y antropogénicas (procesos industriales o urbanos, prácticas agrícolas).

Este tipo de contaminante lleva asociados una serie de riesgos potenciales muy grandes, la magnitud de los cuales va a depender del rango de tamaños, de su composición física y

química así como de su concentración y tiempo de residencia en la atmósfera. (Salvador, 2000)

Las características estructurales y dinámicas de la atmósfera y las características morfológicas del terreno determinan la dispersión de los contaminantes en el espacio y su evolución temporal. La dispersión configura la diferente concentración de contaminantes en la atmósfera (inmisión) en la zona de influencia de la fuente emisora. La evolución de los contaminantes conlleva la aparición de otros nuevos no emitidos por la fuente directamente: son los contaminantes secundarios, como el ozono formado a partir de los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles en presencia de la luz solar, o el ácido sulfúrico formado a partir de la oxidación del dióxido de azufre. (Aránguez, 1999)

Gran parte de la población mundial (personas que viven en ciudades como Ciudad de México, Los Ángeles, Santiago de Chile, entre otras), está expuesta a niveles de contaminación atmosférica que exceden los límites planteados por la Organización Mundial de la Salud. (López, 2007)

La vulnerabilidad y exposición a los riesgos climáticos se ve determinada por diversos factores, tales como: ubicación geográfica, distribución territorial de la población e infraestructura y dependencia de recursos naturales frágiles para desarrollar actividades económicas y de sustento, influyendo de igual manera la capacidad de respuesta, la disponibilidad de recursos financieros, tecnológicos, de organización y planificación.

Especialmente, el territorio mexicano por su posición y características geográficas es considerado como uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático, ya que particularmente se ve expuesto a diferentes fenómenos hidrometeorológicos a causa de su ubicación entre dos océanos, en zona de ciclones, su latitud y relieves. (Sarlat, 2015)

3.2 Etapas de la contaminación del aire

Existen diferentes etapas de contaminación son:

- Emisiones: los contaminantes que son introducidos a la atmósfera provienen de industrias, de otras fuentes artificiales y de la superficie terrestre.

- Comportamiento inicial de los contaminantes en la atmósfera: la naturaleza y geometría de las fuentes de emisión determinan diferencias en el comportamiento inicial de los contaminantes. Las emisiones pueden ser instantáneas o continuas, puntuales o distribuidas en línea, área o volumen, ubicadas a nivel del suelo o elevadas, fijas o móviles. También es importante conocer si la velocidad de emisión de los contaminantes es significativa y si la diferencia entre la temperatura del aire.
- Transporte y difusión atmosféricos: una vez que los efluentes emitidos por una chimenea no están afectados por su propio empuje, se mueven en la dirección del viento (X) y se desplazan en la dirección lateral (Y) y en la vertical (Z). Las variables que intervienen en la predicción de la concentración de los contaminantes en el aire a nivel del suelo, en los primeros kilómetros en la dirección del viento, están relacionadas con la velocidad del viento y la estructura de la turbulencia de la atmósfera en los ejes Y y Z.
- Transformaciones químicas: la mayoría de los contaminantes sufre transformaciones químicas, alcanzando otras formas más o menos peligrosas.
- Depósito: luego de un periodo de tiempo, los contaminantes dejan la atmósfera mediante los siguientes procesos:
 - Depósito húmedo: originado por la precipitación
 - Depósito seco: caída gravitacional de partículas grandes, absorción de gases o partículas pequeñas, por el suelo.
- Impacto sobre el clima: la contaminación del aire afecta principalmente al clima, debido a su impacto sobre el balance radiativo. (Venegas, 1986)

3.3 Contaminantes climáticos de vida corta

Mediciones sistemáticas durante décadas señalan que las concentraciones de gases llamados de invernadero (GEI) aumentan significativamente desde comienzos de la Era Industrial, fines del siglo XVIII, como consecuencia del creciente uso de combustibles fósiles y la destrucción de las selvas tropicales. Los CCVC son agentes atmosféricos contribuyentes al calentamiento global y al mismo tiempo degradan la calidad del aire. (Lipp, 2020)

Los CCVC son contaminantes del aire dañino para la salud, y por lo tanto, el disfrute de los derechos humanos, especialmente de los más vulnerables, y también contribuyen significativamente al cambio climático. Por su permanencia relativamente corta en la atmósfera, se hace referencia a ellos como forzadores climáticos de vida corta o contaminantes climáticos de vida corta. Debido a su naturaleza, a estos contaminantes se les puede controlar y disminuir rápidamente. (Ortúzar, 2016)

Entre los CCVC se encuentran:

- Ozono troposférico: contaminante secundario del grupo de los oxidantes fotoquímicos. Esto es, no emitido directamente por ninguna fuente, sino producido a

partir de compuestos precursores y radiación solar, y cuya acción sobre el medio está relacionada con la naturaleza oxidante que presenta su molécula. Se encuentra presente a nivel antrópico en la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre; la cual abarca una altura variable, comprendida entre los 8 km sobre los polos y 16 km sobre la línea del Ecuador.

Su origen, no obstante, también puede ser natural, procedente del ozono estratosférico que entra en la troposfera en latitudes medias —entre 30° y 60°— a través de zonas de discontinuidad en la tropopausa por donde circulan las corrientes en chorro polar y subtropical.

También hay ozono en pequeñas cantidades junto al oxígeno producido por las plantas verdes en la fotosíntesis. Otra fuente puntual la constituyen las descargas eléctricas en la atmósfera, desprendiéndolo también las reacciones químicas que liberan oxígeno en frío. (Kirchner, 2009)

- Metano: poderoso gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento veinte veces mayor que el CO₂. Permanece en la atmósfera aproximadamente doce años. Además de influir en el clima, este contaminante afecta la salud humana y los ecosistemas, especialmente por su rol como propulsor del ozono troposférico. Alrededor de 60% de las emisiones mundiales de metano provienen de actividades humanas. Las fuentes más importantes son la extracción y quema de petróleo y gas, los vertederos de basura, los cultivos de arroz y las minas de carbón, entre otras. La ganadería y especialmente la industrializada son otra fuente importante de emisión de metano. A pesar de ello, ese metano aún no se ha contabilizado en los inventarios de emisiones.
- Hidrofluorocarbono: contaminante creado por el ser humano en reemplazo de los CFC, luego que estos fueron prohibidos por el Protocolo de Montreal. Los HFC se utilizan para la fabricación de aires acondicionados, refrigeración y aerosoles. La tasa de crecimiento de los HFC es de 10 a 15% anual. Su poder calorífico depende del tiempo que permanezca en la atmósfera: los más saturados permanecen entre 1 y 50 años, y los menos entre días y semanas. (Ortúzar, 2016)
- Carbono negro: componente del material particulado que se produce por la quema incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa, principalmente en vehículos motorizados, cocinas domésticas, incendios y fábricas industriales. Contribuye al calentamiento global principalmente porque las partículas oscuras absorben luz emitiendo calor y calentando la atmósfera; también se depositan sobre el hielo y la nieve. Además afecta la salud humana, contribuyendo a problemas respiratorios como cáncer de pulmón y asma. Su tiempo de permanencia en la atmósfera varía entre unos pocos días y unas pocas semanas, pero su potencial de calentamiento es entre 460 y 1.500 veces más potente que el CO₂. (AIDA, 2013)

La reducción de los CCVC trae beneficios no directamente relacionados con el calentamiento global, pero no por ellos menos importantes para el bienestar de las personas y ecosistemas. Por un lado, tienen la particularidad de que son además peligrosos contaminantes locales del aire, por lo que su reducción significa mejorar la calidad del aire. (Hoffman, 2016)

Los CCVC también afectan la calidad del aire, aumentando el índice de muertes prematuras al ser causantes de enfermedades respiratorias y cardíacas. Además, perjudican gravemente el rendimiento de los cultivos, causando importantes pérdidas económicas y afectando la alimentación mundial. (Ortuzar, 2016)

Dentro de las iniciativas y acuerdos para lograr un consenso en el control de emisiones de contaminantes (en primera instancia gases de efecto invernadero) se tiene:

- Protocolo de Montreal. Acordado en la Convención de Viena, celebrada en el año 1985 por la Organización de las Naciones Unidas, fue firmado en 1987 para comenzar a regir en 1989. Tenía por objetivo principal detener el deterioro de la capa de ozono mediante el control de las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC). Una reducción de los CFC se tradujo en el uso de HCFC y HFC que, como se mencionó en las primeras páginas de este trabajo de memoria, es un CCVC que si bien no deteriora la capa de ozono, tiene un fuerte efecto como GEI. Se ha enmendado para que incluya estos últimos contaminantes dentro de las medidas de mitigación.

Protocolo de Kioto. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992 tuvo por objetivo estabilizar las concentraciones de GEI y evitar cambios que podrían resultar peligrosos para el sistema climático a nivel mundial, entrando en rigor en el año 2005. Este acuerdo incluye el control GEI como los HFC, CO₂, óxido nitroso N₂O, perfluorocarbonos y hexafluoruros de azufre SF₆ mediante el uso de inventarios para monitorear el cumplimiento de los estándares acordados. El acuerdo permite que las partes realicen el control de gases que estén de acuerdo a su realidad, por lo que la lista de gases puede diferir de un país a otro.

- Coalición del Clima y Aire Limpio (CCAC). Creada el 2012 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), ahora ONU Medio Ambiente, en conjunto con los gobiernos de Bangladesh, Canadá, Ghana, México, Suecia y Estados Unidos, y actualmente cuenta con más de sesenta miembros entre los cuales se cuentan gobiernos y otras organizaciones intergubernamentales, representantes del sector privado y otros tipos de organizaciones. Dentro de los objetivos de la coalición está crear conciencia sobre los efectos adversos de los CCVC sobre el clima, la salud de las personas y los ecosistemas, mejorar el entendimiento científico sobre sus efectos y generar políticas públicas y acciones a nivel regional para abordarlos. Esta última iniciativa es, dentro de las nombradas, la única que aborda de manera explícita a los CCVC y dentro de ello al CN. (Valdebenito Silva, 2017).

3.4 Dispersión de contaminantes atmosféricos

Los fenómenos de contaminación atmosférica ocurren en su mayoría en la parte más baja de la atmósfera llamada Capa Límite Planetaria, la cual es algunas veces llamada la capa de fricción, ésta se define como la región en la cual la atmósfera experimenta los efectos de la superficie a través de intercambio de momento, calor y humedad. (De Oca, 2010)

Las condiciones meteorológicas influyen sobre el transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera, así como también en los procesos de remoción de los mismos (Vidal-Ros, 2018). Ellas determinan, junto a otros factores como la dispersión atmosférica de un contaminante depende en primer lugar, de las condiciones meteorológicas y, después de los parámetros y condiciones en que se produce la emisión en la fuente, o sea de la velocidad y temperatura de los gases, la masa y peso molecular de los diferentes compuestos, los valores de inmisión de contaminantes en el aire.

Se denomina “dispersión atmosférica” al proceso que transporta y mezcla los contaminantes en el aire. La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende del viento, de la elevación de la pluma y de la turbulencia del aire. Los contaminantes, luego de ser emitidos a la atmósfera, se diluyen debido a su mezcla con el aire limpio, generando plumas que un tiempo después de su emisión y, en la mayoría de los casos, son casi horizontales. (Venegas, 2012)

Una de las características más importante de la atmósfera, en los procesos de dispersión de los contaminantes, es su estabilidad. Esto es su tendencia a resistir el movimiento vertical, o suprimir la turbulencia existente. (De Oca, 2010)

Para determinar la estabilidad atmosférica, se utilizan variables de estados básicas como:

- Presión atmosférica: es un punto de la corteza terrestre es la fuerza por unidad de superficie que, debido a su peso, ejerce la atmósfera sobre dicho punto. A nivel del mar esta presión es aproximadamente de 1013 hPa (hectopascal; $1 \text{ hPa} = 100 \text{ N/m}^2$), disminuyendo con la altura. (Velasco, 2004)
- Temperatura: se usa una definición basada en la teoría cinética de los gases de acuerdo a la cual la temperatura directamente proporcional a la energía cinética mediada las moléculas. Representando así la temperatura absoluta del aire el grado de calentura de la parcela de aire, relativo a un cero absoluto.
- Densidad: masa de sustancia por unidad de volumen, esta magnitud varía con la presión y la temperatura. Además el aire es una mezcla de aire seco y vapor de agua, variando su densidad con la tasa de vapor de agua o humedad específica. (De Oca, 2010)

La dirección del viento juega un papel de importancia, puesto que dependiendo de esta y de la localización de las fuentes de contaminantes atmosféricos se puede dar un incremento en las concentraciones en el aire. En la micro-escala, se resalta además, que los vientos pueden

tener un rol más complejo del que se cree en la escala local, puesto que bajo ciertas condiciones meteorológicas cuando se dan altas velocidades del viento se puede presentar resuspensión de partículas e incrementar las concentraciones en los micrositos (Montoya, 2018)

Si la fuente de emisión de contaminantes se encuentra ubicada en superficie, las mayores concentraciones de los mismos en aire a nivel del suelo se presentan cuando las velocidades del viento son bajas y la atmósfera es estable. Si las fuentes son elevadas y los contaminantes son emitidos con impulso vertical y empuje térmico, la condición atmosférica asociada a las mayores concentraciones de contaminantes en aire a nivel del suelo.

La velocidad del viento afecta la elevación de la pluma originada por una emisión de contaminantes con impulso vertical y empuje térmico. Cuando los vientos son débiles, la elevación de la pluma es mayor que para vientos fuertes. Por otro lado, vientos débiles generan una mínima dilución, mientras que vientos fuertes proporcionan considerable dispersión. En condiciones atmosféricas marcadamente inestables (convectivas), la pluma de contaminantes puede ser transportada hacia la superficie, originando concentraciones relativamente elevadas a nivel del suelo cerca de la fuente. (Venegas, 2012)

La posibilidad de que exista una buena dispersión de los contaminantes en la atmósfera, está estrechamente relacionado con que haya mucho mezclado térmico, lo que depende en primer lugar del gradiente vertical de la temperatura y la turbulencia mecánica debido a la acción cortante del viento. (De Oca, 2010)

3.5 Factores geográficos y topológicos de México

El Valle de México (VM) se encuentra a una altura promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar, con 23% menos de oxígeno con respecto a éste, lo que da como resultado que los procesos de combustión interna sean menos eficientes con la subsecuente mayor producción de contaminantes. El VM es una cuenca cerrada, ya que está rodeada de montañas de las sierras del Ajusco, Chichinautzin, Nevada, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina, las que forman una barrera física natural para la circulación del aire, lo que quiere decir de que no hay vientos laminares que puedan barrer los contaminantes.

Debido a su localización geográfica a una latitud de 19° N hace que reciba una abundante radiación solar lo que hace que su atmósfera sea altamente fotorreactiva. En presencia de la luz solar los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno reaccionan fácilmente para formar ozono y otros oxidantes.

Se le agrega el explosivo crecimiento demográfico, de más de 25 millones de personas en el VM, con todos los inconvenientes que lo anterior condiciona en el medio ambiente. Si además se tiene en cuenta que en la capital de la República se concentran las más importantes actividades industriales, económicas, políticas, culturales y de movilidad del país. (Gómez-Gómez, 1998)

En el Valle de México se tiene una flota cercana a los 5 millones de vehículos, que ha crecido en la última década a una tasa promedio anual de 3.8 %. Este crecimiento se explica, entre otras razones, por la expansión irracional de la mancha urbana, un sistema de transporte público insuficiente y deficiente, y un modelo de movilidad que privilegia y subsidia el transporte privado.

La creciente congestión vehicular es un factor que cada vez pesa más en la mala calidad del aire del Valle de México. (Molina, 2016)

La Ciudad de México involucra una elevada densidad poblacional, vehicular e industrial producto de un acelerado desarrollo tecnológico; por tanto, no es novedad que experimente problemas ambientales, destacando la contaminación del aire.

Aspectos meteorológicos que contribuyen a ello son los sistemas anticiclónicos del Golfo de México y el Océano Pacífico, al causar estabilidad atmosférica e impedir la mezcla vertical del aire. Además, su relieve constituye una barrera natural para la circulación del aire impidiendo la dispersión de contaminantes en la zona. (Guadalupe, 2012)

Las condiciones geográficas y climáticas afectan la dispersión de los gases y partículas generadas por la industria, el transporte y las residencias, lo cual determina en última instancia las condiciones atmosféricas de una ciudad o región. La temperatura ambiental, la humedad y la pluviosidad, la velocidad y la dirección del viento, la estabilidad atmosférica, las altas y las bajas presiones, sumado a la topografía (valles, montañas) condicionan la concentración final de los contaminantes atmosféricos. (López, 2007)

Por otro lado la inversión térmica (IT) es un fenómeno natural que se caracteriza por un cambio en la tendencia normal del aire al enfriarse con la altitud; cuando existe ésta, la temperatura aumenta con la altitud en determinado estrato atmosférico. Este aumento térmico puede producirse desde la superficie o a partir de una cierta altura. Se pueden presentar cuatro tipos de inversiones térmicas (de tierra, por subsidencia, por turbulencia y frontal), de tal manera que, bajo ciertas condiciones meteorológicas puede predominar alguna de ellas y contribuir a intensificar la acumulación y concentración de contaminantes en el aire.

La IT se vuelve peligrosa en una zona urbana debido a que la capa de aire caliente que cubre la región impide el desarrollo de corrientes de aire ascendentes que dispersen los contaminantes. Esta situación se agrava en presencia de masas de aire de alta presión que propician una inversión prolongada durante varios días. Los contaminantes del aire en la superficie llegan a concentrarse hasta llegar a valores nocivos o letales para los seres vivos. (Guadalupe, 2012)

El Valle de México con frecuencia presenta inversiones térmicas que provocan el estancamiento de los contaminantes. (Gómez-Gómez, 1998)

3.6 Formas de transporte en la ciudad

Es fundamental entender la ciudad desde el componente de la movilidad urbana, cuya definición se plantea como una necesidad básica de las personas de requerir desplazamientos para acceder a bienes y servicios dentro de la ciudad, que no repercuta negativamente en el bienestar de sus ciudadanos o inhibe las posibilidades de desarrollo económico, cultural, o medioambiental entre otros. (Olaya García, 2013)

Las políticas de transporte desarrolladas a lo largo de más de 60 años en la Ciudad de México fueron un constante intento por tratar de establecer un progresivo control sobre un ámbito netamente moderno como el transporte. (García, 2018)

El crecimiento ampliado que ha presentado la Zona Metropolitana del Valle de México desde la década de 1980 se ha mantenido constante y ha generado una interrelación funcional de la Ciudad de México con zonas metropolitanas.

El fenómeno de la movilidad regional ha tenido consecuencias socioeconómicas y ambientales que han provocado impactos diversos en la Zona Metropolitana del Valle de México, los cuales se han tratado de resolver mediante la política de movilidad de los gobiernos de la Ciudad de México y el Estado de México por medio de una política de limitación de la movilidad; sin embargo, contrario a ella, desde hace varios años se ha privilegiado el desplazamiento en automóvil, que requiere de nuevas infraestructuras no sólo para la metrópoli del Valle de México, sino también para la región central del país.

Dos factores fundamentales para comprender la movilidad en la Ciudad de México; el primero de ellos es la estructura monocéntrica y extendida de la metrópoli, el segundo es el sobreuso de las vialidades por el automóvil privado, por último, la sobresaturación del transporte público. Lo anterior ha obligado a las autoridades a enfrentar el reto de reorganizar los modos en que la ciudad se mueve todos los días. Un reto en el que a pesar de los programas y estrategias implementadas desde la década de 1980 no se ha logrado resolver.

El medio de transporte con mayor frecuencia de uso para ir al trabajo es el transporte público con 45% de los viajes, seguido por la población que exclusivamente camina al trabajo con 32%. Los viajes en automóvil privado representan 21% del total de viajes y sólo 2% de quienes viajan al trabajo, lo hacen en bicicleta.

La Ciudad de México tiene un sistema de transporte que es un complejo agregado de subsistemas y componentes, el cual, en términos de planeación de infraestructura, ha privilegiado la circulación del automóvil particular.

