



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ANTEPROYECTO PARA LA RED DE MONITOREO ATMOSFÉRICO  
DEL CARBONO NEGRO EN AIRE AMBIENTE PARA LA ZONA  
METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**LORENA MORENO MAXINEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**





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.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** María Rafaela Gutiérrez Lara

**VOCAL:** Néstor Noé López Castillo

**SECRETARIO:** José Abraham Ortíz Álvarez

**1er. SUPLENTE:** José Agustín García Reynoso

**2° SUPLENTE:** Gema Luz Andraca Ayala

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**M. en C. José Abraham Ortíz Álvarez**

**SUSTENTANTE:**

---

**Lorena Moreno Maxinez**

## Índice

<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>IV</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>VII</b>
Objetivo general .....	VII
Objetivos Particulares.....	VII
<b>Capítulo 1 Antecedentes .....</b>	<b>1</b>
1.1 Calentamiento global y Cambio Climático.....	1
1.2 Contaminantes climáticos de vida corta.....	3
1.2.1 Metano.....	7
1.2.2 Ozono troposférico.....	7
1.2.3 Hidrofluorocarbonos.....	8
1.3 Carbono negro .....	9
1.3.1 Formación del carbono negro.....	9
1.3.2 PM <sub>2.5</sub> .....	12
1.3.3 Los efectos del carbono negro sobre el medio ambiente y la salud humana.....	14
1.3.4 El carbono negro en el mundo .....	15
1.3.5 Antecedentes del monitoreo de carbono negro a nivel mundial.....	18
1.3.5.1 Red de monitoreo de carbono negro del Reino Unido .....	18
1.3.5.2 Red de monitoreo de carbono negro en California.....	20
1.3.6 Estudios de carbono negro en México .....	21
1.3.7 Métodos para la cuantificación de carbono negro en medio aire ambiente.....	23
1.3.7.1 Mediciones de carbono negro mediante aetalómetro.....	27
<b>Capítulo 2 Metodología de diseño de la red de monitoreo de carbono negro.....</b>	<b>30</b>
2.1 Programa de monitoreo de la calidad del aire.....	30
2.2 Información antecedente y enfoque del monitoreo .....	33
2.2.1 Objetivos de la red .....	34
2.2.2. Selección del área de estudio .....	35
2.2.3 Selección de los contaminantes a monitorear .....	36
2.2.4. Selección de los equipos que serán usados para el monitoreo .....	36
2.2.5. Uso de los datos .....	36
2.2.6 Consideraciones en el diseño .....	37
2.3 Metodología del diseño de la red.....	37
2.3.1 Información de la zona de estudio.....	38
2.3.1.1 Fuentes y emisiones.....	38
2.3.1.2 Salud e información demográfica.....	39
2.3.1.3 Información meteorológica.....	39

2.3.1.4 Información topográfica .....	40
2.3.1.5 Información previa de la calidad del aire .....	40
2.3.1.6 Consideraciones del uso de la tierra en la zona .....	41
2.3.2 Número y distribución de sitios de muestreo .....	41
2.3.2.1 Determinación del número de sitios de muestreo .....	41
2.3.2.2 Tipos de sitios de muestreo .....	43
2.3.2.3 Distribución de los sitios de muestreo .....	43
2.3.3 Muestreo duración y frecuencia .....	46
<b>Capítulo 3 Propuesta del diseño de la red de monitoreo de carbono negro en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....</b>	<b>48</b>
3.1 Programa de monitoreo de carbono negro. ....	48
3.2 Información antecedente de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. ....	50
3.2.1 Objetivos de la red .....	50
3.2.2. Delimitación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. ....	50
3.3 Desarrollo de la metodología del diseño de la red .....	56
3.3.1 Información de la zona de estudio.....	56
3.3.1.1 Industrias, transporte e incendios .....	57
3.3.1.2 Distribución poblacional.....	60
3.3.1.3 Climatología y vientos.....	61
3.3.1.4 Ubicación geográfica y altitud .....	66
3.3.1.5 Información previa de la calidad del aire.....	67
3.3.1.6 Actividades económicas y uso de suelo.....	70
3.3.2 Número y distribución de sitios de muestreo .....	73
3.3.3 Muestreo duración y frecuencia .....	73
<b>Capítulo 4 Análisis de la propuesta de la red de monitoreo de carbono negro en la zona metropolitana del Valle de Toluca .....</b>	<b>74</b>
4.1 Centro .....	76
4.2 Cuadrante I.....	76
4.3 Cuadrante II.....	78
4.4 Cuadrante III.....	80
4.5 Cuadrante IV .....	81
4.6 Análisis de la calidad del aire en la ZMVT .....	82
4.7 Análisis con modelos de trayectoria.....	85
4.7 Propuesta .....	90

<b>Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>92</b>
5.1 Conclusiones.....	92
5.2 Recomendaciones.....	93
<b>Bibliografía .....</b>	<b>96</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1.1 Vidas medias en la atmósfera de los contaminantes climáticos de vida corta en comparación con el gas de efecto invernadero de vida larga CO <sub>2</sub> .	4
Tabla 1.2 Procesos de formación de las partículas gruesas, finas y ultrafinas	13
Tabla 1.3 Porcentaje de carbono negro emitido por motores de vehículos.	15
Tabla 1.4 Emisiones en 2005 (Mt/año) de carbono negro, otros compuestos orgánicos y PM <sub>2.5</sub> .	16
Tabla 1.5 Iniciativas para mitigar el carbono negro por fuentes de diesel	17
Tabla 1.6 Iniciativas para mitigar el carbono negro por quema de biomasa	17
Tabla 1.7 Iniciativas para mitigar el carbono negro por diversas fuentes	18
Tabla 1.8 Objetivos de la red de monitoreo de carbono negro en el Reino Unido	20
Tabla 1.9 Medidas preventivas de carbono negro en México.	23
Tabla 1.10 Métodos de medición y cuantificación de carbono negro.	25
Tabla 1.11 Técnicas ópticas comerciales de medición de carbono negro.	27
Tabla 2.1 Restricciones comunes para el diseño y operación de un sistema de monitoreo.	33
Tabla 2.2 Número de sitios de muestreo sugeridos dependiendo el contaminante y el tamaño de la población.	42
Tabla 2.3 Distribución sugerida de las estaciones de muestreo.	45
Tabla 2.4 Escalas de representatividad de los sitios de monitoreo.	46
Tabla 3.1 Municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con la H. LVII Legislatura del Estado de México.	53
Tabla 3.2 Municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con la Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010.	54
Tabla 3.3 Número de industrias manufactureras registradas en 2009 por municipio. Fuente de	57
Tabla 3.4 Número de industrias manufactureras presentes en cada municipio de acuerdo a su clasificación.	58
Tabla 3.5 Fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios.	60
Tabla 3.6 Población, Superficie y DMU de cada municipio en la ZMVT.	61
Tabla 3.7 Rangos de Temperatura y precipitación por municipio.	62
Tabla 3.8 Descripción de clima por municipio.	63
Tabla 3.9 Altitud en metros sobre el nivel del mar por municipio.	66
Tabla 3.10 Estaciones de muestreo del Valle de Toluca.	67
Tabla 3.11 Emisiones en toneladas anuales de la ZMVT 2006	70
Tabla 3.12 Producto Interno Bruto a precios constantes (millones de pesos de 2003) por sector de actividad económica según municipio en 2011.	71
Tabla 3.13 Uso del suelo y vegetación en los municipios de la ZMVT.	72
Tabla 4.1 Simbología de la zona de estudio.	75
Tabla 4.2 Estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo del Valle de Toluca	75

## Índice de figuras

Figura 1.1. Balance de energías en condiciones normales de la atmósfera.....	2
Figura 1.2. Balance de energías en condiciones de efecto invernadero de la atmósfera.....	2
Figura 1.3. Proyección del incremento de temperatura.....	6
Figura 1.4. El Ozono presente en diferentes capas de la atmósfera.....	8
Figura 1.5. Reacciones de combustión ideales.....	10
Figura 1.6. Reacciones de combustión no ideales.....	10
Figura 1.7. Estructura del carbono negro.....	11
Figura 1.8 Red de monitoreo de carbono negro y elemental en el estado de California, USA....	21
Figura 1.9. Porcentaje de emisiones de carbono negro por fuente emisora.....	22
Figura 1.10. Medición de los componentes carbónicos en las partículas.....	26
Figura 1.11. Aetalómetro portable modelo AE42.....	28
Figura 2.1. Pasos a seguir para el desarrollo de un programa de monitoreo de aire.....	31
Figura 3.1. Propuesta para desarrollar un programa de monitoreo de carbono negro.....	49
Figura 3.2. Localización del Estado de México.....	52
Figura 3.3. División de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con la H. LVII Legislatura del Estado de México.....	53
Figura 3.4. Delimitación de la Zona Metropolitana de Toluca de acuerdo con SEDESOL- CONAPO-INEGI.....	55
Figura 3.5. Zona Metropolitiana del Valle de Toluca para este estudio.....	56
Figura 3.6. Porcentaje por tipo de industria.....	59
Figura 3.7. Número de días con lluvia en cada mes.....	62
Figura 3.8. Clima en el Estado de México.....	63
Figura 3.9. Temperaturas normales de Toluca y Metepec durante el año.....	64
Figura 3.10. Temperaturas medias de Toluca y Metepec durante el año.....	64
Figura 3.11. Temperaturas máximas de Toluca y Metepec durante el año.....	65
Figura 3.12. Rosa de los vientos de Toluca.....	65
Figura 3.13. Relieve del Estado de México.....	66
Figura 3.14. Ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico en el Valle de Toluca.....	67
Figura 3.15. Rosas de los vientos para las 5 estaciones de monitoreo atmosférico en el Valle de Toluca.....	68
Figura 3.16. Rosas de vientos ubicadas en el mapa.....	69
Figura 4.1. Zona de estudio y sus puntos de interés.....	74
Figura 4.2. Cuadrante I.....	77
Figura 4.3. Cuadrante II y IV.....	79
Figura 4.4. Cuadrante III.....	81
Figura 4.5. Cuadrante IV.....	82
Figura 4.6. Representación espacial de las concentraciones promedio de los promedios diarios de 24 horas.....	83
Figura 4.7. Representación del límite anual (promedio anual de los promedios de 24 horas) ...	84

Figura 4.8. Representación espacial de las concentraciones promedio de los promedios diarios de 24 horas.....	84
Figura 4.9. Primera corrida del modelo de HYSPLIT (15/Diciembre/2008).....	86
Figura 4.10. Gráfica de retro-trayectorias (15/Diciembre/2008).....	87
Figura 4.11. Primera corrida del modelo de HYSPLIT (22/Diciembre/2008).....	88
Figura 4.12. Gráfica de retro-trayectorias (22/Diciembre/2008).....	89
Figura 4.13. Propuesta de la Red de Monitoreo de Carbono Negro en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. ....	91

## Objetivos

### Objetivo general

Proponer una metodología que permita desarrollar un diseño preliminar de la red de monitoreo atmosférico de carbono negro en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

### Objetivos Particulares

- ❖ Dar una visión general del cambio climático en la actualidad, el origen y la naturaleza de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta y la importante contribución al calentamiento global.
- ❖ Proporcionar información suficiente para comprender la formación del carbono negro y sus efectos en la salud y el medio ambiente.
- ❖ Revisar los estudios relacionados con este contaminante que se están realizando en México así como en el resto del mundo.
- ❖ Se plantea desarrollar un método para el diseño de redes de monitoreo de carbono negro, basándose en estudios e información desarrollada por organizaciones mundialmente conocidas.
- ❖ Entender el comportamiento económico, poblacional y climatológico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

## Capítulo 1 Antecedentes

En este capítulo se mostrarán algunos antecedentes que son importantes para proponer y desarrollar una red de monitoreo de carbono negro. Se mencionará la importancia de los contaminantes climáticos de vida corta y su influencia en el calentamiento global. Además, se dará una breve explicación de la formación del carbono negro en las reacciones de combustión. Así mismo, se abordará brevemente los efectos del carbono negro en la salud humana y el medio ambiente. Del mismo modo, se dará una visión general de la situación del carbono negro en el mundo y en México. Finalmente, se discutirán y se diferenciarán las técnicas más comunes de medición de carbono negro dependiendo de las propiedades de este contaminante.

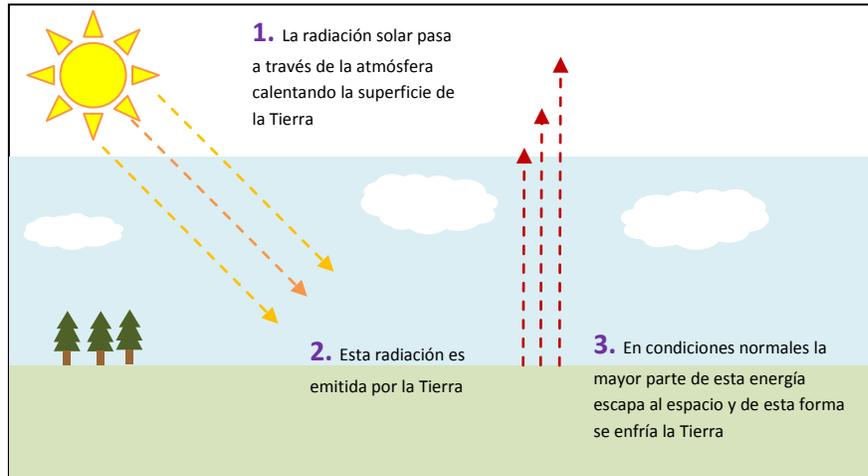
### 1.1 Calentamiento global y Cambio Climático

El calentamiento global es un fenómeno que se ha venido observado de manera general, se relaciona con un incremento en la temperatura promedio de la Tierra. Por ejemplo, para el año 2010 se había registrado un incremento promedio de 1°C en la temperatura global comparados con valores observados en 1850 (Gay, Estrada, & Martínez, 2010). La temperatura superficial de la Tierra fue más alta durante el siglo XX que en cualquier otro de los últimos mil años, el incremento ha sido de entre 4 y 8 °C, siendo las últimas dos décadas las más calientes (Estrada, 2001).

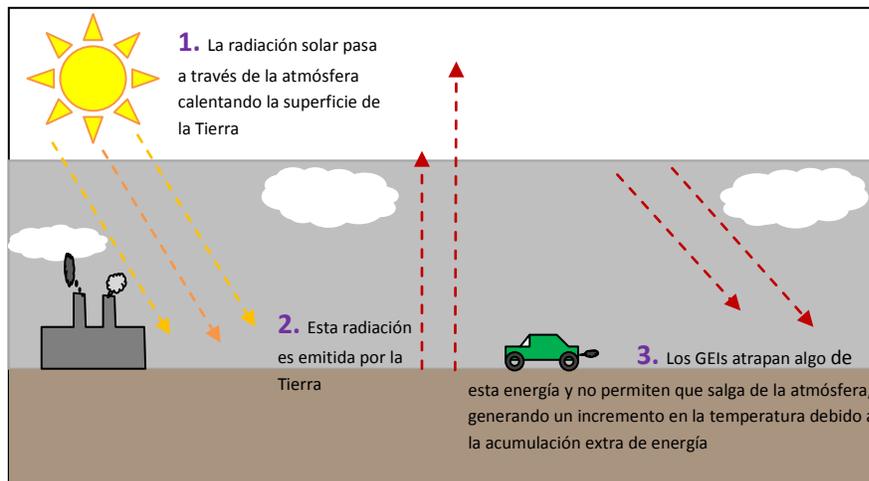
Este aumento en la temperatura ha traído consigo consecuencias considerables, puesto que los daños que ha causado a los ecosistemas y a la vida han sido costosos con efectos irreversibles. Asimismo, algunos de los efectos causados por este aumento de temperatura ha desatado una reacción en cadena, que termina por contribuir a acrecentar los efectos del calentamiento global.

Actualmente se reconoce que los principales causantes de este incremento en la temperatura son los gases de efecto invernadero (GEI's) principalmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), entre los cuales se encuentran el metano, el carbono negro, el ozono troposférico y los hidrofluorocarbonos

(HFC's). El efecto de calentamiento que provoca la presencia de estos contaminantes en la atmósfera se debe a que no permiten la salida de la energía de la atmósfera de manera natural, provocando un efecto invernadero. Como se observa en las figuras 1.1 y 1.2, donde se explica más a detalle este efecto.



**Figura 1.1. Balance de energías en condiciones normales de la atmósfera.**



**Figura 1.2. Balance de energías en condiciones de efecto invernadero de la atmósfera.**

Como consecuencia del efecto invernadero, ahora observamos el derretimiento de los glaciares en los polos, lo cual no solo incrementa los niveles de agua de los océanos, sino que acrecienta dicho efecto al liberar el metano que se encontraba disuelto en los glaciares. Esto a su vez, ocasiona el cambio en los patrones de precipitación del agua debido a la descompensación en el ciclo del vital líquido.

Otros efectos del cambio climático son la alteración que sufren los patrones meteorológicos, las estaciones del año y la cantidad de precipitaciones, transformaciones en ecosistemas y, por lo tanto, la vida de sus habitantes. Esta alteración es una consecuencia del calentamiento a nivel global, no obstante, algunas zonas vulnerables son las que se ven más afectadas por este cambio. Actualmente, el cambio climático es una problemática que afecta a millones de personas, animales y ecosistemas enteros en todo el mundo y puede llegar a causar crisis de diversa índole tales como económicas, de abastecimiento de agua potable, de salud y de producción de alimentos, por mencionar algunas.

## 1.2 Contaminantes climáticos de vida corta

Los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) deben su nombre a que su vida en la atmósfera es relativamente corta comparada con la vida media de otros gases como el CO<sub>2</sub>. De acuerdo a la UNEP (United Nations Environment Program) los contaminantes climáticos de vida corta son sustancias tales como:

El metano, el carbono negro, el ozono troposférico y varios hidrofluorocarbonos, los cuales, tienen un impacto significativo en el cambio climático a corto plazo y una duración de vida relativamente corta en la atmósfera. (UNEP, 2011).

Los efectos causados por los CCVC pueden tener impactos en semanas o en una década pero no permanece por más tiempo; sin embargo, sus efectos pueden llegar a ser determinantes en la contribución al forzamiento radiactivo de la Tierra en los años siguientes. Para fines de este documento se entenderá como calentamiento a corto plazo al horizonte comprendido entre 20 a 40 años, es decir, si los efectos de los contaminantes permanecen después del año 2050, ya será considera un calentamiento a largo plazo.

Los CCVC no solo contribuyen al incremento de la temperatura promedio global, si no también perturban los patrones climatológicos locales, originan afectaciones a la salud ya que disminuyen la calidad del aire y algunos de ellos afectan al desarrollo y crecimiento de cultivos agrícolas para el consumo humano. En la tabla 1.1 se describen los tiempos de vida media de los CCVC y algunas observaciones importantes.

**Tabla 1.1 Vidas medias en la atmósfera de los contaminantes climáticos de vida corta en comparación con el gas de efecto invernadero de vida larga CO<sub>2</sub> (UNEP, 2011).**

<i>Substancia</i>	<i>Tiempo de Vida</i>	<i>Observaciones</i>
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Décadas a siglos, alrededor el 20% de CO <sub>2</sub> permanece por varios milenios	No se puede determinar un solo tiempo de vida del CO <sub>2</sub> debido a las diferentes tasas de adsorción por diferentes procesos de remoción.
HFCs	29 años	Una cantidad considerable de los hidrofluorocarbonos tienen una vida de 29 años o menos y por eso se pueden considerar como de vida corta (UNEP, 2011).
Metano	12 años	El metano tiene 21 veces el potencial de calentamiento del CO <sub>2</sub> (IGDS, 2013)
Ozono troposférico	4-18 días	El ozono es un contaminante que no es emitido directamente a la atmósfera, es producido por reacciones fotoquímicas que involucran otros agentes como: monóxido de carbono (CO) metano (CH <sub>4</sub> ) óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) y compuestos orgánicos volátiles.
Carbono negro	3-8 días	El tiempo de residencia promedio en la atmósfera del carbono negro varía regionalmente y dependiendo de la temporada. Este rango está basado en una evaluación internacional con 16 modelos. Sin embargo, el carbono negro también puede seguir calentando la atmósfera después de ser depositado en cuerpos de agua o nieve.

Estudios recientes indican que los CCVC contribuyen aproximadamente entre un 40-45% al calentamiento global, el otro 55-60% es aportado, principalmente por el gas de efecto invernadero CO<sub>2</sub>, el cual puede durar hasta miles de años en la atmósfera (IGDS, 2013). Sin embargo, si se suman las aportaciones que hacen ambos tipos de gases al incremento global de la temperatura, el aumento se volverá mucho más significativo tanto a corto como a largo plazo.

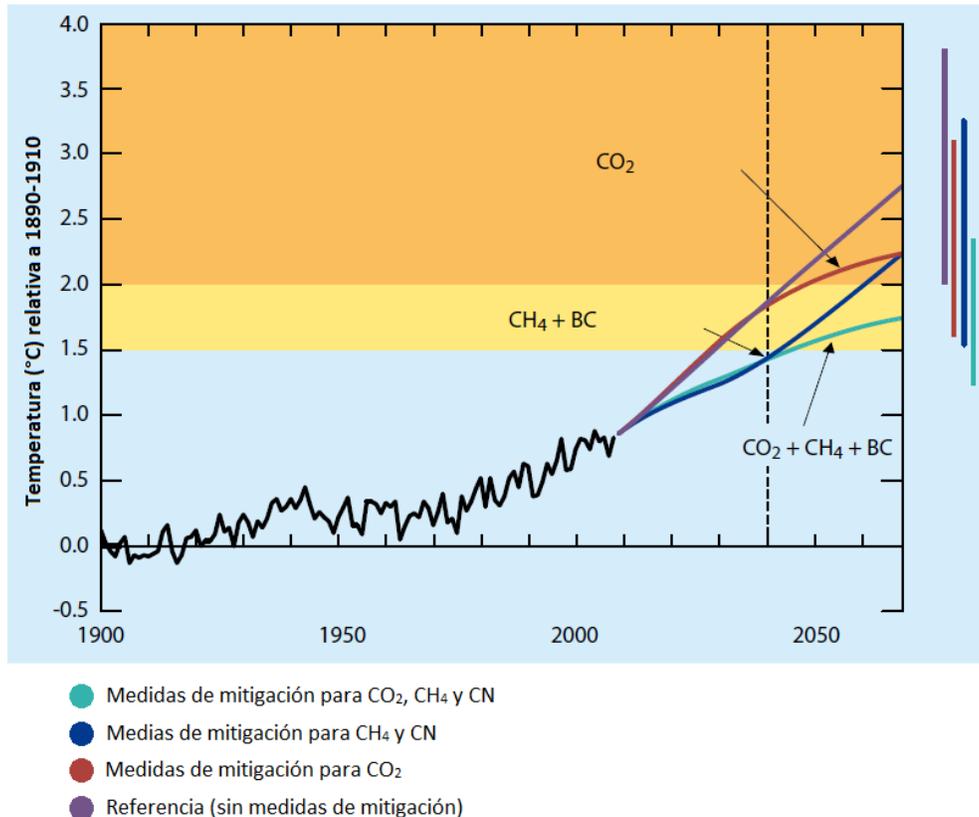
La mitigación de estos gases en tiempo y forma puede llegar a contribuir a una reducción del calentamiento global hasta en un cincuenta por ciento; la rapidez del calentamiento en el Ártico por dos tercios y en regiones elevadas como el Himalaya y el Tíbet por al menos la mitad (IGDS, 2013). Sin embargo, no es suficiente solo proponer y desarrollar estrategias de mitigación para los CCVC, es necesario combinar acciones que incluyan la disminución de emisiones al ambiente tanto de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> y los CCVC.

En suma, el cambio climático en el futuro cercano se verá afectado principalmente por dos factores: el CO<sub>2</sub> que existe actualmente en la atmósfera y por los CCVC. El CO<sub>2</sub> que será emitido en los próximos 20 años no será determinante en el cambio climático al corto plazo como podría pensarse, ya que su efecto es a largo plazo.

Para explicar un poco más a detalle esta premisa se utilizará la figura 1.3, donde se muestra una gráfica que relaciona el incremento de la temperatura por cada década desde 1900 hasta 2050. Se hace una extrapolación de lo que sería el aumento de la temperatura si se tomaran algunas medidas preventivas para CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y carbono negro, y se comparan con la línea que representa el comportamiento si no se hiciera ninguna medida de prevención.

Como se observa en la figura 1.3, el incremento aproximado de la temperatura, si no se realiza ningún tipo de mitigación, podría oscilar entre los 2 °C hasta 4 °C, sin embargo, si se efectuaran estrategias de mitigación para CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y carbono negro se podría reducir este rango hasta niveles de 1.25 °C hasta 2 °C. Así mismo, se observa en la gráfica que si solo se llevaran a cabo medidas para únicamente CO<sub>2</sub> los resultados se empezarían a reflejar en un largo plazo más allá del 2040 (después de la línea punteada) y el rango de incremento variaría de 1.7 °C hasta 3.25 °C. Por otro lado, si únicamente se implementaran

regulaciones para las emisiones de los CCVC como CH<sub>4</sub> y carbono negro, los resultados se observarían en un corto plazo que sería dentro de los próximos 25 años, pero este beneficio no se extendería por más tiempo (después de la línea punteada no se observa un gran cambio).



**Figura 1.3. Proyección del incremento de temperatura.**  
 Fuente: (UNEP & WHO, 2011)

Es por eso que, para reducir los impactos de los contaminantes en el corto plazo, será necesario enfocarnos en la mitigación de las emisiones de los CCVC para prevenir un aumento más drástico e irreversible en el largo plazo. Es importante entender que todos los esfuerzos de mitigación deberán tener el objetivo de disminuir el calentamiento global tanto en un largo como en un corto plazo y, por eso, es indispensable implementar programas que mitiguen tanto los CCVC y los GEIs.

Por lo anterior, es necesario mitigar el efecto de estos contaminantes de vida corta en la atmósfera lo más pronto posible para proteger a la salud de millones de personas en

regiones vulnerables. Las reducciones en este tipo de contaminantes ayudarían no solo a combatir el cambio climático en corto plazo, sino también a estabilizar sistemas climáticos, reducir incendios y huracanes, evitar la expansión de la desertificación, disminuir los ciclones en los trópicos y el derretimiento de los glaciares, mejorar la calidad del aire y prevenir enfermedades respiratorias crónicas como asma, bronquitis y hasta cáncer pulmonar.

### 1.2.1 Metano

El *metano* ( $CH_4$ ) es considerado un gas de efecto invernadero y un CCVC debido a que su efecto solo dura alrededor de una década, sin embargo, este componente en la atmósfera es precursor de otros contaminantes como el ozono troposférico.

Las principales fuentes de emisión del metano están relacionadas a actividades humanas por ejemplo: en la agricultura por la descomposición de residuos orgánicos y algunos cultivos de arroz; en la industria del petróleo, el metano es emitido al ambiente durante la extracción, procesamiento y transporte de combustibles fósiles debido a que se encuentra presente en pozos de extracción de hidrocarburos; es producido en algunos procesos de refinación y tratamiento de estos combustibles; en otras actividades industriales como en minas de carbono, en la quema de biomasa y en los tratamientos de agua residual y tiraderos de basura. Aproximadamente 60% de las emisiones de  $CH_4$  están relacionadas a actividades humanas, el otro 40% es emitido por fuentes naturales (IGDS, 2013).

La importancia de combatir la emisión de este contaminante radica en la potencia de calentamiento que tiene, es decir, una tonelada de metano que se emite a la atmósfera tiene el potencial de calentamiento global equivalente a 25 toneladas de  $CO_2$  en una escala de 100 años (MCE2 & INECC, 2013). Es por eso que eliminar una tonelada emitida de  $CH_4$  representaría una gran ayuda para el combate del calentamiento global.

### 1.2.2 Ozono troposférico

Cuando nos referimos a ozono troposférico, estamos indicando que este ozono está localizado en una capa de la atmósfera baja, es decir, la capa atmosférica que está más

cercana a la tierra donde habitamos. A diferencia del ozono troposférico, el ozono que se encuentra en una capa más alta de la atmósfera, la estratosfera, es benéfico para la vida humana ya que ayuda a absorber los rayos ultravioleta y forma un escudo protector. Desafortunadamente, cuando el ozono se encuentra presente en la capa baja de la atmósfera puede tener impacto, en la calidad del aire, salud y ecosistemas. Se explica esta relación en la figura 1.4.

