



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Distribución de monóxido de carbono, su
relación con la isla de calor urbana y la
temperatura del aire en la Ciudad de México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA :

Mariana Monserrat Pérez Miguel

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Luis Barradas Miranda

2017



Ciudad Universitaria, CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno:

Pérez Miguel Mariana Monserrat
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
309222457
marianaperezm@ciencias.unam.mx

2. Tutor:

Dr. Víctor Luis Barradas Miranda
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Ecología
vlbarradas@ecologia.unam.mx

3. Presidente de Jurado

Dra. Silke Cram Heydrich
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geografía
silkecram@igg.unam.mx

4. Vocal

Dra. Gema Luz Andraca Ayala
Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Ciencias de la Atmósfera
gema@atmosfera.unam.mx

5. Suplente

Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química
claudia.rivera@ciencias.unam.mx

6. Suplente

Dr. Harry Álvarez Ospina
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
harry02co@gmail.com

7. Datos del trabajo.

Distribución de monóxido de carbono, su relación con la isla de calor urbana y la temperatura del aire en la Ciudad de México.

79 p

2017

2

Índice

Listado de Figuras.....	5
Resumen.....	7
1. Introducción.....	10
1.1 Isla de calor urbana y su descripción.	10
1.1.1 Relevancia de la isla de calor urbana.	16
1.1.3 Isla de calor urbana en la Ciudad de México	17
1.1.4 El balance de energía en la Ciudad de México	18
1.2. Monóxido de Carbono	19
1.2.1 Química del CO en la atmósfera.....	19
1.2.2. Tiempo de residencia del CO	20
1.2.3 Relevancia del CO en zonas urbanas y factores de emisión.....	21
1.2.4 Monóxido de carbono en la Ciudad de México.	22
1.2.5 Modelos de dispersión de CO.....	25
1. 3. Justificación	25
2. Hipótesis y Objetivos.....	27
2.1 Hipótesis	27
2.2 Objetivo General	27
2.3 Objetivos Particulares.....	27
3. Sitio de Estudio	27
3.1 Caracterización de los micrositos de estudio	29
3.2 Descripción del Parque Vehicular	30
3.3 Reporte de Movilidad.....	31
4. Metodología	31
4.1 Procesamiento de datos obtenidos por la RAMA y RedMet	32
4.1.2 Análisis estadístico de datos	34
4.2 Datos obtenidos mediante el software CAL3QH.....	34
5. Resultados y discusión.	39
5.1 Datos utilizados de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET).	39
5.2 Isla de Calor en la ZMVM utilizando datos de Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET).....	46
4.3 Distribución espacial de CO en la ZMVM de acuerdo a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.....	51
4.4 Análisis estadístico entre variables	59

5. Conclusiones y recomendaciones.	63
Referencias	66

Listado de Figuras

Figura 1. Valores de albedo encontrados comúnmente en los entornos urbanos.	10
Figura 2. Temperatura en superficies pavimentadas en Phoenix, Arizona. Se observa una temperatura superficial de hasta 67 °C en el pavimento en verano.	10
Figura 3. La altura de los edificios, H, y el ancho de la calle, W. Se establecen tres regímenes de flujo que dependen sobre todo de las relaciones entre la altura media de los edificios (H) y el ancho del cañón (W), y a la vez entre la longitud de la calle (L). Estos tres tipos de flujo pueden presentarse como (a) aislado, (b) en estela interferida, y (c) en vórtice (LIPP, 2014).	11
Figura 4. Representación sobre los diversos flujos de calor en un medio rural y uno urbano. Estos valores se asocian a datos promedio obtenidos de distintas ciudades. En este caso se asocian a la Ciudad de México con fines ilustrativos. Fuente (Sass, 2012).	15
Figura 5. Diagrama ilustrativo sobre el radical OH en los procesos de oxidación troposférica para los gases traza. Adaptado de (Finlayson-Pitts, 2000).	21
Figura 6. Emisión de autos particulares por cambio de velocidad (A) y distribución espacial de CO en la ZMVM, 2012 (B) (IECEI, 2012).	23
Figura 7. Imágenes satelitales de los cruces elegidos para el estudio (Obtenido Google Earth).	30
Figura 8. Distribución geográfica de las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA y RedMet en la ZMVM.	33
Figura 9. Ecuación asociada a los modelos de dispersión gaussiana y esquema representativo de cada término en la ecuación. Dónde: C representa la concentración, Q la cantidad de contaminante emitido por unidad de tiempo, u la velocidad del viento y σ_y y σ_z son coeficientes de dispersión turbulenta que dependen de la clase de estabilidad y de la distancia al foco en la dirección del viento, x.	35
Figura 10. Determinación del ancho de cada cruce y carril en las distintas zonas de estudio. [Elaboración propia 2016, de una imagen de Google maps].	36
Figura 11. Ejemplo sobre la determinación de la capacidad de un cruce, tomando en cuenta el número de autos encontrados en 50 metros. [Elaboración propia 2016].	36
Figura 12. Representación del tipo de intersección 6X6 utilizada en el análisis de Eje 1 Norte y Eje 3 Sur. Este tipo de intersección debe ser elegido con la finalidad que la distribución del CO sea espacialmente adecuada. [Obtenida del manual de usuario CAL3QH].	37
Figura 13. Representación del tipo de intersección 6X6 utilizada en el análisis de Reforma. Este tipo de intersección debe ser elegido con la finalidad que la distribución del CO sea espacialmente adecuada. [Obtenida del manual de usuario CAL3QH].	38
Figura 14. Comportamiento promedio de la concentración de CO en temporada seca fría (TSF), temporada seca cálida (TSC), temporada húmeda (TH) y promedio anual. [Elaboración propia, 2016].	39
Figura 15. Distribución promedio de CO en temporada seca cálida de 7-9 h en temporada seca cálida (TSC), temporada seca fría (TSF), temporada húmeda (TH) y promedio anual.	41
Figura 16. Distribución promedio de CO en temporada seca cálida de 19-21 h en temporada seca cálida (TSC), temporada seca fría (TSF), temporada húmeda (TH) y promedio anual.	42
Figura 17. Distribución sobre datos promedio anuales de TA y promedios de temporada seca fría (TSF), temporada seca cálida (TSC) y temporada húmeda (TH). [Elaboración propia, 2016].	43
Figura 18. Distribución de promedios anuales de horas pico de 7 a 9 h y 19 a 21 h y anuales desde 2005 a 2015. [Elaboración propia, 2016].	44
Figura 19. Comparación de comportamiento de CO en cada mes en los años 2005 y 2015.	45
Figura 20. Variaciones mensuales en la concentración de CO desde el 2005 hasta el 2015. [Elaboración propia, 2016].	45