La estructura del sistema de transporte se integra de la siguiente manera:

- Sistemas de transporte público de pasajeros operados por el Gobierno de la Ciudad de México, lo cual implica que el Estado se encarga no sólo de brindar infraestructura necesaria para su funcionamiento, sino también mantenimiento, costos de combustibles, administración, operación de los sistemas, así como recaudación de la tarifa.
- Sistemas de transporte público de pasajeros concesionados, que son unidades que utilizan la infraestructura operada y mantenida por el Estado, y cuentan con un título de concesión que les autoriza el usufructo de los vehículos para otorgar un servicio de transporte; este es el caso de los microbuses, las combis o vagonetas, autobuses, taxis y el Tren Suburbano.
- Sistema Ecobici, el cual inició operaciones en 2010, tiene como objetivo principal brindar a la población el acceso a la bicicleta y, al mismo tiempo, crear una cultura ciclista que fomente el respeto entre los usuarios de la vía pública, así como promover la intermodalidad con el transporte público por medio de la colocación de cicloestaciones cerca de los sistemas de transporte masivo.
- Servicios de transporte público individual a través de aplicaciones. Este sector utiliza algunas aplicaciones para smartphones, las cuales conectan a usuarios con

conductores de autos particulares que prestan el servicio de trasladarlos, con tarifas y condiciones diferentes a las de un taxi. (Fernández Silva, 2018)

El impacto producido por el uso del automóvil influye negativamente en aspectos como el económico, social, ambiental o geográfico, lo que realmente afecta a la población obligándola a buscar otras alternativas para mejorar esta situación. (Olaya García, 2013)

La oferta insuficiente de transporte urbano, las malas condiciones en que operan los distintos medios de transporte, el congestionamiento y las horas invertidas, entre otros, son factores que inciden en los costos sociales, que deben ser sufragados por los sectores público y privado en detrimento de la calidad de vida que ofrece la ciudad y del nivel de vida que alcanzan sus ciudadanos. (Fernández Silva, 2018)

La movilidad contribuye de forma importante a alterar el medio ambiente, pues los agentes que se integran diariamente a trabajar a la ciudad y los automóviles privados que usan son factores de contaminación. (Velázquez, 2018)

El tema de la movilidad en la Ciudad de México tomó dimensiones inesperadas en la primavera del año 2016, debido a la frecuente declaración de Contingencias Ambientales por parte de las autoridades metropolitanas. (Fernández Silva, 2018)

Actualmente el uso del automóvil en la ciudad se entiende como un fenómeno urbano que plantea la necesidad de regulaciones, tanto ambientales como fiscales: verificación vehicular para el control de emisiones de carbono, creación de beneficios en los impuestos para el usuario que compra automóviles nuevos, o incremento de las inversiones tanto de los sectores privados como de los públicos para contener y no obstaculizar los flujos generados por el automóvil y el transporte de carga. (Olaya García, 2013)

Desde un enfoque ciudadano, las tendencias de movilidad en un plano internacional evolucionaron, ahora las ciudades en México y América Latina le están apostando a construir infraestructura ciclo inclusiva, sustentable. El enfoque está altamente ligado con el usuario a través de la funcionalidad, seguridad y conectividad de los espacios, acorde con las necesidades y dinámicas diarias de los habitantes. (Millán Laguna, 2018)

La movilidad urbana sostenible asegura la protección del medio ambiente, manteniendo la cohesión social y la calidad de vida de los ciudadanos y favoreciendo el desarrollo de las comunidades. (Olaya García, 2013)

La infraestructura ciclo-inclusiva tiene el beneficio general de incentivar el uso de la bicicleta y reducir sustancialmente el riesgo de accidentes entre automóviles y usuarios de transporte no motorizado. (Ríos Flores, 2015)

La bicicleta como medio de transporte en las ciudades está ampliamente distribuida por todo el mundo, dadas sus características adaptables al medio urbano, ya que minimiza la ocupación de espacio vial, facilita el transporte intermodal, no contamina y puede llegar a ser el medio de transporte más rápido puerta a puerta para distancias inferiores a 10 km en ciudades congestionadas. (Millán Laguna, 2018)

Para incentivar el uso de la bicicleta, la infraestructura vial debe disponer de un espacio continuo, protegido del tránsito motorizado, separado de los peatones y libre de posibles obstáculos. Existen tres tipos de infraestructura: verde o independiente, compartida y segregada.

- Verde o independiente: carriles para la bicicleta independientes asociados a corredores verdes.
- Segregada: carriles demarcados con pintura u otro tipo de separador. La segregación con pintura se realiza en vialidades con velocidades máximas de 30 km/h y un volumen de circulación de automóviles medio (mayor a 2.000 vehículos/día); la segregación con separador físico es necesaria cuando los ciclistas comparten la vía con velocidades máximas de 50 km/h sin importar el volumen de circulación.
- Compartida: carriles de tránsito compartido con bicicletas. Este tipo de infraestructura se encuentra usualmente en vialidades con velocidades máximas de 30 km/h y un volumen de circulación de automóviles relativamente bajo (menor o igual a 2.000 vehículos/día).

Independientemente de las características de una vialidad, sus velocidades y el tipo de infraestructura para bicicletas, las intersecciones viales son el punto de mayor riesgo para los ciclistas urbanos. (Ríos Flores, 2015)

4 Carbono negro y monóxido de carbono

4.1 Carbono negro

El carbono negro (CN) es un tipo distinto de material carbonoso contenido en un aerosol, formado durante la combustión de combustibles basados en el carbono. (Bond, 2013)

Su presencia en la atmósfera normalmente es el resultado de diversos procesos de combustión incompleta de los motores de combustión interna de los vehículos (en especial motores diésel), emisiones de la industria, las emisiones domésticas (p. e. quema de carbón o de leña) y la quema de biomasa. Tiene un tiempo de vida en la atmósfera entre 5 y 200 años y es eliminado rápidamente por sedimentación. (Segura Redón, 2015)

El CN es el único de los CCVC que no es propiamente un gas de efecto invernadero (GEI) sino un componente de la partícula, aunque tiene un aporte en el calentamiento global. Se trata de uno de los principales componentes del material particulado (PM), tanto PM_{10} como $PM_{2.5}$, que contamina el aire. (Ortuzar, 2016)

4.1.1 Propiedades

Al CN forma parte de los aerosoles en la medida en que cumple con una serie de características que lo hacen único.

La fuerte absorción de la luz en todo el espectro visible es su principal característica. No existe otra sustancia presente en la atmósfera con tal absorptividad de luz visible por unidad de masa.

- Absorbe fuertemente la luz visible con una sección transversal de absorción de masa de al menos $5 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ a una longitud de onda de 550 nm. Esta capacidad de absorber la luz visible es para todas las longitudes de onda del espectro y es esta característica lo que lo hace distinguible de otros aerosoles y es por este motivo por el que se ha mostrado mayor interés en los estudios referentes a los procesos de transferencia radiativa en la atmósfera y el balance de radiación en el sistema climático.
- Es refractario, es decir, conserva su forma básica a temperaturas muy elevadas, con una temperatura de vaporización cercana a los 4000 K.
- Es insoluble en agua, en disolventes orgánicos como el metanol y la acetona, y en otros componentes del aerosol atmosférico.

- Existe como un agregado de pequeñas esferas de carbono. La fuerte absorción de la luz visible en todas las longitudes de onda visibles por parte del carbono negro es la característica distintiva que ha despertado el interés en los estudios de la transferencia de radiación atmosférica. Ninguna otra sustancia con una absorción de luz tan fuerte por unidad de masa está presente en la atmósfera en cantidades insignificantes. El CN tiene una reactividad química muy baja en la atmósfera; su principal proceso de eliminación es en la superficie. El CN se encuentra generalmente en partículas de aerosol atmosférico que contienen una serie de otros materiales, muchos de los cuales se emiten conjuntamente con el CN desde una variedad de fuentes. (Bond, 2013)
- Existe como un agregado de pequeñas esférulas consistentes en capas de grafito arrugadas en forma de cascarón. (Es una diferencia respecto al carbón grafitico, el que es plano). El CN es considerado un contaminante climático de vida corta, esto es debido a que su forzamiento radiativo atmosférico se detiene dentro del orden de semanas luego que cesan sus emisiones, desapareciendo por deposición húmeda y seca. (Madaraiga, 2018)

4.1.2 *Cuantificación de niveles*

Existen métodos de medida de emisiones de CN en tiempo real y métodos que se basan en la medida del CN retenido en un filtro por el que se hace pasar durante cierto tiempo y a un caudal determinado los gases que genera la fuente de emisión. Para determinar la fracción de CN recogida en los filtros es necesario emplear métodos específicos. Los dos principales son:

- Método óptico: calcula el contenido de CN a través de la atenuación de la luz transmitida a través de un filtro, que puede ser de fibra de vidrio, fibra de cuarzo, papel, teflón, etc. Normalmente para medir el CN se utilizan longitudes de onda pertenecientes a la zona del espectro entre el verde y los rayos infrarrojos, ya que es donde más absorbe. Existen instrumentos que pueden medir la absorción para diferentes longitudes de onda, lo que da información sobre los distintos componentes que absorben a cada longitud, como por ejemplo el Brown Carbon. Para convertir la absorción de luz en masa de CN es necesario un factor de conversión, que se establece de forma experimental. El método no es destructivo, es decir, el filtro mantiene la capa depositada de material particulado intacta. Algunos de los equipos que se basan en el método óptico son los talómetros, los reflectómetros o los transmisómetros.
- Método termo-óptico: es el método más ampliamente utilizado. Se basa en la estabilidad térmica y química de los componentes del PM para obtener su composición. Es un método más avanzado ya que permite calcular el cociente Carbono Orgánico/Carbono Elemental. Para ello es necesario calentar el filtro, por lo

que se trata de un método destructivo. Para aplicar este método es necesario utilizar filtros de fibra de cuarzo. (Muñoz, 2016)

4.1.3 *Interacción ambiente-clima*

El CN tiene un papel importante en el sistema climático de la Tierra debido a que absorbe la radiación solar, influye en los procesos de formación y en la dinámica de las nubes y altera significativamente el proceso de derretimiento de la nieve y las cubiertas de hielo. Está formado generalmente por agregados de partículas microscópicas de carbón rodeadas por compuestos orgánicos y pequeñas cantidades de sulfatos y nitratos. (Gallardo, 2017)

El CN afecta el clima con mecanismos directos e indirectos. El más estudiado de estos mecanismos es el forzamiento radiativo, el cual está directamente relacionado con el cambio de temperatura.

El forzamiento radiativo es la medida de como un contaminante afecta el balance entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente de la Tierra.

Un contaminante que incrementa la cantidad de energía en el sistema climático de la Tierra se dice que tiene un “forzamiento radiativo positivo”, calentando el sistema. En contraste, un contaminante que tiene un “forzamiento radiativo negativo” reduciendo la cantidad de energía en el sistema climático permitiendo su enfriamiento.

Además del forzamiento radiativo, el CN es asociado con otros efectos incluidos el oscurecimiento de superficies y cambios en los patrones de precipitación. (Hernández, 2016)

El CN forma parte de los llamados contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), los cuales tienen un importante potencial de calentamiento global (PCG) y un tiempo de vida en la atmósfera más corto que el bióxido de carbono, el principal GEI.

Su potencial de interferir en el clima adquiere tres formas: En la primera, sus partículas oscuras absorben la luz solar, elevando los niveles de la temperatura a su alrededor. En la segunda, el carbono negro actúa como agente acelerador en el derretimiento de glaciares y nieve al depositarse sobre ellos oscureciéndolos. La tercera forma —referida a la interacción del carbono negro con las nubes y a la influencia que tiene en su reflectividad, duración, estabilidad y precipitación (Ortuzar, 2016)

Los distintos atributos climáticos del CN y de los gases de efecto invernadero dificultan la interpretación con los parámetros de medición comúnmente usados para comparar sus impactos climáticos. (Lipp, 2020)

4.2 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido, ligeramente menos denso que el aire. En la naturaleza se genera CO en la producción y degradación de la clorofila, mientras que su origen antropogénico se sitúa en las combustiones incompletas.

El monóxido de carbono (CO) es un gas relativamente abundante y estable en la atmósfera. Es producido básicamente por los microorganismos en la superficie y los océanos, y también en las combustiones incompletas. Los sumideros principales son el consumo por las bacterias en el suelo, la fotosíntesis y las reacciones fotoquímicas en la estratosfera. (Castillo, 1999)

4.2.1 Propiedades

Los gases traza en la atmósfera contribuyen en menos de 1% de la composición atmosférica y a pesar de su baja concentración determinan las propiedades físicas y químicas de la atmósfera. Algunos de estos gases son gases de efecto invernadero o son elementos claves para la formación de éstos. Periodos largos de mediciones de gases traza permiten comprender el comportamiento y evolución de las fuentes y sumideros, su comportamiento químico y su impacto en el sistema climático. (Cholan Rodriguez, 2016).

El monóxido de carbono (CO) afecta a la capacidad de oxidación de la troposfera, y, en particular, juega un papel importante en los ciclos del radical hidroxilo (OH), radical hidropéroxilo (HO₂) y ozono (O₃). La vida media del CO va desde diez días sobre regiones continentales en verano hasta más de un año sobre las regiones polares en su correspondiente invierno. Su relativamente corta vida media (comparada con la de los gases de efecto invernadero bien mezclados) y la distribución irregular de sus fuentes, dan lugar a grandes variaciones temporales y espaciales de la fracción molar de CO. Las mayores fuentes de CO son la quema de combustibles fósiles, la quema de biomasa, la oxidación de CH₄, y la oxidación de hidrocarburos distintos del CH₄. El mayor sumidero de CO es la reacción con OH, mientras que la deposición en superficie es un sumidero pequeño.

El ciclo del ozono es afectado por el CO. El ozono, además de ser un gas muy reactivo que aparece en la atmósfera por reacciones fotoquímicas, es un gas de efecto invernadero. El forzamiento radiativo debido al ozono troposférico es 0.40 W/m²; mientras que para el ozono estratosférico el forzamiento radiativo es -0.05 W/m², debido a la disminución de la concentración de O₃ por la presencia de halocarbonos antropogénicos.

El CO no es un gas de efecto invernadero, pero se puede considerar como un gas de efecto invernadero indirecto debido a su efecto sobre las concentraciones de CO₂, CH₄ y O₃, con un forzamiento radiativo efectivo neto de 0.23 W/m², como se detalla a continuación: 0.09 W/m² debidos a la oxidación del CO emitido a CO₂, 0.07 W/m² debidos al CH₄ atmosférico que no se ha destruido por la emisión de CO que compite con el CH₄ por el OH, que es el principal destructor de CH₄, y 0.08 W/m² debidos a que el CO emitido actúa como precursor del O₃. (Gómez Peláez, 2018)

4.2.2 *Cuantificación de niveles*

El CO se mide con el instrumento MOPITT (Measurement Of Pollution in The Troposphere) a bordo del satélite Terra desde marzo de 2000. Este compuesto tiene un tiempo de vida de aproximadamente 2 meses y su principal fuente en Sudamérica es la quema de biomasa, por lo que es posible utilizarlo como trazador de la contaminación producida. El MOPITT mide el CO en 6 niveles (850, 700, 500, 350, 250 y 150 mb), aunque solo son independientes dos capas: la troposfera baja y alta. Las mediciones no son sensibles en la capa límite sino que se mide el CO una vez que alcanza la troposfera libre. En particular en el sur de Sudamérica, se utilizan los valores en 850 mb, ya que se estableció mediante el cálculo de trayectorias que este nivel es el más representativo de la situación real.

Las mediciones de las concentraciones de CO en la atmósfera pueden también realizarse a través de un instrumento llamado AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), que es basado en la radiación a longitudes de onda específicas asociado con la absorción por concentraciones de monóxido de carbono, el sensor AIRS es sensible a CO en la troposfera media a una altura de entre 2 y 10 km, con un pico de sensibilidad a una altitud de unos 5 km. (Cholan Rodríguez, 2016).

4.2.3 *Interacción ambiente-clima*

El monóxido de carbono (CO) afecta a la capacidad de oxidación de la troposfera, y, en particular, juega un papel importante en los ciclos del radical hidroxilo (OH), radical hidroperóxido (HO₂) y ozono (O₃).

Su relativamente corta vida media (comparada con la de los gases de efecto invernadero bien mezclados) y la distribución irregular de sus fuentes, dan lugar a grandes variaciones temporales y espaciales de la fracción molar de CO.

El ciclo del ozono es afectado por el CO. El ozono, además de ser un gas muy reactivo que aparece en la atmósfera por reacciones fotoquímicas, es un gas de efecto invernadero.

El CO no es un GEI, pero se puede considerar como uno debido a su efecto sobre las concentraciones de CO₂, CH₄ y O₃, con un ERF neto de 0.23 W/m², como se detalla a continuación: 0.09 W/m² debidos a la oxidación del CO emitido a CO₂, 0.07 W/m² debidos al CH₄ atmosférico que no se ha destruido por la emisión de CO que compite con el CH₄ por el OH, que es el principal destructor de CH₄, y 0.08 W/m² debidos a que el CO emitido actúa como precursor del O₃. (Gómez Peláez, 2018)

4.3 Efectos en la salud

El problema ambiental de la contaminación atmosférica es uno de los más relevantes, tanto por su magnitud como por la percepción de la comunidad y se manifiesta especialmente en asentamientos de tipo urbano, industrial y minero.

La contaminación atmosférica constituye un problema ambiental por cuanto la acción antrópica genera un efecto sobre un componente ambiental (aire) y el deterioro de éste afecta la supervivencia y calidad de vida del hombre. (Barrios Casas, 2004)

Las emisiones a la atmósfera relacionadas con el cambio climático pueden agravar los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de los ciudadanos, no sólo indirectamente por el impacto en los fenómenos meteorológicos sino de manera inmediata por los efectos directos de los contaminantes sobre la salud.

Aún existen incertidumbres acerca de los mecanismos fisiopatogénicos de los contaminantes atmosféricos. Sin embargo se conoce bien que los efectos de la exposición a la contaminación atmosférica son múltiples y de diferente severidad, siendo los más afectados los sistemas respiratorio y cardiocirculatorio. Estos efectos mantienen una gradación tanto en la gravedad de sus consecuencias como en la población susceptible afectada. (Ballester, 2005)

Los efectos en la salud humana están determinados por la exposición a la contaminación del aire y la toxicidad de los contaminantes, e incluyen desde síntomas agudos (como dolor de cabeza e irritación de los ojos) hasta enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso la muerte prematura. La diversidad de los efectos depende de factores tales como la concentración y las características del contaminante, además de la susceptibilidad del individuo expuesto y el tiempo de exposición. La exposición se considera crónica cuando uno está expuesto a la contaminación durante periodos largos (por ejemplo, años), y aguda cuando se trata de periodos cortos (por ejemplo, días u horas). (Zuk, 2007)

Una de las variables ambientales importantes, por lo tanto, es la concentración de los contaminantes en el aire. La concentración no sólo es resultado de la magnitud de las emisiones sino también de la manera en que los principales contaminantes se transportan, se dispersan y reaccionan entre sí en la atmósfera para formar contaminantes secundarios. Estos mecanismos están condicionados por una serie de factores meteorológicos. Entre ellos destacan la presencia de vientos, la temperatura, la radiación solar, la altura o profundidad de la capa de mezcla, las precipitaciones y la topografía local. (Matus, 2002)

La interpretación de las reacciones que produce la contaminación atmosférica en la salud humana se fundamenta en estudios de dos clases, toxicológicos y epidemiológicos. Ambos tipos de estudios se consideran complementarios cuando se trata de valorar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud.

- Estudios toxicológicos experimentales, en el hombre o en los animales, en los que la concentración, duración y condiciones de la exposición son controladas por el investigador. La principal ventaja radica precisamente en el control de las condiciones de exposición, por lo que la medida de ésta es más precisa que en el caso de los estudios observacionales. En cuanto a los inconvenientes, éstos radican fundamentalmente en el hecho de someter a los sujetos en experimentación a una situación artificial, ya que se utiliza un reducido número de contaminantes en situación ideal, a grandes dosis y en circunstancias ambientales especiales. Además, las poblaciones con las que se experimenta son poco representativas.
- Estudios epidemiológicos, en los que se observan los sucesos que se desarrollan en las poblaciones humanas bajo condiciones naturales, circunstancia en la que radica su ventaja más significativa. Como medida de la contaminación atmosférica se utilizan, habitualmente, los datos de las redes de vigilancia de la contaminación atmosférica.

Las series temporales que examinan la relación entre contaminación atmosférica y salud, se debería tener en cuenta, por un lado, la adecuación de la metodología estadística utilizada, y, por otro, los factores de confusión considerados.

- Factores geofísicos: aquellos producidos por los ciclos estacionales de energía y radiaciones en la superficie de la tierra. Conllevan cambios en la meteorología, la contaminación y la salud. Su ciclo fundamental es el año.
- Factores meteorológicos: la temperatura ambiental y la humedad son dos variables con las que se intenta resumir la meteorología, lo que para algunos autores resulta insuficiente para poder ajustar adecuadamente un fenómeno tan complejo.
- Factores socioculturales: se corresponden con el nivel de desarrollo económico e industrial, la cultura, la religión, la mentalidad de las personas, el país, la comunidad, etc. El ciclo fundamental de la actividad sociocultural en la mayoría de países y culturas es la semana, que se corresponde con el ciclo laboral básico. (Ballester Díez, 1999)

Los estudios epidemiológicos miden el efecto de los contaminantes atmosféricos sobre la salud de las personas, sin embargo, estudios específicos para la ZMVM son limitados.