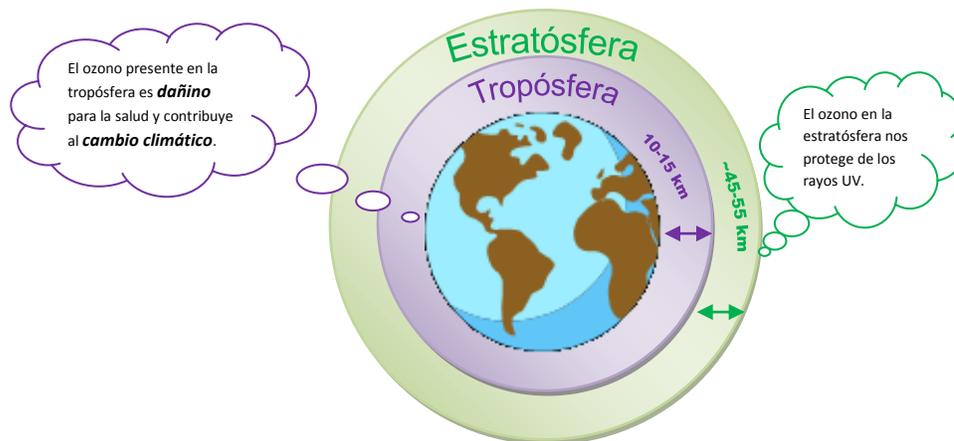


Figura 1.4. El Ozono presente en diferentes capas de la atmósfera.

Entre los principales efectos que tiene es que no permite el desarrollo de cultivos y plantas de consumo humano y causa enfermedades respiratorias. En contraste con otros gases, el ozono troposférico no es emitido directamente a la atmósfera, es decir, no es originado directamente durante un proceso como el metano y el CO<sub>2</sub>, sino que es producido por reacciones secundarias de otros contaminantes como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y componentes orgánicos volátiles (IGDS, 2013).

Debido al origen secundario de este contaminante, los métodos y estrategias que se desarrollen para la mitigación de la producción del ozono troposférico en los próximos años tendrán que estar enfocados a sus precursores antes mencionados.

### 1.2.3 Hidrofluorocarbonos

Los hidrofluorocarbonos (HFCs) son sustancias químicas producidos por el hombre y son principalmente usados en refrigeración y espumas aislantes. Su concentración está

aumentando debido al creciente uso de aires acondicionados en países desarrollados, producidos principalmente por los refrigerantes, solventes y aerosoles (UNEP, 2011).

Las emisiones de los hidrofluorocarbonos han aumentado significativamente en los últimos años, estas emisiones están creciendo de un 10 a un 15% cada año y se espera que para el año 2020 se dupliquen (IGDS, 2013).

Actualmente se han exhibido dos propuestas para disminuir gradualmente los HFCs que se propone sean incluidos en el Protocolo de Montreal. Los Estados Federados de Micronesia y el Reino de Marruecos, hicieron una propuesta en conjunto y la segunda fue realizada por los países norteamericanos de Canadá, EE.UU. y México. (IGDS, 2013).

### 1.3 Carbono negro

El carbono negro es un contaminante que permanece poco tiempo en la atmósfera, es producido principalmente por la combustión incompleta de quema de material orgánico como las estufas de carbón, leña, biomasa, en incendios forestales, en quemadores de industrias y combustibles fósiles, como el diesel; y es el principal componente del hollín.

El carbono negro es considerado un contaminante climático de vida corta debido a que su vida promedio en la atmósfera es de algunas semanas, sin embargo, su efecto puede llegar a durar más tiempo en la Tierra.

#### 1.3.1 Formación del carbono negro

Cuando nos referimos a combustión incompleta, estamos describiendo a un proceso de combustión en el que, por la falta de oxígeno, no se alcanza a consumir todo el combustible y debido a eso se forman partículas de carbono negro. Para que una reacción de combustión pueda llevarse a cabo completamente, es necesario que el oxígeno esté presente en la proporción indicada o en exceso. Por ejemplo, en la combustión que se realiza dentro de un motor a base de diésel, el oxígeno que está disponible es el que se encuentra en el aire, si esa cantidad de oxígeno no es suficiente para consumir todo el combustible para formar  $\text{CO}_2$  entonces se formarán partículas de carbono negro.

La mayoría de las reacciones de combustión con combustibles fósiles, considerando que puedan alcanzar las condiciones ideales, están constituidas de la forma que se muestra en la figura 1.5.

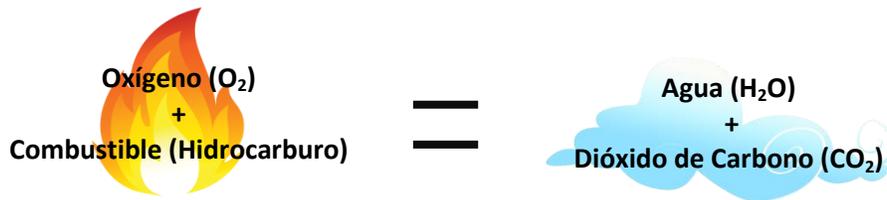


Figura 1.5. Reacciones de combustión ideales.

Debido a que los hidrocarburos están formados elementalmente por carbón e hidrógeno, al mezclarlos con oxígeno a altas temperaturas, en condiciones ideales, se formarían únicamente dióxido de carbono y agua. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el oxígeno normalmente no está en la proporción adecuada y por eso ocurre la reacción que se describe en la figura 1.6.

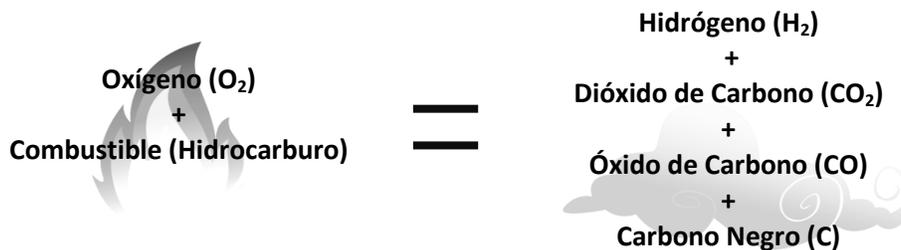
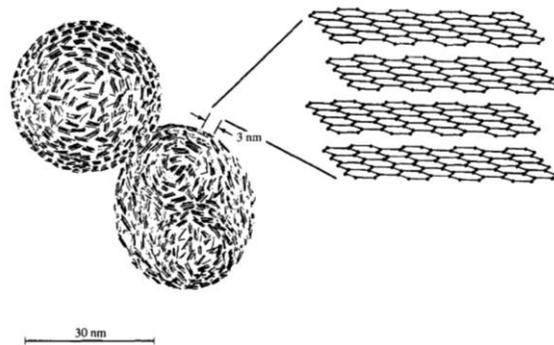


Figura 1.6. Reacciones de combustión no ideales.

Esta reacción, la cual explica el comportamiento de una forma muy general, también se observa la formación de óxido de carbono; este fenómeno se debe igualmente a la falta de oxígeno. Es importante mencionar que la formación del carbono negro también depende de la estructura y tipo del combustible.

La mezcla de material que se produce en las reacciones de combustión está compuesta principalmente por dos tipos de carbono. El primero, es el carbono elemental, cuya característica predominante es su estructura química, la cual es muy similar al grafito

impuro y es emitido principalmente a la atmósfera durante la combustión. Se puede observar dicha estructura en la figura 1.7. El segundo, es el carbono orgánico, éste término se refiere únicamente a la fracción de masa orgánica presente en la mezcla y no están incluidos otros compuestos como hidrógeno, oxígeno o nitrógeno. El carbono orgánico puede ser emitido directamente, asimismo, existe la posibilidad de que se produzca por la condensación de otros hidrocarburos de baja volatilidad.



**Figura 1.7. Estructura del carbono negro.**  
Fuente: (Seinfeld & Pandis, 2006).

La formación del hollín depende directamente de la proporción carbono/oxígeno que existe en el momento de la combustión. Si la cantidad de oxígeno presente en la mezcla fuera insuficiente para formar  $\text{CO}_2$  en la combustión, se formaría  $\text{CO}$  como el producto de la combustión y la relación estequiométrica quedaría de la siguiente forma (Seinfeld & Pandis, 2006):

Hidrocarburo
Proporción de oxígeno presente en la mezcla.
Hollín formado en la reacción.
Coefficiente estequiométrico del carbono negro, depende directamente de la cantidad de carbono presente en el hidrocarburo.
Monóxido de carbono formado en la reacción.
Hidrógeno producido.

De acuerdo a la ecuación anterior se podría asumir que para que se formara hollín, la relación C/O tendría que exceder el valor crítico de 1; sin embargo, tanto  $\text{CO}_2$  como CO se forman en la reacción de combustión. Esto se debe a que las partículas de  $\text{CO}_2$  son mucho más estables que las partículas de CO, por lo que el oxígeno y el carbono tendrán una preferencia de formar  $\text{CO}_2$ ; es por esto que el hollín comienza a formarse incluso a niveles bajos de C/O. Experimentalmente se ha observado que la formación de hollín se realiza a intervalos de C/O cercanos a 0.5 (Seinfeld & Pandis, 2006).

Es interesante destacar que la formación de carbono negro en la combustión no depende únicamente de estos factores, lo que hace que su estudio sea mucho más complejo debido a las variables que están asociadas al proceso en el que se produce. Otros de los factores que intervienen en la formación de este contaminante incluyen el tipo de combustible que se usa en la combustión y la temperatura a la que se lleva a cabo la reacción.

Los combustibles que tiene una mayor tendencia a formar hollín son la familia de los naftalenos, seguidos por la familia de los bencenos y al final los alifáticos. El estado y la composición del combustible también influyen en la probabilidad de una combustión completa (Peña, 2014).

Esta breve explicación abarca algunos puntos importantes en el proceso de formación del carbono negro, sin embargo, no se alcanza a incluir toda la complejidad detrás de esta reacción tan específica.

### 1.3.2 $\text{PM}_{2.5}$

El material particulado forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen (INECC, 2013). Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, como partículas primarias y pueden formarse partículas secundarias cuando reaccionan algunos gases en la atmósfera.

Las partículas  $\text{PM}_x$  se conocen como las partículas que están suspendidas en la atmósfera y tienen un diámetro menor a  $x \mu\text{m}$ .  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  son las partículas que normalmente son monitoreadas (Seinfeld & Pandis, 2006). La fracción gruesa la componen

las partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5-10}$ ), la fracción fina comprende las partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ), y las ultrafinas se refieren a las partículas menores a 1  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_1$ ) (INE-SEMARNAT, 2011). En la tabla 1.2 se observan los principales procesos de formación dependiendo el tipo de partícula.

**Tabla 1.2 Procesos de formación de las partículas gruesas, finas y ultrafinas (INE-SEMARNAT, 2011).**

	Tipo de partículas		
	Ultrafinas ( $\text{PM}_1$ )	Finas ( $\leq \text{PM}_{2.5}$ )	Gruesas ( $\text{PM}_{2.5}-\text{PM}_{10}$ )
<b>Proceso de formación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nucleación de gases atmosféricos incluyendo <math>\text{H}_2\text{SO}_4</math>, <math>\text{NH}_3</math> y algunos compuestos orgánicos.</li> <li>• Condensación de gases.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condensación de gases.</li> <li>• Coagulación de partículas pequeñas.</li> <li>• Reacción de gases en o sobre las partículas.</li> <li>• Evaporación de neblina gotas de agua en las que los gases se han disuelto y reaccionado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos mecánicos (prensado, molienda, abrasión, rompimiento de sólidos/gotas).</li> <li>• Evaporación de aerosoles.</li> <li>• Suspensión de polvos.</li> <li>• Reacción de gases en o sobre partículas.</li> </ul>

Este tamaño de partícula es monitoreada debido a los daños que ocasiona a la salud humana. Esa concentración de aerosoles atmosféricos y su composición varía dependiendo de: la región donde se realiza el monitoreo, la temporada del año, la meteorología y las emisiones de sus precursores. Normalmente en áreas urbanas más contaminadas se observa una concentración mucho mayor de  $\text{PM}_{2.5}$ . La composición de  $\text{PM}_{2.5}$  se caracteriza principalmente por la presencia de sulfatos, nitratos, ácidos, metales y carbono negro (INE-SEMARNAT, 2011).

Actualmente existen dos métodos que permiten realizar estimaciones de las emisiones de carbono negro a partir de de datos de emisiones de  $\text{PM}_{2.5}$  (INE-SEMARNAT, 2011):

- Factores de emisión: la determinación de los factores de emisión de carbono negro requieren de mediciones con una caracterización precisa de numerosas

fuentes de emisión. Actualmente en México no se cuentan con datos suficientes para emplear este método.

- La razón CN/ PM<sub>2.5</sub>: este método utiliza correlaciones publicadas por Battye, las cuales señalan el porcentaje estimado de carbono negro presente en las PM<sub>2.5</sub>, esta razón varía dependiendo el tipo de fuente emisora.

### 1.3.3 Los efectos del carbono negro sobre el medio ambiente y la salud humana

La presencia del carbono negro en la atmósfera afecta las temperaturas, la formación de las nubes, los patrones y cantidad de lluvia, el caudal de los ríos e impacta al derretimiento de los glaciares (IGDS, 2013). Por ejemplo, si el carbono negro se deposita en cuerpos de hielo o nieve, éste oscurece la superficie contribuyendo a que estas entidades se derritan más rápidamente. De la misma forma, el carbono negro calienta directamente a la atmósfera al absorber radiación solar para luego emitir esa radiación al ambiente. Así mismo, el carbono negro puede afectar directamente a la evaporación superficial de los ríos que puede impactar fuertemente al rendimiento de los cultivos agrícolas.

Aunado a esto, el carbono negro tiene afectaciones sobre la salud humana ya que puede causar enfermedades respiratorias crónicas como asma y hasta cáncer de pulmón. La mayoría de los estudios que se han realizado para determinar los efectos en el sistema respiratorio por exposición a partículas finas en el aire, se enfocan principalmente a la exposición de PM<sub>2.5</sub>. Sin embargo, ya que el carbono negro puede llegar a constituir hasta un 15% de la materia particulada PM<sub>2.5</sub> (UNEP & WHO, 2011), se realiza una asociación de que los efectos negativos a la exposición de PM<sub>2.5</sub> podrían ser los mismos al exponerse al carbono negro. En nuestro país se estima que 38 mil personas murieron entre 2001 y 2005 a causa de la contaminación atmosférica; aproximadamente 5000 fueron niños (INE, 2011).

Se ha asociado la exposición a largo plazo al carbono negro que implica la quema de biomasa con infartos al corazón. También se han encontrado efectos negativos en la presión arterial y el adelgazamiento de la pared arterial. Adicionalmente, se observaron cambios en el electrocardiograma que puede derivar en riesgos para causar una arritmia, isquemia y cambios en la metilación del ADN (UNEP & WHO, 2011). De estos datos puede deducirse que la exposición a carbono negro es altamente tóxica.

### 1.3.4 El carbono negro en el mundo

La principal fuente de emisiones de carbono negro a nivel mundial es la quema de biomasa a cielo abierto; no obstante, es mucho más significativo el origen del carbono negro por la quema de biomasa en el hemisferio sur que en el hemisferio norte. Estas partículas presentes en la atmósfera dependen de la temporalidad, en las épocas de sequía se han observado incrementos en Sudamérica, África y en el sureste de Asia (UNEP & WHO, 2011). Así mismo, se ha encontrado que en países más desarrollados, la mayoría de las emisiones de carbono negro son generadas por los motores de los vehículos. Un estudio realizado en algunas ciudades demostró que, efectivamente, la mayor cantidad de carbono negro en aire ambiente provenía de vehículos motorizados, los resultados de este estudio se encuentran reportados en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3 Porcentaje de carbono negro emitido por motores de vehículos. Fuente: (Seinfeld & Pandis, 2006).**

Porcentaje de carbono negro emitido	Ciudad
47%	Detroit
93%	Los Ángeles
30-60%	En el área rural de Pensilvania

La tabla 1.4 muestra las emisiones reportadas en 2005 para fuentes antropogénicas y fuentes naturales. Se considera como fuentes antropogénicas todas aquellas actividades en las que trabaja el hombre para su desarrollo y estabilidad, entre estas actividades se encuentran la agricultura, la industria y el transporte.

**Tabla 1.4 Emisiones en 2005 (Mt/año) de carbono negro, otros compuestos orgánicos y PM<sub>2.5</sub>. Fuente: (UNEP & WHO, 2011)**

		Carbono negro	Otros compuestos orgánicos	PM <sub>2.5</sub>
Fuentes Antropogénicas	Combustión a gran escala	0.1	0.15	8.1
	Procesos industriales	0.43	0.66	4.5
	Combustión comercial-residencial	2.7	9.6	17.8
	Transporte	1.6	1.4	3.4
	Extracción y distribución de combustibles fósiles	0.28	0.06	0.51
	Residuos/tiraderos	0.1	0.75	1.3
	Agricultura	0.31	1.2	3.4
	Total fuentes antropogénicas	5.52	13.82	39.01
	Promedio Emisiones Naturales	3.35	35.5	6000
	Global Total	8.87	49.32	6039.01

En el caso de carbono negro es importante destacar que el sector que contribuye con una mayor cantidad de emisiones es el residencial, es decir, la quema de leña o carbón en estufas. Por otro lado, el transporte es el segundo aportador con una cantidad significativa de 1.6 Mt/año (UNEP & WHO, 2011). La mayoría de las iniciativas que se han propuesto hasta ahora están enfocadas principalmente a estos dos sectores de las actividades humanas. Así mismo, las fuentes naturales aportan tan sólo el 38% de las emisiones totales globales, mientras que la suma de las fuentes relacionadas a actividades humanas representan más del 60% (UNEP & WHO).

Varias iniciativas han sido propuestas por diferentes organismos alrededor del mundo para combatir el acelerado incremento de los CCVC en la atmósfera y el posible impacto que puedan tener en los siguientes años por venir, tanto en el calentamiento global como en la salud humana. Las medidas necesarias para reducir las emisiones del carbono negro y otros contaminantes productos de la combustión incompleta, tendrán que ser implementadas principalmente en los sectores de transporte, el doméstico y el agrícola. Muy pocas iniciativas tendrán que estar enfocadas al sector industrial en algunos países desarrollados. Esto implicará un mejor cuerpo regulatorio en la mayoría de los países ya que se tendrán que remover de circulación los vehículos con índices altos de emisión, prohibir la quema de

residuos agrícolas y basura al aire libre, así como proveer combustibles más limpios en las zonas marginadas de los países en vías de desarrollo.

El principal exponente de estas iniciativas mitigatorias es el organismo internacional CCAC (Climate and Clean Air Coalition to reduce Short-Lived Climate Pollutants) que es una asociación miembro de la UNEP. La CCAC sugiere que si se implementan y controlan correctamente estas iniciativas que se proponen a continuación, las emisiones de carbono negro podrían verse reducidas hasta en un 77% (UNEP, 2011). En las tablas 1.5, 1.6 y 1.7 se presentan algunas de las iniciativas que podrán ser adoptadas y los beneficios que éstas aportan, las iniciativas planteadas varían dependiendo al fuente principal de emisión.

**Tabla 1.5 Iniciativas para mitigar el carbono negro por fuentes de diesel (UNEP, 2011).**

<i>Iniciativas por fuentes de diesel</i>	<i>Beneficios</i>
Instalar filtros de partículas en vehículos de diesel.	Reducir las emisiones relacionadas a la combustión de diesel puede reducir rápidamente el calentamiento, debido a los bajos niveles de aerosoles de enfriamiento que son coemitidos por estas fuentes.
Eliminar de circulación en las carreteras vehículos diesel que emiten una gran cantidad de emisiones.	

**Tabla 1.6 Iniciativas para mitigar el carbono negro por quema de biomasa (UNEP, 2011).**

<i>Iniciativas por quema de biomasa</i>	<i>Beneficios</i>
Reemplazar estufas tradicionales de leña con cocinas a base de combustión limpia de biomasa.	Si se logran implementar estas medidas de manera conjunta se podría llegar a reducir hasta en un 50% las emisiones de carbono negro. Así mismo esta mitigación tendrá importantes impactos en la salud humana, el clima y los cultivos, estos beneficios, contrastados con los costos de implementación, son mucho mayores.
Modernizar hornos de ladrillos.	
Modernizar hornos de coque.	
Prohibición de quema a cielo abierto de biomasa.	

**Tabla 1.7 Iniciativas para mitigar el carbono negro por diversas fuentes (UNEP, 2011).**

<i>Iniciativas por otras fuentes</i>	<i>Beneficios</i>
Proveer acceso global a métodos modernos de cocina y calefacción.	Muchas de las propuestas de mitigación pueden ser implementadas con tecnologías existentes.
Reemplazar lámparas simples de mecha a base de keroseno por lámparas de bajos costos y emisiones en los países en desarrollo.	

Actualmente se ha logrado que el organismo CCAC apruebe nueve iniciativas específicas con una implementación rápida para la disminución de los CCVCs (IGDS, 2013):

1. Reducir las emisiones de carbono negro de vehículos pesados y motores a base de diésel.
2. Mitigar los CCVC y otros contaminantes relacionados a la producción de ladrillos.
3. Mitigación de CCVC por rellenos sanitarios y residuos sólidos urbanos.
4. Promoción de tecnologías alternativas y estándares de los HFCs.
5. Acelerar las reducciones de metano y carbono negro asociadas a la producción de gas natural y petróleo.
6. Financiar la mitigación de los CCVC.
7. Promover un plan de acción nacional.
8. Reducir los CCVC por calefacciones domésticas y estufas de leña.
9. Valoraciones regionales de los CCVC.

### 1.3.5 Antecedentes del monitoreo de carbono negro a nivel mundial

En esta sección se expondrán algunas características de las redes de monitoreo de carbono negro en el mundo. Se mencionará primero la red de monitoreo de carbono negro del Reino Unido y posteriormente la del estado de California en EE.UU.

#### 1.3.5.1 Red de monitoreo de carbono negro del Reino Unido

El Reino Unido posee una red de monitoreo de carbono negro, la red de humo negro y sus predecesores han operado en el Reino Unido por más de 60 años. Desde 2008 se han utilizado monitores tipo, Magee aetalómetros modelos AE22, para medir las concentraciones

de carbono negro (Fuller & Connolly, 2012). Este tipo de equipos permite realizar el monitoreo de carbono negro de forma automática.

En 2011, dicha red de monitoreo fue revisada para evaluar/replantear los objetivos, se determinó que las redes de monitoreo deben tener propósitos múltiples, proporcionar mediciones que cumplen varias necesidades entre las que destacan la vigilancia y el control de los niveles ambientales.

Después de realizar un estudio exhaustivo, finalmente en 2012, se estableció una red de catorce estaciones de monitoreo por aetalómetros donde se cumplen los siguientes compromisos:

1. Mantener la cobertura de monitoreo de humo negro sobre todo el Reino Unido.
2. Conservar la continuidad de las bases de datos históricas que se tiene hasta el momento.
3. Compilar información para el estudio epidemiológico del carbono negro y sus efectos en la salud humana.
4. Recopilar información acerca de las fuentes de carbono negro y material particulado.
5. Evaluar reducciones de material particulado y gestionar intervenciones de la calidad del aire.
6. Cuantificar la contribución de la quema de madera en la presencia del carbono negro y el material particulado en el medio ambiente del Reino Unido.
7. Recaudar datos para realizar futuras consideraciones políticas incluyendo carbono negro y el cambio climático.

En 2011, las metas y objetivos de la red fueron revisados y se estableció un nuevo enfoque hacia la investigación. La revisión fue realizada por colaboradores de una serie de fuentes externas como universidades prestigiosas, laboratorios y centros de investigación. Algunos de estos organismos fueron el Laboratorio Nacional de Física, las universidades de Birmingham, Strahclyde y Edimburgo, así como el Kings College de Londres (Fuller & Connolly, 2012).

Los objetivos principales del proyecto de investigación incluyen tres puntos principales, aunque se considera que en el futuro pueden extenderse los objetivos a otras opciones de investigación. Los objetivos se muestran en la Tabla 1.8 donde se contrastan

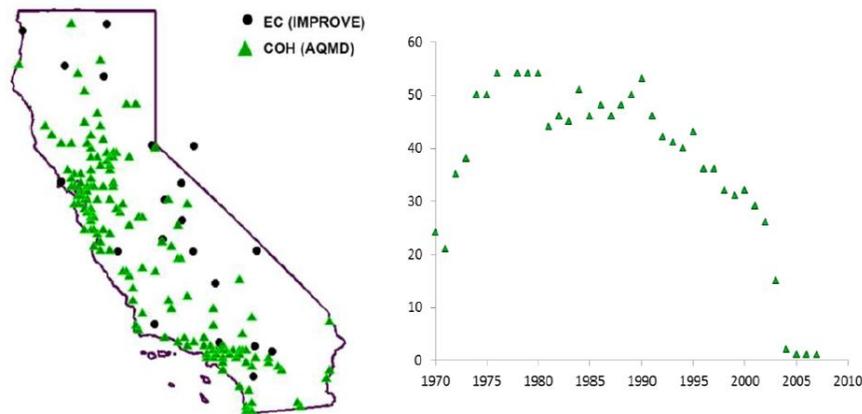
los objetivos inmediatos y los que se podrán ir adoptando conforme avance el desarrollo del programa.

**Tabla 1.8 Objetivos de la red de monitoreo de carbono negro en el Reino Unido (Fuller & Connolly, 2012).**

Objetivos inmediatos	Objetivos a largo plazo
Proveer medidas de carbono negro con calidad asegurada y calidad de control.	La realización de campañas de monitoreo adicionales y el subsecuente análisis de los datos.
	Evaluar la contribución del tránsito vehicular y otras fuentes de emisión de carbono negro.
Evaluar las tendencias en las concentraciones de la distribución espacial del carbono negro.	Evaluar el efecto de las emisiones por motor de diésel y las zonas con emisiones bajas en las tendencias y concentraciones de carbono negro.
Determinar la proporción de carbono negro que contribuye al material particulado.	Investigar la contribución de la quema de biomasa y otras fuentes de carbono negro.
	Investigar la asociación entre el carbono negro y los efectos a la salud humana.

### 1.3.5.2 Red de monitoreo de carbono negro en California

Uno de los mayores registros de carbono negro es el de mediciones de coeficiente de turbidez en California, EUA. Estos niveles se han registrado en más de 100 sitios en todo California y se han archivado por la CARB (California Air Resources Board). En la figura 1.8 se muestran las estaciones donde se medían tanto carbono elemental y el coeficiente de Haze que ayuda a medir concentraciones de carbono negro. Esta red se diseñó con el objetivo de entender mejor el comportamiento de la concentración de carbono negro en el estado de California.



**Figura 1.8 Red de monitoreo de carbono negro y elemental en el estado de California, USA.**  
**Fuente: (Ramanathan, 2013)**

### 1.3.6 Estudios de carbono negro en México

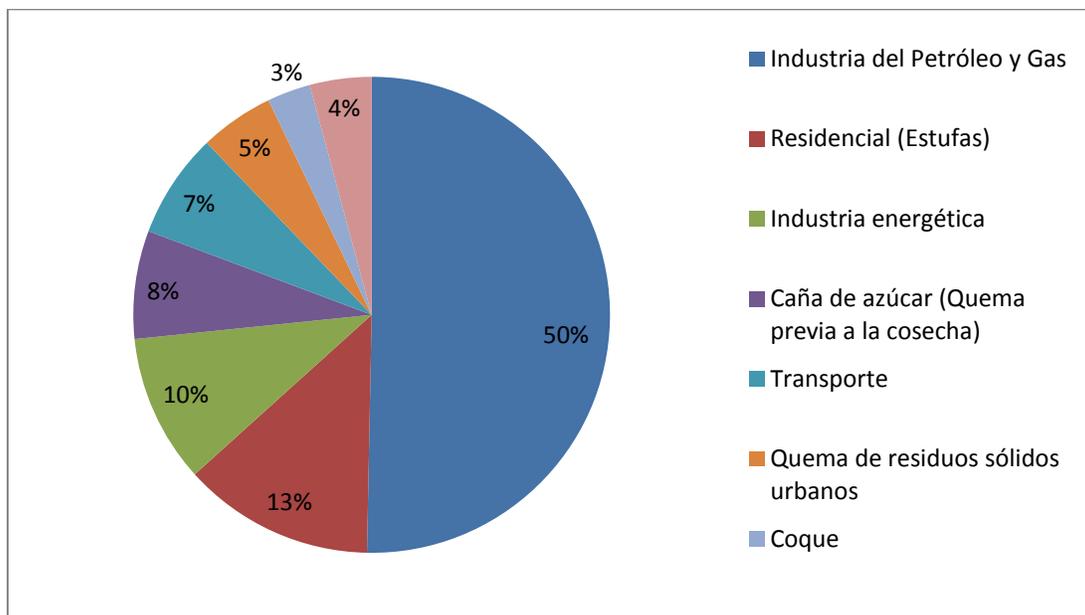
En México, no existe una red de monitoreo de carbono negro, sin embargo, se han realizado estudios entre los que destacan el realizado por el Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente, en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, desarrollaron un reporte para Apoyar la Planificación Nacional de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta, en especial, metano y carbono negro. Así como otras investigaciones realizadas por la UNAM que incluye algunos artículos (Cruz, 2013) y la UAM, la UAEM, entre otras.