Figura 21. Isotermas de T_A en el 2005 a las 6:00 h en la ZMVM. Cada punto indica dónde se encuentra una estación automática de monitoreo RedMet. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda).	47
Figura 22. Isotermas de T_A en el 2013 a las 14:00 h en la ZMVM. Cada punto indica dónde se encuentra una estación automática de monitoreo. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda).	49
Figura 23. Isotermas de T_A en el 2014 a las 14:00 h en la ZMVM. Cada punto indica dónde se encuentra una estación automática de monitoreo. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda).	50
Figura 24. Mapas de dispersión de CO en la ZMVM de 7 a 9 h en 2005. Datos obtenidos de la RAMA... ..	52
Figura 25. Distribución de CO en el año 2015 de 7 a 9 h. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda) [Elaboración propia, 2016].....	53
Figura 26. Distribución de la concentración de CO promedio 10 años en cada estación meteorológica.....	54
Figura 27. Variaciones diarias de CO. La línea roja se encuentra asociada a las concentraciones registradas por la estación XAL el día 23/01/2015. La línea verde se encuentra asociada a las concentraciones registradas por la estación MON el día 23/01/2015.	55
Figura 28. Variaciones diarias de TA en la estación de XAL y MON el día 23/01/2015.....	56
Figura 29. Diferencia entre valores registrados por la estación PED en el año 2005 y 2015. Las líneas naranjas indican la diferencia entre cada temporada, donde: TSC (temporada seca cálida), TH (temporada húmeda) y TSF (temporada seca fría). La línea roja indica la tendencia de los datos.....	57
Figura 30. Diferencia entre valores registrados por la estación MER en el año 2005 y 2015. Las líneas naranjas indican la diferencia entre cada temporada, donde: TSC (temporada seca cálida), TH (temporada húmeda) y TSF (temporada seca fría). La línea roja indica la tendencia de los datos.....	58
Figura 31. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Eje 1 Norte. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.	61
Figura 32. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Paseo de la Reforma. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.	62
Figura 33. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Paseo de la Reforma. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.	63

Agradecimientos académicos

A la DGAPA-PAPIIT en el proyecto "Lineamientos climáticos y bioclimáticos para la planeación urbana en México" con clave IT201514 por la beca brindada para que pudiera elaborar este trabajo

Agradezco a los profesores que guiaron mi educación durante estos cuatro años, en especial a: Biol. Isabel, así como a los miembros de mi jurado: Dra. Silke Cram Heydrich, Dr. Harry Álvarez Ospina, Dra. Gema Luz Andraca Ayala por su guía y consejos para la realización de esta tesis.

A mi asesor de tesis, el Dr. Víctor Luis Barradas, por el enorme apoyo recibido desde la planeación de este proyecto de tesis, hasta su realización. Por la enorme paciencia al resolver todas mis dudas respecto a este proyecto, así como todos los consejos académicos y personales que han influido en mi formación y por mostrarme una manera distinta de pensar la ciencia y compartir sus conocimientos, curiosidad y creatividad.

A la Dra. Claudia Rivera por su apoyo y comentarios que ayudaron a enriquecer éste trabajo y su guía para la realización del mismo.

Agradecimientos Personales

A Dios, por llenarme de bendiciones a lo largo de mi vida.