4.3.1 *Carbono negro*

La OMS, en su reporte *Health Effects of Black Carbon*, indica que los resultados de los efectos en la salud relacionados con la exposición a $PM_{2.5}$ también se asociaron con el carbono negro. Los estudios sobre los efectos sobre la salud a corto plazo indicaron que las asociaciones con el CN son más robustas que las relacionadas con las $PM_{2.5}$ o PM_{10} , lo que sugiere que podría ser un mejor indicador de las sustancias nocivas provenientes de fuentes de combustión (especialmente de tráfico) que la concentración de masa de las partículas. (Sedema, 2015)

Las PM están formadas por una mezcla compleja de componentes cuyas características físicas y químicas son muy variadas. Esta complejidad, que se da tanto en ambientes urbanos como en rurales, complica la interpretación de los numerosos resultados de los estudios e investigaciones que se han llevado a cabo sobre las partículas suspendidas en todo el mundo, pues el potencial de que causen daños a la salud puede variar de acuerdo con su tamaño, su composición química y las fuentes de donde provienen. Sin embargo, hay evidencia muy robusta sobre los impactos negativos en la salud por la exposición aguda o crónica a las PM en estudios epidemiológicos y toxicológicos en todo el mundo. Los efectos más documentados son la mortalidad y la hospitalización de pacientes con enfermedad pulmonar.

4.3.2 *Monóxido de carbono*

El monóxido de carbono, que por sus características físico-químicas es llamado “el asesino silencioso”, utiliza múltiples mecanismos de toxicidad que explican sus potenciales efectos adversos en la salud humana. (Téllez, 2006)

Durante la exposición, el CO no se acumula, su absorción y su excreción dependen de la diferencia de la presión parcial del gas en la sangre y en el aire alveolar. Este compuesto compite con el oxígeno por los sitios de unión de las hemoproteínas acarreadoras de oxígeno y forma un compuesto estable, la carboxihemoglobina (COHb), que desplaza al oxígeno, por lo que disminuye la presión parcial de oxígeno en la sangre y ocasiona hipoxia tisular. La relación entre el CO en el aire y las concentraciones de carboxi-hemoglobina en la sangre dependen principalmente de la duración de la exposición y de la función cardiorrespiratoria del individuo. De acuerdo a la norma de calidad del aire de los Estados Unidos de Norteamérica, la concentración de carboxihemoglobina permisible en una persona expuesta a una concentración de 10 mg por m^3 (9 ppm) de monóxido de carbono durante 8 horas o de obstructiva crónica (EPOC), exacerbación de los síntomas y aumento de la necesidad de terapia en asmáticos, mortalidad y hospitalización de pacientes con enfermedades cardiovasculares, mortalidad y hospitalización de pacientes con diabetes mellitus, aumento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación de los pulmones, inflamación sistémica, disfunción endotelial y vascular, desarrollo de aterosclerosis, aumento en la incidencia de infecciones y cáncer de pulmón. (INECC, 2011)

Estudios epidemiológicos en comunidades han incluido el CN como uno de los muchos indicadores de las partículas finas en la contaminación del aire. De los componentes de las PM_{2.5}, el CN es uno de los grandes contribuidores a la masa total de las PM_{2.5}. Los efectos observados del CN en estudios de salud son similares a los observados para las PM_{2.5} y algunos otros constituyentes del PM (Ej., níquel, vanadio etc.), sugieren que estos efectos no son solo atribuidos al CN. (Hernández, 2016)

El CN presente en el aire que respiramos, provoca importantes efectos negativos sobre la salud, ya que por su pequeño tamaño estas partículas son inhaladas por el ser humano y pueden afectar directa o indirectamente al sistema pulmonar y los bronquiolos e incrementar el riesgo de padecer infecciones respiratorias, contribuyendo a aumentar la tasa de muertes prematuras y de numerosas enfermedades respiratorias y cardiovasculares registradas a nivel mundial. Asimismo, estas partículas son consideradas por la Comisión Europea como la primera causa de muerte prematura en materia medioambiental. En lo que respecta al cambio climático, pese a su corta permanencia en la atmósfera, estas sustancias son un potente forzante climático, mediante la absorción de radiación solar, que vuelven a emitir en forma de calor. (Madariaga, 2018)

40 mg por m³ (35 ppm) durante una hora es de 1.2 a 1.5%, pero en fumadores de 20 o más cigarrillos por día puede alcanzar un valor de 4 a 7%.

Aunque se ha observado que concentraciones de 3.2 a 4.2% de carboxihemoglobina se asocian a deterioro de la capacidad de razonar, los efectos nocivos para la salud se observan cuando la concentración es de 5% o más. Los principales efectos de la inhalación de monóxido de carbono son: alteraciones de la percepción y de las funciones cerebrales, disminución de los reflejos osteomusculares, mareo, inconsciencia y muerte. Las personas con insuficiencia cardiaca son particularmente susceptibles a este contaminante porque a diferencia del individuo sano, no pueden compensar la falta de oxígeno con un aumento del flujo sanguíneo al organismo. En este grupo de pacientes la inhalación de monóxido de carbono puede ocasionar desde una disminución de la capacidad para hacer ejercicio y dolores musculares, hasta manifestaciones clínicas de angina de pecho. (Vallejo, 2003)

En intoxicación crónica las manifestaciones clínicas pueden variar dependiendo del tiempo de exposición, las concentraciones del tóxico y la susceptibilidad individual. Los principales efectos crónicos por exposición a monóxido de carbono son alteraciones cardiovasculares y neuropsicológicas.

Las alteraciones neuropsicológicas se relacionan con presencia de cefalea persistente, fatiga, reducción de la percepción visual, la destreza manual, disminución de memoria, disminución de la concentración, atención y las capacidades para conducir, trastornos del sueño con predominio de insomnio, irritabilidad y con menos frecuencia deterioro demencial. También se ha relacionado la exposición crónica a monóxido de carbono con la aparición de un cuadro neurológico similar al parkinson. (Téllez, 2006)

5 Metodología

La monitorización personal se considera el patrón de oro para la evaluación de la exposición a los contaminantes atmosféricos y se ha demostrado que proporciona asociaciones estadísticas más fuertes con los resultados de salud que la monitorización en lugares fijos e información adicional sobre los patrones de exposición, como las vías de exposición o los niveles máximos de exposición. Sin embargo, la realización de la monitorización personal en estudios epidemiológicos a gran escala ha sido muy limitada hasta la fecha debido a que los monitores personales tradicionales suelen ser engorrosos, ruidosos y caros de realizar. (Cai, 2014)

Los muestreadores pasivos y activos corresponden a una metodología discontinua, implicando el posterior análisis en el laboratorio, mientras que los muestreadores automáticos y sensores remotos pertenece a la metodología continua, los cuales la captación y análisis del contaminante en el punto de muestreo de forma continua y automática, sin embargo, presentan desventajas por su costo y su complejo método de operación, de forma tal que en función del método de la captación del contaminante será el método de análisis.

Muestreo pasivo

Estos muestreos son ampliamente utilizados para la evaluación de la calidad del aire, por su bajo costo y manejo sencillo. Sirven como indicativo de la contaminación, permiten llevar a cabo evaluaciones de tendencias a largo plazo, e identificar zonas de riesgo que deben ser monitoreadas con analizadores automáticos y equipos activos manuales para verificar el cumplimiento de la legislación ambiental. Este método de muestreo colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un periodo adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. (Campa, 2019)

Muestreo activo

Las muestras de contaminantes se recolectan por medios físicos o químicos para su posterior análisis en el laboratorio. Por lo general, se bombea un volumen conocido de aire a través de un colector –como un filtro (muestreador activo manual) o una solución química (muestreador activo automático)- durante un determinado periodo y luego se retira para el análisis. Los más comunes se listan a continuación (Córdova Peña, 2019)

- Captadores de gases y partículas. Captador de pequeño volumen. Se emplea para la toma de muestras de partículas en suspensión en el aire y para las muestras de gases, pudiéndose emplear al mismo tiempo para ambos.

- Captadores de gases y partículas. Captador de pequeño volumen. Se emplea para la toma de muestras de partículas en suspensión en el aire y para las muestras de gases, pudiéndose emplear al mismo tiempo para ambos.
- Captadores de gases y partículas. Captador de pequeño volumen. Se emplea para la toma de muestras de partículas en suspensión en el aire y para las muestras de gases, pudiéndose emplear al mismo tiempo para ambos. (Campa, 2019)

Analizadores automáticos

Pueden proporcionar mediciones de alta resolución (generalmente en promedios horarios o mejores) en un único punto para varios contaminantes criterios (SO_2 , NO_2 , CO , MP), así como para otros contaminantes importantes como los COV. La muestra se analiza en línea y en tiempo real, generalmente a través de métodos electro ópticos: absorción de UV o IR; la fluorescencia y la quimiluminiscencia son principios comunes de detección.

Sensores remotos

Son instrumentos desarrollados recientemente que usan técnicas espectroscópicas de larga trayectoria para medir las concentraciones de varios contaminantes en tiempo real. Los datos se obtienen mediante la integración entre el detector y una fuente de luz a lo largo de una ruta determinada. Los sistemas de monitoreo de larga trayectoria pueden cumplir un papel importante en diferentes situaciones de monitoreo, principalmente cerca de las fuentes. (Córdova, 2019)

5.1 Equipo de monitoreo

Los sensores de bajo costo (SCN) son una gama de sensores de menor precio y tamaño que los posiciona como los más usados en el mercado actual en diferentes áreas de la industria y más recientemente en el área de monitoreo de calidad del aire. Otras ventajas significativas son los costos de operación y mantenimiento involucrados, además de tener la facultad de presentar información en tiempo real generando datos en volumen suficiente y disponible en todo momento. Por otra parte, al ser una tecnología que se encuentra aún en desarrollo en el área de calidad del aire, presenta como sus principales desventajas la falta de estandarización de principios y validación de información.

Para el monitoreo de calidad de aire se requiere que se consideren dos tipos de variables, las variables meteorológicas y las variables propiamente de calidad del aire (concentración/presencia de contaminantes). Los SCN disponibles en el mercado nos permiten monitorear ambos tipos, sin embargo, en el caso de aquellos que recolectan datos

de la concentración de los contaminantes nos limitan en el rango de detección y en la sensibilidad del cambio de estos.

Las ventajas de esta tecnología son obvias: menor costo del equipo, así como de operación y mantenimiento, comparada con la tecnología actual en el área de calidad del aire. La comunicación en tiempo real, que permite la acción de correcciones inmediatas; la generación de datos en volumen, que permite el desarrollo de programas de prevención y contingencia, así como de modelos de proyección. La facilidad de difusión de los datos generados a todos los interesados permite tener un control de exposición personal relacionándolo directamente con la prevención de salud individualizada.

Sus principales desventajas tenemos que aún no se cuenta con protocolos de calibración y operación estandarizados. En el caso de ciudades con climas extremos la limitante de los rangos de operación de temperatura es un reto a resolver dado que la mayoría de los sensores disponibles comercialmente solo alcanzan los 55°C y en todos los casos el trabajar a esta temperatura aumenta su porcentaje de error. (Navarrete, 2019)

5.1.1 Microetalómetro

El microAeth es un instrumento basado en la tecnología del Aethalómetro y diseñado específicamente para el mapeo móvil de la distribución del CN. Es ligero, de tamaño compacto y fácil de manejar, por lo que tiene el potencial de ser utilizado en estudios epidemiológicos tanto como monitor de aire personal como de interiores. Como cualquier monitor en tiempo real, los datos del microAeth pueden ser muy variables o ruidosos, especialmente cuando el paso de tiempo entre las mediciones se acorta o las concentraciones son muy bajas, por lo que puede ser ventajoso llevar a cabo un post-procesamiento de los datos en tiempo real para promediar los puntos adyacentes y suavizar el ruido de la señal real. (Cai, 2014)

El Aethalometer es un instrumento que permite medir en tiempo real la concentración de las partículas de aerosol CN en una corriente de aire. El principio de funcionamiento del etalómetro se basa en la medición de la atenuación óptica de un haz de luz transmitido a través de una muestra recogida en un filtro. Con un etalómetro se supone que el ATN sólo aumenta debido a la absorción de luz por la acumulación de CN en el filtro. Por lo tanto, la concentración de CN informada por el etalómetro a partir de la tasa de cambio de la atenuación. (Park, 2010)

5.1.2 *Langan*

El Langan CO Measurer es un paquete integrado que combina software sofisticado con un instrumento electrónico confiable para medir el monóxido de carbono a una alta resolución en niveles bajos. El equipo cuenta con un sensor electroquímico optimizado para observar monóxido de carbono en el rango de 0 a 200 partes por millón (ppm) con una resolución de 0.05 ppm (50ppb). Así mismo, posee también un Sensor Electroquímico CiTiceL® el cual se usa para leer y restablecer el instrumento, para mostrar los resultados en presentaciones útiles y para traducir datos a otras computadoras y una pantalla digital está integrada en la carcasa (González Rojas, 2018).

5.2 **Material y software de apoyo**

5.2.1 *Bicicletas y equipo de seguridad*

Las bicicletas presentan una serie de ventajas destacables dentro de la promoción de un esquema de movilidad sostenible, principalmente: la reducción de las emisiones contaminantes que provocan el cambio climático y de los niveles de ruido, un incremento de la intermodalidad en el transporte urbano debido a su complementariedad con otros medios como puede ser el tren, tranvía, metro o autobús y los efectos positivos en la salud. (Bea Alonso, 2009)

5.2.2 *Google Earth*

Google Earth es: un programa informático similar a un Sistema de Información Geográfica (SIG), creado por la empresa Keyhole Inc., que permite visualizar imágenes en 3D del planeta, combinando imágenes de satélite, mapas y el motor de búsqueda de Google que permite ver imágenes a escala de un lugar específico del planeta. Apareció con este nombre en mayo de 2005, cuenta con diferentes versiones y ha ido cambiando, a través de su estructura de Web 2.0, gracias a la participación de los usuarios. Podemos incluir versión de pago y gratuita, con diferentes prestaciones según se trate de una u otra.

Nueva tecnología de Internet que permite observar, comparar, analizar, diferenciar, elaborar y alcanzar los conocimientos del área de la Geografía. Proporciona la posibilidad de acceder al aspecto físico externo de la Tierra y, a partir de él, organizar conocimientos que sin una observación directa del fenómeno. (Trigueros, 2010)

5.2.3 *Microsoft Excel*

El desarrollo de las investigaciones y sobre todo el manejo de los datos en la actualidad requieren de la utilización de herramientas potentes para facilitar el uso de los datos, agilizar

la obtención de los resultados y para obtener una mejor precisión de los mismos. Una de esas potentes herramientas que pueden utilizarse en nuestro medio es el paquete de office de Windows y dentro de este al programa Microsoft Excel, el cual tiene una amplia gama de utilidades.

El análisis de datos provee diferentes pruebas, entre ellas: estadística descriptiva que rinde el siguiente informe para una o más variables seleccionadas, como se mostrará a continuación o el análisis comparativo de dos o más poblaciones.

En ese sentido el análisis de datos provee, mediante la inferencial paramétrica, una serie de pruebas entre las que figuran aquellas más comúnmente usadas como: análisis de varianza de un factor, regresión, prueba f para la igualdad de dos varianzas, prueba t para dos muestras pareadas, prueba t para dos muestras independientes con varianzas iguales, prueba t para dos muestras independientes con varianzas desiguales y prueba z para las medias de dos muestras. (González, 2006)

5.2.4 *Matlab*

El análisis de datos (imágenes y señales) a través del software matlab, tiene como objetivo principal la manipulación de estos ya sea en el dominio del tiempo a fin de buscar eventos característicos relacionados con la temporalidad y el dominio de la frecuencia evidenciando el comportamiento frecuencial que posee una data en particular según un fenómeno específico.

Matlab es una herramienta muy versátil y robusta que permite analizar datos asociados a la representación de fenómenos en distintas áreas del conocimiento. (Porrás González, 2018)

5.3 Selección de rutas

Se seleccionaron dos rutas para recorrer en bicicleta, y una ruta a pie por la acera en avenidas con disponibilidad de carriles especializados para su uso con bicicleta como se puede observar en la Figura 1.



Figura 1. Rutas seleccionadas

La primera ruta ciclista recorrida es la ruta San Ángel (verde). La segunda ruta es la ruta Reforma (azul) La tercera ruta se cubrió a pie, en la acera junto a la ciclovía Insurgentes (rojo). En la Tabla 1, se muestran las características generales de cada una de las rutas establecidas.

Tabla 1. Características generales de las rutas

Ruta	San Angel	Reforma	Insurgentes (acera)
Modo de transporte	Bicicleta	Bicicleta	A pie
Distancia total recorrida en km	12	10	10
Principales rutas recorridas	Revolución Insurgentes Felix Cuevas	Patriotismo Reforma Insurgentes	Insurgentes
Estaciones de metro	Mixcoac Insurgentes Sur Barranca	Chapultepec Insurgentes	
Paradas de autobús	Metro Mixcoac Metro Barranca San Angel Estadio Olímpico Universitario	Chapultepec Metro Insurgentes Metro	6 paradas

La ruta de San Ángel tiene tres divisiones principales en las cuales existe una variación entre la distancia de separación entre autobuses, automóviles y ciclistas, pendiente y distancia entre cada una: Revolución, Insurgentes y Feliz Cuevas. Revolución mantiene 2 m de separación con los ciclistas, una longitud de 5 km y pendiente positiva, Insurgentes mantiene 8 m de separación con los ciclistas, una longitud de 5 km y pendiente negativa, y Felix Cuevas, donde se comparte la ruta entre autobuses, automóviles y ciclistas, aproximadamente 1.5 km de longitud.

De igual manera, la ruta Reforma tiene tres divisiones principales en las cuales existe una variación entre la distancia de separación entre autobuses, automóviles y ciclistas, pendiente y distancia entre cada una: Escandón, Reforma y Condesa. Escandón mantiene 2 m de separación con los ciclistas, una longitud de 3 km y un pendiente positiva, Reforma mantiene una distancia de aproximadamente 2 m con los ciclistas, una longitud de 2 km y pendiente cero, y Condesa mantiene una distancia de 8 m con los ciclistas, una longitud de 4 km y una pendiente positiva.

Finalmente, la ruta Insurgentes recorrida a pie, la cual mantiene una distancia aproximada de 2 m de la ciclovía y 4 m de la vía automovilística y 15 m de la vía designada para el tránsito del metrobús. Esta ruta fue recorrida en ambas direcciones para llevar a cabo un recorrido total aproximado de 10 km.

5.4 Obtención de muestras

Se procuró mantener una velocidad media constante de aproximadamente 15 km/h en la bicicleta para evitar alteraciones en las lecturas de concentración debido a las fluctuaciones de velocidad a lo largo del tiempo de medición, permitiendo tener el mismo número de registros para cada viaje con distancias similares.

Los instrumentos se colocaron en una mochila y las muestras se tomaron a la altura del rostro del ciclista y/o del peatón, para que éstas tomaran registros similares a lo respirado naturalmente.

La exposición de los ciclistas y peatones a los contaminantes se realizó en diferentes horarios establecidos para todos los días con el fin de obtener datos representativos relacionados a los cambios de flujo vehicular y las variaciones atmosféricas.

Los datos recabados fueron descargados, se verificó la información y una limpieza de datos donde se segregaron aquellos datos atípicos, negativos, sin registro y errores que pueden ser ocasionados por un error de muestreo, acontecimientos extraordinarios o errores del propio equipo, así como una variabilidad en los resultados estadísticos, se realizó una corrección de

las estampas de tiempo y se restó a lo obtenido de CO y al CN de cada día la concentración mínima que corresponde a la concentración de fondo de la atmosfera.

Posteriormente, mediante estadística básica con apoyo de Microsoft Excel, se desarrollaron los análisis de comportamiento obteniendo series de tiempo a partir del cálculo de la media por cada 30 segundos registrados en los sensores e histogramas donde se exponen las concentraciones de CN y CO respectivamente; gracias a esto, se pudo hacer una limpieza de datos donde se segregaron aquellos datos atípicos que pueden ser ocasionados por un error de muestreo, falta de datos, acontecimientos extraordinarios o errores del propio equipo, así como una variabilidad en los resultados estadísticos.

Se realizó un estimado promedio de la concentración media por kilómetro expuesto a partir una media global de los datos por recorrido en función de la base de datos depurada:

$$A = \frac{\bar{c}}{km} \quad \text{Ecuación 1}$$

c: media global

Km: kilómetro

A: concentración media por kilómetro

Se realizó el cálculo para estimar la dosis de exposición (D) en mg/kg*día, que es la cantidad total de contaminante a la que el ciclista o el peatón ha estado expuesto durante su recorrido estimando que respira a una velocidad (Vr) de 15,3 m³/día (0,6 m³/h).

De acuerdo con la ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) de Estados Unidos:

$$D = \frac{C \times IR \times EF}{BW} \quad \text{Ecuación 2}$$

C: concentración del contaminante (mg/m³)

IR: tasa de inhalación (m³ /día)

EF: factor de exposición

BW: peso de individuo (kg)

Siendo necesario calcular previamente el factor de exposición (EF):

$$EF = \frac{F \times ED}{AT}$$

Ecuación 3

Donde

F: frecuencia
(días/años)

ED: duración de la exposición (años)

AT: tiempo promedio (días*año)

6 Resultados

6.1 Formas de movilidad en la CDMX

En la actualidad, el uso de vehículos motorizados como automóviles, autobuses, etc., se han convertido en el eje principal para la movilidad para todos los sectores populares, promoviendo su uso indiscriminado dentro de las ciudades, y teniendo como principales rutas, vías adaptadas para éste tipo de vehículos.