México es uno de los cuatro países piloto apoyados por la CCAC para desarrollar una planificación nacional de inicio rápido para los CCVC; este cuarteto está compuesto por Bangladesh, Colombia, Ghana y México (MCE2 & INECC, 2013). Este proyecto incluye todos los elementos para una planificación a largo plazo, pero solo con el nivel de detalle permitido por la información disponible y las evaluaciones preliminares.

Un borrador del reporte para Apoyar a la Planificación Nacional de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta para México, proporcionará un plan preliminar para trabajar en las estrategias de mitigación de los CCVC como parte de las políticas y programas actuales. Dicho plan incluirá Estrategias de Desarrollo de Bajas Emisiones (LEDS por sus siglas en inglés), difusión nacional, programas de gestión de calidad del aire y planes de acción referentes al clima.

La institución encargada de coordinar el Plan Nacional para los CCVC es el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Esta organización es responsable de estimar las emisiones, coordinar las investigaciones técnicas y científicas, asegurarse de que todas las acciones nacionales estén dentro de la ley mexicana y proponer políticas recomendadas referentes a la mitigación y las medidas que deberán adoptarse (MCE2 & INECC, 2013).

Entre 1990 y 2010 la tasa de crecimiento anual del carbono negro en México se estimaba a un 2% y se incrementó de 70.4 Gg a 104.5 Gg en dicho periodo (MCE2 & INECC, 2013). En la figura 1.9, se pueden apreciar las principales fuentes de emisión del carbono negro y los porcentajes que aportan cada una de las fuentes al total que fue emitido en México en el 2010.



**Figura 1.9. Porcentaje de emisiones de carbono negro por fuente emisora.**  
Fuente de los datos: (MCE2 & INECC, 2013)

En la tabla 1.9, se muestran algunas de las estrategias de mitigación que se han propuesto implementar en México. Se han agrupado estas medidas dependiendo de su fuente de emisión, entre las que se incluyen, la agricultura, incendios forestales, industria del ladrillo, quema de leña en estufas, transporte y generación de energía eléctrica.

**Tabla 1.9 Medidas preventivas de carbono negro en México. Fuente: (MCE2 & INECC, 2013).**

<b>Fuente</b>	<b>Medidas preventivas</b>
<b>Agricultura (labranza)</b>	Reducción de un 10% de las emisiones de carbono negro gracias al uso de equipo agrícola y la implementación de prácticas que sean menos destructivas al suelo.
<b>Incendios forestales</b>	El Programa Nacional para la protección contra incendios será reforzado sobre todo en la zona norte del país donde se presentan frecuentemente incendios, estas zonas abarcan los estados de: Sonora, Chihuahua, Durango, Coahuila y Baja California.
<b>Industria (Fabricación de ladrillos)</b>	Sustitución de hornos de ladrillo tradicionales por hornos modernos en los 5 estados de mayor producción de ladrillo. Así como la transformación de esta producción con nuevas tecnologías para 2030.
<b>Residencial (Quema de leña en estufas)</b>	Promover la sustitución de estufas de carbón tradicionales por: Estufas mejoradas en municipios rurales con un alto índice de pobreza (con un índice de marginalización alto). Estufas mejoradas en las áreas semirurales como una política nacional social y ecológica implementada por SEDESOL, SEMARNAT, CONAFOR y PESA-SAGARPA.
<b>Transporte</b>	Introducción de combustibles de ultra-bajo azufre y mejores tecnologías en los vehículos a partir de 2016.
<b>Generación de electricidad</b>	Adicionar sistemas de generación de parques eólicos y sistemas turbogas como refuerzos. Remplazar un porcentaje de la generación de ciclo combinado por generación en plantas nucleares, parques eólicos y sistemas turbogas como refuerzos.

### 1.3.7 Métodos para la cuantificación de carbono negro en medio aire ambiente

Existen diferentes técnicas para medir y cuantificar el carbono negro en aire ambiente, las cuales se concentran en dos grupos: las que se enfocan en la naturaleza de las propiedades químicas, y las que el principio que se utiliza para realizar la medición se basa en las propiedades físicas del carbono negro.

Dentro del primer grupo, han sido consideradas las propiedades químicas del carbono negro por los científicos de todo el mundo para contribuir al desarrollo de nuevas metodologías que permitan la cuantificación de carbono negro. Por ejemplo, se han perfeccionado sistemas que se basen en la estabilidad térmica o química de estas partículas, es decir, que dependan de la reactividad de las partículas de carbono negro al hacer una variación en la temperatura.

En el segundo grupo se han tomado otros enfoques de medición del carbono negro que se basan en las propiedades de absorción de luz, esta propiedad física se puede observar en las partículas negras como el carbono negro. Estas propiedades físicas de la materia carbonacea particulada varían en términos de la refracción y la absorción de la luz. Cada técnica de medición provee información única de estas propiedades. Algunos científicos usan las propiedades de absorción de la luz para desarrollar métodos que pueden ayudar a determinar la cantidad de carbono negro en aire ambiente.

Los métodos de cuantificación del carbono negro, consisten en el aislamiento de fracciones específicas de carbono y se conocen como remoción de fracciones de carbono. Por otra parte, existen los métodos que se basan en la absorción de luz y son conocidos como métodos ópticos. En la tabla 1.10 se muestra una pequeña descripción de cada técnica, la frecuencia de uso y el método que se utiliza.

El carbono negro es cuantificado directamente en los métodos térmicos-ópticos o térmicos ya que se determina la cantidad de carbono negro por la cantidad de átomos de carbono que reaccionan durante este tipo de análisis. En los métodos ópticos esta cuantificación simplemente es una aproximación de la luz absorbida por las partículas presentes en la muestra de medición. Los equipos de base filtro-ópticos son relativamente más baratos que el resto de los equipos, sencillos de operar, están disponibles y algunos están adaptados para hacer mediciones en campo (EPA, 2012).

**Tabla 1.10 Métodos de medición y cuantificación de carbono negro.(EPA, 2012)**

Clasificación	Descripción del método	Frecuencia de uso
Remoción de fracciones de carbono/Aislamiento de fracciones específicas de carbono	<i>Térmico-óptico:</i> El carbono negro es medido como la fracción de carbono que resista a la remoción por el calentamiento a muy altas temperaturas y tiene una corrección laser para carbono que carboniza durante el procedimiento de análisis. El carbono negro es cuantificado como la cantidad de masa de carbono que reacciona durante el calentamiento.	Alto
	<i>Térmico:</i> El carbono negro es medido como la fracción de carbón que resiste a la remoción por calentamiento a altas temperaturas, es cuantificado por la masa de carbono que reacciona durante el incremento de la temperatura.	Bajo
Métodos ópticos/ absorción de luz	<i>Base-filtro:</i> La absorción de luz por las partículas es medida por un filtro lleno de ellas, el carbono negro es cuantificado usando factores que relacionen la absorción de luz con la concentración en masa.	Alto
	<i>Fotoacústico:</i> La absorción de la luz por las partículas se mide calentando las partículas transfiriendo la energía al aire que las rodea, esto genera ondas de sonido. El carbono negro es cuantificado usando factores que asocian la absorción de luz con la concentración en masa.	Bajo
	<i>Incandescencia:</i> La incandescencia de las partículas es medida, el carbono negro se cuantifica calibrando la señal de incandescencia con el hollín generado en el laboratorio.	Bajo

En la Figura 1.10 se pueden observar algunos de los principios que se usan en las técnicas térmicas-ópticas, y en los métodos ópticos. La técnica térmica-óptica distingue las partículas de carbono en dos principales grupos: el carbón elemental (CE) que de acuerdo a la gráfica presentará una mayor refracción, y las partículas de carbono orgánico que estarán en la región de menor refracción. Por otro lado, los métodos que se basan en el principio de absorción de luz o mejor conocidos como métodos ópticos hacen una clasificación conocida como carbono absorbente de luz (CAL), la cual incluye todas las partículas en la atmósfera

que absorben luz: tanto carbono negro (CN) como carbono café (CC). Estos métodos cuantifican una cantidad de partículas de carbono negro que en realidad es aparente ya que puede contener otras partículas que absorban luz en una región cercana como el carbono café. Sin embargo, este tipo de métodos permiten que se pueda estimar la concentración del carbono negro presente en la atmósfera.

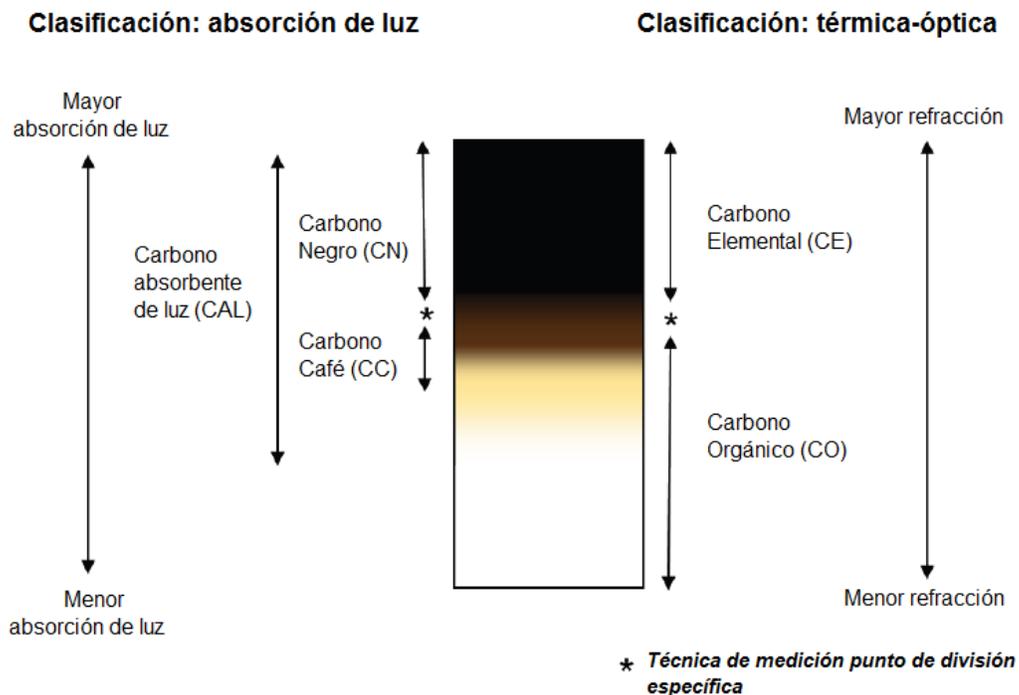


Figura 1.10. Medición de los componentes carbónicos en las partículas.

Adaptado de: (EPA, 2012)

En la tabla 1.11, se muestran las técnicas ópticas comerciales para medir el carbono negro. En esa tabla se mencionan los tipos de instrumentos que se pueden utilizar para realizar las mediciones de carbono negro, si la medición es en tiempo real o no, si se utiliza un filtro o una corriente de aire y las longitudes de onda medidas. Existen diferentes correlaciones que convierten la absorción de luz, a una longitud de onda particular, en concentración másica de carbono negro. El factor de conversión está basado en diferentes experimentos que se tienen que realizar para poder obtener el cociente que definirá la relación que existe entre la absorción de la luz con la concentración en masa del carbono negro.

**Tabla 1.11 Técnicas ópticas comerciales de medición de carbono negro. Fuente: (EPA, 2012).**

Instrumento		Longitud de onda medida	
Aetalómetro	Tiempo Real	Filtro	370 nm, 880 nm estandar 370, 470, 520, 590, 660, 880 y 950 opcional
Fotómetro de adsorción de partículas de hollín	Tiempo Real	Filtro	467, 530 y 660 nm
Fotómetro de adsorción multi-angulo	Tiempo Real	Filtro	670 nm
Transmisómetro	Interrumpido	Filtro	370 nm y 880 nm
Densitómetro	Interrumpido	Filtro	400 – 650 nm
Reflectómetro de mancha de humo	Interrumpido	Filtro	No está especificado
Híbrido de Integración Plato / Esfera	Interrumpido	Filtro	633 nm
Espectrómetro fotoacústico de hollín	Tiempo Real	Corriente de aire	405, 532, 781 nm
Fotómetro de partículas individuales de hollín	Tiempo Real	Corriente de aire	1064 nm
Analizador de campo Semi-continuo	Tiempo Real	Filtro	632 nm
Sensor Fotoacústico de Micro Hollín	Tiempo Real	Corriente de aire	808 nm

### 1.3.7.1 Mediciones de carbono negro mediante aetalómetro.

La medición de carbono negro se hace principalmente mediante métodos ópticos continuos. En este trabajo se propone hacer las mediciones con un aetalómetro. El principio que utiliza este tipo de equipos para medir el carbono negro es la rapidez de cambio en la absorción de la luz transmitida debido a la colección continua de las partículas depositadas en un filtro.

En la figura 1.11 se muestra una fotografía de una aetalómetro portátil, su tamaño le permite ser transportado para tomar muestras en distintas locaciones. Otras de las ventajas de este equipo es que no requiere atención del usuario durante la operación ya que el instrumento es completamente automático.



**Figura 1.11. Aetalómetro portable modelo AE42.**

**Fuente: (Magee Scientific Corporation, 2010)**

La principal ventaja de utilizar este tipo de equipos para realizar un monitoreo es que los resultados que arrojan pueden ser obtenidos en el sitio, los resultados están disponibles inmediatamente después de haber realizado la medición sin tener que esperar el análisis del laboratorio. Algunas otras ventajas son que es un instrumento automático que no consume otro tipo de reactivos para realizar la medición, además de que no requiere una atención exhaustiva por parte del operador quien si lo desea puede prenderlo y dejarlo haciendo el monitoreo de aire ambiente en el sitio deseado (Hansen, 2005).

El principio que utiliza el aetalómetro para realizar la medición del carbono negro es la absorción de la luz que presentan las partículas, es decir pertenece a las técnicas ópticas base-filtro. Las partículas que serán detectadas por un equipo de este tipo están integradas por el material negro y algunos compuestos que absorben luz ultravioleta (Hansen, 2005). Sabemos que en la combustión de materiales derivados del petróleo la reacción genera otros compuestos, dependiendo de la pureza del combustible, tales como NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>x</sub>. Sin embargo, estas sustancias no son relevantes ya que la mayoría de éstas son emitidas a la atmósfera en forma de gases y no serán medidas en un aetalómetro.

Un aetalómetro colecta una muestra de partículas que están presentes en aire ambiente y las deposita en un filtro. El método que se utiliza para la medición del carbono negro en este equipo es una técnica de atenuación óptica, es decir, que mide la atenuación de un haz de luz que es transmitido hacia la muestra que se encuentra en el filtro. Esta cantidad de luz absorbida es linealmente proporcional a la cantidad de carbono negro depositado en el filtro.

## Capítulo 2 Metodología de diseño de la red de monitoreo de carbono negro

En este capítulo se discutirá cuáles son los pasos a seguir para diseñar una red de monitoreo de carbono negro. Se plantean los diferentes requerimientos que se deben cumplir para poder tener los criterios suficientes para realizar la planeación y ejecución de la red de monitoreo.

### 2.1 Programa de monitoreo de la calidad del aire

Es importante entender que el diseño de una red de monitoreo atmosférico es una pequeña parte de todo un proyecto mucho más complejo que está determinado por numerosas variables; sin embargo, dicho diseño es un paso fundamental para poder realizar una implementación del mismo. El diagrama expuesto en la figura 2.1, muestra una propuesta de los pasos a seguir en caso de implementar un programa de monitoreo de carbono negro. En algunos casos puede ocurrir que la secuencia o los pasos que se plantean no se adapten a las necesidades del proyecto a desarrollar por lo que podrán ser modificadas. Este planteamiento muestra y es una guía para realizar el trabajo de una forma mucho más rápida y efectiva.

En la figura 2.1, se muestran los pasos muy resumidos de cómo se puede hacer el planteamiento para diseñar un programa de monitoreo de carbono negro, es decir, este planteamiento incluye no solo el diseño de la red sino que abarca todo el proceso de establecimiento de un programa desde la justificación hasta la implementación del mismo.

Antes de poder llegar a la fase de diseño de la red es necesario entender el panorama actual, así como determinar el tipo de información antecedente con la que se cuenta y a partir de la cual se podrá hacer algún planteamiento.

Enseguida, se deberá de hacer el planteamiento de los objetivos y se evaluarán los recursos disponibles, así mismo, se tendrá que hacer una análisis mucho más profundo de la información antecedente.

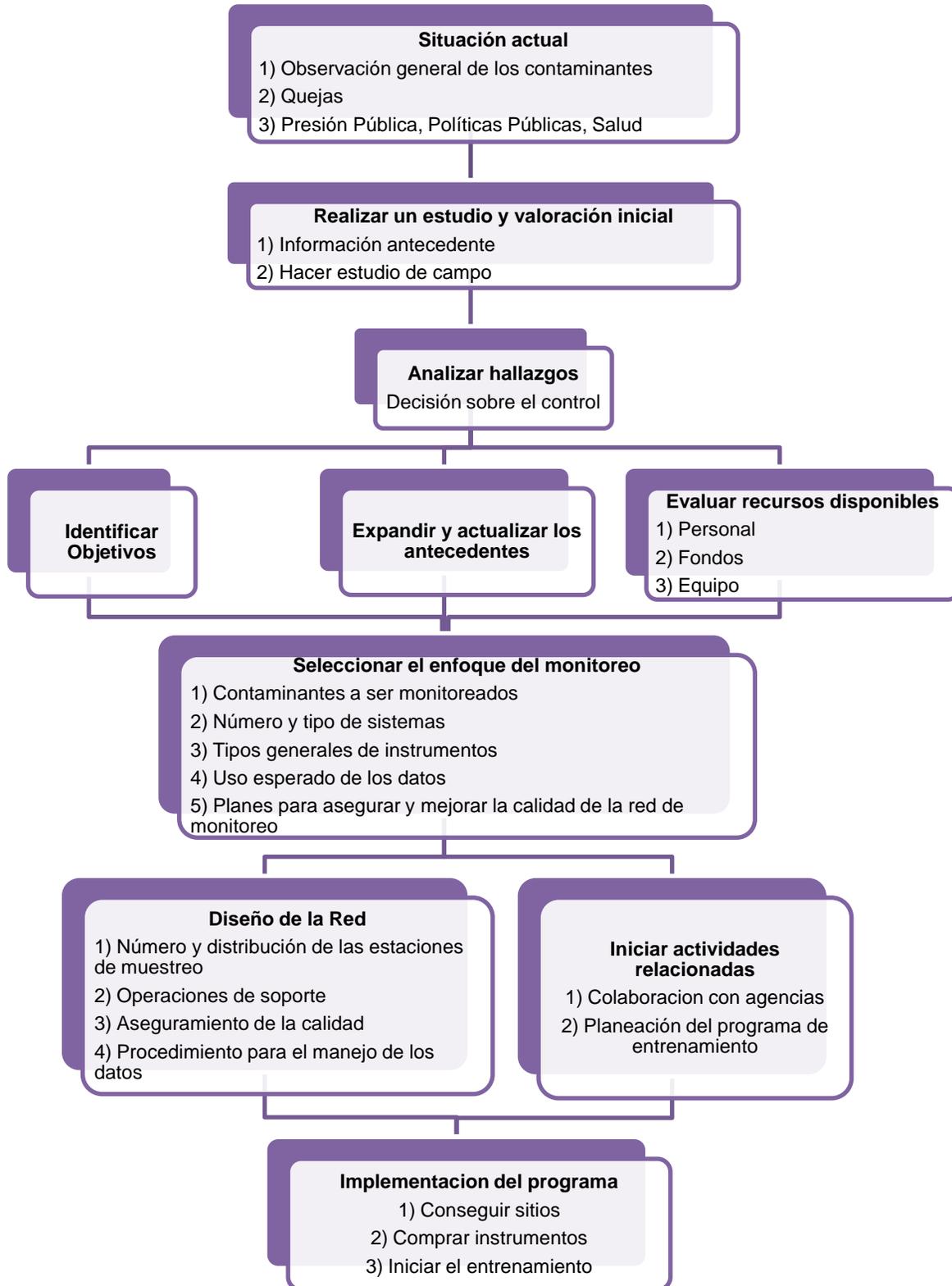


Figura 2.1. Pasos a seguir para el desarrollo de un programa de monitoreo de aire. Adaptado de: (WHO & WMO, 1977)

A continuación se deberá seleccionar el enfoque que se le dará a este sistema, el tipo de contaminantes que se desean monitorear, tipos de instrumentos y técnicas a utilizar, el uso que se le dará a los datos y preparar alguna planificación para asegurar la calidad de la red.

Una vez que se ha realizado esta selección, se procederá simultáneamente a realizar tanto el diseño de la red, como a iniciar algunas actividades relacionadas tales como la planeación del entrenamiento del personal y el trabajo con las dependencias que estarán involucradas en el proyecto.

Finalmente se hará la implementación del programa donde se pondrá en práctica todo lo anterior, se comprarán e instalarán los equipos que realizarán el monitoreo y se entrenará al personal que operarán los aparatos.

El diseño y el modelo de operación del sistema estará limitado por los objetivos que se desean alcanzar y dependerá de un número de consideraciones técnicas, dentro de las que se incluyen los tipos de fuentes de emisión, su densidad geográfica, el tipo de contaminante y sus propiedades físicas y químicas. También deberá tomarse en cuenta la cantidad de afectados potenciales que sufren los estragos causados por la contaminación atmosférica, así como el tiempo disponible y los requerimientos legales.

Estas restricciones se agrupan principalmente en 5 categorías que se muestran en la tabla 2.1, las cuales pueden ser de diferente naturaleza. Es importante clasificar y determinar qué impedimentos pueden ser los que tengan un mayor impacto, por ejemplo, los recursos disponibles es normalmente una de las restricciones que son determinantes para la toma de decisiones.

**Tabla 2.1 Restricciones comunes para el diseño y operación de un sistema de monitoreo. Fuente de datos: (WHO, 1976).**

Tipo de restricción	Ejemplos
<b>Las necesidades de los usuarios de los datos</b>	Cantidad y Calidad de los datos Localización Tiempo
<b>Recursos disponibles</b>	Fondos Mano de obra Instalaciones de vigilancia o monitoreo existentes
<b>Requerimientos Legales</b>	Locales Regionales Estatales Nacionales Internacionales
<b>Tecnología disponible</b>	Equipos de medición Tecnologías de análisis
<b>Criterio operacional</b>	Económico Social Legal Rentabilidad
<b>Responsabilidad operacional</b>	Asignación de responsabilidades a las dependencias correspondientes

## 2.2 Información antecedente y enfoque del monitoreo

El diseño básico para un sistema de vigilancia de calidad de aire involucra un número de pasos a seguir para tener una medición satisfactoria de los niveles del contaminante y su comportamiento. En esta primera fase, deberá recopilarse información y analizarse antes de proceder a plantear el diseño de la red de monitoreo. Es necesario identificar los objetivos que se quieren alcanzar por la red de monitoreo y es fundamental para poder seguir en el proceso del diseño. Asimismo, se necesita delimitar el área donde se llevará a cabo este estudio. Del mismo modo, deberá de establecerse cual o cuales contaminantes se desean

monitorear y hacer el planteamiento de cómo se medirán las concentraciones en aire ambiente de dichos contaminantes.

### 2.2.1 Objetivos de la red

Al hacer el desarrollo de una red de monitoreo es necesario establecer los objetivos que se desean alcanzar al término y durante el desarrollo del programa. Una red de monitoreo normalmente tiene varios objetivos o propósitos que pueden tener diferentes enfoques, es importante aprovechar la inversión que se realiza en la implementación. Adicionalmente estas redes de monitoreo pueden ser desarrolladas con otros fines complementarios que impliquen actividades mucho más complejas como estrategias de prevención o mitigación.

Algunos de los objetivos que puede tener una red de monitoreo se presentan a continuación (EPA, 2013):

- a) Apoyar estudios de investigación de contaminación ambiental.
- b) Determinar las concentraciones más altas esperadas que ocurran dentro del área incluida por la red.
- c) Estipular concentraciones representativas en áreas con una densidad de población alta.
- d) Para observar tendencias de contaminación dentro de la región, incluyendo áreas no urbanas.
- e) Determinar el impacto en los niveles de contaminación ambiental de fuentes significativas o de las categorías de fuentes.
- f) Proveer con datos de contaminación ambiental al público en general en un tiempo adecuado.
- g) Alcanzar la conformidad con los estándares de calidad de aire y el desarrollo de las estrategias de mitigación de emisiones.
- h) Activar procedimientos de emergencia para prevenir episodios de contaminación del aire o reducir su severidad

### 2.2.2. Selección del área de estudio

En muchos casos las redes de monitoreo de aire deben incluir completamente una zona urbana compleja que incluya más de una región administrativa y esto puede que requiera el desarrollo de programas cooperativos con comunidades vecinas. Dependiendo del tipo de interacciones que las unidades administrativas presenten se podrán hacer diferentes consideraciones, es decir, deberá hacerse un análisis de la dependencia económica y urbana de las entidades que estén involucradas, así como realizar las debidas observaciones de acuerdo a la colindancia de las diferentes entidades para decidir si deberían ser consideradas dentro del estudio. Algunas otras características topográficas de la región urbana son importantes al momento de hacer la definición del área de estudio. Por ejemplo, grandes extensiones montañosas o grandes cuerpos de agua pueden servir efectivamente como límites del área.

Para que el problema sea estudiado exhaustivamente, es realmente deseable que toda la cuenca atmosférica sea incluida dentro de la red de monitoreo. Esto se debe a que muchos contaminantes de aire pueden recorrer grandes distancias y sus efectos pueden ocurrir a kilómetros del punto de emisión, particularmente en casos donde las emisiones son descargadas por chimeneas altas.

Se entiende como cuenca atmosférica a un volumen de aire que tiene características similares, este espacio geográfico está delimitado parcial o totalmente por obstáculos topográficos como líneas costeras y elevaciones montañosas (SMA, 2007).

En los casos en los que el programa de monitoreo deba proveer información relacionada a las concentraciones del ambiente alrededor de una sola fuente, la selección del área de estudio dependerá principalmente de la altura de la chimenea y de las condiciones topográficas y meteorológicas. Algunos de los lugares de muestreo deberán ser localizados donde el nivel máximo de concentración sea esperado. En general, las concentraciones máximas a nivel del suelo serán esperadas en la dirección del viento desde la fuente a una distancia entre 10 y 20 veces la altura de la chimenea (WHO & WMO, 1977).

### 2.2.3 Selección de los contaminantes a monitorear

Regularmente se hace una selección de los contaminantes que serán monitoreados por la red, sin embargo, este trabajo está enfocado en realizar el estudio específicamente para el carbono negro en aire ambiente, por lo que seguir este paso para el diseño de la red no será necesario y podrá continuarse con la siguiente etapa.

### 2.2.4. Selección de los equipos que serán usados para el monitoreo

Los criterios para la selección del o los equipos que estarán realizando el monitoreo continuo deberán tomar en cuenta la precisión de los datos obtenidos, la factibilidad de la operación del equipo, el presupuesto disponible, el uso previo de estos equipos en otras redes de monitoreo similares.

### 2.2.5. Uso de los datos

La información que se obtiene de una red de monitoreo puede usarse para distintos fines, por lo que es importante tomar en cuenta el uso posterior que se les dará a los datos que se hayan obtenido durante el monitoreo (WHO, 1976). La calidad, cantidad y tipo de datos que se requieren dependen íntimamente de la actividad que se realice posteriormente. Por ejemplo, realizar estudios de la afectación a la salud humana causada por el contaminante probablemente no requerirá el mismo tipo de datos que la comprensión del comportamiento del contaminante y su interacción con la atmósfera.