El uso de la bicicleta se ha fomentado en las últimas décadas debido al cambio de la política pública y la revalorización del entorno, buscando mejorar la calidad de vida y salud pública. A pesar de los múltiples beneficios que otorga su uso como beneficios en la salud, la economía familiar, el entorno urbano y la calidad del aire, falta su promoción y adaptación de las vías públicas.

Sin embargo, en América Latina se ha readaptado y promovido el uso de la bicicleta como medio de transporte.

La Ciudad de México ha destacado dentro de este ámbito debido a la implementación de la Ley de Movilidad, anteponiendo al peatón, ciclista, medios de transporte público, transporte de carga y por último el automóvil particular como prioridad, siendo aprobada por el gobierno de la Ciudad de México y el Plan Integral de Movilidad. Se ha buscado fomentar el ciclismo a través de la adaptación y construcción de vías para ciclistas principalmente:

- Creación de ciclovías y ciclocarriles
- Integración de las bicicletas como forma de transporte público
- Creación de estacionamientos para bicicletas
- Establecimiento de un sistema de bicicletas públicas y su préstamo gratuito
- Fomentación de la cultura sobre el uso de la bicicleta.

Sin embargo, existen diferentes barreras de accesibilidad para la movilidad cotidiana en bicicleta:

- Habilidades: Conocimiento sobre cómo cambiar una llanta, darle mantenimiento, estacionarse, qué hacer en caso de robo, cómo manejar entre los autos y qué accesorios utilizar para manejar de forma segura en la ciudad.
- Físico-espaciales: Influencia de la distancia, la infraestructura ciclista o el tipo de superficie, en la elección de la bicicleta como transporte.
- Socio-culturales: La influencia de la compañía en los viajes, el apoyo de los grupos de ciclismo urbano, la familia o los amigos en el uso de la bicicleta como transporte.

- Financieras: Influencia del costo de los diversos medios de transporte (metro, microbús, trolebús, metrobús, taxi, tren suburbano, mototaxi, Ecobici o auto particular) en la elección de alguno o algunos en particular.
- Organizacionales: La coordinación de las actividades diarias. La frecuencia en el uso de la bicicleta y los motivos de viaje.
- Temporales: Influencia del día y la noche, el clima (lluvia y frío) o los horarios en el uso de la bicicleta.
- Tecnológicas: La capacidad de uso y la disponibilidad de tecnología para aumentar o facilitar los viajes, incluye internet y teléfonos móviles. (Vázquez, 2015)

6.2 Estimación de niveles de concentración de carbono negro

En la ruta de San Ángel se realizaron un total de 12 viajes donde se registraron más de 100 mediciones de CN en cada viaje. La ruta de Reforma se recorrió 7 veces en diferentes horarios y se registraron más de 100 lecturas de CN en cada recorrido. La ruta Insurgentes se recorrió 9 veces y se obtuvieron más de 100 registros de CN en cada viaje. Todos los recorridos en bicicleta se realizaron a una velocidad constante de 15 km/h para evitar variaciones que pudieran alterar las mediciones de concentración de contaminantes.

6.2.1 San Ángel

La figura 2 muestra una representación gráfica de la concentración promedio por intervalo de medición de CN en el recorrido por la ruta de San Ángel.

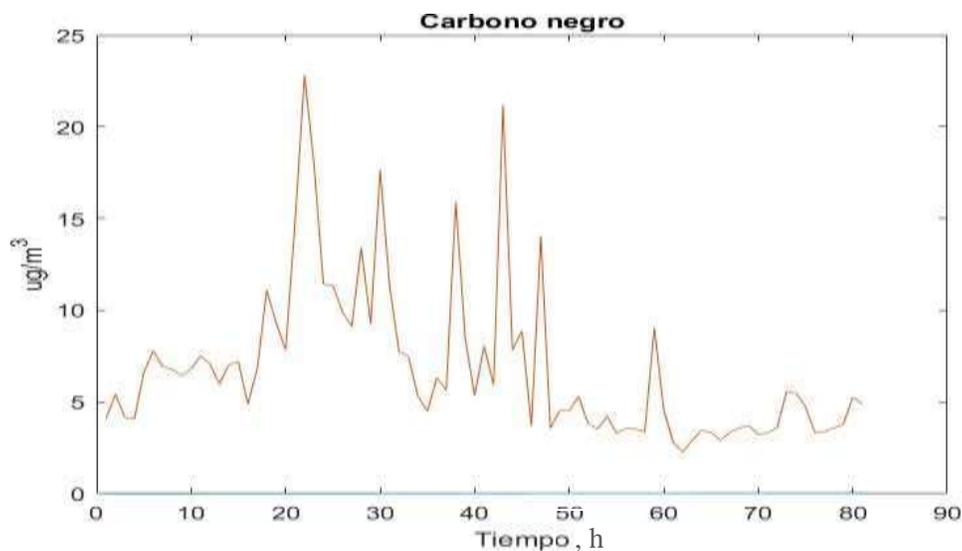


Figura 2. Serie de tiempo de concentración de CN durante los recorridos en la ruta San Ángel.

A partir de la ecuación 1, se determinó que a lo largo de los 12 km que componen la ruta San Ángel se está expuesto a un promedio de $0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CN por kilómetro, esto sin tomar en cuenta los factores medio-ambientales y la variabilidad del flujo vehicular

En la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos sobre la estadística básica realizada para el análisis de los datos obtenidos.

Tabla 2. Estadística básica para CN en para la ruta San Ángel.

Fecha	Suma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	máx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
03/07/2020	623.38	120	5.19	7.10	0.03	36.78
04/07/2020	588.62	106	5.55	11.34	1.04	110.23
05/07/2020	366.93	99	3.71	3.78	0.10	30.37
06/07/2020	772.68	115	6.72	9.16	0.24	56.12
07/07/2020	1154.03	110	10.49	19.51	0.83	146.69
08/07/2020	1035.88	104	9.96	19.28	0.16	132.96
09/07/2020	423.46	99	4.28	4.75	0.89	37.46
10/07/2020	679.25	101	6.73	6.51	0.25	31.24
11/07/2020	363.91	97	3.75	5.32	0.38	32.59
12/07/2020	312.71	106	2.95	3.60	0.12	22.79
13/07/2020	647.40	101	6.41	5.12	0.67	30.24
14/07/2020	1004.99	102	9.85	6.91	1.31	33.11

La concentración más alta registrada para el CN fue de $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 7 de julio, las cuales corresponden a lecturas realizadas en la parada de autobús que está a pocos metros del Estadio Olímpico. En ese lugar, unos 50 autobuses de pasajeros esperan su turno para realizarsu viaje. La parada de autobús de la estación de metro de Barranca (0.3 horas) también indicaaltas concentraciones de CN, pero no tan altas como las del Estadio Olímpico.

Las concentraciones medias de CN en los fines de semana fueron de $3,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en los días laborables fueron de $7,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La mayor carga de CN se encuentra en Félix Cuevas con $1.8 \mu\text{g}/\text{km}$. A pesar de que Félix Cuevas fue la avenida con menor distancia recorrida, es donde los ciclistas y los autobuses comparten el carril. La menor carga de CN se encuentra en Insurgentes, donde la separación entre el ciclista y el autobús es mayor. Esto es algo que debe tomarse en cuenta al momento de diseñar una ciclovía urbana.

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) reportó para los días 3 al 14 de julio de 2020 en la estación Benito Juárez de 8:00 a 9:00 una concentración promedio de $\text{PM}_{2.5}$ de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una concentración máxima de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

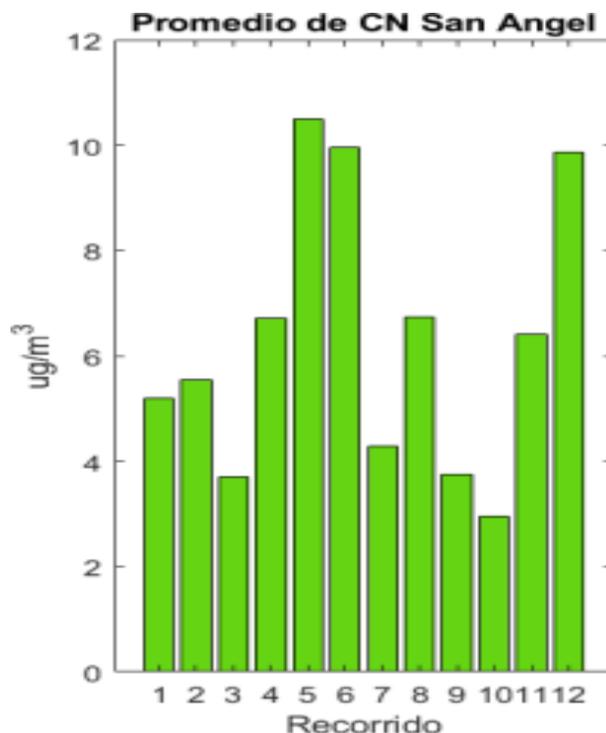


Figura 3. Promedio de concentración de CN durante los recorridos en la ruta San Ángel.

A partir de las ecuaciones 2 y 3, se realizaron los cálculos para obtener la dosis de exposición promedio por cada día recorrido durante el periodo de obtención de muestras, la cual representa la tasa en la que los contaminantes son inhalados para un adulto promedio de 70 kg.

Tabla 3. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CN en para la ruta San Ángel.

Fecha	ED (años)	AT (días*año)	F (días/año)	BW (kg)	EF (1/años)	IR (m³/día)	C (mg/m³)	D (mg/kg*día)
03/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.005	2.56E-06
04/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.006	2.73E-06
05/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.004	1.82E-06
06/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.007	3.31E-06
07/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.010	5.16E-06
08/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.010	4.90E-06
09/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.004	2.11E-06
10/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.007	3.31E-06
11/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.004	1.85E-06
12/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.003	1.45E-06
13/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.006	3.15E-06
14/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.010	4.85E-06

La figura 4 se muestra como una representación gráfica de la tabla 3, permitiendo un mejor análisis visual de los resultados obtenidos para la ruta de San Ángel.

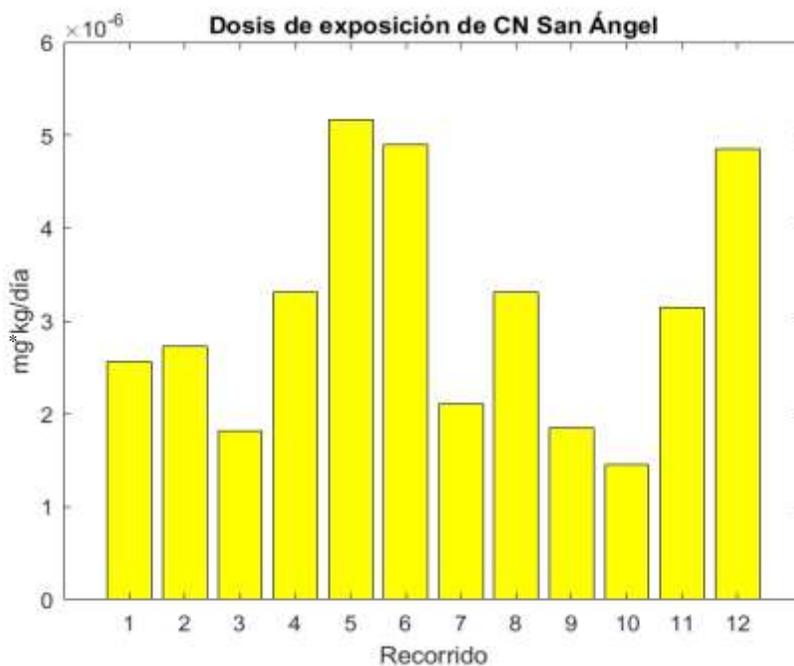


Figura 4. Promedio dosis de exposición de CN durante los recorridos en la ruta San Ángel.

De ésta manera se puede observar que se obtuvieron las dosis máximas de CN con $5.16E^{-06}$ y $4.90E^{-06}$ para los días 7 y 8 de julio correspondientemente, lo cual a la vez corresponde a días laborales, mientras que la dosis mínima con $1.45E^{-06}$ corresponde al día domingo, 12 de julio.

6.2.2 Reforma

La figura 5 muestra una representación gráfica de la concentración promedio por intervalo de medición de CN en el recorrido por la ruta Reforma.

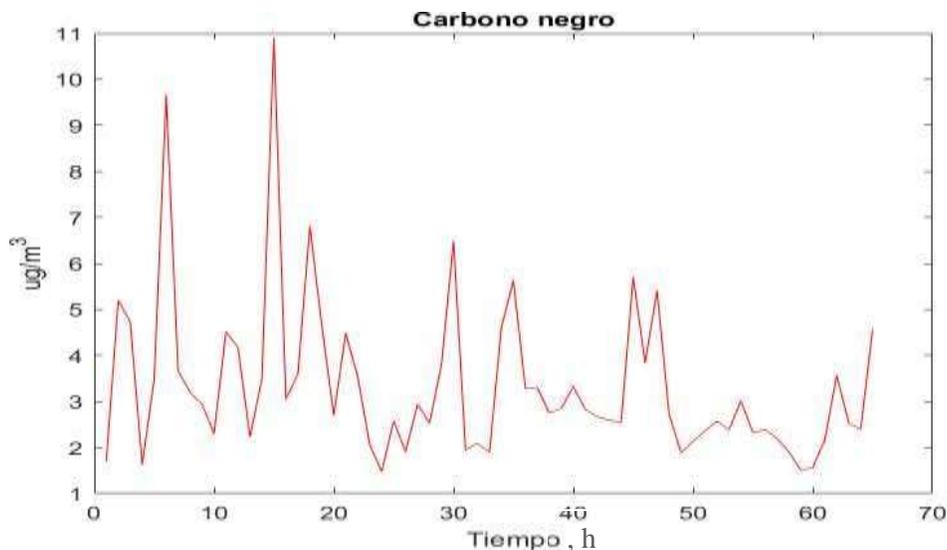


Figura 5. Serie de tiempo de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Reforma.

A partir de la ecuación 1, se determinó que a lo largo de los 10 km que componen la ruta Reforma se está expuesto a un promedio de $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CN por kilómetro, esto sin tomar en cuenta los factores medio-ambientales y la variabilidad del flujo vehicular.

En la tabla 4, se muestra los resultados obtenidos sobre la estadística básica realizada para el análisis de los datos obtenidos.

Tabla 4. Estadística básica para CN en para la ruta Reforma.

Fecha	Suma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	mín ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	máx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
20/07/2020	283.984	107	2.65	3.99	0.32	30.85
21/07/2020	432.538	99	4.37	5.14	0.93	47.88
22/07/2020	598.382	132	4.53	5.82	0.22	35.86
23/07/2020	487.264	94	5.18	4.58	1.78	28.89
24/07/2020	281.608	91	3.09	4.59	0.16	37.13
25/07/2020	226.252	90	2.51	6.56	0.13	61.76
26/07/2020	157.008	78	2.01	5.87	0.11	50.63

Esta ruta tiene una longitud de 10 km y tiene una duración de menos de una hora. El recorrido se realizó siete veces en distintas horas del día, desde las 8:44 hasta las 14:30. En este recorrido no se realizó un recuento de vehículos en las avenidas donde están los carriles para bicicletas.

La mayor concentración de CN registrada fue de $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 25 de julio, con una concentración media de CN en esta ruta durante los días laborables fue de $3,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y durante el fin de semana de $2,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A lo largo de la avenida Patriotismo se reportan las

mayores concentraciones de CN (0 - 0.2 h), junto con la avenida Nuevo León y la avenida Baja California (0.75 h).

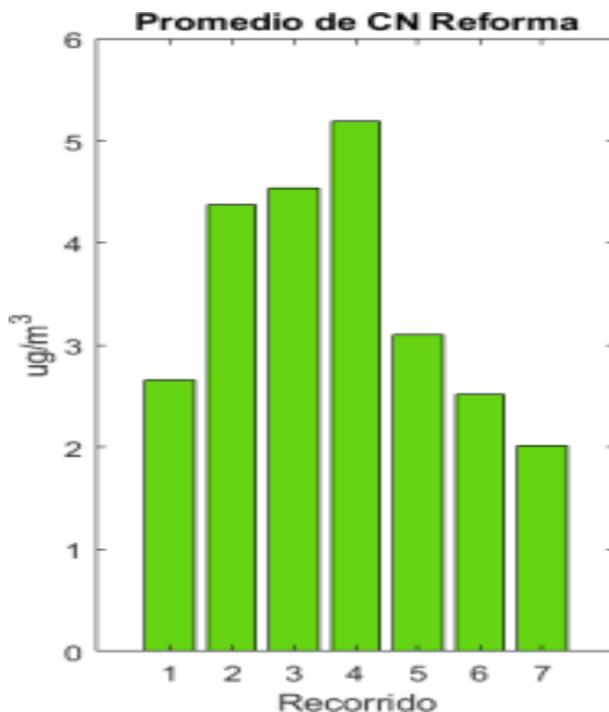


Figura 6. Promedio de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Reforma.

La tabla 5 muestra los resultados promedio obtenidos en la ruta Reforma durante el periodo de análisis de ésta.

Tabla 5. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CN para la ruta Reforma.

Fecha	ED (años)	AT (días*año)	F (días/año)	BW (kg)	EF (1/años)	IR (m³/día)	C (mg/m³)	D (mg/kg*día)
20/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.003	1.31E-06
21/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.004	2.15E-06
22/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.005	2.23E-06
23/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.005	2.55E-06
24/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.003	1.52E-06
25/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.003	1.24E-06
26/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.002	9.91E-07

La figura 7 muestra una representación gráfica de la tabla 5 para el apoyo del análisis de los resultados.

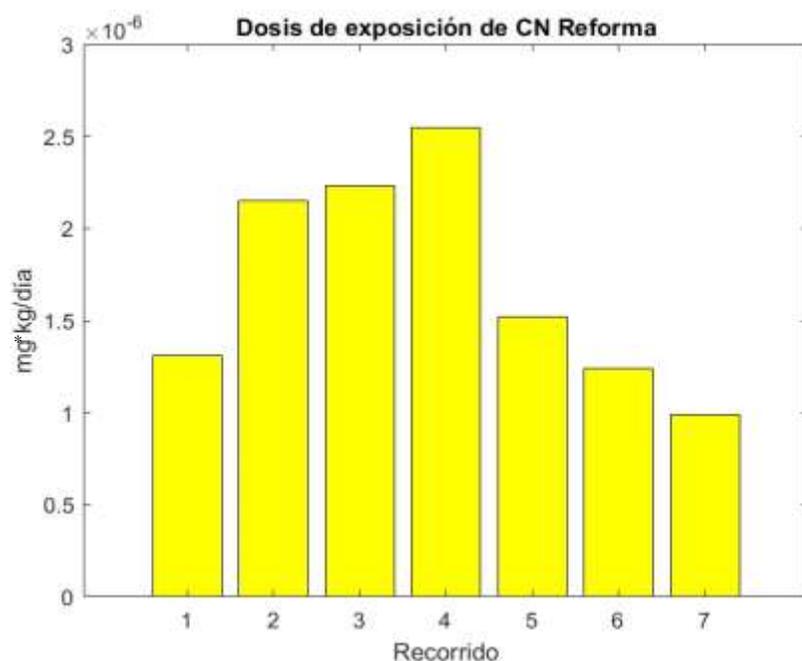


Figura 7. Promedio dosis de exposición de CN durante los recorridos en la ruta Reforma.

Se puede determinar que la dosis máxima de CN con $2.55E^{-06}$ para el día 23 de julio, el cual corresponde al día jueves, mientras que la dosis mínima con $9.91E^{-07}$ para el día 26 de julio, domingo.

6.2.3 Insurgentes

La ruta Insurgentes se caracteriza por tener una distancia de 12km, la cual se recorrió a pie en la banqueta. No hubo recorridos en esta ruta los fines de semana.

En general, las concentraciones registradas en Insurgentes son menores que en las rutas anteriores, probablemente debido a una mayor distancia entre el peatón y los vehículos pesados, que es mayor que la de un ciclista en el carril para bicicletas; así, como a un menor número de vehículos diésel (autobuses) que circulan por la avenida Insurgentes.

La figura 8 muestra una representación gráfica de la concentración promedio por intervalo de medición de CN en el recorrido por la ruta de Insurgentes.

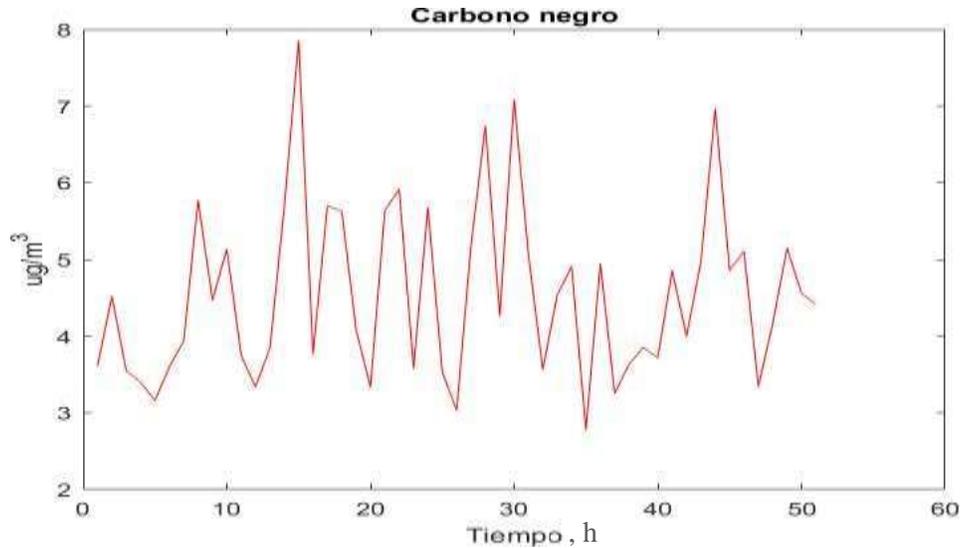


Figura 8. Serie de tiempo de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Insurgentes.

A partir de la ecuación 1, se determinó que a lo largo de los 10 km que componen la ruta Insurgentes se está expuesto a un promedio de $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CN por kilómetro, esto sin tomar en cuenta los factores medio-ambientales y la variabilidad del flujo vehicular.

En la tabla 6, se muestra los resultados obtenidos sobre la estadística básica realizada para el análisis de los datos obtenidos.

Tabla 6. Estadística básica para CN para la ruta Insurgentes.

Fecha	Suma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	máx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
04/08/2020	653.88	105	6.227	4.57	0.25	17.03
05/08/2020	414.034	106	3.906	2.13	0.48	10.81
06/08/2020	517.9	101	5.128	3.27	0.32	16.17
07/08/2020	746.313	207	3.605	2.52	0.15	11.72
10/08/2020	1131.163	245	4.617	3.10	0.18	14.14
11/08/2020	1119.162	237	4.722	3.59	0.06	18.36
12/08/2020	482.173	114	4.230	3.74	0.22	15.81
13/08/2020	629.285	221	2.847	1.58	0.12	11.30
14/08/2020	904.656	215	4.208	3.04	0.13	14.53
15/08/2020	3366.644	210	16.032	13.80	0.14	57.41

La mayor concentración registrada de CN fue de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 11 de agosto y de $980 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración media de CN fue de $4,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La estación de monitoreo Benito Juárez de la RAMA reportó un promedio de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ durante los días de muestreo.

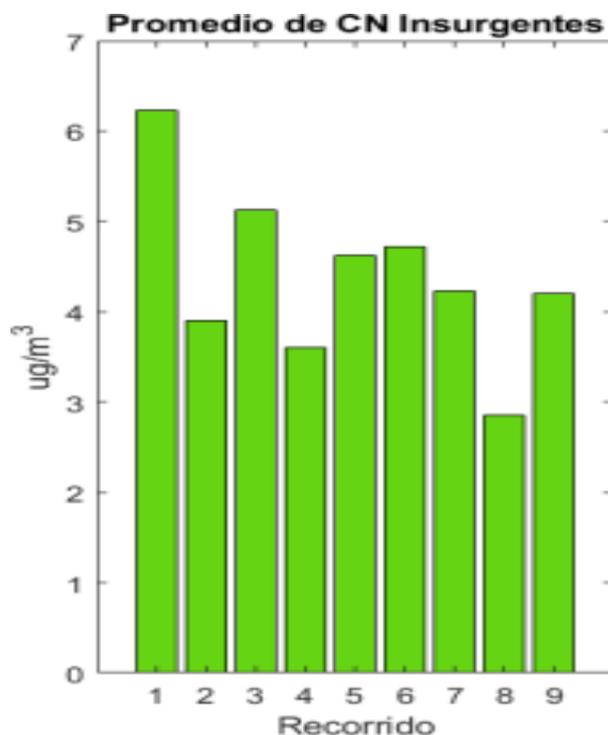


Figura 9. Promedio de concentración de CN durante los recorridos en la ruta Insurgentes.

La tabla 7 muestra los resultados promedio obtenidos en la ruta Insurgentes durante el periodo de análisis de ésta.

Tabla 7. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CN en para la ruta Insurgentes.

Fecha	ED (años)	AT (días*año)	F (días/año)	BW (kg)	EF (1/años)	IR (m³/día)	C (mg/m³)	D (mg/kg*día)
04/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.006	3.06505E-06
05/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.004	1.92247E-06
06/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.005	2.52379E-06
07/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.004	1.77451E-06
10/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.005	2.27242E-06
11/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.005	2.3242E-06
12/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.004	2.08174E-06
13/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.003	1.40147E-06
14/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.004	2.07097E-06
15/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225183	15.3	0.016	7.89054E-06

La figura 10 muestra una representación gráfica de la tabla 7 para el apoyo del análisis de los resultados.

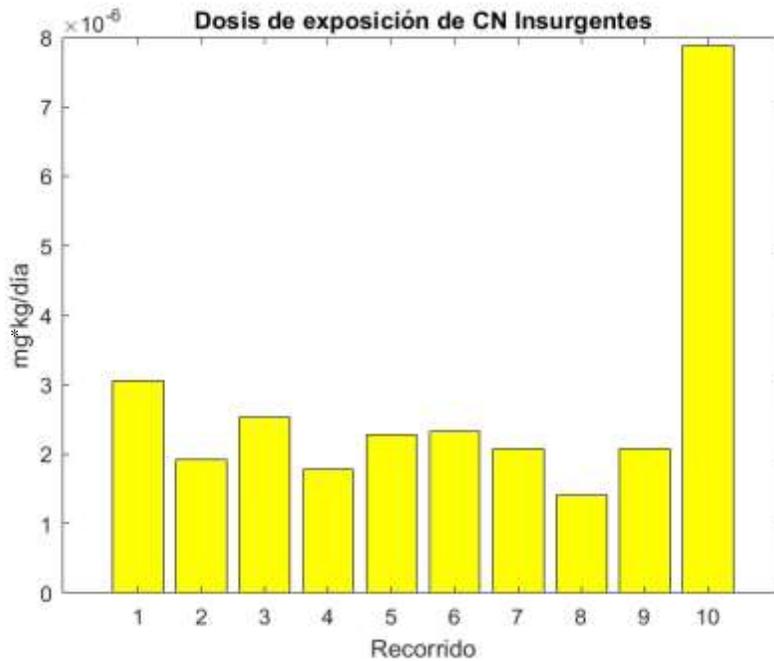


Figura 10. Promedio dosis de exposición de CN durante los recorridos en la ruta Insurgentes.

Se puede determinar que la dosis máxima de CN con $7.89054E^{-06}$ para el día 15 de agosto, el cual corresponde al día sábado, mientras que la dosis mínima con $1.40147E^{-06}$ para el día jueves 13 de agosto.

6.3 Estimación de niveles de emisión de monóxido de carbono

En la ruta de San Ángel se realizaron un total de 12 viajes donde se registraron más de 110 mediciones de CO en cada viaje. La ruta de Reforma se recorrió 7 veces en diferentes horarios y se registraron más de 100 lecturas de CO. La ruta Insurgentes se recorrió 9 veces y se obtuvieron más de 100 registros de CO en cada viaje. Todos los recorridos en bicicleta se realizaron a una velocidad constante de 15 km/h para evitar variaciones que pudieran alterar las mediciones de concentración de contaminantes.

6.3.1 San Ángel

La figura dos muestra una representación gráfica de la concentración promedio por intervalo de medición de CO en el recorrido por la ruta de San Ángel.

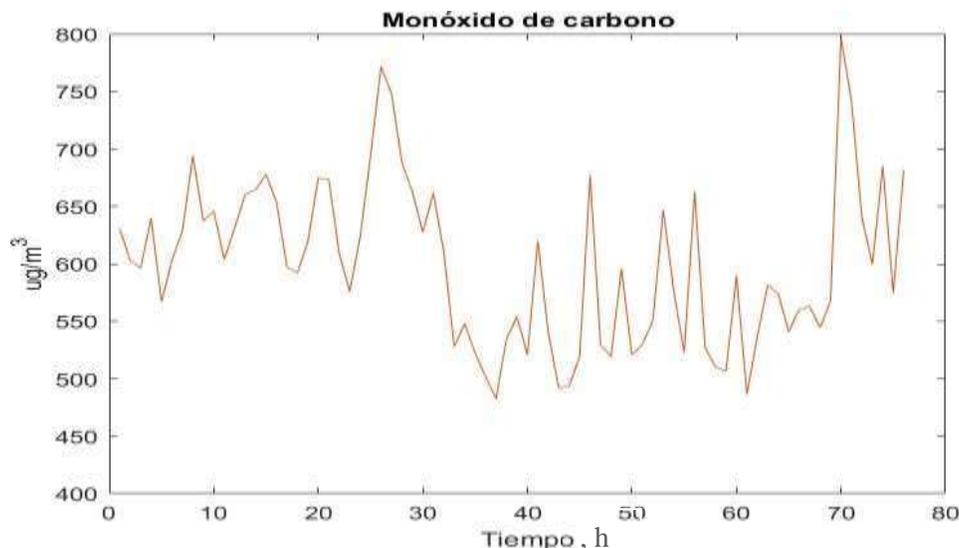


Figura 11. Serie de tiempo de concentración de CO durante los recorridos en la ruta San Ángel.

A partir de la ecuación 1, se determinó que a lo largo de los 12 km que componen la ruta San Ángel se está expuesto a un promedio de $49.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CO por kilómetro, esto sin tomar en cuenta los factores medio-ambientales y la variabilidad del flujo vehicular.

En la tabla 8, se muestra los resultados obtenidos sobre la estadística básica realizada para el análisis de los datos obtenidos.

Tabla 8. Estadística básica para CO en para la ruta San Ángel.

Fecha	Suma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	máx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
03/07/2020	81882.63	123	665.71	181.84	88.53	1722.63
04/07/2020	225047.96	108	2083.78	613.88	3.77	2750.17
05/07/2020	34560.82	99	349.10	234.56	109.25	1213.09
06/07/2020	87992.34	116	758.55	329.38	249.59	2429.01
07/07/2020	81488.94	112	727.58	230.34	333.41	1791.38
08/07/2020	40791.09	103	396.03	219.88	50.86	1002.12
09/07/2020	54751.04	101	542.09	231.58	290.09	1699.08
10/07/2020	97171.52	103	943.41	162.90	590.53	1421.24
11/07/2020	32978.53	99	333.12	132.14	107.37	729.93
12/07/2020	23385.89	107	218.56	96.75	55.57	632.92
13/07/2020	92117.60	103	894.35	235.32	564.16	1588.88
14/07/2020	74323.42	104	714.65	193.55	217.57	1404.28

La concentración más alta registrada para el CO fue de $2750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 6 de julio, las cuales corresponden a lecturas realizadas en la parada de autobús que está a pocos metros del Estadio Olímpico. El CO está más uniformemente distribuido a lo largo de todo el recorrido;

esto indica probablemente que las fuentes están más uniformemente dispersas a lo largo del recorrido y consisten en coches.

La concentración media de CO los fines de semana era de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los días laborables de 705 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) reportó para los días 3 al 14 de julio de 2020 en la estación Benito Juárez de 8:00 a 9:00 una concentración de CO media de 0,2 ppm (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y una máxima de 0,3 ppm (273 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

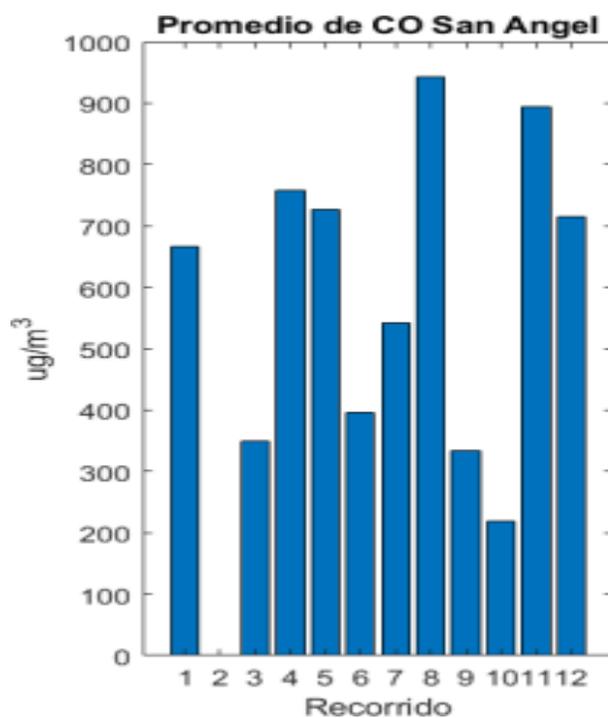


Figura 12. Promedio de concentración de CO durante los recorridos en la ruta San Ángel.

La tabla 9 muestra los resultados promedio obtenidos en la ruta San Ángel durante el periodo de análisis de ésta.

Tabla 9. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CO en para la ruta San Ángel.

Fecha	ED (años)	AT (días*año)	F (días/año)	BW (kg)	EF (1/años)	IR (m³/día)	C (mg/m³)	D (mg/kg*día)
03/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.666	3.28E-04
04/07/2020	30	10950	0.82	71	2.25E-03	16.3	2.084	1.08E-03
05/07/2020	30	10950	0.82	72	2.25E-03	17.3	0.349	1.89E-04
06/07/2020	30	10950	0.82	73	2.25E-03	18.3	0.759	4.28E-04
07/07/2020	30	10950	0.82	74	2.25E-03	19.3	0.728	4.27E-04
08/07/2020	30	10950	0.82	75	2.25E-03	20.3	0.396	2.41E-04

09/07/2020	30	10950	0.82	76	2.25E-03	21.3	0.542	3.42E-04
10/07/2020	30	10950	0.82	77	2.25E-03	22.3	0.943	6.15E-04
11/07/2020	30	10950	0.82	78	2.25E-03	23.3	0.333	2.24E-04
12/07/2020	30	10950	0.82	79	2.25E-03	24.3	0.219	1.51E-04
13/07/2020	30	10950	0.82	80	2.25E-03	25.3	0.894	6.37E-04
14/07/2020	30	10950	0.82	81	2.25E-03	26.3	0.715	5.23E-04

La figura 13 muestra una representación gráfica de la tabla 9 para el apoyo del análisis de los resultados.

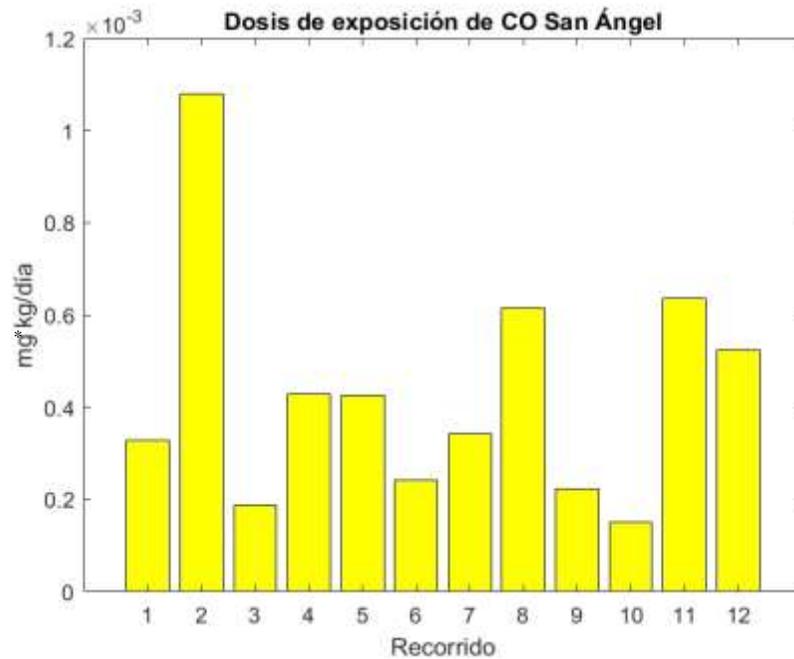


Figura 13. Promedio dosis de exposición de CO durante los recorridos en la ruta San Ángel.

Se puede determinar que la dosis máxima de CO con $1.08E^{-03}$ para el día 4 de julio, el cual corresponde al día sábado, mientras que la dosis mínima con $1.51E^{-04}$ para el día domingo 12 de julio.

6.3.2 Reforma

Las concentraciones registradas muestran una distribución más uniforme de los contaminantes a lo largo de la ruta, en comparación con la ruta de San Ángel.

La figura dos muestra una representación gráfica de la concentración promedio por intervalo de medición de CO en el recorrido por la ruta Reforma.

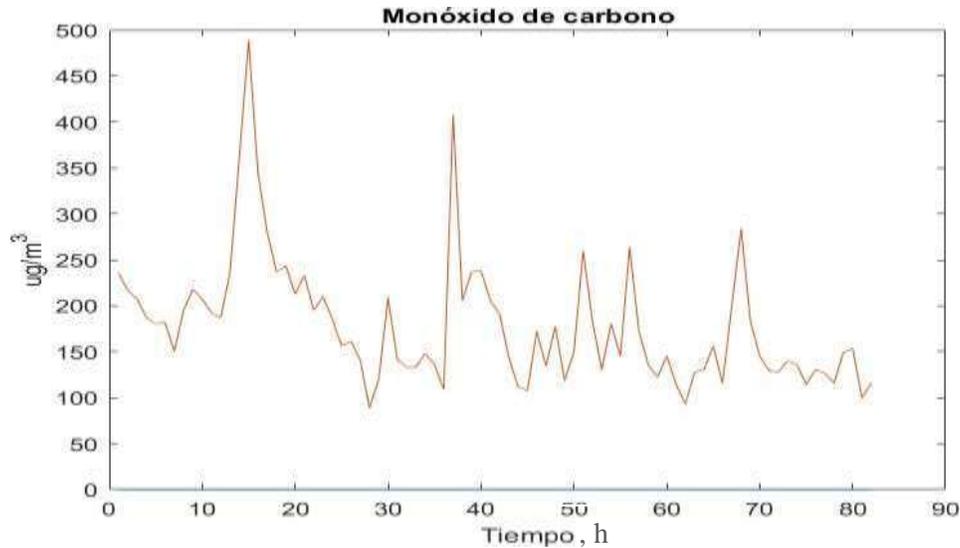


Figura 14. Serie de tiempo de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Reforma.

A partir de la ecuación 1, se determinó que a lo largo de los 10 km que componen la ruta Reforma se está expuesto a un promedio de $17.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CO por kilómetro, esto sin tomar en cuenta los factores medio-ambientales y la variabilidad del flujo vehicular.

Tabla 10. Estadística básica para CO en para la ruta Reforma.

Fecha	Suma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	mín ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	máx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
20/07/2020	30694.5656	110	279.04	244.54	28.26	2034.37
21/07/2020	17800.776	100	178.01	192.41	18.84	1252.65
22/07/2020	14777.4696	133	111.11	96.77	9.42	631.03
23/07/2020	27614.7488	96	287.65	121.35	150.69	809.98
24/07/2020	14947.0008	95	157.34	116.38	18.84	649.87
25/07/2020	13741.4456	91	151.00	161.74	9.42	932.42
26/07/2020	5961.8472	98	60.84	53.54	9.42	291.97

La mayor concentración de CO registrada fue de $2034 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 20 de julio.

En general, las concentraciones medias de CO fueron menores que en la ruta de San Ángel, probablemente porque los vehículos diésel son menos comunes en esa ruta.

Los diferentes horarios de la ruta de Reforma nos permitieron observar otros patrones de concentración a lo largo del día. Los promedios de concentración en los días de semana son más altos que en los fines de semana, a pesar de que los recorridos se hicieron en diferentes horas del día.

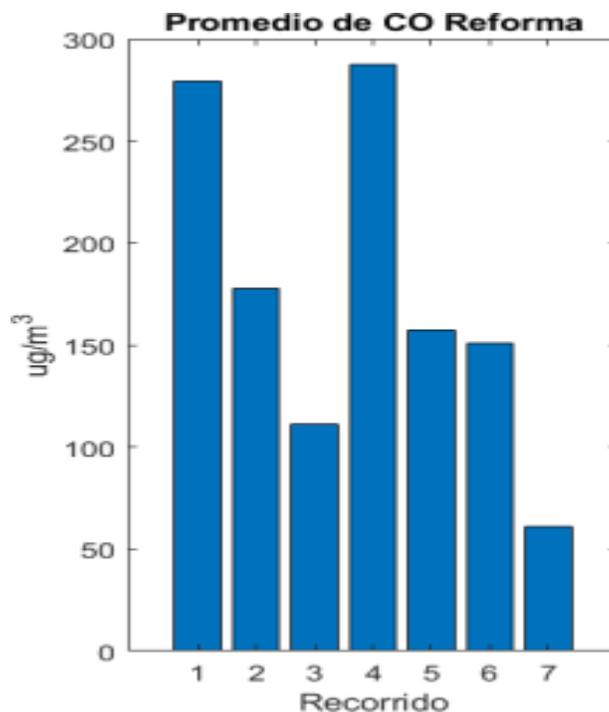


Figura 15. Promedio de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Reforma.

La tabla 11 muestra los resultados promedio obtenidos en la ruta Reforma durante el periodo de análisis de ésta.

Tabla 11. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CO en para la ruta Reforma.