A continuación se presentan algunos de los posibles usos que se les puede dar a los datos obtenidos por una red de monitoreo:

- a) Evaluar los efectos de la contaminación en el hombre y su medio ambiente.
- b) Estudiar las interacciones de los contaminantes y sus patrones de comportamiento.
- c) Establecer estándares de calidad del aire.
- d) Desarrollar estrategias y regulaciones de control.
- e) Evaluar la efectividad de los esfuerzos de control.
- f) Activar procedimientos de emergencia para prevenir episodios de contaminación del aire o reducir su severidad.
- g) Guiar esfuerzos para minimizar el impacto de la contaminación del aire.

### 2.2.6 Consideraciones en el diseño

Una vez que se haya evaluado el marco teórico básico del programa, este podrá ser desarrollado. Las decisiones dependerán de los objetivos que se tiene que cumplir y de la información proporcionada. También dependerán de la fase de desarrollo del programa. En la mayoría de las instancias, el desarrollo del programa deberá de ser gradual, con nuevos contaminantes siendo seleccionados y el número de estaciones siendo reducidas o incrementadas con el paso de los años, mientras que el programa gana experiencia y es refinado para responder de una mejor forma a las necesidades por las cuales se estableció.

Los requerimientos y consideraciones básicas en el diseño de una red de monitoreo incluyen algunos de los siguientes criterios (WHO, 1976):

- a) La selección de los contaminantes a ser monitoreados, inicialmente y en el futuro.
- b) Definición del área dentro de la cual se harán las mediciones.
- c) La determinación del número, tipo y localización de los sitios.
- d) La selección de instrumentos apropiados, las técnicas analíticas a emplear y la frecuencia de la toma de muestras.

### 2.3 Metodología del diseño de la red

Una vez que los objetivos del proyecto están claros, se procederá a recabar la mayor cantidad posible de información del área de estudio, se podrán consultar, generalmente, las dependencias a instituciones que posean información relevante y que pueda ser de utilidad durante el diseño de la red. Alguna de esta información básica puede incluir: fuentes y emisiones, salud e información demográfica, información topográfica y meteorológica, información previa sobre la calidad del aire y consideraciones del uso de suelo. Una vez que se ha entendido el comportamiento de la zona de estudio, se podrá determinar el número y ubicación de los sitios donde se desea obtener información del contaminante. Finalmente, será necesario determinar la duración del muestreo y la frecuencia con la que se realizarán las mediciones.

### 2.3.1 Información de la zona de estudio

Para poder realizar el diseño de la red de monitoreo es necesario recabar toda la información que se encuentre disponible de la zona en la que se realizará dicho muestreo, es importante entender lo mejor posible el comportamiento de la población, el clima y otros factores que puedan ser determinantes en el diseño.

#### 2.3.1.1 Fuentes y emisiones

Uno de los primeros pasos para en el diseño de una red de monitoreo, es recopilar información referente a las fuentes de emisión del contaminante en el área donde se instalará el monitoreo de emisiones. Normalmente, las mayores emisiones son emitidas por las industrias manufactureras, vehículos motorizados, plantas de energía, incineradores y equipos de calentamiento. En el caso de una red de monitoreo de carbono negro es necesario identificar las industrias que tengan algún proceso de combustión involucrado en su cadena de producción. La información que se desea coleccionar será el número, tipo, tamaño y localización (WHO & WMO, 1977). De ser posible, podría ser complementado con datos, tipos, cantidades y composición de los combustibles utilizados en las diferentes fuentes, conocer el tipo de combustible que es usado puede ayudar a entender y predecir la formación de carbono negro y asociarla a la fuente de emisión. Los combustibles de fuentes fijas deberán ser considerados de manera independiente de los combustibles usados en el transporte.

Cuando estamos considerando la distribución de las fuentes de emisión, es importante que se haga una distinción entre las fuentes grandes y las pequeñas, debido a que el impacto del contaminante emitido varía dependiendo el tamaño de la fuente. Por ejemplo, las fuentes pequeñas pueden tener un impacto mucho mayor en las concentraciones a nivel del suelo que las fuentes industriales grandes. Así mismo, es de suma importancia hacer la distinción entre los contaminantes primarios que son emitidos directamente de las fuentes y los contaminantes secundarios que serán el resultado de reacciones fotoquímicas (WHO & WMO, 1977). El carbono negro sería considerado un contaminante primario ya que es emitido directamente por las fuentes. Por otro lado, en el contexto de los contaminantes climáticos de vida corta, el ozono troposférico sería calificado como un contaminante secundario, porque se genera a partir de otros contaminante y no

directamente de la fuente. Generalmente, los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera, por lo que la mayor concentración podría ser encontrada en una distancia considerable de las fuentes emisoras, este aspecto deberá ser considerado al hacer el diseño de la red.

### **2.3.1.2 Salud e información demográfica**

La decisión para empezar un programa de monitoreo esta frecuentemente basado sobre quejas y solicitudes que son hechas por la población. Causadas por molestias, malos olores y polvo. En el caso de carbono negro, la causa podría ser por la presencia de material negro en el aire mejor conocido como hollín. El origen y la distribución geográfica de las quejas, el tipo y número pueden ayudar en el diseño de la red. También es útil recopilar información del daño ocasionado a las plantas, animales y materiales en el área esto es de ayuda al seleccionar las áreas de monitoreo (WHO & WMO, 1977).

La información de la distribución del contaminante dentro del área de estudio se requiere, particularmente, donde el objetivo es evaluar la exposición humana. El monitoreo de la calidad del aire para estudios epidemiológicos es generalmente hecho en un número de áreas residenciales que tienen calidades de aire significativamente diferentes. La información requerida para estas áreas incluye datos sobre la edad y condiciones socioeconómicas de la población, los cuales normalmente son obtenidos de los censos nacionales de población.

### **2.3.1.3 Información meteorológica**

Se realiza un estudio previo para determinar qué tipo y calidad de información está disponible en las dependencias que estudian y poseen información meteorológica. Esta información, normalmente es reunida y almacenada para otros propósitos que no necesariamente tienen que ver con el monitoreo de aire. Regularmente, estas dependencias realizan estudios para la predicción del tiempo, asistencia del tráfico aéreo, y servicios de agricultura e hidrología (WHO & WMO, 1977).

La dirección y velocidad del viento, las variaciones de temperatura dentro de las horas del día y durante el año son algunos de los parámetros medidos por las dependencias

que se encargan de hacer el estudio meteorológico. El tipo de clima en las diferentes zonas del país, datos de precipitación, horas de sol, humedad relativa y absoluta y el potencial de formación de niebla son datos que también se podrían encontrar disponibles en las bases de datos. Es importante reunir la mayor cantidad de información disponible ya que esta información podría ser útil en la toma de decisiones.

#### **2.3.1.4 Información topográfica**

La información topográfica juega un papel importante al seleccionar los sitios de monitoreo porque tiene efectos en el viento local y la estabilidad de las condiciones. En general, entre más complejo sea el terreno, más sitios de muestreo se necesitarán para determinar la distribución de la contaminación. Otras características topográficas que afectan la dispersión de los contaminantes incluyen, montañas, lagos y océanos (WHO & WMO, 1977).

Muchas áreas industriales se han desarrollado en zonas cercanas a ríos o cercanas a fuentes de agua, debido a las necesidades de este tipo de asentamientos. Por otro lado, en las ciudades asentadas en terreno montañoso hay variaciones substanciales en la altitud de la zona urbana, este efecto puede causar variaciones importantes en las concentraciones del contaminante.

#### **2.3.1.5 Información previa de la calidad del aire**

Muchas veces existe información relacionada a la calidad del aire, por ejemplo, estudios especiales se han hecho por servicios de salud y meteorológicos, universidades e investigadores científicos o, en algunas veces, por alumnos que están preparando sus tesis para graduarse. En algunas ocasiones ya existe un programa de monitoreo continuo que está en operación en esa zona de estudio y se pueden obtener datos de algunos otros contaminantes que estén siendo monitoreados. Toda esta información que se encuentra disponible, deberá ser colectada y, de ser posible, tabulada para su análisis y consideración. Un primer estimado de la magnitud del problema puede ser obtenido de esta forma, sin embargo, se debe tener cuidado al usar esta información ya que una gran variedad de muestras y métodos analíticos pudieron haberse utilizado.

### **2.3.1.6 Consideraciones del uso de la tierra en la zona**

Es importante clasificar cada sitio en términos de actividades económicas en el área y posibles fuentes de emisión. Esto puede realizarse convenientemente en términos de la descripción del uso del área existente. En algunas áreas, las autoridades gubernamentales han realizado mapas que describen el uso de suelo. En algunos casos se puede clasificar como residencial, comercial, industrial o mixto. Del mismo modo, puede ser clasificado por la densidad poblacional o de viviendas. Otras clasificaciones incluyen el uso de suelo para actividades relacionadas a la agricultura, ganadería y silvicultura.

### **2.3.2 Número y distribución de sitios de muestreo**

El número y distribución de las estaciones de muestreo dependerá de diversos factores, es importante que se consideren los objetivos de la red de monitoreo, así como los planes que se tienen a futuro y las restricciones económicas y de operatividad que existen.

#### **2.3.2.1 Determinación del número de sitios de muestreo**

El número de sitios de muestreo depende principalmente del tamaño del área a cubrir por la red, la variabilidad de la concentración de los contaminantes y los objetivos del monitoreo.

La tabla 2.2 presenta una guía general para el número de estaciones necesarias por tendencia de monitoreo en las áreas urbanas para contaminantes comunes. Se asume que las estadísticas demográficas son indicadores del tamaño de la región y la variabilidad de la contaminación. El número de estaciones recomendada están basada en una larga experiencia ganada en algunas ciudades y deberá de ser considerada únicamente como una guía.

**Tabla 2.2 Número de sitios de muestreo sugeridos dependiendo el contaminante y el tamaño de la población. Fuente: (WHO & WMO, 1977)**

Población urbana total en millones	Total del material particulado	Dióxido de azufre	Óxidos de nitrógeno	Oxidantes	Dióxido de carbono
<1.0	2	2	1	1	1
1-4	5	5	2	2	2
4-8	8	8	4	3	4
>8	10	10	5	4	5

Finalmente se hará la implementación del programa donde se pondrá en práctica todo lo anterior, se comprarán e instalarán los equipos que realizarán el monitoreo y se entrenará al personal que operará los aparatos.

Los factores que pueden modificar esta el número de estaciones son los siguientes:

- 1) Ciudades con altos índices de industrialización, el número de sitios para material particulado y dióxido de azufre deberán de ser incrementados.
- 2) Áreas donde cantidades grandes de combustibles pesados sean usados, el número de estaciones de dióxido de azufre deberán ser incrementadas. En este caso, debido a la naturaleza del carbono negro, podría asumirse que esta consideración deberá hacerse también para este contaminante.
- 3) Áreas donde no se usen muchos combustibles pesados, el número de estaciones deberá ser disminuido.
- 4) Regiones con un terreno irregular, probablemente sea necesario incrementar el número de estaciones.
- 5) Ciudades con tránsito extremadamente alto, el número de estaciones para óxidos de nitrógeno, oxidantes y bióxido de carbono deberá ser duplicado.
- 6) Ciudades donde la población sea mayor a 4 millones de habitantes, con relativo transito bajo, el número de estaciones para óxidos de nitrógeno, oxidantes y bióxido de carbono deberán ser reducidas.

### 2.3.2.2 Tipos de sitios de muestreo

Una red debe ser diseñada con una variedad de tipos de sitios de monitoreo para cumplir con las necesidades básicas; la red de monitoreo requerirá sitios que estén localizados para lograr lo siguiente (EPA, 2013):

- a) Determinar la mayor concentración esperada que ocurrirá en el área cubierta por la red.
- b) Medir concentraciones típicas en áreas con una densidad de población alta.
- c) Determinar el impacto de las fuentes significativas o la categoría de fuentes en cuanto a calidad del aire.
- d) Determinar el trasfondo de los niveles de concentración.
- e) Determinar la extensión del transporte de un contaminante regional dentro de las áreas contaminadas y utilizar este estudio como un soporte para estándares secundarios.
- f) Medir los impactos de la contaminación de aire en la visibilidad, daño a la vegetación u otros impactos sobre el bienestar.

### 2.3.2.3 Distribución de los sitios de muestreo

La distribución de un número dado de estaciones de monitoreo sobre una cierta área puede ser básicamente de dos tipos:

El primer tipo de distribución, denominado red geométrica, propone que los sitios estén situados en las intersecciones de una cuadrícula o dentro de cada cuadro.

El segundo, llamado también redes especiales, propone que se haga una discriminación más selectiva, tomando en consideración la distribución de las fuentes, población, topografía, climatología y otros factores económicos y políticos.

#### ***Red geométrica***

Las redes geométricas han sido usadas por diversas razones, no obstante, se ha determinado que generalmente no son favorables debido a algunas deficiencias inherentes. Por ejemplo, las técnicas de muestreo y análisis son limitadas ya que no son económicamente viables; aunado a esto, se requiere mucho personal y tiempo para operarlas (WHO & WMO, 1977).

En muchos casos, estas redes son parte de estudios destinados a determinar el número de estaciones requeridas para caracterizar adecuadamente los niveles de contaminación en el área. Otros han sido usados para hacer medidas de rutina de la contaminación del aire.

Hay un número posible de variaciones referentes a la operación de una red de cuadrícula regular. Bajo este esquema de red, todos los puntos cruzados en la cuadrícula deben de ser estaciones de monitoreo. Sin embargo, algunos pueden ser eliminados después de analizar datos, determinando que una reducción es posible sin la pérdida de precisión. También existe la posibilidad de usar estaciones de monitoreo móviles para visitar los puntos de la red de una manera aleatoria para calcular la contaminación del aire en esa zona.

### ***Redes especiales***

Este tipo de monitoreo lleva a cabo una selección más rigurosa, ya que toma en consideración la distribución de las fuentes, población, topografía, climatología y otros factores económicos y políticos. Una red de este tipo requerirá que se escojan los puntos de muestreo más representativos y que se consideren como de mayor vulnerabilidad. En ellos se instalarán una mayor cantidad de equipos de monitoreo, con lo cual, se podrá obtener una imagen mucho más detallada de la contaminación del aire en las áreas más contaminadas y más pobladas.

Para entender los patrones de contaminación del aire en la región seleccionada es recomendable el uso de modelos de dispersión que puedan proporcionar información adicional a través de la interpolación.

La tabla 2.3 muestra la distribución normal para sitios que monitorean dióxido de azufre y partículas. Se muestra una sugerencia de cómo pueden acomodarse las estaciones de muestreo dependiendo del total de sitios de muestreo que se tienen que colocar. Se dividen en zonas industriales y zonas residenciales.

**Tabla 2.3 Distribución sugerida de las estaciones de muestreo. Fuente: (WHO & WMO, 1977)**

Número total de estaciones	Número de estaciones en una ciudad o área industrial	Número de estaciones en áreas residenciales
1	1	0
2	1	1
3	2	1
4	2	2
5	3	2
10	6	4

La localización de cada estación de monitoreo es muy importante y deberá de satisfacer los siguientes requisitos:

1. El sitio deberá ser representativo del área seleccionada en el diseño general.
2. La estación deberá ser instalada y operada para entregar datos que puedan ser comparados con otros sitios de la red.
3. Algunos requerimientos físicos deberán ser satisfechos en el sitio.

El apropiado emplazamiento de las zonas de monitoreo requieren especificaciones de los objetivos del monitoreo, los tipos de sitios necesarios para cumplir con los objetivos y la escala espacial deseada de representatividad (40 CFR 58, 2013). Las escalas de representatividad de más interés se dividen en 6 grupos, microescala, escala media, escala vecinal, urbana, regional, escalas nacionales y globales. En la tabla 2.4 se describe cada una de las escalas en términos de sus dimensiones físicas.

**Tabla 2.4 Escalas de representatividad de los sitios de monitoreo. Adaptado de: (40 CFR 58, 2013)**

<b>Escala de representatividad</b>	<b>Tamaño</b>
<b>Microescala</b>	El rango abarca aproximadamente hasta 100 metros.
<b>Media</b>	Varias cuerdas de la ciudad, desde 100 metros hasta 500 metros.
<b>Vecinal</b>	Define concentraciones dentro de una área extendida de la ciudad que tiene un uso de suelo relativamente uniforme con dimensiones de 0.5 km hasta 4 km. La escala del vecindario y la urbana tienen el potencial de superponerse en aplicaciones que conciernen a los contaminantes secundarios o contaminantes que tienen una distribución homogénea.
<b>Urbana</b>	Esta escala define las concentraciones dentro de un área del tamaño de una ciudad, en un rango de 4-50 km. Dentro de una ciudad, la colocación geográfica de las fuentes podría resultar en que no existe un solo sitio que pueda decirse que representa la calidad del aire en una escala urbana.
<b>Regional</b>	Usualmente define un área rural de una geografía relativamente homogénea sin grandes fuentes, y se extiende desde decenas hasta cientos de kilómetros.
<b>Nacional y Global</b>	Estas escalas de medidas representan concentraciones caracterizando una nación y la Tierra como un todo.

### 2.3.3 Muestreo duración y frecuencia

La duración del programa de monitoreo puede ser visto en tres escalas de tiempo: a corto plazo, intermitente y largo plazo. Dependiendo de los objetivos de la red de monitoreo se seleccionará una duración del programa.

#### ***Corto plazo***

Normalmente, se plantea una duración a corto plazo cuando el tipo de monitoreo se hace con propósitos específicos, tales como realizar un estudio preliminar de los niveles de contaminación antes de continuar con un programa más intensivo o para entender el comportamiento general del contaminante para poder plantear un diseño definitivo de la red.

La limitante de este tipo de programa, es que los datos probablemente no sean representativos por cambios en la meteorología o que las condiciones de emisión se hayan visto modificadas durante este corto tiempo. El comportamiento de algunos contaminantes varía dependiendo de algunos factores tales como el clima, la temperatura, las precipitaciones y la temporada del año.

### ***Intermitente***

Un monitoreo de este tipo hace mediciones en tiempos separados, puede ser una vez al mes o un día cada 6 meses. Este tipo de monitoreo sirve para ahorrar costos, especialmente cuando los equipos se operan de forma manual. También ayuda a conocer datos de comportamiento del contaminante en diferentes estaciones del año sin tener que hacer mediciones continuas durante todo el periodo. Se pueden hacer mediciones con equipos que sean móviles para una mejor funcionalidad.

### ***Permanente o largo plazo***

Este tipo de monitoreo permite tener datos históricos que se han obtenido por varios años. Presenta muchas ventajas ya que se puede llegar a entender mejor el comportamiento del contaminante a lo largo de un periodo mucho más extenso y la variabilidad de las concentraciones a lo largo del año. Permite realizar un análisis de los datos para que las agencias o institutos puedan plantear los diferentes programas de control de contaminación y realizar legislaciones o regulaciones específicas. Es importante que los sitios permanezcan el mismo periodo de tiempo para asegurar la validez de los datos.

Para poder determinar qué tipo de monitoreo se quiere realizar hay que tener en cuenta algunas consideraciones: primeramente, hay que poner atención a la variabilidad de las emisiones del contaminante, si estas emisiones son emitidas durante el día o durante la noche y cuáles son las horas pico de dichas emisiones. Asimismo, se deberán determinar los días de la semana que tienen una mayor emisión, y si ésta depende de la temporada estacional, las variaciones del clima o si se ve afectada por las variaciones meteorológicas. De igual manera, se debe considerar la precisión de los datos, de la calidad del aire, este punto está relacionado con los objetivos del monitoreo.

## Capítulo 3 Propuesta del diseño de la red de monitoreo de carbono negro en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

En este capítulo se presenta el diseño de la red de monitoreo de carbono negro con la información planteada en el capítulo previo. Se necesitarán establecer, los objetivos de la red, la zona de estudio, el número de sitios de muestreo y la frecuencia con la que se hará el monitoreo.

### 3.1 Programa de monitoreo de carbono negro.

En esta sección se mencionará brevemente la metodología que se propone para realizar el programa de monitoreo de carbono negro. En la figura 3.1 se presenta la propuesta.

Se propone que primero se realice un estudio para determinar la situación actual del carbono negro en la región donde se desea hacer el monitoreo, si existe alguna información previa y que estudios se han hecho anteriormente. También se recomienda hacer una investigación acerca de las políticas públicas que se han implementado para tomarlas como base.

Al seleccionar el enfoque del monitoreo también se necesita establecer el número de sitios de monitoreo tomando en cuenta las fuentes potenciales y las zonas vulnerables a la exposición de carbono negro. En este anteproyecto se propone utilizar un aetalómetro como equipo de medición, sin embargo, será necesario evaluar la posibilidad de utilizar otros equipos que se tengan disponibles y el presupuesto con el que se cuenta para hacer la compra de los equipos suficientes. Para este proyecto se desean utilizar los datos del monitoreo para comprender el comportamiento de las concentraciones de carbono negro y posteriormente usar esta información para desarrollar estrategias de mitigación en la ZMVT.

Para el diseño de la red serán considerados sitios ya existentes para facilitar la operación e instalación de los equipos que realizarán un monitoreo automatizado.

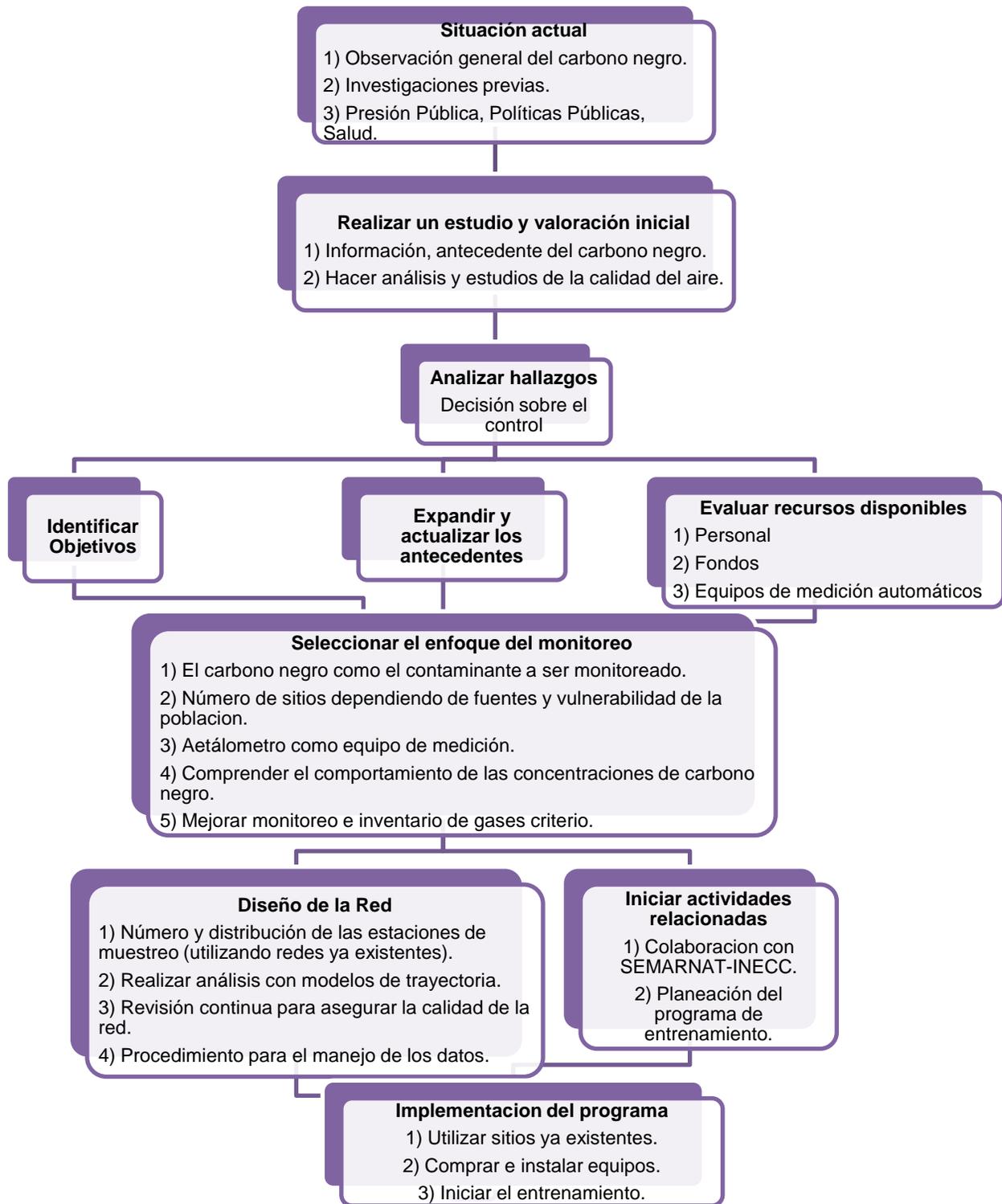


Figura 3.1. Propuesta para desarrollar un programa de monitoreo de carbono negro.

## 3.2 Información antecedente de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

En este capítulo se determinará la zona de estudio y se hará una descripción de dicha zona con factores como distribución de población, clima, actividades económicas, transporte e incendios forestales.

### 3.2.1 Objetivos de la red

Caracterizar la zona de estudio, localizar fuentes de carbono negro tales como fábricas, parques industriales, vialidades principales y aeropuertos.

Localizar las zonas vulnerables a la exposición de carbono negro.

Establecer el número mínimo de estaciones de monitoreo que representen el comportamiento de las concentraciones de carbono negro dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Establecer la línea base de las concentraciones ambientales de carbono negro dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Evaluar las concentraciones ambientales para tener un panorama general del carbono negro.

### 3.2.2. Delimitación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Puede entenderse el *término zona metropolitana* como un asentamiento urbano que desborda los límites político-administrativos del territorio sobre el que se expande, es una zona con una variedad de actividades económicas para el abastecimiento de bienes y servicios de consumo. Está compuesta principalmente por una ciudad núcleo, que tiene una gran concentración demográfica y por las ciudades periféricas que se relacionan entre sí.

Los métodos y conceptos para definir una zona metropolitana no están muy bien definidos ya que depende de la complejidad de la zona a definir. La delimitación de la zona metropolitana depende esencialmente del fin con el que se usará dicha limitación, para fines

administrativos o estadísticos. Sin embargo, al momento de hacer una delimitación de este tipo, se toman en cuenta algunos factores importantes que se exponen a continuación (SEDESOL, CONAPO & INEGI, 2012):

- a) Tamaño de la población. Está directamente relacionado con la identificación del núcleo de la metrópoli y tendrá que referirse al umbral mínimo que se está considerando en cada estudio.
- b) Expansión urbana y contigüidad. Es necesario apreciar el crecimiento de la ciudad sobre su entorno, ya que pueden darse zonas metropolitanas con uno o más núcleos.
- c) Densidad de población. Las altas densidades poblacionales son un indicador de la posible existencia de una zona metropolitana y una dependencia entre localidades.
- d) Desplazamientos laborales y dependencia. Este factor es un principal indicador de integración funcional entre las distintas ciudades, ya que manifiesta las relaciones económicas y la dependencia que se tiene con el núcleo.

La delimitación que se haga de una determinada zona metropolitana, teniendo en cuenta los factores ya citados ayudará a la generación de datos estadísticos y geográficos que puedan ser utilizados para fortalecer y mejorar acciones gubernamentales en la planeación y gestión del desarrollo de dicha entidad.

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca se ubica en la región centro del país; es parte de la megalópolis que se forma alrededor de la Zona Metropolitana del Valle de México, más específicamente está confinada dentro del Estado de México. Esta entidad federativa se localiza en el centro del territorio nacional y cuenta con 125 municipios, su capital es Toluca de Lerdo. Como se puede observar en la Figura 3.2 el Estado de México colinda con 7 entidades Guerrero, Querétaro, Michoacán, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Morelos y el Distrito Federal. El Estado de México tiene una extensión de 22 351 km<sup>2</sup> y comprende el 1.1% del territorio nacional (SEDESOL, CONAPO & INEGI, 2012).