Fecha	ED (años)	AT (días*año)	F (días/año)	BW (kg)	EF (1/años)	IR (m³/día)	C (mg/m³)	D (mg/kg*día)
20/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.279	1.37E-04
21/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.178	8.76E-05
22/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.111	5.47E-05
23/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.288	1.42E-04
24/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.157	7.74E-05
25/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.151	7.43E-05
26/07/2020	30	10950	0.82	70	2.25E-03	15.3	0.061	2.99E-05

La figura 16 muestra una representación gráfica de la tabla 11 para el apoyo del análisis de los resultados.

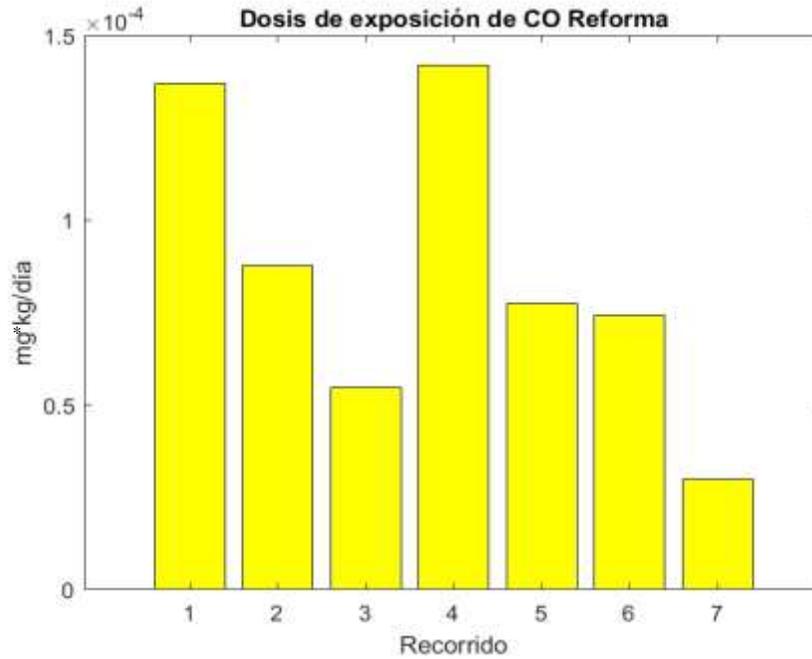


Figura 16. Promedio dosis de exposición de CO durante los recorridos en la ruta Reforma.

Se puede determinar que la dosis máxima de CO con $1.42E^{-04}$ para el día 23 de julio, el cual corresponde al día jueves, mientras que la dosis mínima con $2.99E^{-05}$ para el día domingo 13 de agosto.

6.3.3 Insurgentes

La figura dos muestra una representación gráfica de la concentración promedio por intervalo de medición de CO en el recorrido por la ruta de Insurgentes.

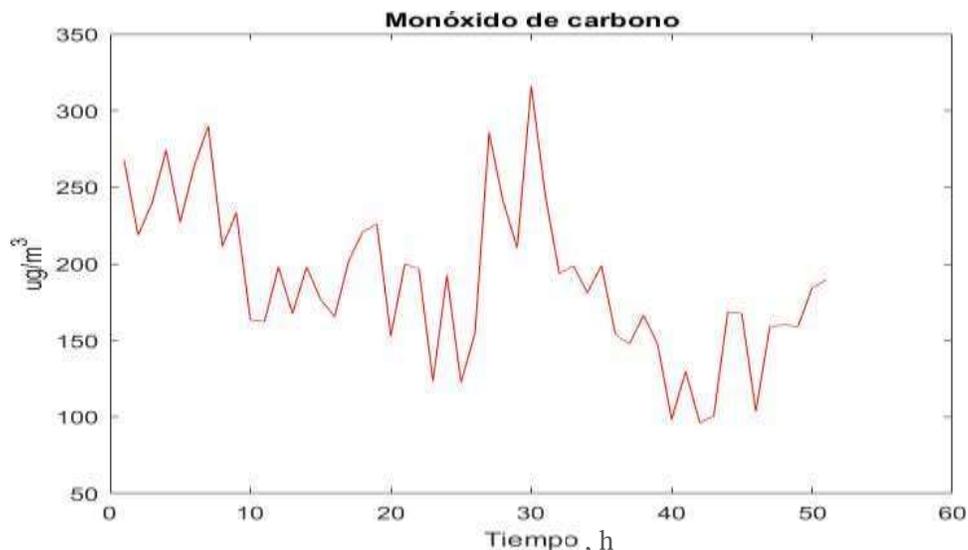


Figura 17. Serie de tiempo de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Insurgentes.

A partir de la ecuación 1, se determinó que a lo largo de los 10 km que componen la ruta Insurgentes se está expuesto a un promedio de $18.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CO por kilómetro, esto sin tomar en cuenta los factores medio-ambientales y la variabilidad del flujo vehicular.

En la tabla 12, se muestra los resultados obtenidos sobre la estadística básica realizada para el análisis de los datos obtenidos.

Tabla 12. Estadística básica para CO en para la ruta Insurgentes.

Fecha	Suma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	n ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	máx ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
04/08/2020	12987.9736	107	121.38	79.43	0.00	310.81
05/08/2020	14768.0512	106	139.32	110.14	18.84	489.76
06/08/2020	19213.536	103	186.54	106.48	9.42	442.66
07/08/2020	42429.892	209	203.01	139.71	9.42	866.49
10/08/2020	63451.7608	247	256.89	118.93	28.26	706.38
11/08/2020	45519.1272	239	190.46	128.30	9.42	678.12
12/08/2020	23743.7864	116	204.69	157.99	9.42	809.98
13/08/2020	26814.1848	223	120.24	107.98	18.84	565.10
14/08/2020	39999.9448	217	184.33	176.51	18.84	979.51
15/08/2020	27963.2296	212	131.90	138.25	18.84	998.35

Las escalas de las cifras de CO son más pequeñas que las de los recorridos anteriores y también hay una gran variabilidad en la desviación estándar de las lecturas debido a las menores concentraciones. La concentración media de CO fue de $178 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La estación de monitoreo Benito Juárez de la RAMA reportó una media de $\sim 228.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una máxima de $\sim 571.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ppm para el CO.

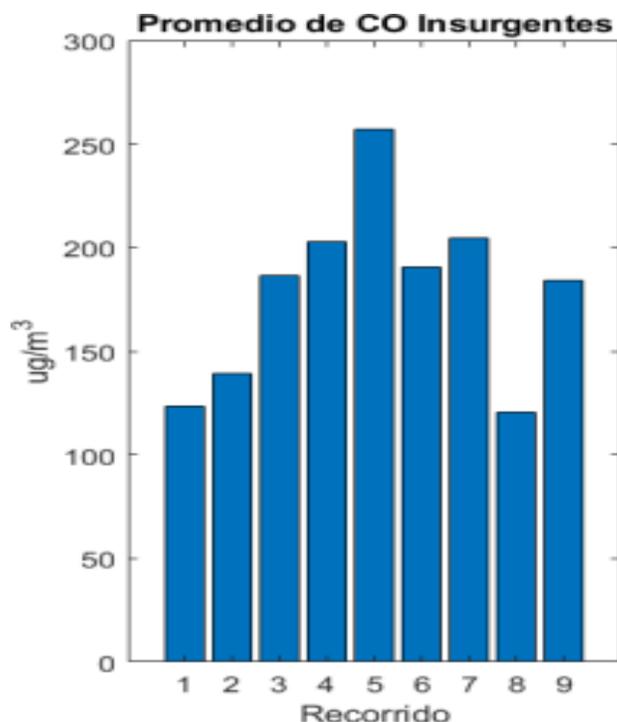


Figura 18. Promedio de concentración de CO durante los recorridos en la ruta Insurgentes.

La tabla 13 muestra los resultados promedio obtenidos en la ruta Insurgentes durante el periodo de análisis de ésta.

Tabla 13. Resultados obtenidos para el cálculo de la dosis de exposición a CO en para la ruta Insurgentes.

Fecha	ED (años)	AT (días*año)	F (días/año)	BW (kg)	EF (1/años)	IR (m³/día)	C (mg/m³)	D (mg/kg*día)
04/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.121	5.97429E -05
05/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.139	6.85719E -05
06/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.187	9.18119E -05
07/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.203	9.99205E -05
10/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.257	0.000126 437
11/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.190	9.374E- 05
12/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.205	0.000100 744
13/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.120	5.91819E -05
14/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.184	9.07253E -05
15/08/2020	30	10950	0.82	70	0.00225 183	15.3	0.132	6.49203E -05

La figura 19 muestra una representación gráfica de la tabla 13 para el apoyo del análisis de los resultados.

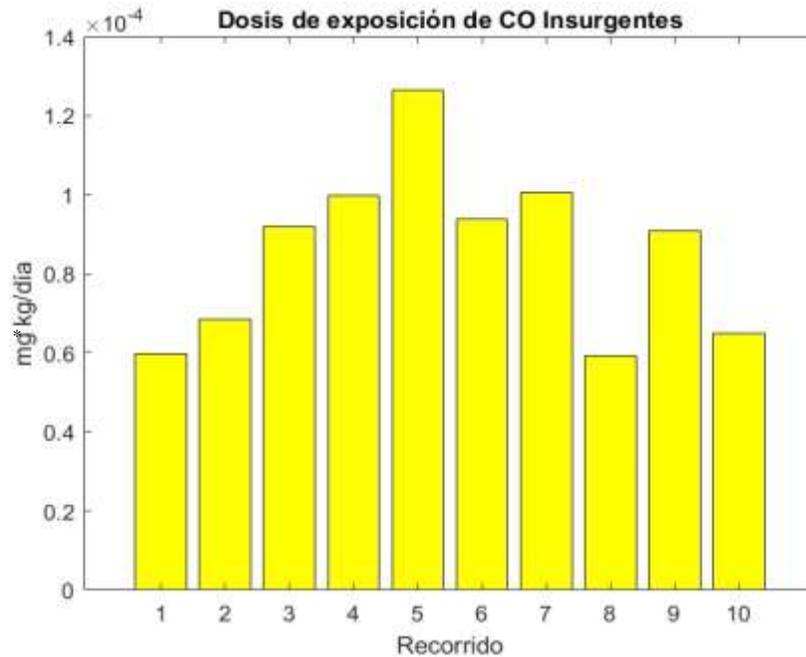


Figura 19. Promedio dosis de exposición de CO durante los recorridos en la ruta Insurgentes.

Se puede determinar que la dosis máxima de CO con 0.000126437 para el día 10 de agosto, el cual corresponde al día lunes, mientras que la dosis mínima con $5.91819E^{-05}$ para el día jueves 13 de agosto.

6.4 Mapas de distribución de contaminantes

A partir de los datos obtenidos sobre las concentraciones registradas durante cada uno de los días de muestreo, se pudo hacer una relación respecto a éstas y las coordenadas registradas respecto a la ubicación de las rutas y su recorrido, permitiendo realizar un análisis visual sobre los puntos o áreas con mayor concentración en cada ruta y para cada contaminante respectivamente. Cada uno de los resultados obtenidos, se muestran en las siguientes figuras:

6.4.1 San Ángel

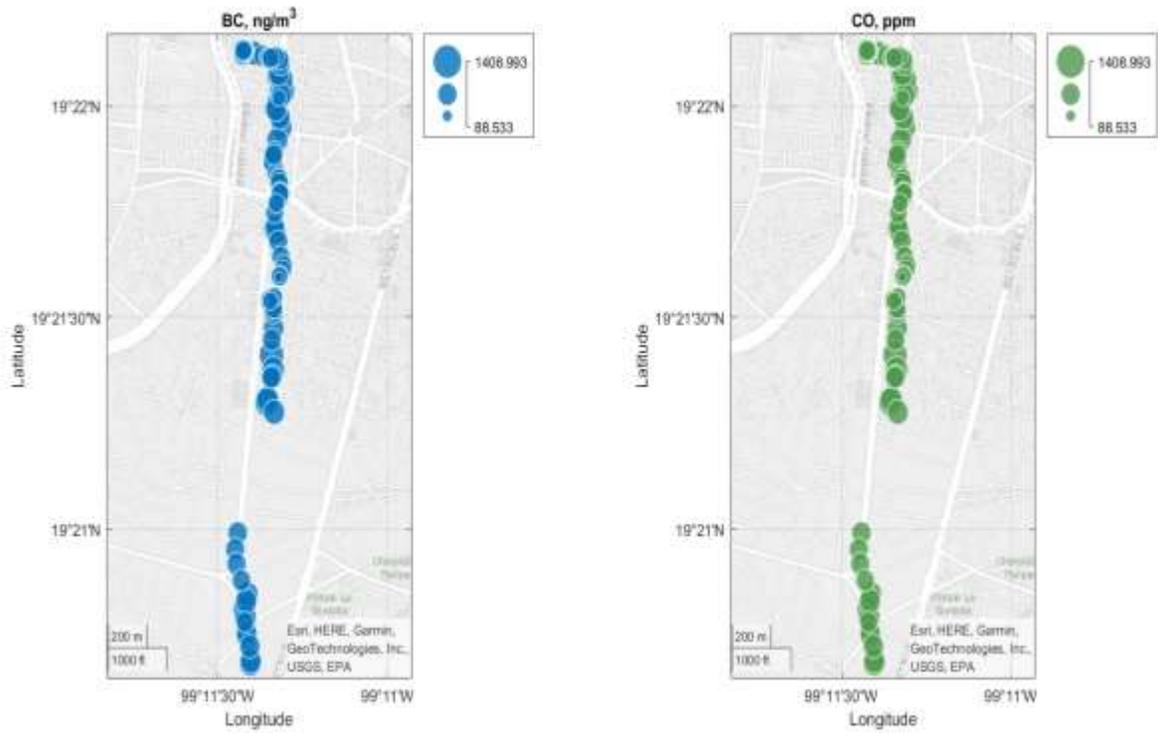


Figura 20. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 03/07/2020.

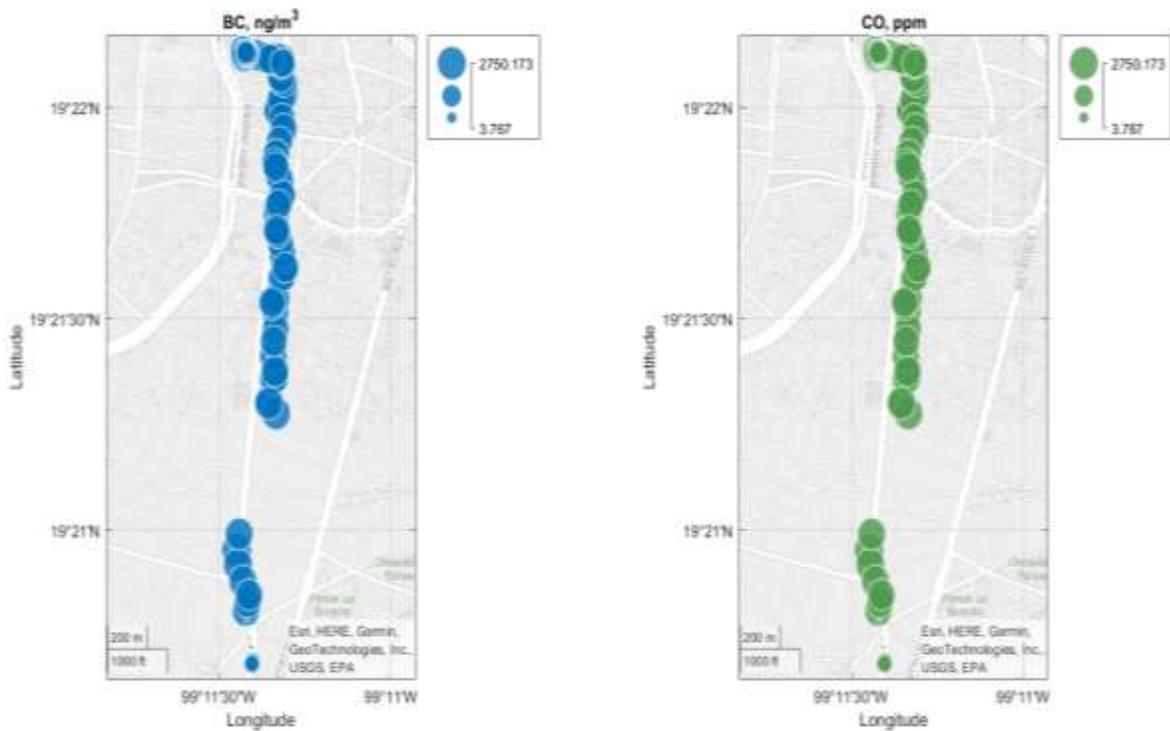


Figura 21. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 04/07/2020.

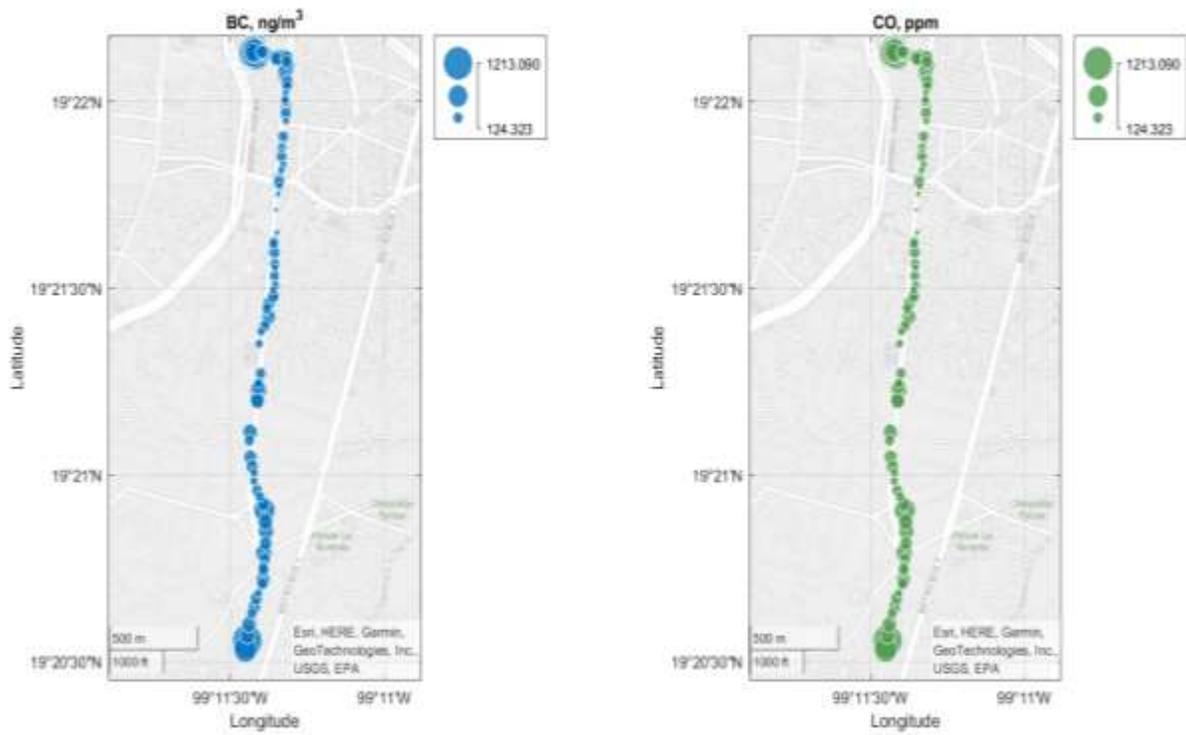


Figura 22. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 05/07/2020.

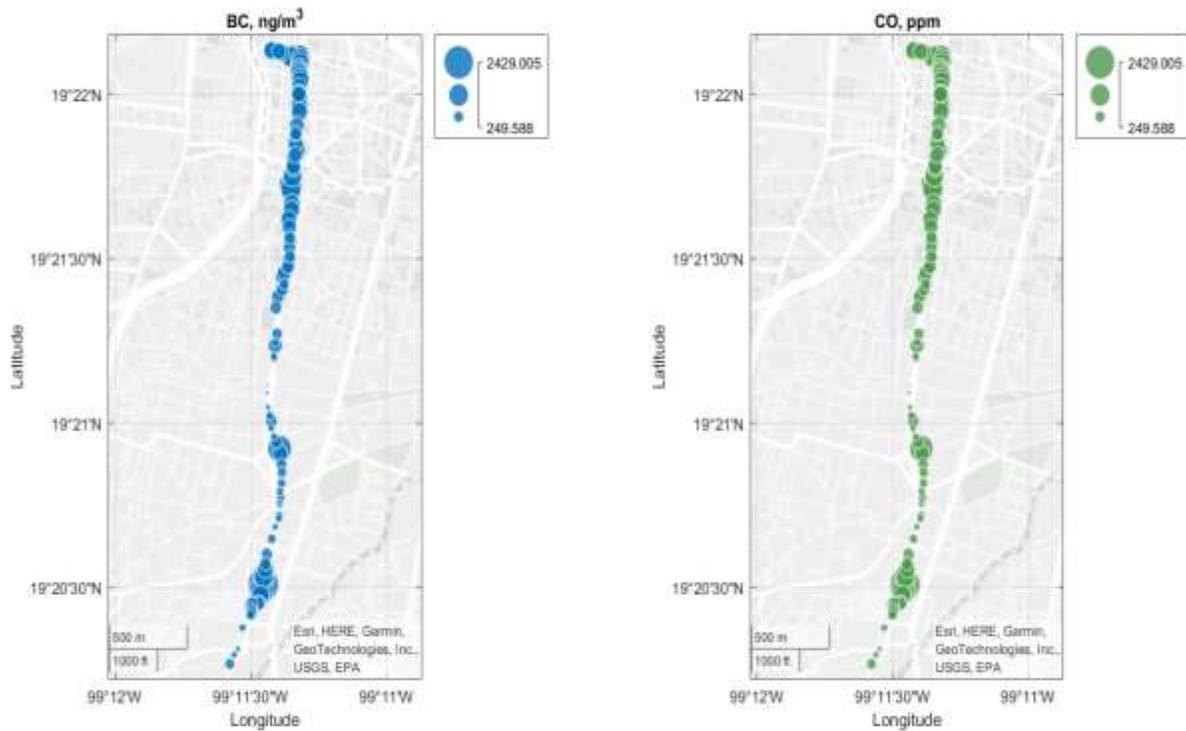


Figura 23. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 06/07/2020.