El Estado de México es el más poblado de la República Mexicana, con una población total para el 2010 de 15 175 862 habitantes (INEGI, 2011), de los cuales el 51.3% son

mujeres y el 48.7% son hombres, es decir, 7 779 976 habitantes son mujeres y 7 396 986 son hombres. Su población comprende el 13.5 % de la población total nacional. Los municipios con mayor población son Ecatepec de Morelos, Nezahualcóyotl y Naucalpan de Juárez, lo cual probablemente, se debe a su cercanía con el Distrito Federal.



Figura 3.2. Localización del Estado de México.

Fuente: INEGI, <http://www.inegi.org.mx/>

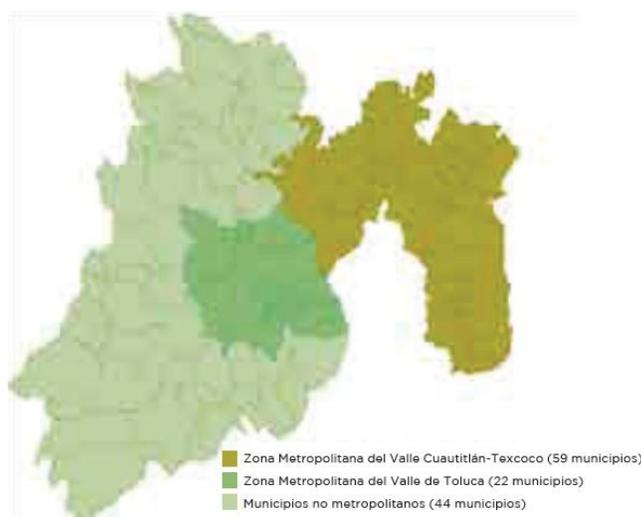
Se han establecido diversas definiciones para delimitar la zona metropolitana que se forma en el valle de Toluca, entre las principales exponentes se encuentra el Gobierno del Estado de México y SEDESOL-CONAPO-INEGI en un trabajo conjunto.

Por otra parte, está la delimitación por parte del Gobierno del Estado de México que se publicó en la Gaceta del Gobierno No. 99, del 19 de noviembre de 2009, de dicho Gobierno, mediante el decreto 13, por el que la H. LVII Legislatura del Estado de México aprobó la declaratoria de Zona Metropolitana del Valle de Toluca. En este sentido, la metrópoli se encuentra delimitada por 22 municipios con una población total para esta zona de 2,172,035 habitantes (COESPO, 2012). Los municipios que forman esta división de la metrópoli se enlistan en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con la H. LVII Legislatura del Estado de México.**

Almoloya de Juárez	Mexicaltzingo	Texcalyacac
Almoloya del Río	Ocoyoacac	Tianguistenco
Atizapán	Otzolotepec	Toluca
Calimaya	San Antonio La Isla	Xalatlaco
Capulhuac	San Mateo Atenco	Xonacatlán
Chapultepec	Rayón	Zinacantepec
Lerma	Temoaya	
Metepec	Tenango del Valle	

En esta división se plantean que existen dos zonas metropolitanas dentro del estado de México y otra zona que se designa como los municipios no metropolitanos, la división se puede observar en la Figura 3.3 donde se observan que se plantea una división de tres zonas, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, Zona Metropolitana del Valle de Cuautitlán-Texcoco y las municipios no metropolitanos. Esto representa, que el 87.9% de la población estatal del 2010 se concentraba en las Zonas Metropolitanas. Esta delimitación de zonas metropolitanas en el Estado de México representaría que el 11.9% de la población total nacional se concentraría en las zonas metropolitanas del Estado de México y equivaldría a más de 13 millones de habitantes (COESPO, 2012).



**Figura 3.3. División de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con la H. LVII Legislatura del Estado de México.**

Fuente: (COESPO, 2012)

Sin embargo, existe otra delimitación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, que se determinó en un trabajo en conjunto de los organismos SEDESOL, CONAPO e INEGI. Bajo esta división se determinaron que los municipios incluidos dentro de esta zona serían solo 15 con una superficie total de 2 203.2 Km<sup>2</sup> y una Densidad Media Urbana de 64.8 habitantes/ha, el número de habitantes que se tienen registrados en esta zona en el censo realizado en 2010 es 1,936,126 (SEDESOL, CONAPO & INEGI, 2012). En este documento nombraron a este conjunto de 15 municipios asociados como la Zona Metropolitana del Valle de Toluca que se pueden observar en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con la Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010.**

Almoloaya de Juárez	Rayón
Calimaya	San Antonio la Isla
Chapultepec	San Mateo Atenco
Lerma	Temoaya
Metepec	Toluca
Mexicaltzingo	Xonacatlán
Ocoyoacac	Zinacantepec
Otzolotepec	

Como se observa en la figura 3.4, las regiones en color amarillo simbolizan las localidades urbanas consideradas dentro de esta zona por los organismos citados en el párrafo anterior. Los municipios de Toluca, Metepec y San Mateo Atenco son los municipios con una población principalmente urbana y, como se observa en la figura 3.4, esta zona urbana se conforma alrededor del municipio de Toluca. Algunos otros municipios como Chapultepec, Ocoyoacac, Rayón, San Antonio La Isla, Temoaya y Xonacatlán se consideran dentro de la Zona Metropolitana de Toluca debido a su integración funcional con los municipios centrales que tiene una conurbación física. Sin embargo, para este estudio dicha relación de dependencia no es relevante y por eso se consideraran únicamente los municipios aledaños que tengan una concentración urbana alta.

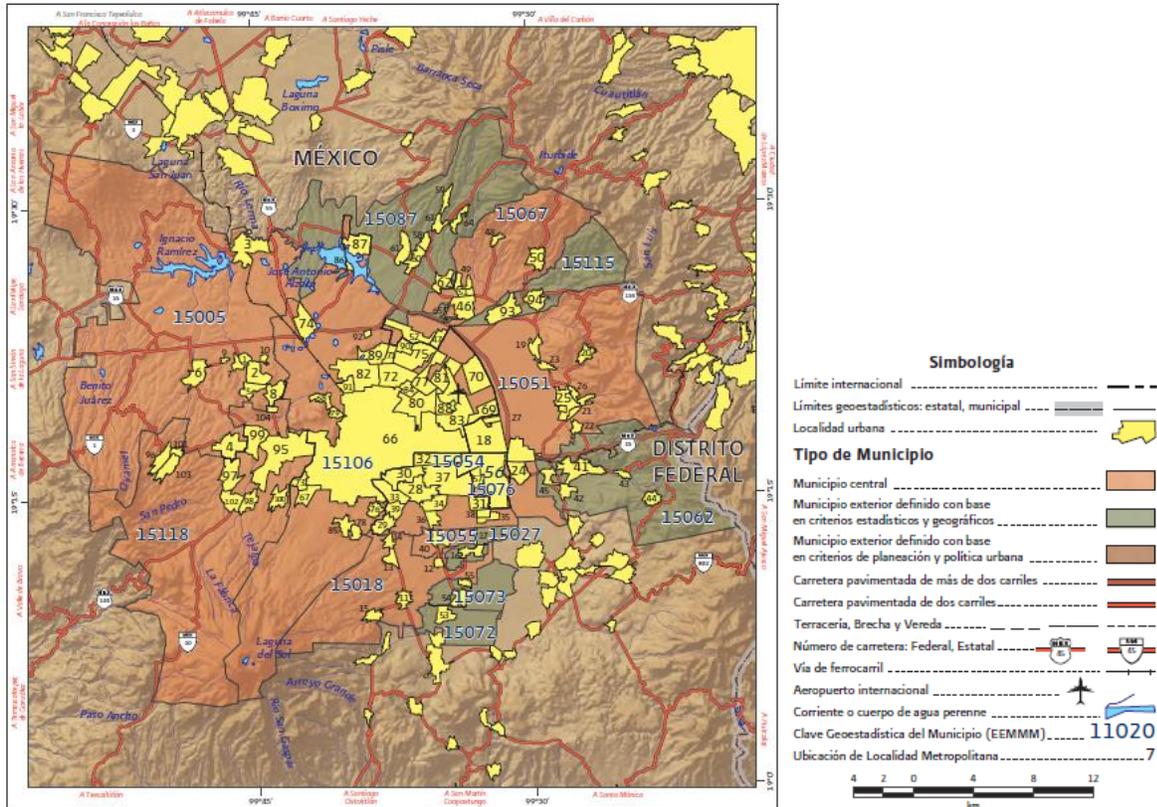
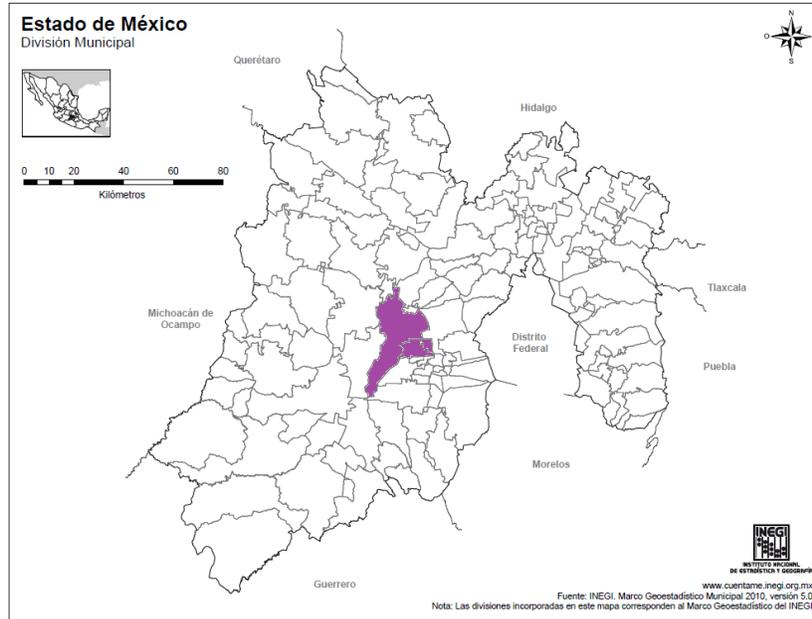


Figura 3.4. Delimitación de la Zona Metropolitana de Toluca de acuerdo con SEDESOL-CONAPO-INEGI.

Fuente: (SEDESOL, CONAPO & INEGI, 2012)

Por lo tanto, para fines de este estudio, se planteará una nueva definición a la que se le designará Zona Metropolitana del Valle de Toluca (en adelante ZMVT), se incluirán los municipios de Toluca, Metepec y San Mateo Atenco debido a que esta zona agrupa a los municipios cercanos la a ciudad de Toluca con una concentración de la población considerablemente alta. En este estudio se determinará la ubicación de los puntos de medición de carbono negro, para lo cual, es necesario determinar qué zonas son más vulnerables a la contaminación en aire por carbono negro, ya que muchos de los efectos negativos que ocasiona la presencia de este contaminante en el aire ambiente repercuten directamente en la salud humana. Por tal razón es importante considerar la distribución de la población para poder hacer la delimitación de la zona de estudio.

De acuerdo a este criterio dentro de esta zona metropolitana quedarán incluidos los municipios de Toluca, Metepec y San Mateo Atenco, como se puede observar en la Figura 3.5.



**Figura 3.5. Zona Metropolitana del Valle de Toluca para este estudio.**

**Fuente: INEGI Marco Geoestadístico Municipal 2010 [www.cuentame.inegi.or.mx](http://www.cuentame.inegi.or.mx)**

### 3.3 Desarrollo de la metodología del diseño de la red

Para el desarrollo de la metodología se utilizarán los principios planteados en el Capítulo 2 y se utilizará toda la información disponible que se encuentre en los institutos de investigación y dependencias gubernamentales.

#### 3.3.1 Información de la zona de estudio

Se recopilará toda la información disponible del área de estudio, se pretende que esta búsqueda ayude a entender el comportamiento del carbono negro en la zona. Se buscará información referente al tipo de fuentes y se caracterizarán de acuerdo a su naturaleza. Así mismo se pretende localizar las zonas vulnerables al carbono negro, la cantidad y localización de la población, así como la extensión territorial. También se incluirán datos climatológicos de la zona como, clima, temperatura ambiental, dirección de vientos y ubicación topográfica.

### 3.3.1.1 Industrias, transporte e incendios

#### **Industrias**

De acuerdo al censo realizado en 2009 por el INEGI, se registraron alrededor de 5,698 industrias en toda la ZMVT. En la Tabla 3.3 se muestra el número de industrias manufactureras por cada municipio y el total que suma esta zona.

**Tabla 3.3 Número de industrias manufactureras registradas en 2009 por municipio. Fuente de Datos: (INEGI, 2008)**

<b>Municipio</b>	<b>Industrias manufactureras registradas en 2009</b>
Metepéc	900
San Mateo Atenco	1,715
Toluca	3,083
Zona Metropolitana del Valle de Toluca	5,698

La clasificación de las industrias manufactureras de acuerdo al INEGI se divide en 21 sectores principales, que abarcan desde la industria de los alimentos hasta la fabricación de muebles, equipo de transporte y, plástico y hule. En la tabla 3.4 se hace el desglose del tipo de industria manufacturera que se encuentra presente en cada municipio.

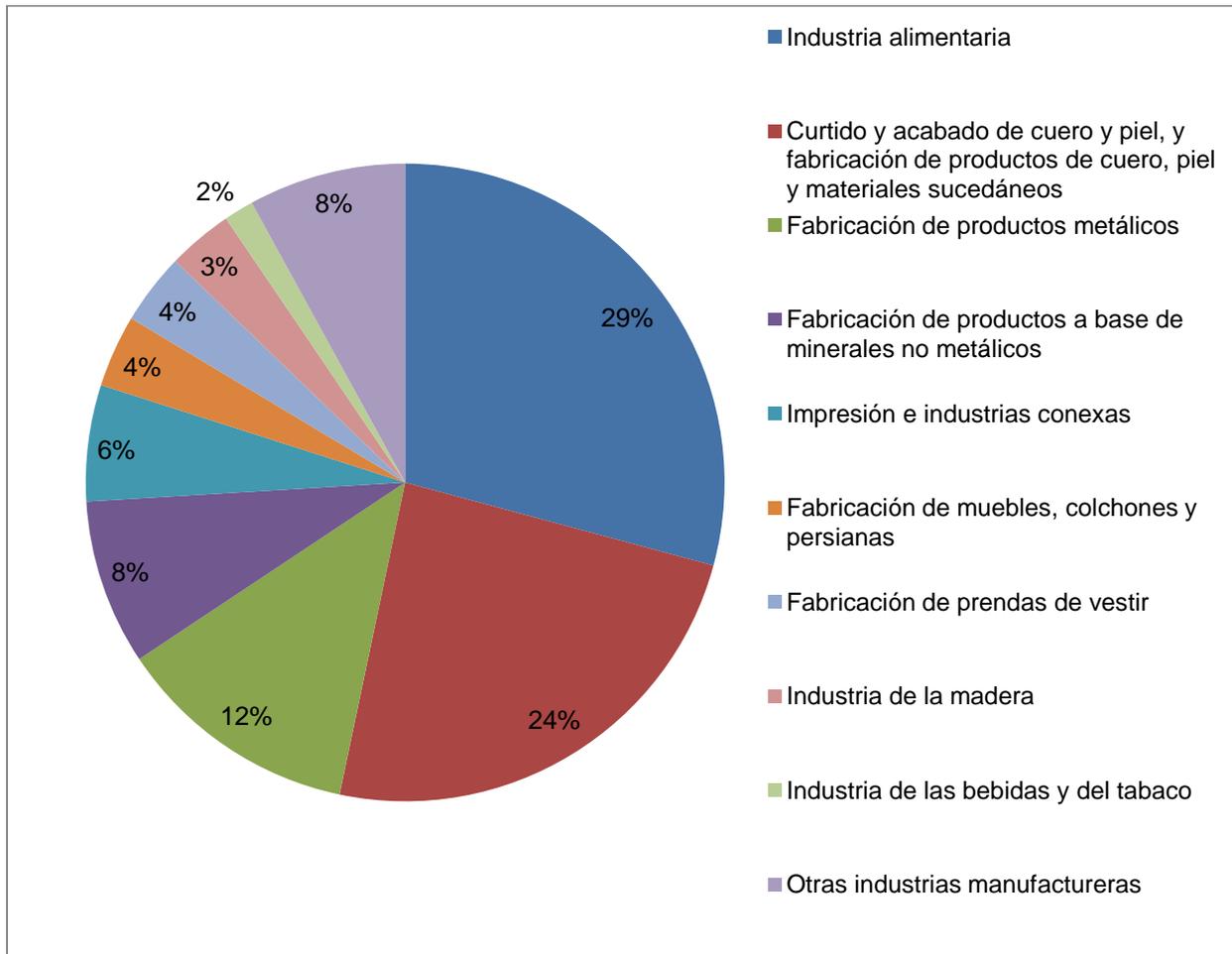
Las industrias en las que se realicen procesos de combustión, ya sea para fines de calentamiento o por requerimiento del proceso de producción, serán de suma importancia para este estudio ya que son notables fuentes de emisión de carbono negro. Dentro de estas industrias se destacan: petróleo y petroquímica, industria química, pinturas y esmaltes, metalúrgica y siderúrgica, automotriz, celulosa y papel, cemento y cal, vidrio, generación de energía eléctrica, alimentos y bebidas, papel y cartón, plástico y hule, accesorios, aparatos eléctrico y equipos de generación eléctrica.

**Tabla 3.4 Número de industrias manufactureras presentes en cada municipio de acuerdo a su clasificación. Fuente de los datos: (INEGI, 2008)**

Tipo de Industria	Metepec	San Mateo Atenco	Toluca
Industria alimentaria	249	124	1277
Industria de las bebidas y del tabaco	14	10	61
Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles	*	*	21
Fabricación de productos textiles, excepto prendas de vestir	6	*	50
Fabricación de prendas de vestir	24	20	160
Curtido y acabado de cuero y piel, y fabricación de productos de cuero, piel y materiales sucedáneos	*	1351	11
Industria de la madera	33	15	139
Industria del papel	*	15	13
Impresión e industrias conexas	30	21	282
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón		*	6
Industria química	*	12	41
Industria del plástico y del hule	*	9	30
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	372		102
Industrias metálicas básicas	*	*	*
Fabricación de productos metálicos	94	62	543
Fabricación de maquinaria y equipo	*	*	12
Fabricación de accesorios, aparatos eléctricos y equipo de generación de energía eléctrica	*		5
Fabricación de equipo de transporte		*	23
Fabricación de muebles, colchones y persianas	23	49	135
Otras industrias manufactureras	33	10	165

“La columna unidades económicas se encuentra inhibida en varios renglones, mostrando un asterisco (\*). Esto se debe a que la ley del sistema nacional de información estadística y geográfica, en vigor, en sus artículos 37, 38, 42 y 47 establece la confidencialidad de la información.”

En la figura 3.6 se hace una relación del porcentaje que representa cada tipo de industria en esta región. Como podemos observar en el gráfico, las industrias que tiene una presencia mucho mayor con respecto al total de industrias son: la alimentaria y la fabricación de productos de cuero con un 29% y 24% respectivamente.



**Figura 3.6. Porcentaje por tipo de industria.**

Así mismo, las industrias de fabricación de productos metálicos y la fabricación de productos a base de minerales no metálicos están en tercer lugar, al representar, en conjunto, el 20% de las industrias manufactureras de la región.

Las industrias que se han decidido agrupar en la categoría de otras industrias, son aquellas que representaban menos del 1% en el total. Entre estas industrias se agruparon:

Industria del plástico y del hule, fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, Industria Química y del papel entre otras.

Será importante localizar, para este anteproyecto, las industrias que están relacionadas con la fabricación de productos a base de minerales no metálicos. Esta importancia radica en que la mayoría de los procesos de producción de este tipo de mercancías requieren horneado, y por lo tanto, quema de combustibles que producirán carbono negro. Dentro de esta clasificación se encuentran las industrias de: fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios, que incluye: la fabricación de artículos de alfarería, porcelana, loza y muebles de baño, ladrillos, azulejos y losetas no refractarias y productos refractarios que son materiales que resisten altas temperaturas sin descomponerse. Se encontraron datos del número total de industrias dentro de este giro que están presentes en cada municipio y se reportan en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios. Fuente de los datos: (INEGI, 2008)**

<b>Municipio</b>	<b>Número de Industrias</b>
Meteppec	340
San Mateo Atenco	*
Toluca	27
<b>Total</b>	<b>367</b>

### 3.3.1.2 Distribución poblacional

En este estudio se analizará la distribución de la población en esta zona metropolitana, como se puede observar en la tabla 3.6, los municipios tienen una densidad de población ( $\text{hab}/\text{km}^2$ ) más alta a  $1000 \text{ hab}/\text{km}^2$ . Estos municipios tienen una concentración alta de habitantes con respecto al territorio que ocupan.

La Densidad Media Urbana de los municipios que son considerados en este estudio tiene un valor mayor a los 49 habitantes por hectarea, los municipios que presentan una DMU alta mayor a 70 hab/ha son Metepec y Toluca.

**Tabla 3.6 Población, Superficie y DMU de cada municipio en la ZMVT. Adaptado de (SEDESOL, CONAPO & INEGI, 2012) y (INEGI, 2011)**

Municipio	Población en 2010	Superficie (km <sup>2</sup> )	DMU (hab/ha)	Densidad de Población (hab/km <sup>2</sup> )
Metepec	214,162	67.4	83.8	3177.5
San Mateo Atenco	72,579	18.9	49.6	2639.2
Toluca	819,561	428.1	72.3	1808.8
<i>Total</i>	<i>1,106,302</i>	<i>514.4</i>	--	--

De estos datos puede deducirse que los municipios de Metepec, San Mateo Atenco y Toluca tiene una alta densidad de población, que además, esta localizada en una zona urbana de la metropoli, ya que el valor que presentan para la Densidad Media Urbana es también alto.

### 3.3.1.3 Climatología y vientos

#### ***Climatología***

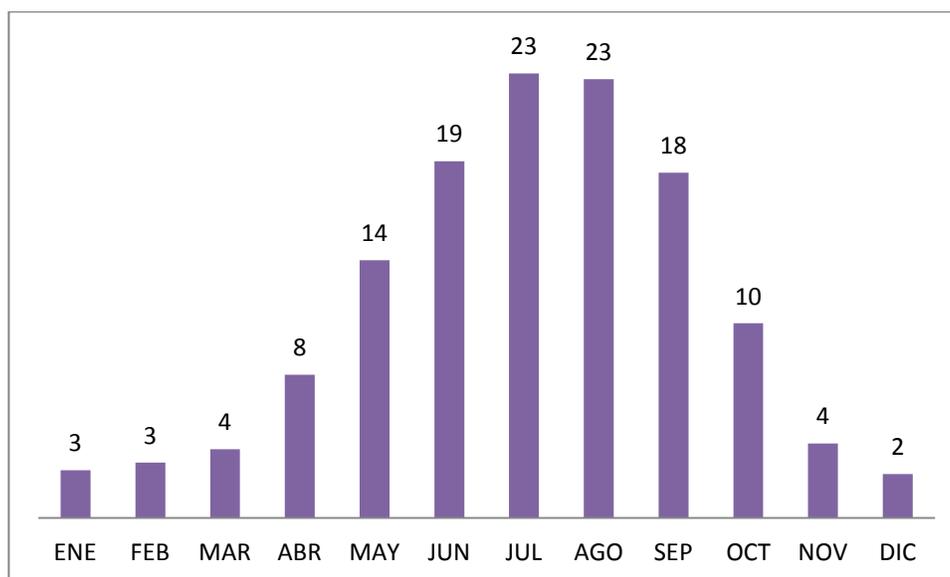
Los climas presentes en la ZMVT son: templado subhúmedo con lluvias en verano, semifrío subhúmedo con lluvias en verano y semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano. El rango de temperatura va desde 4 °C en las Zonas más frías hasta 14 °C en el resto de la zona. El frío de alta montaña está presente únicamente en el Nevado de Toluca, el cual, tiene una altitud de 4680 metros sobre el nivel del mar.

En cuanto a las precipitaciones en la región, de acuerdo a la tabla 3.7, se observa que el rango de precipitación es muy parecido para la mayoría de los municipios con un mínimo de 700 mm y un máximo que varía de 1000 mm hasta 1500 mm. Las lluvias son concurrentes en verano de acuerdo al tipo de climas que están presentes en esta zona.

**Tabla 3.7 Rangos de Temperatura y precipitación por municipio.**

Municipio	Rango de Temperatura(°C)	Rango de Precipitación (mm)
Metepec	10 – 14	700 – 1000
San Mateo Atenco	10 – 14	800 – 1000
Toluca	4 – 14	800 – 1500

En la figura 3.7, se puede observar que entre los meses de Junio y Septiembre, se tendrán los meses con mayores precipitaciones en el año, esto afectará principalmente al arrastre de contaminantes particulados, lo que puede contribuir a que las cantidades de carbono negro en la atmósfera para estos meses disminuyan.



**Figura 3.7. Número de días con lluvia en cada mes. Fuente de los datos: (SMN, 2014)**

En la Tabla 3.8 se describe el tipo de clima presente en cada municipio. Por ejemplo, para el municipio de Toluca, prácticamente tres cuartas partes del territorio tienen un clima templado subhúmedo y la otra cuarta parte es semifrío subhúmedo, a excepción de la zona de la montaña, la cual tiene un clima frío de altura. Para los otros dos municipios no se observan cambios de clima dentro de sus límites territoriales.

**Tabla 3.8 Descripción de clima por municipio.**

Municipio	Clima
Metepec	Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (100%).
San Mateo Atenco	Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (100%).
Toluca	Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (73.79%), semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (23.23%) y frío de altura con marcado invierno (2.98%).

El clima predominante en esta región es el templado subhúmedo con lluvias en verano, está presente en toda la ZMTV, en la figura 3.8 se puede observar que toda la zona morada tiene un clima templado subhúmedo predominante, excepto el punto gris que se observa justo donde se ubica el Nevado de Toluca, como ya se indicó antes, se tiene un clima frío de alta montaña.



**Figura 3.8. Clima en el Estado de México.**

Fuente: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/clima.aspx?tema=me&e=15>

En las figuras 3.9, 3.10, y 3.11, se pueden observar los cambios de temperatura a lo largo del año para Metepec y Toluca. En las gráficas se aprecia que la variación de temperaturas es muy pequeña en ambos municipios.

La figura 3.9 muestra un comparativo entre las temperaturas mínimas normales de Toluca y Metepec, en este gráfico se observa que el comportamiento de las temperaturas mínimas es muy similar a lo largo del año, sin embargo, se observa que las temperaturas de

Metepec se mantienen alrededor de un grado por debajo de las temperaturas de Toluca durante todo el año. Así mismo, se observa que los meses más fríos en esta región serán entre Noviembre y Febrero.

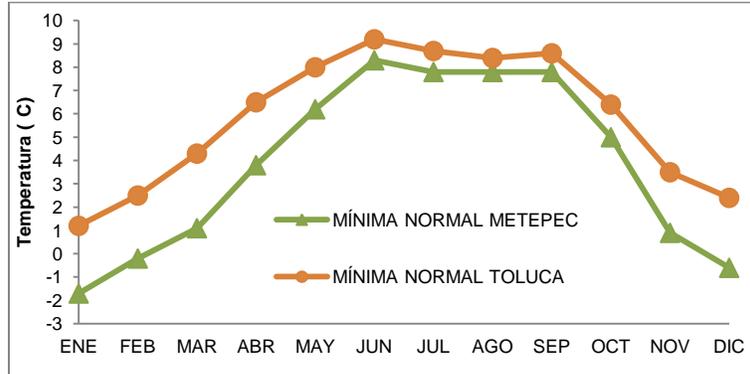


Figura 3.9. Temperaturas normales de Toluca y Metepec durante el año. Fuente de los datos: (SMN, 2014)

La figura 3.10 muestra una comparación de la variación entre las temperaturas medias normales de Toluca y Metepec durante todo el año. Se observa que las temperaturas son prácticamente iguales de Junio a Diciembre, mientras que de Enero a Mayo varían solo en medio grado centígrado.