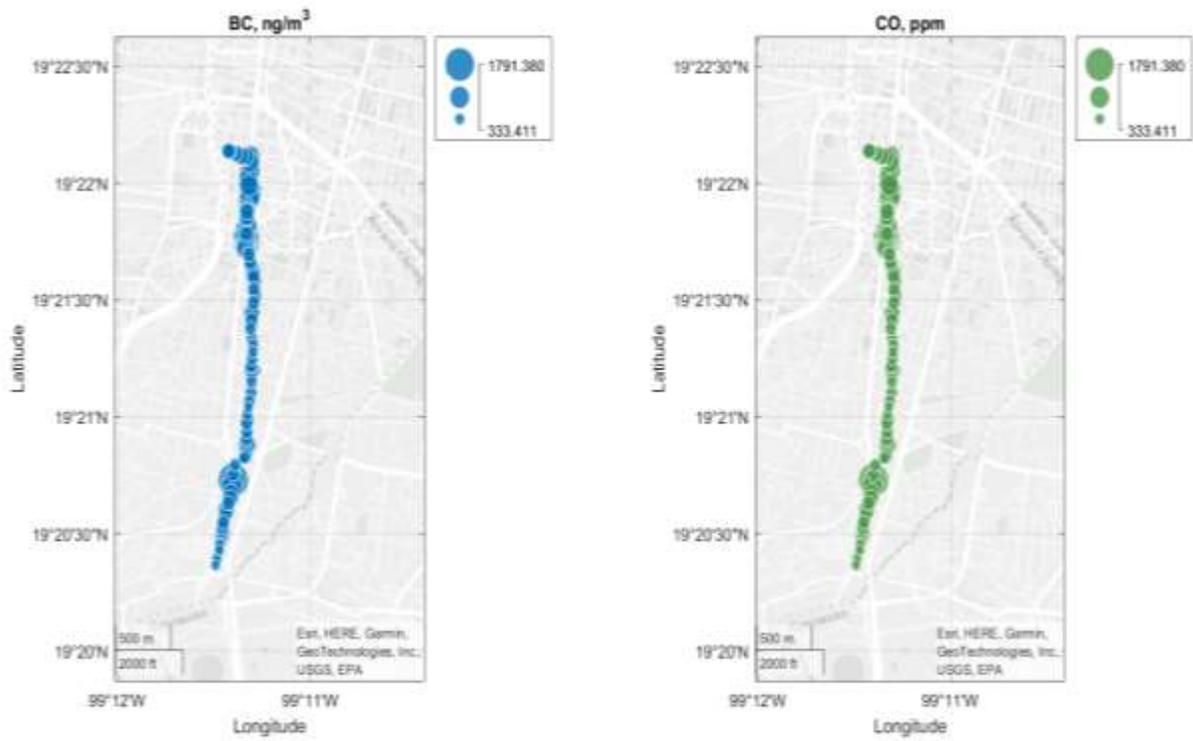


Figura 24. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 07/07/2020.

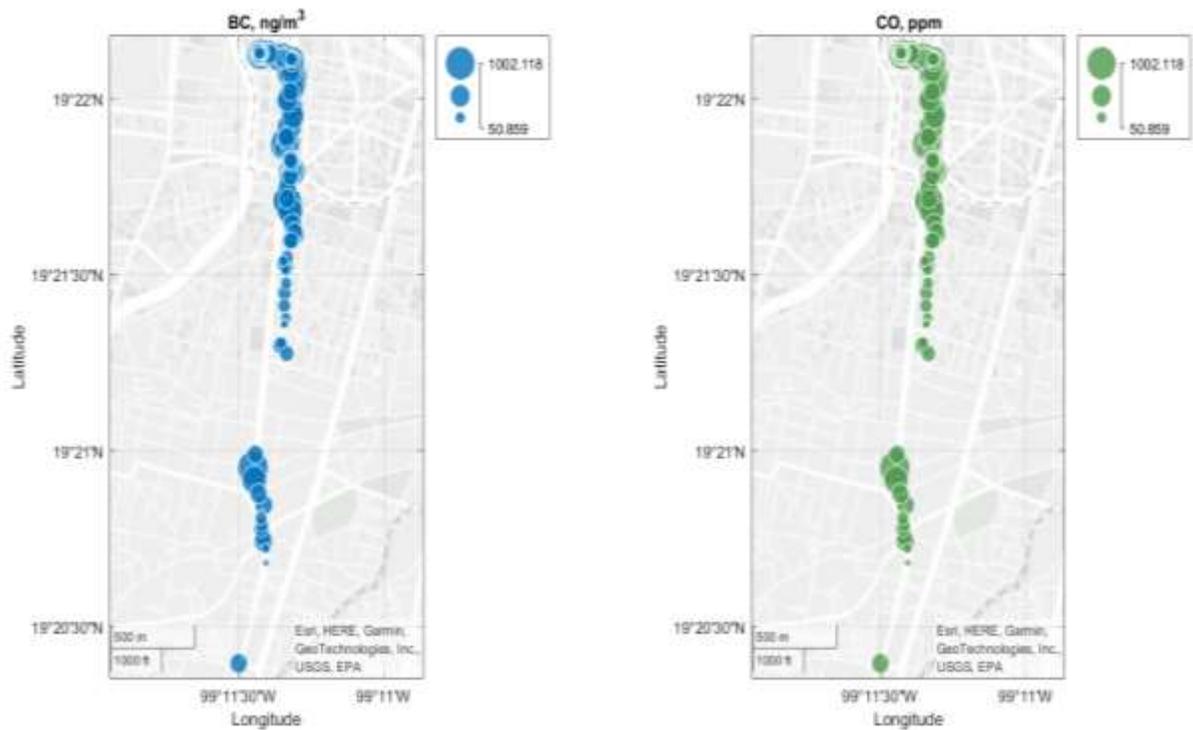


Figura 25. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 08/07/2020.

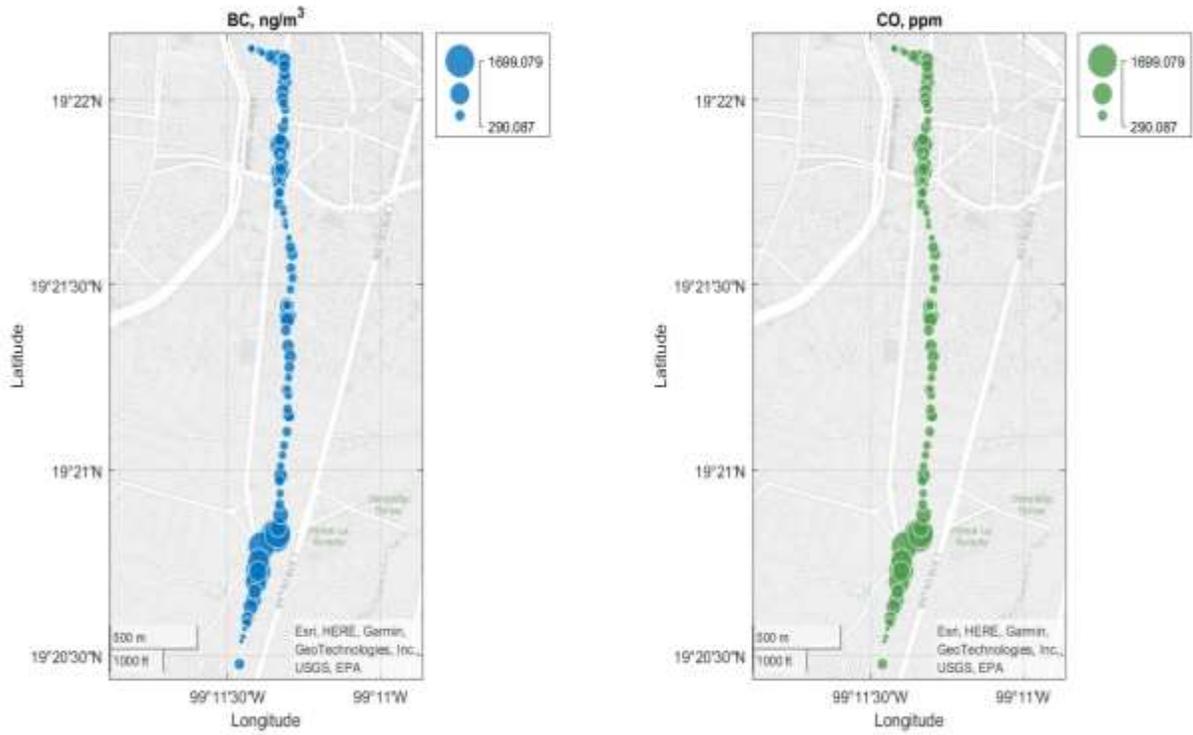


Figura 26. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 09/07/2020.

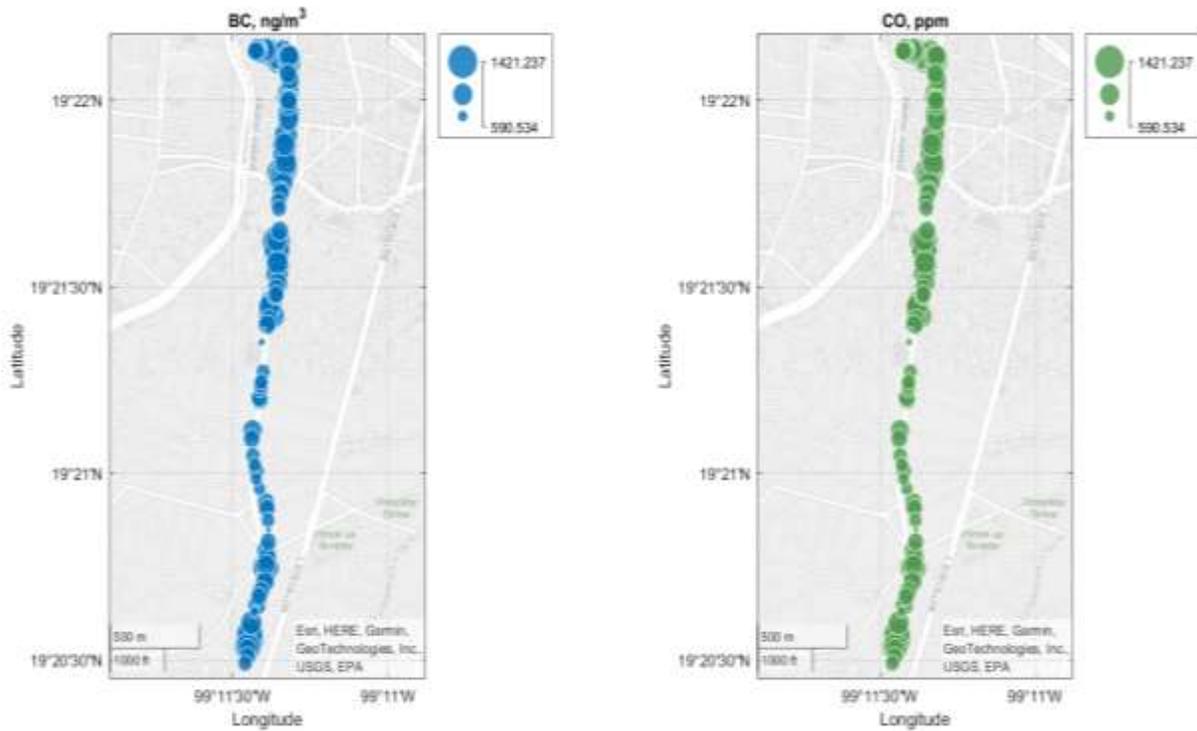


Figura 27. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 10/07/2020.

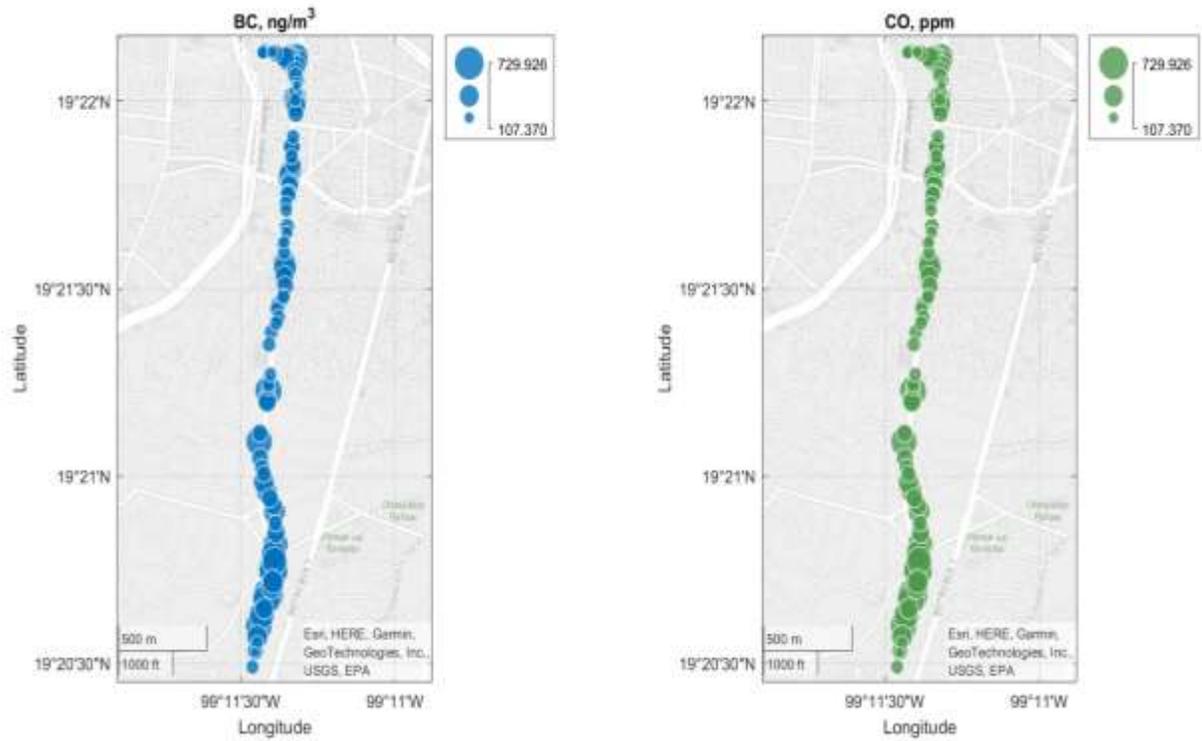


Figura 28. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 11/07/2020.

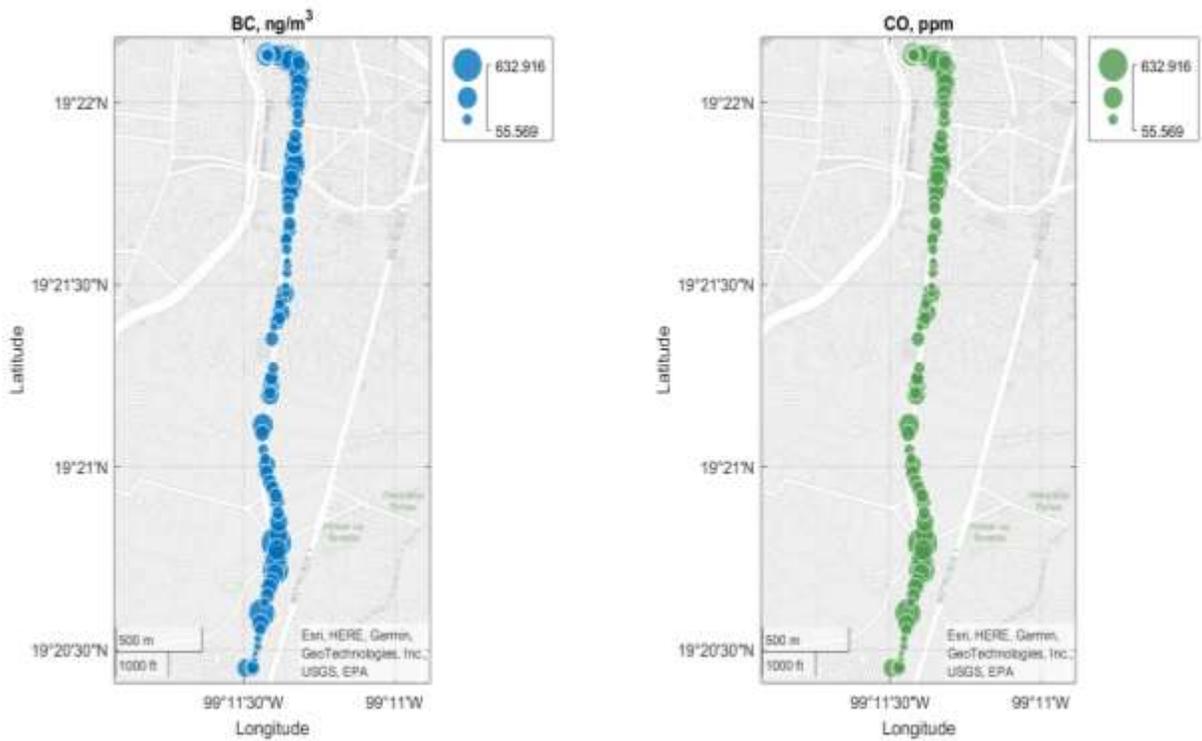


Figura 29. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 12/07/2020.

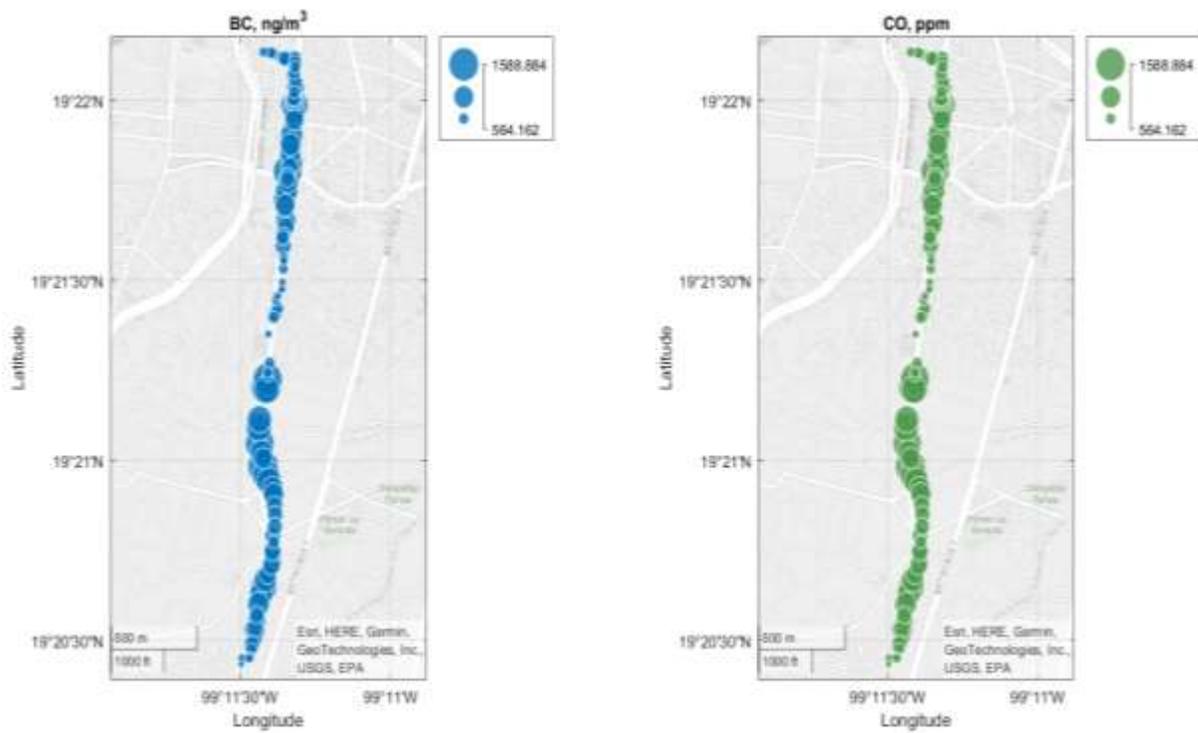


Figura 30. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 13/07/2020.