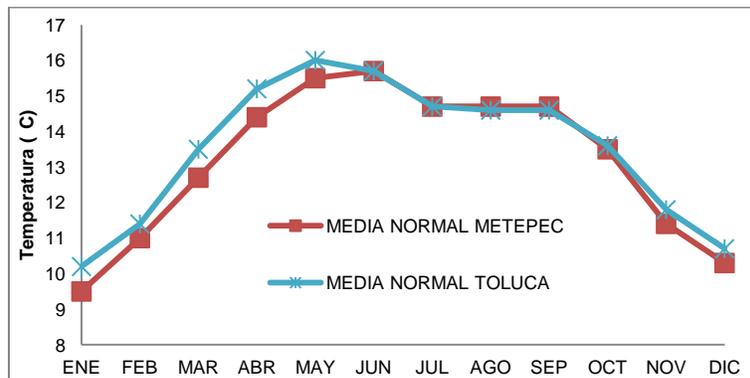


Figura 3.10. Temperaturas medias de Toluca y Metepec durante el año. Fuente de los datos: (SMN, 2014)

La figura 3.11 nos muestra que las temperaturas máximas en Toluca y Metepec se presentaran de Marzo a Mayo, sin embargo, en Metepec serán alrededor de 2 grados centígrados mayores en promedio a lo largo del año.

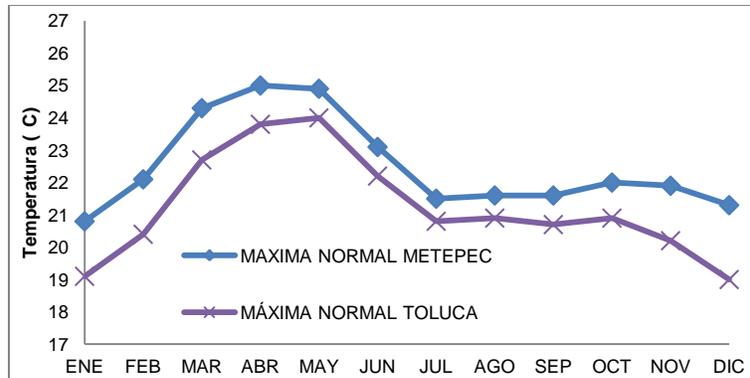


Figura 3.11. Temperaturas máximas de Toluca y Metepec durante el año. Fuente de los datos: (SMN, 2014)

### Vientos

En Toluca los vientos predominantemente provienen del sur, lo que favorece el transporte de los contaminantes hacia la región norte. Es probable que el desplazamiento y transporte de contaminantes generados en otras zonas provoquen afectaciones en la ZMVT. En la figura 3.12 se observa la rosa de los vientos de Toluca.

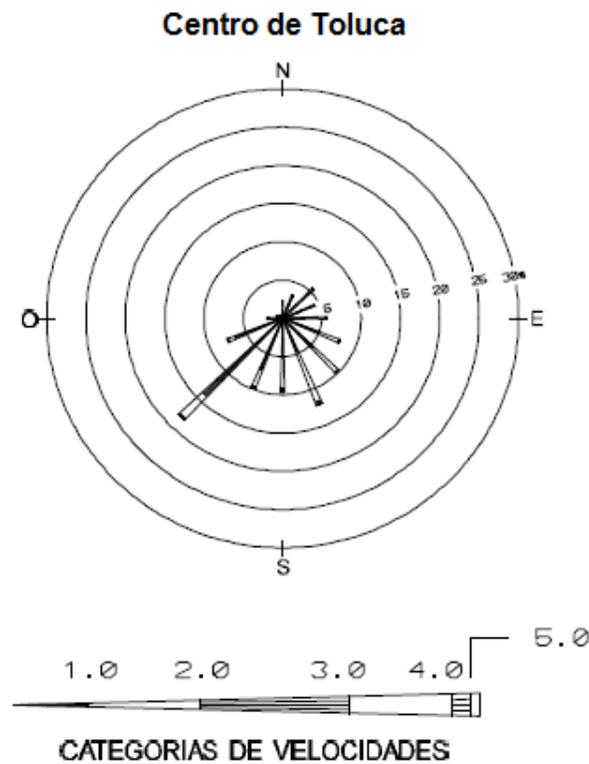
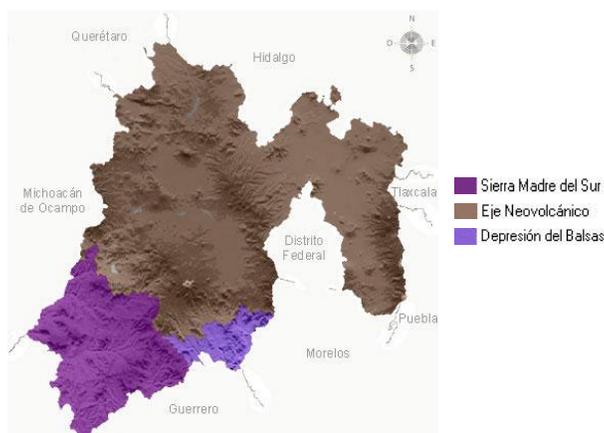


Figura 3.12. Rosa de los vientos de Toluca. Fuente: (INE, 1997)

### 3.3.1.4 Ubicación geográfica y altitud

El Estado de México forma parte de las provincias de la Sierra Madre y Eje Neovolcánico. Como se puede observar en la Figura 3.13 todos los municipios de la ZMVT que se encuentran dentro de la provincia del Eje Neovolcánico.



**Figura 3.13. Relieve del Estado de México.**

Fuente: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=15>

En cuanto a la altitud de la zona varía de aproximadamente 2400 metros sobre el nivel del mar hasta el máximo que se ubica en el Nevado de Toluca. En la tabla 3.9 se puede observar el rango de altitud que tiene cada municipio. En Toluca se observa una variación de altura de 2400 a 4700 metros que representa más de 2300 metros de diferencia debido a la presencia del volcán.

**Tabla 3.9 Altitud en metros sobre el nivel del mar por municipio.**

Municipio	Rango de altitud (metros sobre el nivel del mar)
Metepec	2500-2800
San Mateo Atenco	2500-2700
Toluca	2400-4700

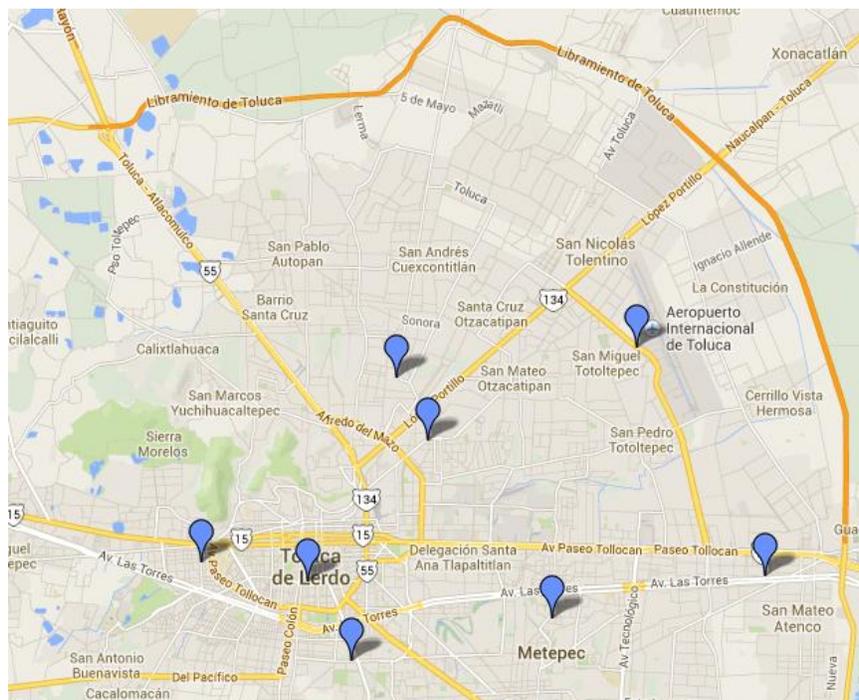
### 3.3.1.5 Información previa de la calidad del aire

Actualmente existe una red de monitoreo en el Valle de Toluca. Esta red está compuesta por 7 estaciones de monitoreo que están ubicadas en diferentes puntos de la zona conurbada de Toluca. En la tabla 3.10 se muestra el nombre de las estaciones de monitoreo y los contaminantes que se miden en dichas estaciones. La red es administrada por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

**Tabla 3.10 Estaciones de muestreo del Valle de Toluca. Fuente: (INECC, 2014)**

Estación	Clave	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	PM10	PST	VV	DV
Oxtotitlán	OX	✓							
Toluca_Centro	CE	✓	✓	✓	✓				
Metepec	MT		✓	✓		✓		✓	✓
San Mateo Atenco	SM		✓	✓		✓			
Aeropuerto	AE		✓	✓		✓	✓		
San Cristobal Huichotitlán	SC		✓	✓		✓	✓		
Cerobuco	CB								

En la figura 3.14 se observa la ubicación de los sitios de monitoreo que existen actualmente para el Valle de Toluca.



**Figura 3.14. Ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico en el Valle de Toluca. Fuente: (INECC, 2014)**

En la figura 3.15 se observan las rosas de vientos para las estaciones de monitoreo de esta red para las que se encontró información histórica suficiente para construir la gráfica.

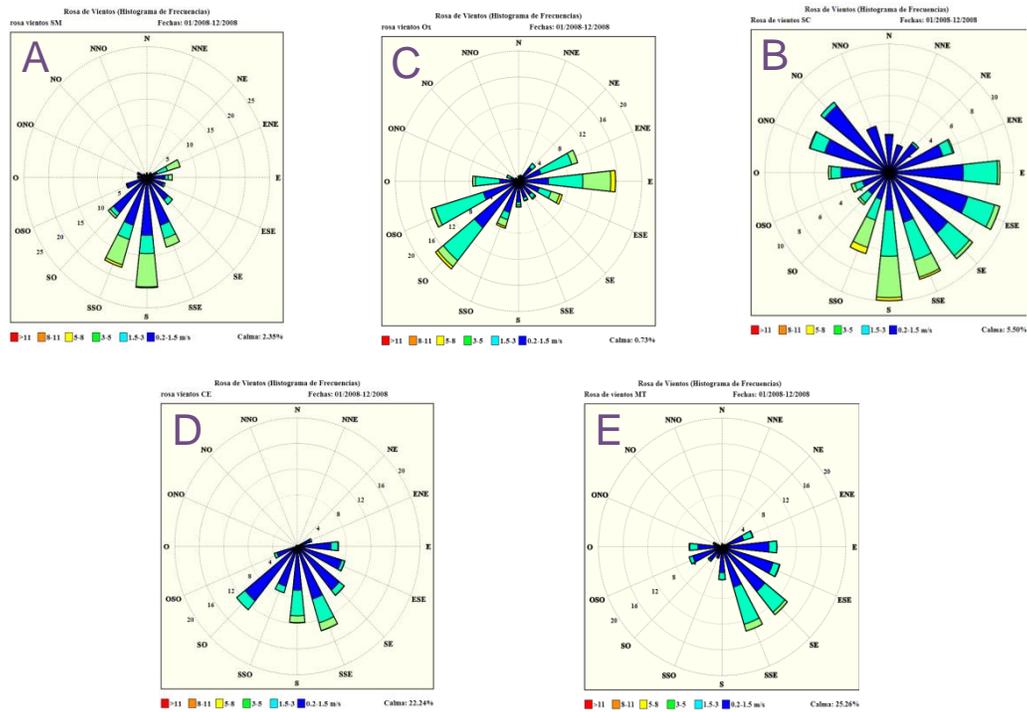


Figura 3.15. Rosas de los vientos para las 5 estaciones de monitoreo atmosférico en el Valle de Toluca.

En la figura 3.15, el esquema A representa la rosa de vientos para San Mateo Atenco, se observa que principalmente los vientos predominantes vienen del sur, esto ayudará a que los contaminantes se transporten hacia el norte.

En el esquema B se construyó la rosa de vientos para la estación de San Cristóbal, aquí puede observarse que los vientos predominantes vienen del sureste, sin embargo, se observan grandes variaciones provenientes del noroeste.

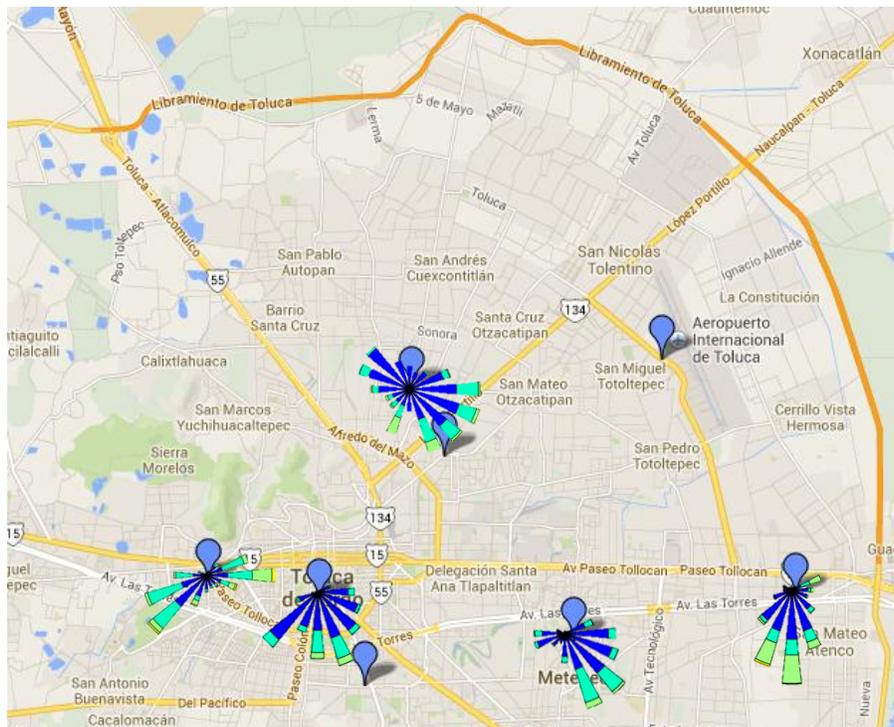
En el esquema C se presenta la rosa de vientos para Oxtotitlán, en este gráfico se distingue que los vientos dominantes vienen en direcciones prácticamente opuestas, tanto del éste como del suroeste.

El esquema D representa la rosa de vientos de Toluca centro, en este gráfico se observa que los vientos vienen desde el sur y sureste con variaciones del suroeste dirigiéndose hacia la parte norte de la ciudad.

Por último se construyó el esquema E, donde se presenta la rosa de vientos de Metepec. De este gráfico se deduce que los vientos provienen del sureste y viajan hacia el noroeste.

Para la construcción de las gráficas se emplearon los datos obtenidos de la base de datos del INECC (INECC, 2008). Y fueron construidas con una herramienta proporcionada en el sitio web de Sistema Nacional de Información de la Calidad el Aire (SINAICA, 2014).

En la figura 3.16 se incorporaron las rosas de vientos para las estaciones de San Mateo Atenco, San Cristobal, Oxtotitlán, Toluca y Metepec.



**Figura 3.16. Rosas de vientos ubicadas en el mapa.**

La red de monitoreo atmosférico para la ZMVT surgió como un programa de vigilancia atmosférica vinculado con los siguientes objetivos (SMA, 2014):

- 1) Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores de la calidad del aire.
- 2) Crear las medidas necesarias para controlar la contaminación.
- 3) Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo.

- 4) Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia.
- 5) Obtener una base de datos para planear la distribución del suelo y del transporte.
- 6) Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.
- 7) Proporcionar datos para el desarrollo y la validación de modelos.
- 8) Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos.

### ***Inventario de emisiones***

En la tabla 3.11 se muestran las emisiones en toneladas por año de gases criterio en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca de acuerdo con el inventario de emisiones del 2006 realizado por el gobierno del Estado de México. Se observa que el municipio que tiene una mayores emisiones es San Mateo Atenco con 9.47 toneladas/año de CO y 0.94 toneladas/año de PM<sub>2.5</sub>. Por otro lado, Toluca presenta 1.14 toneladas/año de PM<sub>10</sub> pero solo 0.87 toneladas/año son PM<sub>2.5</sub>. Para Metepec se reportaron valores bajos tanto de PM<sub>2.5</sub> como de CO, ambos se mantuvieron por debajo de 1 tonelada/año.

**Tabla 3.11 Emisiones en toneladas anuales de la ZMVT 2006 (SMA, 2012)**

<b>Municipio</b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>SOx</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>COV</b>	<b>NH<sub>3</sub></b>	<b>Total</b>
<b>Metepec</b>	7.97	0.02	0.33	0.52	1.14	0.019	0.05	<b>10.02</b>
<b>San Mateo Atenco</b>	1.52	0.94	0.00	9.47	55.82	0.00	0.00	<b>66.82</b>
<b>Toluca</b>	14.14	0.87	16.51	4.2120	21.30	8.07	0.35	<b>64.58</b>

#### **3.3.1.6 Actividades económicas y uso de suelo**

##### ***Actividades económicas***

Las principales actividades económicas relevantes para este estudio, que se identificaron dentro de la ZMVT son: la actividad agrícola, minería, electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, construcción e industrias manufactureras.

El resto de las actividades económicas dentro de esta zona incluyen servicios educativos, de salud y asistencia social, comercio, servicios financieros y de seguros, servicios de alojamiento, información en medios masivos y actividades de gobierno. Por la naturaleza de estas actividades económicas no serán consideradas relevantes dentro de este estudio debido a que no representarán una posible fuente de emisiones de carbono negro.

Por otro lado, de la tabla 3.12 puede deducirse que la mayoría de los municipios tiene una contribución mucho más importante al PIB por la actividad industrial que en ellos se desarrolla en comparación con las actividades económicas relacionadas al aprovechamiento de los recursos naturales como agricultura, ganadería, pesca, caza y aprovechamiento forestal.

**Tabla 3.12 Producto Interno Bruto a precios constantes (millones de pesos de 2003) por sector de actividad económica según municipio en 2011. Fuente de datos: (IGCEM, 2012)**

Municipio	Total Industria	Minería	Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	Construcción	Industrias manufactureras
Metepec	3 973.9	7.0	72.1	3 082.8	812.0
San Mateo Atenco	4 384.0	0	9.7	23.7	4 350.5
Toluca	57 187.5	30.2	7 732.4	8 868.4	40 556.5
<b>Total</b>	<b>65,545.4</b>	<b>37.2</b>	<b>7,814.2</b>	<b>11,974.9</b>	<b>45,719</b>

Dentro de la clasificación de actividades económicas industriales se encuentran la minería, electricidad, agua y suministro de gas, construcción e industrias manufactureras. Los municipios de la ZMTV contribuyen al PIB en el rubro industrial mayoritariamente por sus industrias manufactureras.

El único municipio que tiene una aportación al PIB mayor a los otros dos municipios por un rubro diferente es Metepec, que tiene una aportación muy importante en la construcción. Esto probablemente se debe a este municipio es el que tiene una mayor Densidad Media Urbana y Densidad de Población en toda la región, lo cual ocasiona que este municipio requiera más servicios de salud, vivienda, vialidades, agua potable, drenaje, centros comerciales y otros servicios directamente relacionados con el desarrollo de infraestructura, lo cual se ve reflejado en la inversión a la construcción para satisfacer dichos requerimientos.

Como se puede observar en la tabla 3.12, Toluca, encabeza la lista de las aportaciones por el rubro de Industrias Manufactureras reportando 40 556 millones de pesos, seguida de San Mateo Atenco. Este dato nos indica que los municipios donde están presentes la mayoría de las industrias son Toluca y San Mateo Atenco.

La relación que se observa entre el PIB aportado por cada municipio en el rubro de la industria y el número de industrias manufactureras por municipio es directamente proporcional para cada uno de los municipios. Y es lógico que en Toluca estén asentadas más de 3,000 industrias manufactureras mientras que en Metepec solo se reportaron 900.

### **Uso de suelo**

En la tabla 3.13 se pueden observar las distribuciones en cada municipio del uso de suelo y la vegetación que están presentes.

**Tabla 3.13 Uso del suelo y vegetación en los municipios de la ZMVT. Fuente de datos: (INEGI, 2009).**

	<b>Toluca</b>	<b>Metepec</b>	<b>San Mateo Atenco</b>
<b>Uso de Suelo</b>	Zona urbana (37.18%)	Zona urbana (67.59%)	Zona urbana (76.06%)
	Agricultura (37.01%)	Agricultura (31.95%)	Agricultura (20.61%)
<b>Vegetación</b>	Bosque (14.02%),	Pastizal (0.46%)	Pastizal (3.0%)
	Pastizal (9.22%)		Otro (0.33%)
	Sin vegetación (1.1%)		

### 3.3.2 Número y distribución de sitios de muestreo

Debido a que la cantidad de pobladores dentro de esta región está dentro del rango 1-4 millones de habitantes al tener una población total de 1,106,302 mostrado en la tabla 3.6 Se propone que se establezcan 5 sitios de muestreo, 3 ubicados en zonas industriales o en la ciudad, y otras 2 en las zonas residenciales más vulnerables. Sin embargo, es necesario realizar un análisis para determinar cuál será el número y ubicación de las estaciones de monitoreo.

Actualmente existe una red de monitoreo para el Valle de Toluca que cuenta con 7 sitios de monitoreo para diferentes contaminantes, se hará un estudio para determinar si la ubicación de estos sitios de muestreo pueden ser representativos para el objetivo que se quiere lograr en la red de monitoreo de carbono negro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Sería favorable que los sitios de muestreo que se proponen para la red de monitoreo de carbono negro coincidan con los sitios actuales, esto representaría que se disminuyan los costos por instalación y mantenimiento.

### 3.3.3 Muestreo duración y frecuencia

Inicialmente se plantea que se haga un monitoreo durante un año con el objetivo de comprender de comportamiento de las concentraciones de carbono negro dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. El muestreo será continuo y se pretende que se alcance a cubrir toda la zona conurbada. Para esta zona es muy probable que sea necesaria la colocación de varios sitios de muestreo. La colocación geográfica de las fuentes podría resultar en que no existe un único sitio que represente el comportamiento del carbono negro en una escala urbana.

## Capítulo 4 Análisis de la propuesta de la red de monitoreo de carbono negro en la zona metropolitana del Valle de Toluca

Se dividirá la zona de interés en cuatro cuadrantes para analizar la region por secciones, también se hará un análisis para el centro de los cuadrantes que esta ubicado en el centro de la ciudad de Toluca. En la figura 4.1, se observa el mapa que representa la zona de estudio dividida en cuatro cuadrantes.

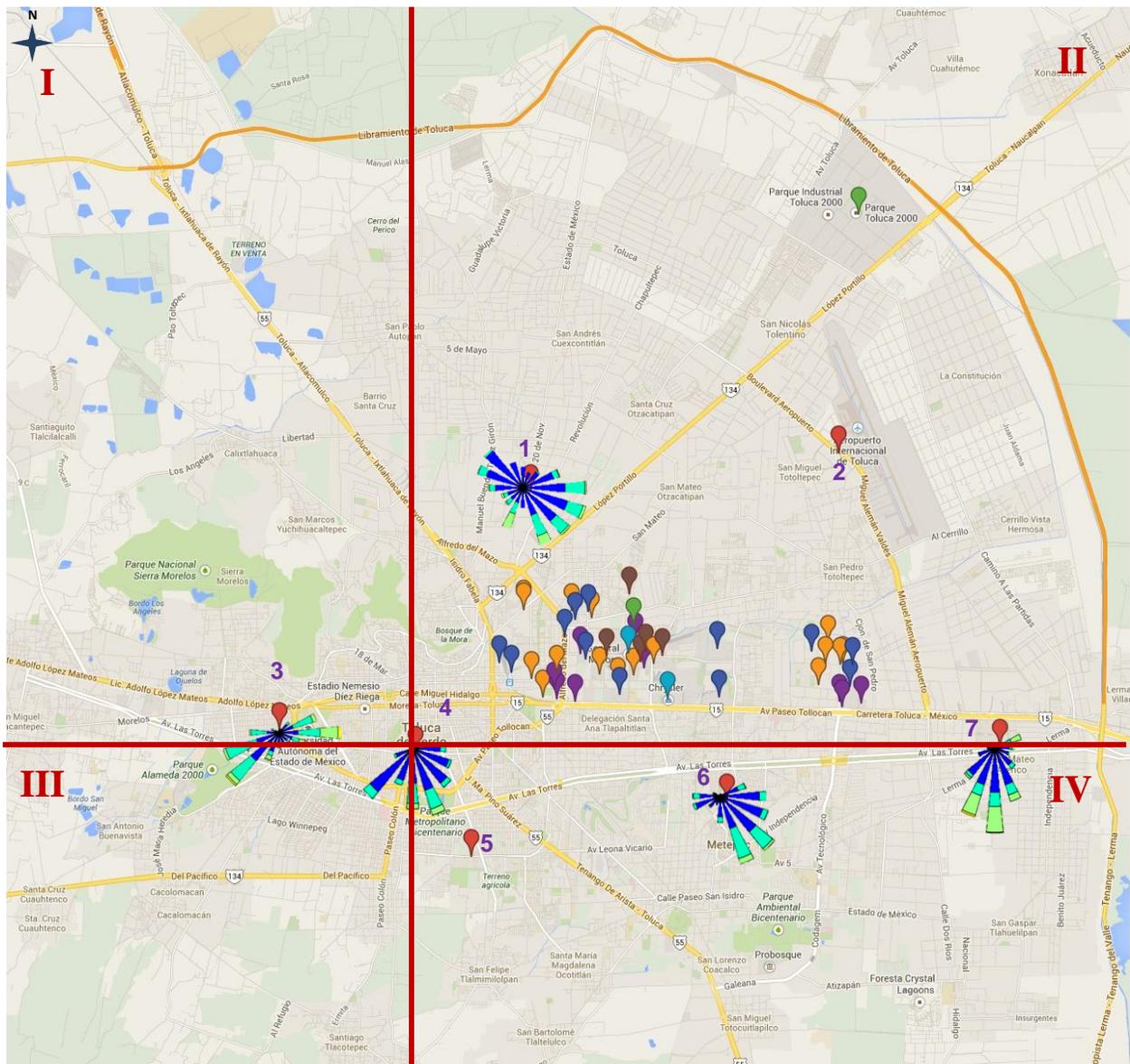


Figura 4.1. Zona de estudio y sus puntos de interés.

Fuente: [https://mapsengine.google.com/map/edit?mid=zzfsAwFRqGeg.kh\\_vpHvm2abo](https://mapsengine.google.com/map/edit?mid=zzfsAwFRqGeg.kh_vpHvm2abo)

Se determinó que la zona de estudio contendría únicamente las zonas urbanas de Toluca, Metepec y San Mateo Atenco. Para fines prácticos, no se incluyeron las zonas cercanas a Toluca que no se encontraban en la zona conurbada y que no presentaban una densidad de población alta, por ejemplo, el Parque Nacional del Nevado de Toluca.

En la figura 4.1, se observa que se han agregado algunos puntos de interés para realizar dicho análisis. Se han identificado las industrias presentes en esta zona, los parques industriales, los establecimientos de transporte de carga, aeropuertos y las principales vialidades por donde transitan los camiones de carga. De igual manera, se consideraron las estaciones de monitoreo existentes actualmente y se agregaron los patrones del viento para los puntos para los que existía información histórica. En la tabla 4.1, se muestra la simbología del mapa señalado y en la tabla 4.2, se mencionan los sitios de muestreo que existen actualmente en esta zona.

**Tabla 4.1 Simbología de la zona de estudio**

Símbolo	
	Estaciones de monitoreo actuales
	Industria de los alimentos
	Parques industriales
	Industria Química
	Otras industrias manufactureras
	Estaciones de transporte de carga

**Tabla 4.2 Estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo del Valle de Toluca (INECC, 2014)**

Número en el mapa	Estación de monitoreo
1	San Cristobal
2	Aeropuerto
3	Oxtotitlán
4	Toluca Centro
5	Cerobuco
6	Metepec
7	San Mateo Atenco

Inicialmente se hará un análisis por cada cuadrante para ubicar las posibles fuentes de carbono negro. Posteriormente, se hará un análisis utilizando datos de la calidad del aire para determinar cuales zonas podrían ser más vulnerables (INE, 2011). Se hará un análisis utilizando un modelo de retro trayectoria para una estación de monitoreo existente. Finalmente, se propondrá un modelo de la red de monitoreo de carbono negro que sea representativa de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Para poder realizar un análisis de cada cuadrante se necesita tener información suficiente de las posibles fuentes emisoras de carbono negro, en la figura 4.1 se han identificado las fuentes mayoritariamente contribuidoras. Es importante destacar que a pesar de que Metepec y San Mateo Atenco no cuentan con fuentes potencialmente peligrosas, su importancia dentro de este estudio es originada por la alta densidad poblacional que tienen.

## 4.1 Centro

Se decidió tener una distribución de los cuadrantes con respecto al centro Toluca, esto nos permitiría hacer un análisis que parte del centro de la ciudad hacia la periferia.

Se observa que en la estación 4, denominada Toluca Centro, los vientos vienen predominantemente tanto del sureste como del suroeste, por lo cual, se esperaría que los contaminantes generados en este sector se desplazarán hacia el noroeste y noreste. Los vientos predominantemente se desplazan hacia el norte, por lo que los contaminantes generados por estas industrias afectarán principalmente a los cuadrantes I y II. Es por eso que en esta zona la industria no representa una fuente importante de carbono negro.

## 4.2 Cuadrante I

En el primer cuadrante se observa que no hay presencia de industria, sin embargo, hay fuentes móviles como camiones de carga que se trasladan por las vialidades principales. Por otro lado, los contaminantes generados por la alta densidad industrial en el cuadrante II podrían ser transportados ligeramente hacia el noroeste lo que impactaría las

concentraciones en el cuadrante I. En la figura 4.2 se puede observar que no se encontraron industrias en este cuadrante. Se localizaron las avenidas y carreteras importantes.

Las vialidades principales en esta sección son:

- Libramiento de Toluca
- La carretera federal 55 Toluca-Ixtlahuaca de Rayón
- Lic. Adolfo López Mateos

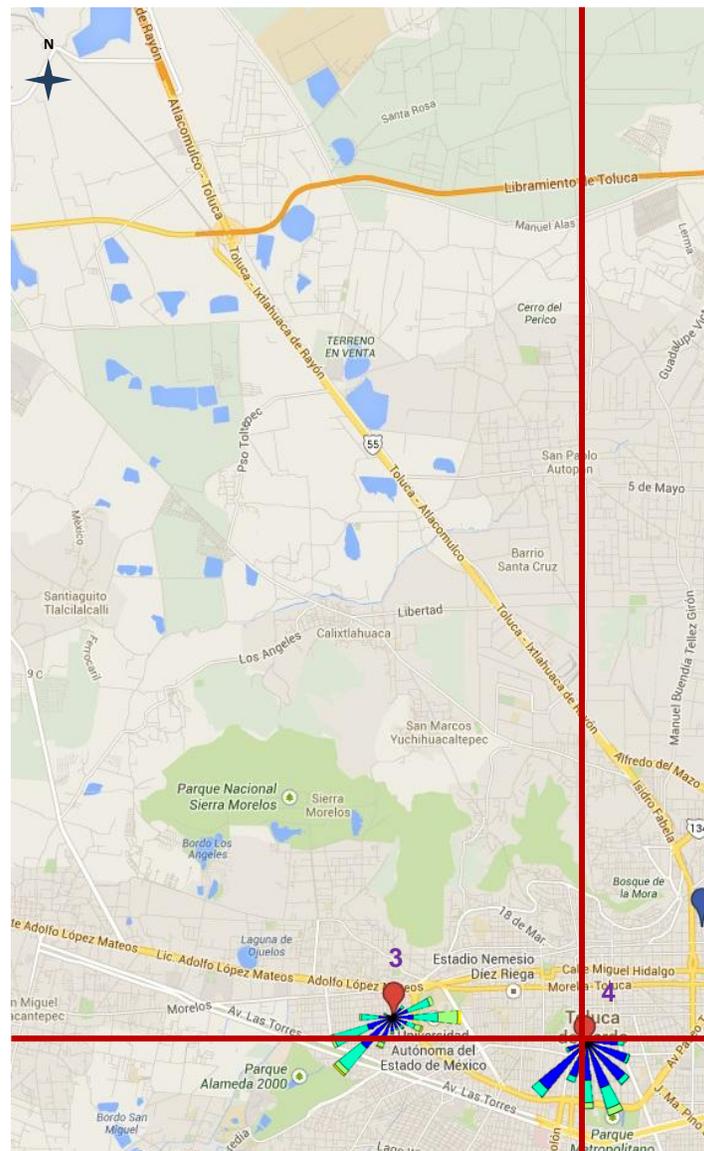


Figura 4.2. Cuadrante I.

El cuadrante está delimitado al sur por el Parque Nacional Sierra Morelos, es por eso que no se hace la consideración de los vientos provenientes del sur ya que la Sierra de Morelos actúa como una barrera geográfica que impediría el transporte de los contaminantes generados en el cuadrante III.

Dentro de este cuadrante está ubicada la estación número 3 Oxtotitlán, se determinó partir de datos históricos que los vientos provienen principalmente del este y suroeste.

Es probable que para este cuadrante no sea forzoso proponer una estación de monitoreo, sin embargo, es necesario realizar el análisis para cada uno de los cuadrantes y determinar que sería lo más favorable para toda la zona.

### 4.3 Cuadrante II

En el segundo cuadrante se encuentra concentrada prácticamente toda la industria de la zona, esto a su vez implica que habrá una alta circulación de vehículos de carga.

En la parte noreste del cuadrante se encuentra ubicado el Parque Industrial Toluca 2000, dentro de este parque se localizan industrias en el giro de farmacéutica, alimentos, automotriz y autopartes, químicos, detergentes y jabones, textil, plásticos, estructuras y productos metálicos y otras industrias (Toluca 2000, 2014). Se puede observar la ubicación de este parque industrial en la figura 4.3.

Así mismo hacia el este se ubica el aeropuerto Internacional de Toluca; entre las capacidades que tiene este aeropuerto es que puede atender a más de 1,850 pasajeros por hora, lo que representaría realizar hasta 36 operaciones aéreas por hora. La infraestructura tiene la capacidad de atender a más de 8 millones de pasajeros por año. Este aeropuerto atendió a más de 4.5 millones al cierre de 2008 (Vuela Toluca, 2014).

Las principales avenidas que se encuentran localizadas dentro de este cuadrante son:

- Libramiento de Toluca
- Autopista Toluca-Naucalpan 134 que se convierte en López Portillo

- Boulevard Aeropuerto/ Miguel Alemán Valdés
- Avenida Paseo Tollocán

Así mismo dentro de esta región está ubicada la estación de monitoreo 1, denominada San Cristóbal. En la figura 4.3, se observa la rosa de vientos para esta estación que se ha calculado con datos históricos disponibles.

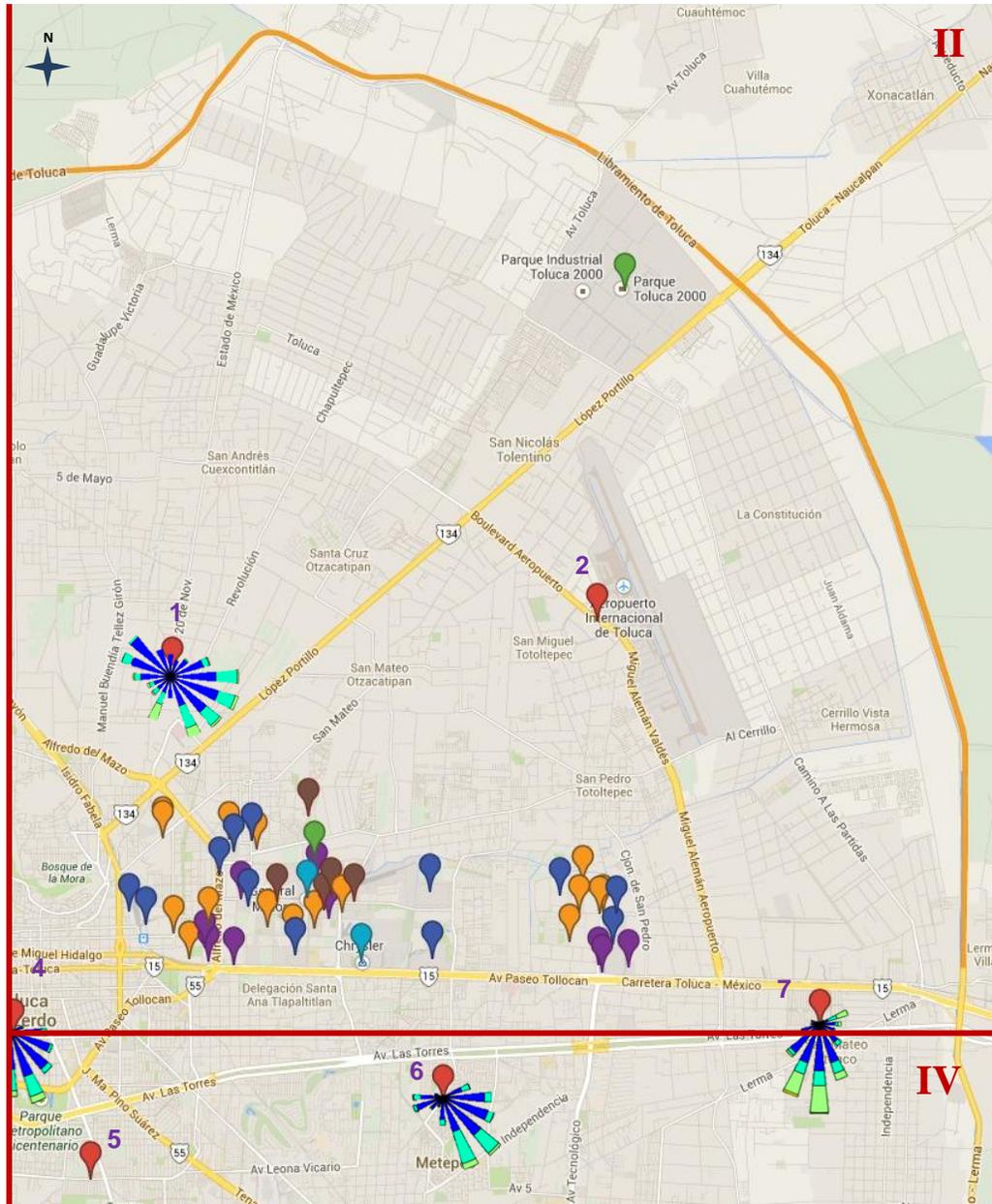


Figura 4.3. Cuadrante II y IV.

Para la estación de monitoreo 2, ubicada en el aeropuerto, no se encontraron datos históricos suficientes para realizar la rosa de vientos. Mientras que, para la estación 7, ubicada en San Mateo Atenco, si se pudo constituir la rosa de vientos y se puede observar en la figura 4.3 que los vientos predominantemente viajan de sur a norte por lo que podría suponerse que el carbono negro producido en el aeropuerto se transportará hacia el norte. Por otra parte, el carbono negro producido en el parque industrial Toluca 2000, se desplazará hacia una zona que no tiene una concentración alta de población. Sin embargo, dado que este parque industrial contiene más de 100 industrias manufactureras (Toluca 2000, 2014) sería importante colocar una estación de monitoreo para determinar la aportación de la concentración de carbono negro en el valle de Toluca por estas industrias.

Por otra parte, la importante concentración industrial que se encuentra al sur del cuadrante II podría representar una alta producción de carbono negro, que de acuerdo a la rosa de vientos de la estación 6, ubicada en Metepec, se va a desplazar hacia el noroeste justo donde está ubicada la estación de monitoreo 1.

#### 4.4 Cuadrante III

Las zonas de relevancia dentro del cuadrante III, principalmente incluyen zonas residenciales, así como el centro de Toluca y la Universidad Autónoma del Estado de México. En la figura 4.4, se observan varias vialidades importantes en este cuadrante, entre estas se incluyen:

- Avenida Paseo Tollocán
- Avenida Las Torres
- Paseo Colón

Las fuentes que se deberán tomar en cuenta en este cuadrante, para determinar la ubicación de la estación de muestreo, serán las fuentes móviles, camiones de carga y automóviles. Se deberá considerar que en esta zona están presentes más de 3 vialidades altamente transitadas.

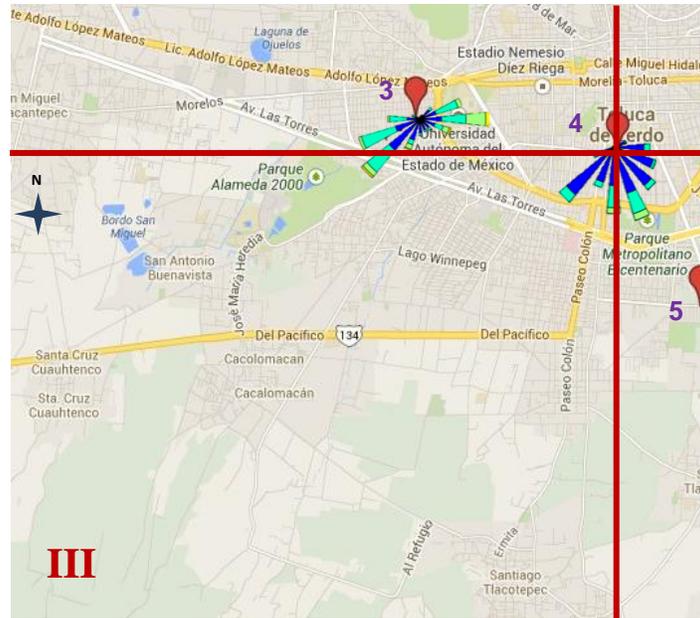


Figura 4.4. Cuadrante III

#### 4.5 Cuadrante IV

Podemos observar que en este cuadrante se encuentran dos estaciones de monitoreo: la número 5, llamada Cerobuco y la número 6, en Metepec. Como se observa en la figura 4.5 los vientos viajan predominantemente hacia el noroeste. Esto significa que los contaminantes generados en el sur de este cuadrante afectarán principalmente a las zonas que se encuentren al norte, es decir, los cuadrantes I y II se verán significativamente afectados por las emisiones generadas en este cuadrante.

Por otro lado, las principales vialidades que se encuentran dentro de esta zona son:

- Carretera Federal 55 Tenango de Arista - Toluca
- Avenida las Torres
- Autopista Tenango del Valle – Lerma

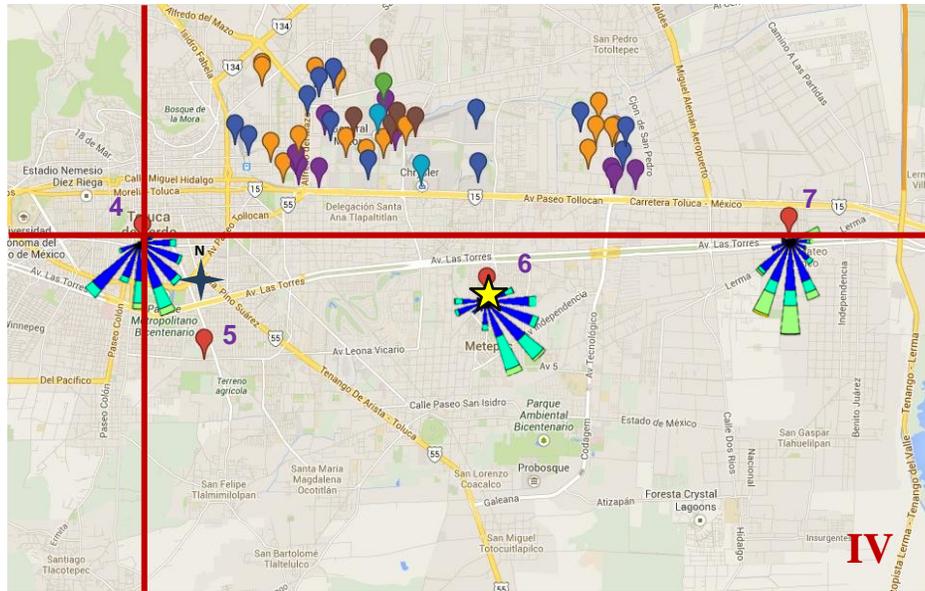


Figura 4.5. Cuadrante IV.

#### 4.6 Análisis de la calidad del aire en la ZMVT

El almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire realizado por el INE (INE, 2011), nos ayudará a hacer un análisis de la calidad del aire en esta zona conurbada. Este documento proporciona datos de las concentraciones de gases criterio y material particulado,  $O_3$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  y  $PM_{10}$ .

Inicialmente se deseaba hacer un análisis del comportamiento en las concentraciones del material  $PM_{2.5}$  en esta región debido a su fuerte relación con el carbono negro, a falta de datos de  $PM_{2.5}$  se decidió hacer un análisis del comportamiento de  $PM_{10}$  y determinar el posible comportamiento del carbono negro en la zona. Se parte de la premisa que el carbono negro, al ser un contaminante particulado, representará un porcentaje del material total particulado. De esta forma, donde se observen datos de  $PM_{10}$  elevados, también será muy posible que se encuentren valores altos de concentración de carbono negro. Los cuáles serán corroborados posteriormente por el monitoreo de carbono negro propuesto.

Considerando la gráfica de concentraciones espaciales promedio en 24 horas que se muestra en la figura 4.6, se determinó que la estación San Cristobal, la cual mantiene

periodos elevados de material particulado y se encuentra muy cercana a la zona industrial de Toluca, es una estación receptora.

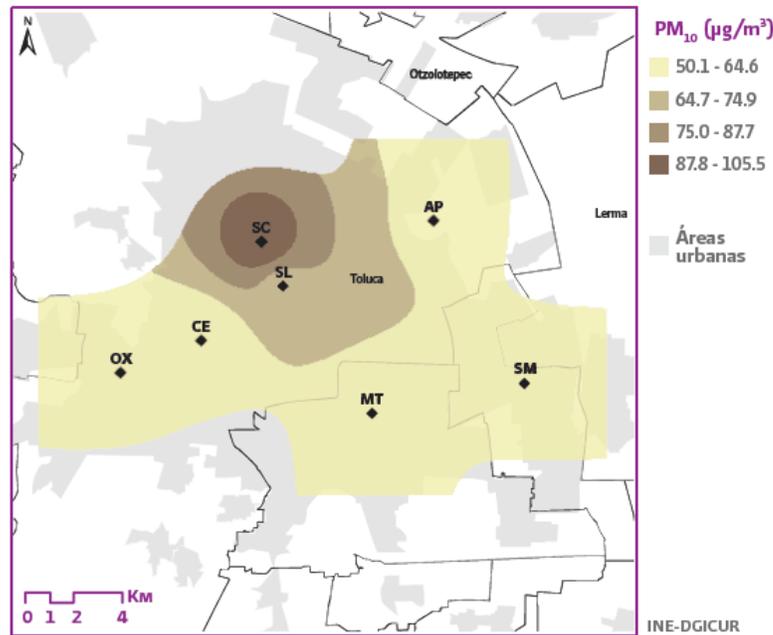


Figura 4.6. Representación espacial de las concentraciones promedio de los promedios diarios de 24 horas. Fuente: (INE, 2011)

Con base en el análisis de la información de la calidad del aire en la ZMVT (INE, 2011), donde se indica que la estación San Cristobal ha registrado entre 2002 y 2009 grandes concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>. Se observa que incluso los valores medidos para esta estación de monitoreo exceden los valores máximos que establecen las normas 50 µg/m<sup>3</sup> que es el límite anual promedio y 120 µg/m<sup>3</sup> límite de 24 horas.

En la figura 4.7, se observa la gráfica que muestra que en todas las estaciones de monitoreo actuales en la ZMVT se ha excedido el valor de la concentración que la norma establece en un límite de 50 µg/m<sup>3</sup>. En comparación con el resto de las estaciones de monitoreo, la estación de San Cristobal presenta una desviación considerable en el límite anual promedio.

En la estación de San Cristobal se ha excedido, prácticamente al doble, el valor permisible por la norma a partir del 2003. En la figura 4.6 se observa que las concentraciones medidas para PM<sub>10</sub> no han bajado de los 75 µg/m<sup>3</sup> desde 2002, y que se alcanzó un máximo de 150 µg/m<sup>3</sup> en 2006.

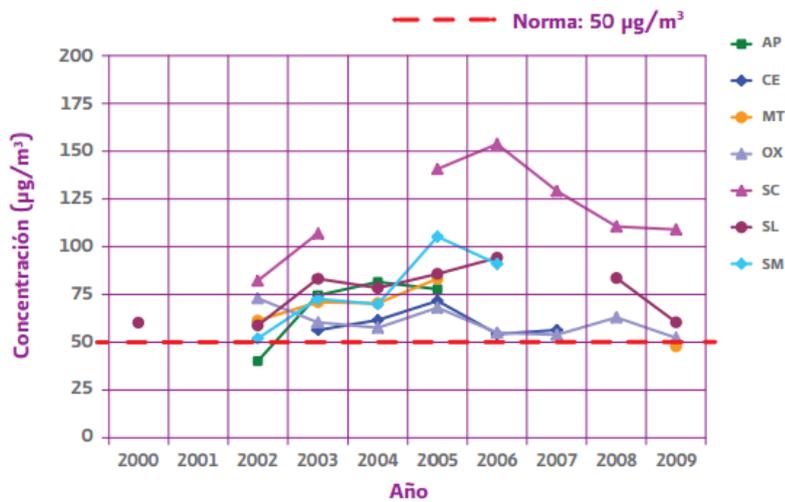


Figura 4.7. Representación del límite anual (promedio anual de los promedios de 24 horas)  
Fuente: (INE, 2011)

Por otro lado, en la figura 4.8 se observa que tampoco se cumple con la norma de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas. De igual forma que en la figura anterior, se observa que la mayoría de las estaciones de monitoreo exceden el valor máximo establecido por las normas. Nuevamente, la estación de San Cristobal rebasa la cifra máxima de concentración permisible, en 2005 se alcanzó un máximo que rebasó los  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En 2008 y 2009 estos valores se mantuvieron cercanos a los  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El resto de las estaciones se mantuvieron en general por debajo de los  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

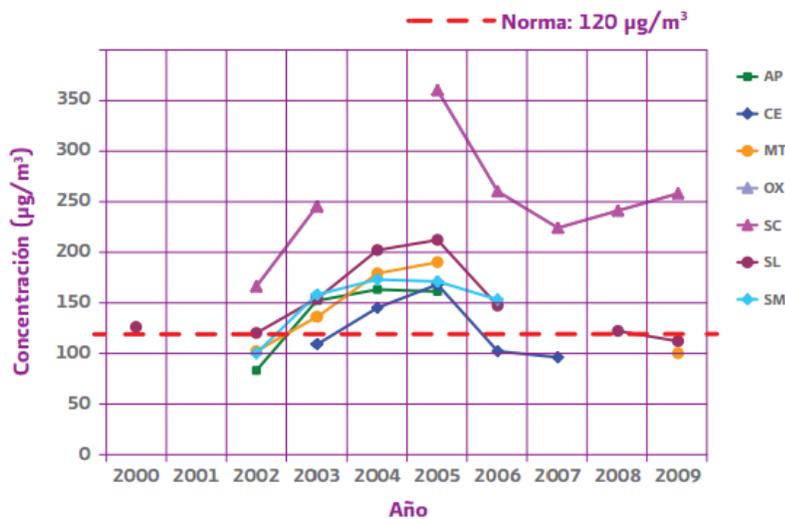


Figura 4.8. Representación espacial de las concentraciones promedio de los promedios diarios de 24 horas.  
Fuente: (INE, 2011)

Debido a que la estación de San Cristobal presenta las mayores concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  a lo largo de los años. Se propone hacer un análisis con un modelo de trayectorias y determinar qué fuentes de emisión de carbono negro está influenciando a esta estación. El análisis se hará en la siguiente sección.

## 4.7 Análisis con modelos de trayectoria

Los modelos de trayectoria requieren grandes bases de datos meteorológicas para proveer vientos en los tiempos, coordenadas y altitudes necesarias (Ortínez, Basaldud, Kahl, & et al., 2012). Una trayectoria representa la suma de las condiciones meteorológicas en diferentes lugares en función del tiempo. Los modelos de trayectoria tienen dos opciones para realizar el análisis:

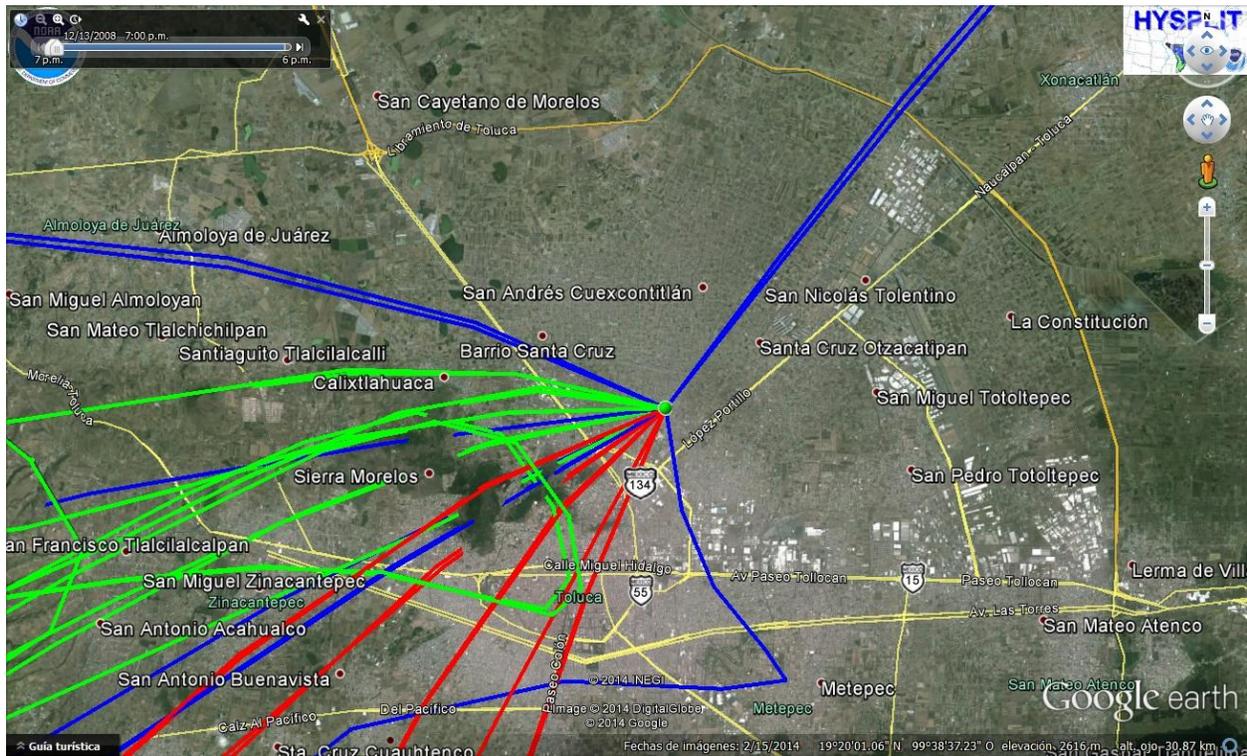
- Trayectoria: nos proporciona datos de la dirección de los vientos que parten del punto de interés.
- Retro-trayectoria: nos ayuda a conocer la trayectoria de los vientos que se dirigen al punto de interés.

Uno de los modelos comúnmente utilizados es HYSPLIT. El modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrado Trayectoria) es la versión más reciente de un sistema completo para el cálculo de trayectorias de partículas simples en el aire, dispersión y simulaciones complejas de deposición (NOAA, 2009).

Se propuso la evaluación del sitio San Cristobal mediante la implementación de un modelo de retro-trayectorias para entender mejor qué fuentes están influenciando este sitio. Para poder hacer una corrida del modelo es necesario conocer las coordenadas de latitud y longitud de un punto de interés.