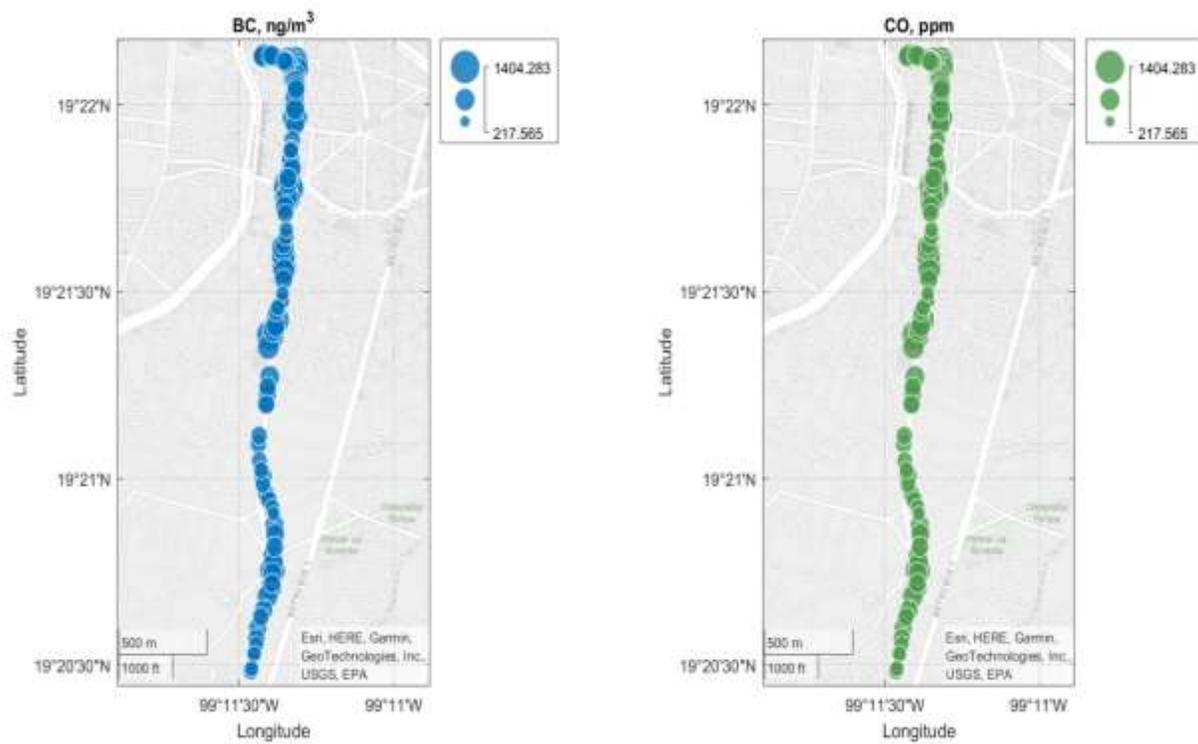


Figura 31. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta San Ángel 14/07/2020.

Se puede observar de manera general que para el caso de BC en la ruta San Ángel, las concentraciones más altas del contaminante se localizan principalmente en la parte centro-norte de la misma, mientras que para el caso del CO, se muestra una distribución de la concentración más homogénea a lo largo de ésta.

Cabe resaltar que existe una coincidencia en los puntos de máxima concentración para ambos contaminantes a lo largo de la ruta.

6.4.2 Reforma



Figura 32. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 20/07/2020.



Figura 33. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 21/07/2020.

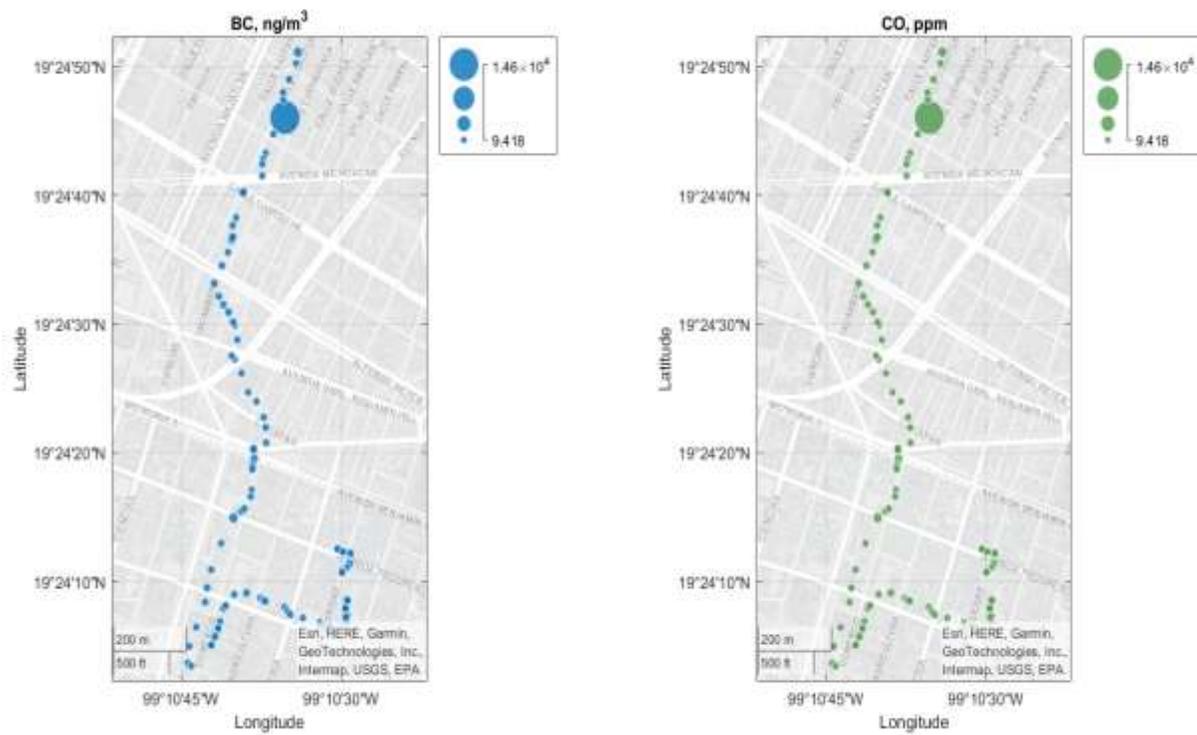


Figura 34. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 22/07/2020.



Figura 35. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 23/07/2020.



Figura 36. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 24/07/2020.



Figura 37. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 25/07/2020.



Figura 38. Mapa de distribución de concentraciones para la ruta Reforma 26/07/2020.

A diferencia de los resultados obtenidos en la ruta San Ángel, en la ruta Reforma se puede observar una distribución similar para ambos contaminantes, al igual que una localización similar para los puntos máximos de concentración de éstos a lo largo de ésta ruta, permitiendo resaltar una mayor y mejor correlación de la emisión de éstos.

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones generales

Este trabajo busca proporcionar información sobre las concentraciones inmediatas a nivel de calle de los contaminantes a los que los transeúntes suelen estar expuestos.

A partir del trabajo realizado y los resultados obtenidos, se pudieron realizar las estimaciones para el cálculo de la carga del contaminante y la dosis de exposición a partir de los datos obtenidos durante los diversos recorridos en las rutas establecidas, que en conjunto, se puede señalar los diferentes niveles de ciertos contaminantes como el CN y CO a los que se puede estar expuesto en la Ciudad de México con distintas condiciones, horarios, tipo de movilidad y tipo de ciclovía.

Los sensores de bajo costo a pesar de mantenerse en etapa de investigación, buscan mejoras con base en sus limitaciones de monitoreo en condiciones reales de operación. Estos dispositivos son una alternativa viable para el análisis de calidad del aire en entornos urbanos, sin embargo, hay que tomar en cuenta que requieren una frecuente calibración y obtener mediciones comparables.

El análisis de los datos de vigilancia móvil es un reto debido a su naturaleza multidimensional y los posibles sesgos debido a la exposición a los gases de escape de un solo vehículo.

La exposición a CN y CO a la que se está propenso no depende directamente de la calidad del aire, ya que el entorno de movilidad de un peatón y ciclista suele ser muy dinámico, por lo que resulta eclipsada la dinámica normal de la atmósfera a microescala frente a la contaminación presente debido a la presencia de vehículos y a la exposición más estrecha a las fuentes contaminantes.

Los estudios de la atmósfera a microescala no sólo son importantes para el estudio de fenómenos meteorológicos que pueden afectar a la población a corto plazo, también para el estudio de los factores meteorológicos que afectan de igual manera a la dinámica atmosférica, y con ésta, el movimiento del viento, la dispersión de contaminantes y su relación, así como determinar de ésta manera los posibles efectos negativos sobre la salud pública a corto, mediano y largo plazo.

7.2 Conclusiones específicas

Los procesos termodinámicos en la atmósfera juegan un papel fundamental en los fenómenos de dispersión de contaminantes, así como la dinámica del viento.

La concentración de partículas $PM_{2.5}$ es un parámetro más común para evaluar la calidad del aire que la CN, ya que tiene efectos directos e indirectos sobre el clima.

El CN es un indicador de las emisiones de los vehículos diésel en las zonas de tráfico intenso, lo que resulta importante en el caso de la Ciudad de México ya todos los autobuses y camiones están equipados con motores diésel, mientras que los automóviles, motocicletas y los turismos utilizan principalmente motores de gasolina.

No es posible aplicar factores de emisión ya que se midieron las concentraciones ambientales, por lo que basados en literatura donde se hayan medido simultáneamente las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ y de CN, se logró llevar a cabo una estimación donde se determinó que existe una fracción de 1/5 correspondiente a CN/ $PM_{2.5}$ en masa.

Las concentraciones medidas eran en algunos casos hasta diez veces mayores que las registradas por la estación de control de la calidad del aire más cercana, debido a la cercanía a las principales avenidas por las cuales se llevaron a cabo las rutas de muestreo y las fuentes de emisión.

La mayoría de las concentraciones promedio máximas de CN y CO, así como la dosis de exposición promedio, se registraron y coincidieron en días laborables, estas concentraciones ambientales coinciden con un aumento del tránsito automovilístico en las avenidas, mayor requerimiento de transporte público y mayor afluencia.

Las vías de mayor uso por la población ocasionan un ciclo de emisión-exposición constante, provocando los altos niveles de CN y CO con la cual se puede determinar una estrecha correlación de los niveles de concentración de contaminantes, la dosis de exposición y las características a las que está expuesto el peatón y ciclista, con la distancia entre las vías de tránsito vehicular, banquetas y ciclovías, así como la presencia de vegetación.

Los múltiples estudios relacionados con los efectos sobre la salud ante las altas concentraciones de contaminantes permiten establecer un efecto negativo principalmente sobre las enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares preexistentes, así como en su desarrollo.

Existe una relación entre la concentración de CN y CO y el material particulado en un rango de 2.5 - 10 micrómetros al que se está expuesto diariamente, en especial en áreas abiertas y con alta movilidad vehicular.

La exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ muestran un creciente papel en el desarrollo y promoción de algunas enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Se puede hacer una estimación sobre aquellas repercusiones en la salud en sitios abiertos que involucra una dinámica atmosférica más errática, múltiples fuentes primarias y secundarias de contaminantes.

La constante exposición a altos niveles de concentraciones de estos contaminantes puede tener fuertes implicaciones de salud, no solo para aquellos con enfermedades preexistentes tales como la diabetes y el asma, provocando un mayor deterioro de las mismas. Estas concentraciones no solo afectan negativamente a aquellos con un historial clínico con enfermedades crónicas, sino también a la población "sana", siendo el CN uno de los responsables del agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, agravamiento de enfermedades como la diabetes y el asma. El CO por otro lado, recibe el nombre de "el asesino silencioso", ya que afecta directamente a la oxigenación y saturación de la sangre, ocasionando desde problemas de concentración hasta neuropsicológicos, afectación de los reflejos y funciones motoras.

La disminución de los niveles de concentración de CN y CO no solo implicaría una mejora en los niveles de contaminación atmosférica, su relación en la biosfera y el restablecimiento de un equilibrio ecológico actualmente indispensable, conllevaría a una mejora de la salud general de la población, su calidad de vida y reduciendo el riesgo de agravamiento de enfermedades crónicas y agudas desarrolladas.

8 Referencias

Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA). (2013). Contaminantes Climáticos de Vida Corta: una oportunidad para reducir emisiones. https://aida-americanas.org/sites/default/files/One%20pager%20final_1.pdf

Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73, 123-132.

Ballester Díez, F., Tenías, J. M., & Pérez-Hoyos, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73, 109-121.

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Rev Esp Salud Pública*, 79(2), 159-175.

Barrios Casas, S., Peña-Cortés, F., & Osses Bustingorry, S. (2004). Efectos de la contaminación atmosférica por material particulado en las enfermedades respiratorias agudas en menores de 5 años. *Ciencia y enfermería*, 10(2), 21-29.

Bea Alonso, M. (2009). Los sistemas de bicicletas públicas urbanas.

Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <http://doi.org/10.1002/jgrd.50171>

Cai, J., Yan, B., Ross, J., Zhang, D., Kinney, P. L., Perzanowski, M. S., ... & Chillrud, S. N. (2014). Validation of MicroAeth® as a black carbon monitor for fixed-site measurement and optimization for personal exposure characterization. *Aerosol and air quality research*, 14(1), 1.

Campa, B. P. C., & Hernandez, I. C. (2019). Metodologías para el muestreo de la calidad del aire. *Vidsupra visión científica*, 7.

Castillo, M. C. C., & Jordán, M. A. (1999). *Meteorología y clima* (Vol. 79). Univ. Politèc. de Catalunya.

Cholan Rodriguez, E. (2016). Distribución espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles y del monóxido de carbono en el Perú relacionado con las quemadas de biomasa (2002-2014).

- Colman Lerner, J. E., Mellado, D., & Sánchez, É. Y. (2018). Contaminantes atmosféricos.
- Córdova Peña, J. M. (2019). Índice de la calidad de aire de combustión del monóxido de carbono y dióxido de azufre del flujo vehicular en Pariachi y Huaycan.
- De Oca, L., Tricio, V., Pierre, A., Cuesta, O., Sánchez, E., & Rodríguez, R. (2010). Aspectos termodinámicos de la meteorología y su influencia en la dispersión de los contaminantes atmosféricos. *RCF*, 134.
- Díaz, P. C. U., Ferro, D. T., & Estévez, J. O. O. (2006). Influencia De Las Calderas Sobre El Medio Ambiente. *Ciencia en su PC*, (3), 1-13.
- Fernández Silva, P. Y., Suárez Lastra, M., & Quiroz Rothe, H. (2018). La movilidad en la Ciudad de México: Impactos, conflictos y oportunidades.
- Gallardo, A. H., Gallardo, R. L. H., Torres, Y. S., & López, Á. J. L. (2017). Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el período 2020-2030–México. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 5(9).
- García, E. A. A. 2018. La política del transporte en la Ciudad de México durante la primera mitad del siglo xx: la evolución de un ámbito de la política urbana. *La movilidad en la Ciudad de México*, 16.
- Gómez-Gómez, M., & Danglot-Banck, C. (1998). Contaminación ambiental en el Valle de México ¿Estamos haciendo lo necesario? *Revista Mexicana de Pediatría*, 65(6), 254-260.
- Gómez Peláez, Á. J. (2018). Medida y transporte de gases de efecto invernadero atmosféricos, monóxido de carbono y polvo sahariano, con especial énfasis en la troposfera libre del Atlántico noreste subtropical.
- González, L. O. P. (2006). Microsoft Excel: una herramienta para la investigación. *MediSur*, 4(3), 68-71.
- González Rojas, A. L., & Arciniegas Triana, D. (2018). Caracterización de las emisiones provenientes de los vehículos de carga pesada en un parqueadero ubicado en la Avenida Calle 17 de la localidad de Fontibón en Bogotá DC.
- Guadalupe, M. G., Sánchez, H. U. R., Godínez, H. U., Pérez, A., & Arias, S. (2012). Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Guadalajara (México). *Investigaciones geográficas*, (58), 9-29.
- Hernández, C. G. D. (2016). Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos.

Hoffman, D. (2016). ¿Qué son los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC)?

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2007). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México. (2011). Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009).

Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367.

Kirchner, B. G. (2009). Ozono troposférico. <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-ozono-troposferico.html>

Lipp, D. O. (2020). Los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (ccvc). Un vehículo para mejorar la calidad del aire y mitigar el Cambio Climático. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 56(1), 14-21.

López, E. M. (2007). Diagnóstico de la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población. Medellín y su área metropolitana, Documento, 2, 174-262.

Madariaga Coaquira, Z. (2018). Estudio de concentración de carbono negro (CN) y carbono orgánico (OC) contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros (PM10), y su incidencia en la salud de la población de Arequipa Metropolitana-años 2014, 2015, 2016, 2017, y 2018.

Matus, P., & Lucero Ch, R. (2002). Norma primaria de calidad del aire. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 18(2), 112-122.

Millán Lagunas, M. M. (2018). La ciclovía como movilidad sustentable; una propuesta mediante el análisis espacial con geotecnologías, caso de estudio Zona Urbana de Toluca.

Molina, C. M. (2016). Mejorar la calidad del aire en el Valle de México es urgente y un gran reto para la sociedad. Consultado en <https://centromariomolina.org/mejorar-la-calidad-del-aire-en-el-valle-de-mexico-es-urgente-y-un-gran-reto-para-la-sociedad>.

Montoya, E. (2018). Caracterización de la concentración de contaminantes del aire a partir del estudio de la dinámica atmosférica en el Valle de Aburrá. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.

Muñoz, M. M. (2016) Desarrollo de un sistema basado en análisis por imagen para la obtención de la carga de carbono negro en filtros procedentes de cocinas mejoradas (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

Navarrete, G. G., y Soto, K. G. R. (2019). SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE. *Epistemus*, 13(27), 30-37.

Olaya García, B., Parma Valenzuela, G. A., & Salinas López, J. A. (2013). La bicicleta como transporte sostenible en México. In Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes (1º. 2013. Sevilla). Universidad de Sevilla, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I.

Ortuzar, F., & Tornel, C. (AIDA). (2016). Controlando los contaminantes climáticos de vida corta. Una oportunidad para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático. El caso de Brasil, Chile y México. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Park, S. S., Hansen, A. D., & Cho, S. Y. (2010). Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data. *Atmospheric Environment*, 44(11), 1449-1455.

Porrás González, J. D. (2018). Análisis de datos con MATLAB. Querol,

X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales.

Ríos Flores, R. A., Taddia, A. P., Pardo, C., & Lleras, N. (2015). Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta. Tomado de: <https://publications.iadb.org/handle/11319/6808>.

Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista cubana de higiene y epidemiología*, 44(2), 0-0.

Salvador, P., & Artiñano, B. (2000). Evaluación de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en las redes de calidad del aire de la Comunidad de Madrid. CIEMAT, 921.

Sarlat, I. (2015). 13 El cambio climático y la reforma energética en México: entre los compromisos internacionales y la realidad nacional. *Revista Aranzadi de Derecho Ambiental*.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2015. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Segura Redón, S. (2015). Caracterización in-situ de las propiedades espectrales de absorción de los aerosoles atmosféricos en Valencia.

Téllez, J., & Rodríguez, A. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental. *Revista de salud pública*, 8, 108-117.

Trigueros, I. M. G. (2010). Análisis del paisaje físico y humano de la provincia de Alicante: Google Earth como herramienta docente en las clases de Geografía. *GeoGraphos: Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales*, 1(1), 1-26.

Valdebenito Silva, V. A. (2017). Determinación de emisiones de carbono negro a partir de emisiones de material particulado fino en vehículos diésel.

Vallejo, M., Jáuregui-Renaud, K., Hermosillo, A. G., Márquez, M. F., & Cárdenas, M. (2003). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la ciudad de México. *Gac Méd Méx*, 139(1).

Vázquez, D., & de la Paz, M. S. (2015). La bicicleta en la movilidad cotidiana: Experiencias de mujeres que viven en la ciudad de México (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.).

Velasco, S., González, A., & Román, F. L. (2004). Una medida de la presión atmosférica sin barómetro. *Revista Española de Física*, 18, 47-51.

Velázquez, B. R. R., & Reséndiz, J. M. (2018). La dimensión regional de la movilidad y su impacto en la contingencia ambiental de la Ciudad de México. *La movilidad en la Ciudad de México*, 40.

Venegas, L. E. (1986). *Difusión de contaminantes en una capa límite atmosférica estratificada convectivamente* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

Venegas, L. E., & Mazzeo, N. A. (2012). La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. In *II Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Vientos (CLIV)*(La Plata, 5, 6 y 7 de diciembre de 2012).

Vidal-Ros, I., López-Lee, R., Cuesta-Santos, O. A., Bolufé-Torres, J., & García-Valdés, E. (2018). Condiciones meteorológicas que influyen en las inmisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(2), 146-158.

Zanón, M. P., & Triola, M. D. C. (2008). *Medio atmosférico, El. Meteorología y contaminación* (Vol. 36). Edicions Universitat Barcelona.

Zuk, M. (2007). Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. Instituto Nacional de Ecología.