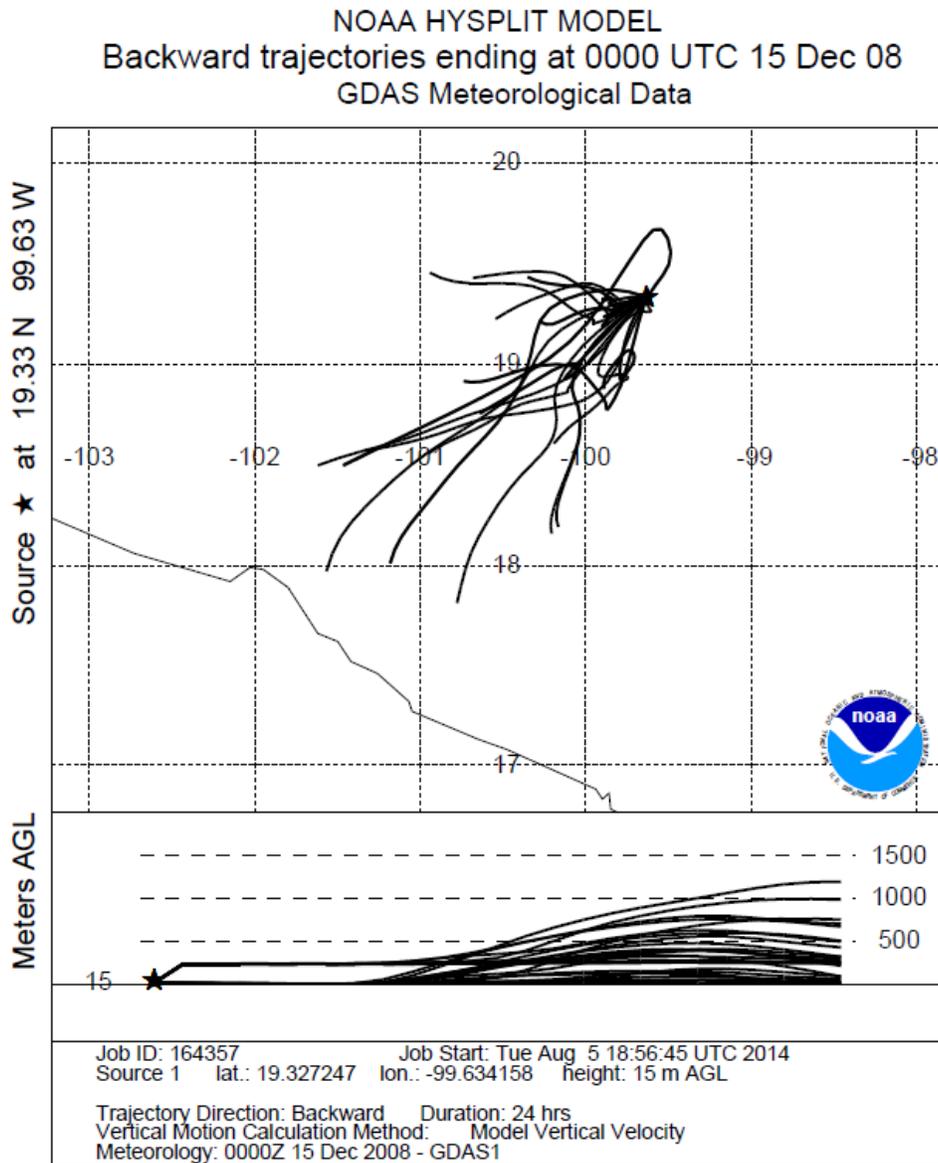
Se realizaron dos corridas de retro-trayectoria del modelo HYSPLIT con la finalidad de evaluar posibles contribuciones de fuentes de emisión cercanas al sitio de monitoreo. El modelo para ambas corridas nos permitió observar como la zona industrial centro y principales avenidas de la ZMTV son posibles fuentes en general de material particulado el cual posiblemente transporte y genere carbono negro.

En la primera corrida realizada para el 15 de Diciembre de 2008, que se muestra en la figura 4.9, se observa que los vientos provienen primordialmente del suroeste. Esto nos indicaría que el sitio San Cristobal podría estar influenciado por la zona residencial del centro de Toluca, el transporte que circula en las principales vialidades como Calle Miguel Hidalgo, Adolfo Lopez Mateos/ Morelia Toluca, Isidro Fabela, Carretera Toluca Atlacomulco.



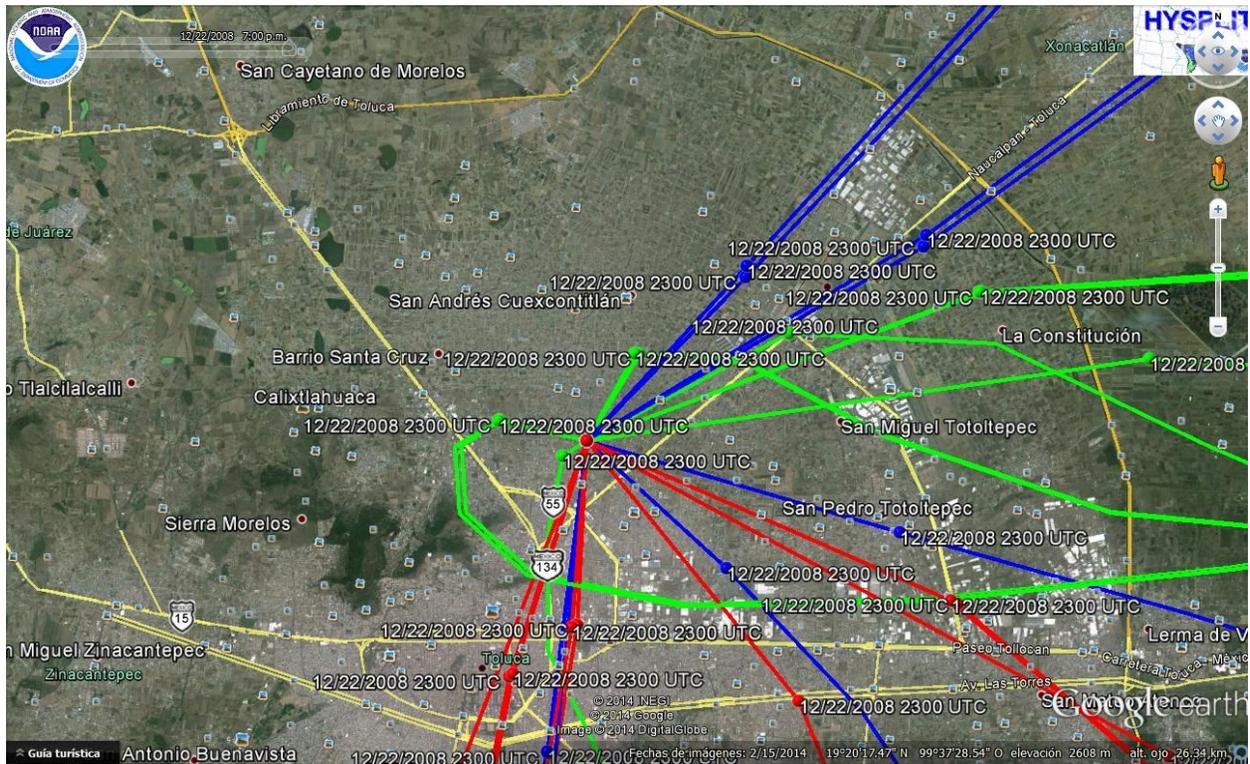
**Figura 4.9. Primera corrida del modelo de HYSPLIT (15/Diciembre/2008)**  
**Fuente: (NOAA's Office of Atmospheric Research, 2013)**

Como se puede observar la figura 4.10, la mayoría de las masas de viento son superficiales por lo que serían cercanas al sitio de muestreo y no son lejanas como se podría interpretar del modelo. Normalmente se mantienen a un nivel menor de los 500 metros sobre el nivel del suelo, sin embargo, hay algunas variantes que exceden los 1000 metros.



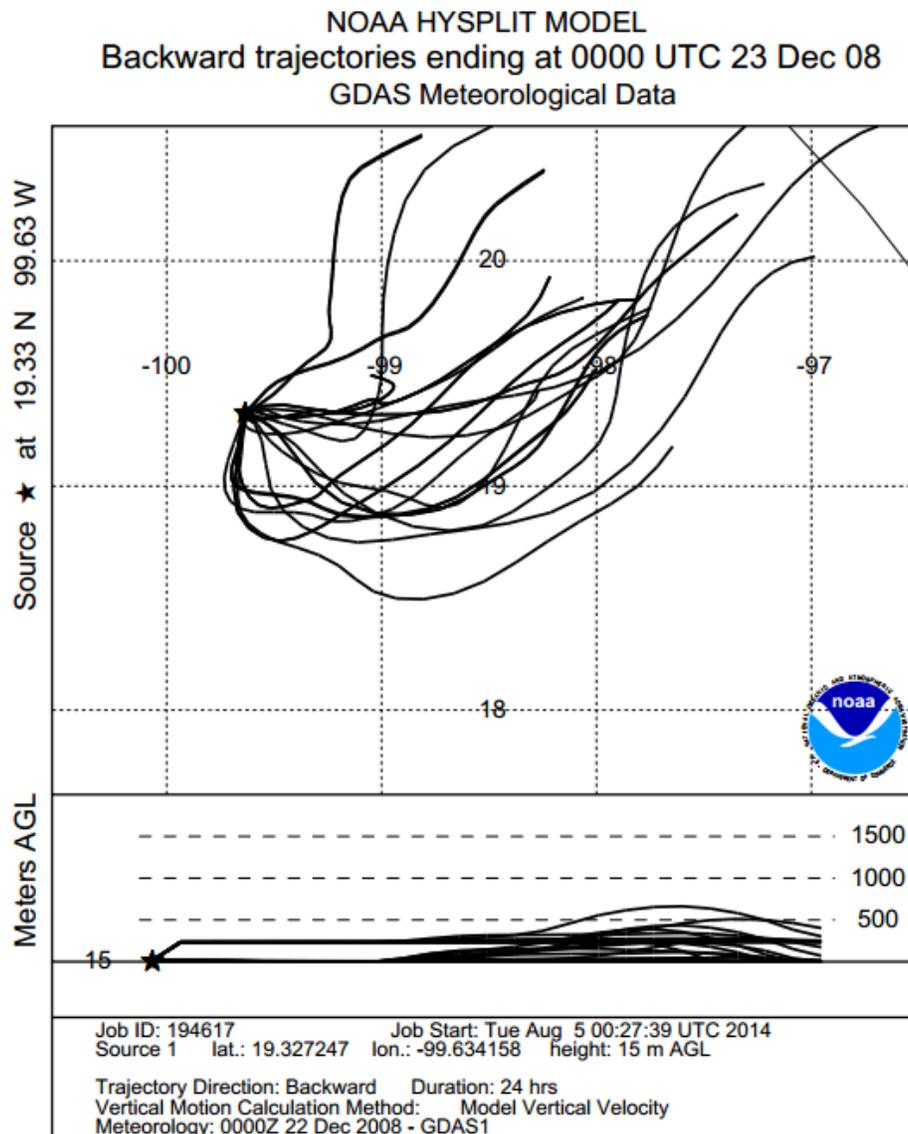
**Figura 4.10. Gráfica de retro-trayectorias (15/Diciembre/2008)**  
**Fuente: (INE, 2011)**

La segunda corrida se muestra en la figura 4.11, en esta imagen se observan que los vientos vienen predominantemente del sur, sureste y este. Se puede esperar entonces que el carbono negro producido en la importante zona industrial al sureste de la estación San Cristobal sea transportado y depositado en la periferia de la estación de monitoreo y esto podría explicar los altos niveles de concentraciones de  $PM_{10}$ .



**Figura 4.11. Primera corrida del modelo de HYSPLIT (22/Diciembre/2008)**  
**Fuente: (NOAA's Office of Atmospheric Research, 2013)**

De igual forma, al analizar la figura 4.12, la gráfica nos indica que las masas de viento provienen de sitios cercanos al área de monitoreo porque son superficiales. La mayoría de las masas de viento viajan a una altura sobre el nivel del suelo menor a 500 metro. Esto podría confirmar que las contribuciones de material particulado a esta estación de monitoreo provienen de las chimeneas de la industria y del transporte de carga que transita por Av. Paseo Tollocán y Av. Las Torres.



**Figura 4.12. Gráfica de retro-trayectorias (22/Diciembre/2008)**  
 Fuente: (INE, 2011)

Este análisis complementa la evaluación de los datos obtenidos de la dirección de las rosas de viento, las cuales indican vientos prevalecientes al sitio de monitoreo con contribuciones de masas del viento del sur y sureste, al hacer estas corridas se puede observar que efectivamente los vientos provenían del sur y que este sitio está influenciado tanto por la industria como por el transporte.

## 4.7 Propuesta

Se decidió realizar una propuesta de red de monitoreo de carbono negro con base en las estaciones de monitoreo existentes.

Se propone la siguiente metodología para la evaluación del carbono negro:

- 1) Evaluación del sitio San Cristobal como la más alta prioridad por ser un sitio con concentraciones elevadas de material particulado y estar dentro de una zona receptora urbana.
- 2) Como segundo punto de monitoreo, se propone a la estación San Mateo Atenco por encontrarse con episodios elevados de material particulado y estar dentro de una zona industrial. Esta zona es vulnerable por su alta concentración poblacional, por lo que sería conveniente que la estación de monitoreo se ubique dentro de la zona residencial. Se propone que se unifiquen las estaciones de monitoreo existentes de Metepec y de San Mateo Atenco en una sola que represente la concentración global de esta zona residencial.
- 3) Finalmente, se propone que la estación Aeropuerto, a pesar de que en esta zona se presentaron pocos episodios de concentraciones muy elevadas de  $PM_{10}$ , será considerada por encontrarse cerca de una zona periurbana y semi industrializada.

Se ubicaron los puntos en el mapa que se proponen para ser las estaciones de monitoreo de carbono negro. Se pueden observar los puntos con estrellas amarillas en la figura 4.13.

Se plantea que la red cuente con 3 puntos representativos que realizarán el monitoreo continuo. Se utilizarán 3 estaciones ya existentes que son San Cristóbal, San Mateo Atenco y Aeropuerto.

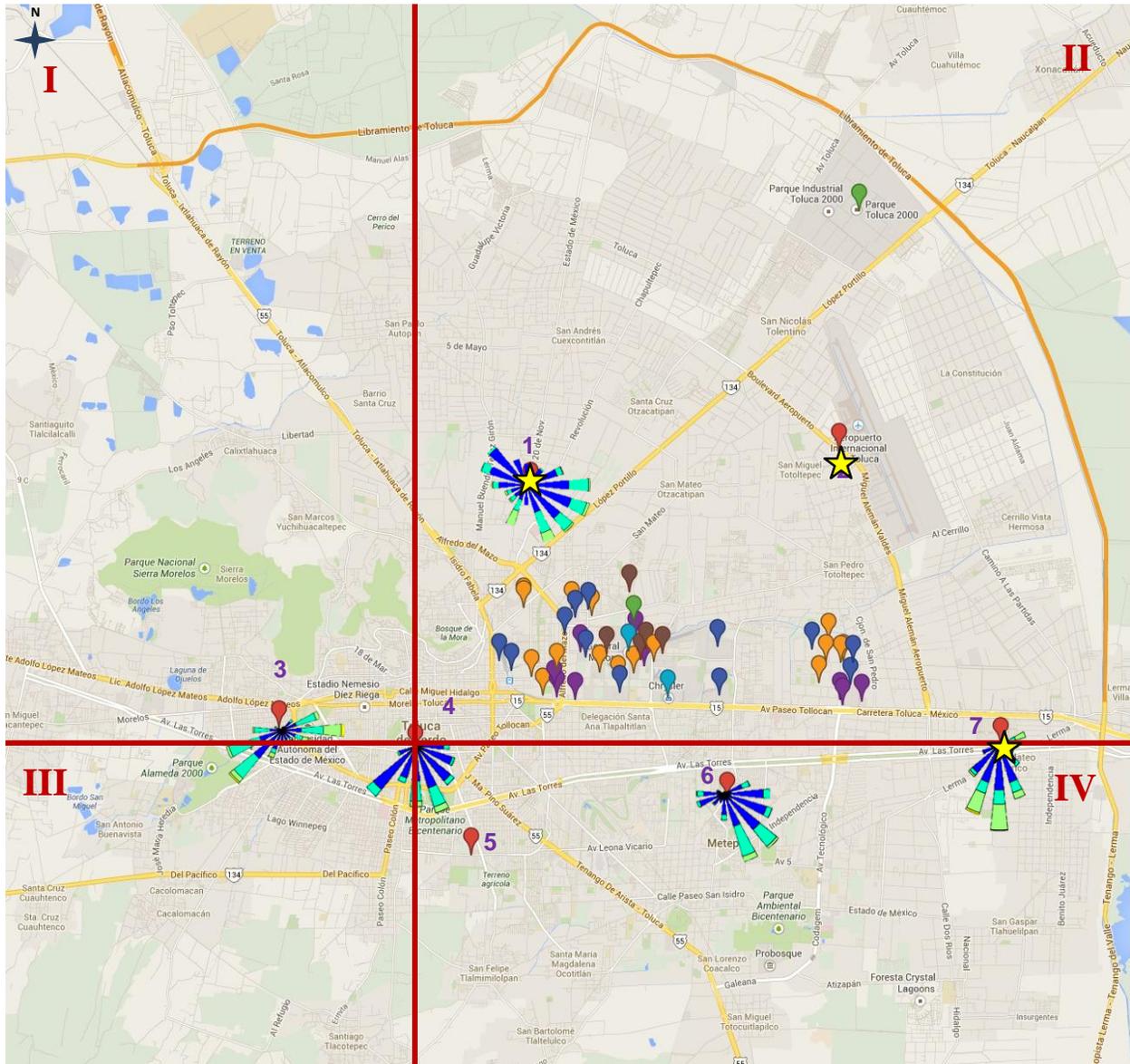


Figura 4.13. Propuesta de la Red de Monitoreo de Carbono Negro en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

## Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentarán algunas conclusiones referentes a este trabajo y se hará una serie de recomendaciones para trabajos futuros que puedan tomar como base el análisis realizado en este documento.

### 5.1 Conclusiones

Debido a las actuales condiciones del calentamiento global y la naturaleza de los Contaminantes Climáticos de vida Corta, el no hacer acciones inmediatas con respecto a estos contaminantes impactarán al cambio climático en los siguientes 20 años y sus efectos podrían ser irreversibles si no se toman medidas en un corto plazo.

De la presente investigación, se deduce que es muy importante conocer los procesos de formación, generación y transporte del carbono negro, que permitirá comprender y revisar las principales fuentes de emisión y su comportamiento en la atmósfera para determinar cuáles áreas territoriales serán vulnerables.

El conocer la relación entre el carbono negro y  $PM_{2.5}$ , puede orientar a ubicar mejor las fuentes de emisión y por lo tanto se podrían encontrar las mejores estrategias y estudios para mitigar y controlar las emisiones de carbono negro.

Las áreas más vulnerables son zonas con una densidad de población alta: por lo tanto, será necesario implementar acciones de prevención en dichas áreas para los siguientes años debido a los efectos negativos que la exposición a este contaminante presenta sobre la salud humana.

El carbono negro es producido en reacciones de combustión de baja eficiencia, ocasionada por el tipo de combustible y se encuentran relacionadas con pérdidas de presión en la atmosfera. En la ZMVT a una altura sobre el nivel del mar que excede los 2500 metros las concentraciones atmosféricas de  $O_2$  no serán suficientes para completar la reacción.

Con base al área de estudio (Zona Metropolitana del Valle de Toluca), se determinó que la población de Metepec es altamente vulnerable debido a que se encuentra localizada considerablemente cerca a la zona industrial más importante dentro del Valle de Toluca y es transitada por una cantidad significativa de vehículos de carga sobre el Paseo Tollocán.

El realizar un análisis de las rosas de los vientos, y la incorporación de modelos de trayectoria durante la investigación ayudó a mejorar la calidad del análisis. Lo anterior permitió concluir que la ZMVT presenta niveles considerables de carbono negro en áreas residenciales y altamente pobladas.

El diseño e implementación de una metodología para realizar una red de monitoreo de carbono negro a partir de datos disponibles o para estudios posteriores en los que se desee entender mejor el comportamiento de este contaminante, se deberá tomar en cuenta:

- La ubicación de fuentes potenciales que incluyen las industrias, aeropuertos, vehículos motorizados y otras fuentes de combustión.
- La naturaleza de la industria.
- Las principales vialidades y el tipo de transporte que transita estas avenidas y carreteras.
- La distribución y concentración poblacional.
- Las estaciones de monitoreo existentes actualmente y el comportamiento de los vientos.
- El estudio de la información del almanaque de calidad del aire para PM<sub>10</sub>.
- El análisis de los datos proporcionados por los modelos de trayectoria.

## 5.2 Recomendaciones

En este estudio se encontró que actualmente el carbono negro es un contaminante que requiere estudios para comprender su impacto en el cambio climático y la salud humana. Por lo que se recomienda desarrollar e implementar proyectos para evaluar las concentraciones ambientales de la ZMTV, y otras ciudades de México. Así como tener mejores datos y un adecuado monitoreo de gases criterio para poder hacer un análisis mucho más certero. Se recomienda desarrollar estrategias de mitigación de carbono negro tempranas para amortiguar el incremento global de la temperatura en el corto plazo.

Principalmente se recomienda realizar un análisis de los recursos, infraestructura, datos, e información meteorológica disponible para optimizar la propuesta que se plantea en este documento. Así mismo, se sugiere optimizar costos por instalación y operación, cuya estimación no se encontraba dentro de los alcances de este trabajo. De igual forma determinar el personal disponible que se hará cargo de realizar el monitoreo y aseguramiento de los datos obtenidos. También se recomienda hacer un análisis de los equipos y metodologías que se emplearán en las mediciones de las concentraciones de carbono negro, complementar esta información con estudios realizados previa o posteriormente para determinar qué equipos y cuáles técnicas serían más convenientes utilizar en esta monitoreo continuo.

Igualmente sería conveniente que se haga un estudio para la zona cercana al aeropuerto y al Parque Industrial Toluca 2000, ya que en esa zona no se encontraron datos históricos que permitieran construir la rosa de vientos, y por lo tanto, no se cuenta con la información suficiente para determinar el comportamiento que tendrá el carbono negro producido en el aeropuerto y en este importante parque industrial.

En esta investigación únicamente se hicieron corridas del modelo de HYSPLIT para la estación de San Cristobal ya que se consideró como el punto con mayor prioridad. Sería conveniente analizar, en un estudio más riguroso, la representatividad de cada estación de monitoreo para determinar si las ubicaciones son realmente adecuadas, implementando modelos de trayectoria en cada uno de ellos.

Así mismo, es conveniente mejorar el inventario de emisiones y su ubicación ya que en este reporte se tomaron datos disponibles en INEGI. Sin embargo, algunos datos no se pudieron consultar debido a ley del sistema nacional de información estadística y geográfica que establece la confidencialidad de la información.

Finalmente, es altamente recomendable realizar un análisis con los datos históricos disponibles en las estaciones de muestreo para comparar las concentraciones de monóxido de carbono en los diferentes puntos. En la teoría se ha encontrado que el carbono negro siempre está acompañado principalmente de monóxido de carbono (Peña, 2014), por lo

tanto, en lugares que presenten concentraciones altas de CO se esperará que las concentraciones de carbono negro sean similares. En este trabajo no se logró hacer un análisis de esta índole ya que no se contaba con los datos suficientes para poder realizar un comparativo.

## Bibliografía

- 40 CFR 58. (2013, July 1). Code of Federal Regulations. *Title 40: Protection of Environment, Part 58, Appendix D*. Washington, District of Columbia, U.S.: Office of the Federal Register National Archives and Records Administration.
- COESPO. (2012). *Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Aspectos sociodemográficos*. Toluca: Consejo Estatal de Población.
- Cruz, X. (2013, Septiembre 1). Oportunidades de mitigación de cambio climático: Forzadores de vida costa en el transporte de la Ciudad de México. *Revista Digital Universitaria*, 14, 12.
- EPA. (2012). *Report to Congress on Black Carbon*. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act. New York: U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2013). *QA Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II*. Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division. New York: U.S. Environmental Protection Agency.
- Estrada, M. P. (2001). Cambio Climático Global: causas y consecuencias. (J. A. Lara, & J. C. Morones, Eds.) *Notas revista de información y análisis*, 16, 89.
- Fuller, G., & Connolly, E. (2012). *Reorganisation of the UK Black Carbon Network*. King's College London for Defra and the Devolved Administrations. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Gay, C., Estrada, F., & Martínez, B. (2010, Noviembre). Cambio Climático y Estadístico Oficial. (A. Ortega, Ed.) *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1, 7.
- Hansen, A. (2005). *The Aethalometer*. Berkeley, California, USA: Magee Scientific Company.
- IGDS. (2013, April 23). *Primer on Short-Lived Climate Pollutants*. Retrieved 11 12, 2013, de Institute for Governance & Sustainable Development Sitio web: <http://www.igsd.org/documents/PrimeronShort-LivedClimatePollutantsElectronicVersion.pdf>
- IGECEM. (2012). *Producto Interno Bruto Municipal*. Toluca: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México.
- INE. (1997). *Claro!... con tu participación Aire Limpio*. Toluca: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- INE. (2011). *Cuarto Almanaque de datos y tendencias de calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. Mexico, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

- INECC. (2008). Junio 06, 2014, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático sitio web: <http://www2.inecc.gob.mx/dgicurg/calair/tend/horarias/concentra.php>
- INECC. (2013, Julio 05). *Contaminantes Criterio*. Agosto 11, 2014, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático Sitio de Internet: <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>
- INECC. (2014). *Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental*. Mayo 29, 2014, de Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire Sitio web: [http://sinaica.ine.gob.mx/rama\\_zmvt.html](http://sinaica.ine.gob.mx/rama_zmvt.html)
- INEGI. (2008). *Censo Económico 2009*. Mayo 07, 2014, de INEGI sitio web: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/saic/>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Toluca, Mexico*. Distrito Federal: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010: Panorama sociodemográfico del estado de México*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INE-SEMARNAT. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Magee Scientific Corporation. (2010, October). *Portable Aethalometer Model AE42 Data Sheet*. Retrieved February 4, 2014, de Magee Scientific Corporation Sitio web: [http://www.mageesci.com/images/stories/docs/AE42\\_specSheet\\_oct2010\\_rev02\\_web.pdf](http://www.mageesci.com/images/stories/docs/AE42_specSheet_oct2010_rev02_web.pdf)
- MCE2 & INECC. (2013). *Supporting National Planning of Short-lived Climate Pollutants in Mexico*. Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México: Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente.
- NOAA. (2009, Septiembre 9). *Descripción HYSPLIT*. Agosto 11, 2014, de Spain HYSPLIT sitio web: [http://www.ciecem.uhu.es/hysplitweb08/HYSPLIT\\_info.php](http://www.ciecem.uhu.es/hysplitweb08/HYSPLIT_info.php)
- NOAA's Office of Atmospheric Research. (2013, Julio 11). *HYSPLIT Trajectory Model*. Agosto 04, 2014, de Air Resources Laboratory: <http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive>
- Ortíz, J. A., Basaldud, R., Kahl, J., & Olivas, R. (2012). *Avances y perspectivas de la depositación ácida en México*. Campeche, México: Universidad Autónoma del Carmen.
- Peña, I. (2014). Determinación de carbono negro atmosférico mediante métodos ópticos. *Tesis para obtener el título de: Ingeniero Químico*. Distrito Federal, México: Facultad de Química.
- Ramanathan, V. (2013). *Black Carbon and the Regional Climate of California*. Institution of Oceanography. San Diego: University of California.

- SEDESOL, CONAPO & INEGI. (2012). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010*. Mexico City: Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics : de air pollution to climate change* (Second ed.). Boboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.,.
- SINAICA. (2014). Junio 06, 2014, de Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire Sitio web: [http://sinaica.inecc.gob.mx/magic/rmautil/null/\\_framework](http://sinaica.inecc.gob.mx/magic/rmautil/null/_framework)
- SMA. (2007). *Cuencas Atmosféricas del Estado de México*. Dirección General de Prevencion y Control de la Contaminacion Atmosférica, Departamento de Diagnóstico. Tlalnepantla de Baz: Secretaría del Medio Ambiente.
- SMA. (2012). *Inventario de Emisiones a la Atmósfera del Estado de México, 2006*. Tlalnepantla de Baz: Secretaría del Medio Ambiente.
- SMA. (2014). *Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Mayo 29, 2014, de Gobierno del Estado de México Sitio web: [http://portal2.edomex.gob.mx/rama/que\\_es\\_red/index.htm](http://portal2.edomex.gob.mx/rama/que_es_red/index.htm)
- SMN. (2014). *Servicio Meteorológico Nacional*. May 19, 2014, de Comisión Nacional del Agua Sitio web: [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=189&tmpl=component](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=189&tmpl=component)
- UNEP & WHO. (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Program and World Meteorological Organization.
- UNEP. (2011). *Near-term Climate Protection and Clean Air Benefits: Actions for Controlling Short-Lived Climate Forcers*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- WHO & WMO. (1977). *Air monitoring programme design for urban and insutrial areas*. Geneva, Switzerland: World Health Organization and World Meteorological Organization.
- WHO. (1976). *Manual on urban air quality management*. (M. J. Suess, & S. R. Craxford, Eds.) Copenhagen: World Health Organization.