Mis padres, Estela y Miguel, por brindarme todo el amor y cariño posible a lo largo de mi vida, por brindarme todo el apoyo necesario para llegar a este punto en mi vida y escucharme siempre que tengo algo que compartirles, por enseñarme a perseguir mis metas a pesar de lo difíciles que parezcan, por demostrarme que sin importar la edad las metas pueden realizarse y por ser mis ejemplos a seguir.

A mi hermana Ana, por ser una fuente de amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por enseñarme tantas cosas en la vida y estar ahí siempre que la he necesitado.

A mi familia, en especial a: Mi abuelita Isabel, mi tía Evangelina, mi tía Virginia y mi tía Anita, ya que todas ustedes han sido como madres para mí.

A Morgan y Juno, por ser el motor de mis metas y acompañarme en las largas noches de estudio y desvelo desde que inicié la licenciatura y por mostrarme su cariño incondicional.

A José, por el gran apoyo brindado durante todo este proceso y por siempre escuchar lo que tengo que decir y estar ahí cuando lo he necesitado.

A Brenda y Mariel, por tantas pláticas y apoyo mutuo para la realización de nuestros trabajos de tesis.

A mis amigos de la Licenciatura: Eloísa, Iñaki, Aura, Nahúm, Andrés, Daniela, y Lucina, por todas las enseñanzas y vivencias que tuvimos a lo largo de estos cinco años.

Resumen

La zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) es considerada como una de las áreas urbanas más grandes del mundo en términos de densidad poblacional, este aspecto conlleva problemáticas ambientales en materia de explotación de recursos y de contaminación.

La atmósfera resulta uno de los sistemas más impactados. En específico, debido a la contaminación atmosférica asociada a las emisiones de las fuentes fijas y móviles, el monóxido de carbono es uno de los principales contaminantes emitidos por estas fuentes. Este contaminante adquiere relevancia debido a que disminuye la abundancia de radicales OH al iniciar el proceso oxidativo dentro de la atmósfera.

El radical OH es responsable de interactuar con el tiempo de residencia de otros gases de efecto invernadero (GEI) con tasas altas de re-irradiación infrarroja. Por esta razón, una alta concentración de monóxido de carbono (CO) influirá en un aumento en la permanencia de los GEI en la atmósfera. Por este motivo se intuye que se verá exacerbado el fenómeno de isla de calor urbana (ICU).

Sorprendentemente, en la actualidad no existen una gran variedad de estudios o informes en la Ciudad de México enfocados a este contaminante. Se piensa que al aumentar su concentración puede enfatizar el efecto de ICU.

Este estudio se enfoca en el análisis del comportamiento del CO y de la ICU desde el año 2005 al 2015, tomando en cuenta las bases de datos emitidas por la Red Ambiental de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y Red de Meteorología y Radiación Solar (RedMet). A partir de estos datos se obtuvieron promedios, con la finalidad de observar la distribución espacial del CO. Se analizó si existían correlaciones entre los datos de la temperatura ambiente (T_A) y la concentración de CO.

Durante el periodo de estudio se observó que la concentración de monóxido de carbono reportada disminuyó en casi 2 ppm a lo largo de 10 años. De igual manera, se muestra que existe una tendencia temporal en relación a los datos de CO, siendo más bajos en la temporada seca fría; esto indica que la T_A influye en la concentración de CO y no viceversa.

Finalmente, al realizar correlaciones entre ambas variables, los valores son significativos en la temporada seca fría (TSF), en el día, en estaciones localizadas en el centro de la Ciudad de México, específicamente Merced (MER). Adicionalmente, el año 2012 reporta coeficientes de correlación más cercanos a 1 en la mayoría de sus estaciones.

1. Introducción

1.1 Isla de calor urbana y su descripción.

La ICU se refiere al gradiente térmico horizontal que se observa entre los espacios urbanos densamente ocupados y construidos, así como también en la periferia rural o peri-urbana (EPA, United States Environmental Protection Agency, 2009). Este gradiente generalmente es de 1° a 3° C, pero bajo condiciones óptimas, se han registrado diferencias de entre 10° y 12 °C (Oke, 1997) (Ballinas M., 2015). El efecto más evidente se da durante la temporada seca cálida (marzo – junio) en el hemisferio norte, debido a que se trata del periodo con mayor radiación solar y, por ende, calentamiento a temperaturas altas (Shepherd, 2005). Aunque el fenómeno es más intenso en los meses fríos.

Este patrón o gradiente térmico se asocia a una progresiva pérdida del entorno vegetal natural, intra y peri urbano, substituyéndolo por superficies impermeables, como, por ejemplo, el concreto, el asfalto, ladrillo y otros materiales de construcción que alteran los balances de energía superficial e hídrico (figuras 1 y 2). Por consecuencia, se tiene un aumento de la temperatura en las áreas urbanas (Chen, 2006).



Figura 1. Valores de albedo encontrados comúnmente en los entornos urbanos (Obtenido: <https://goo.gl/forms/230JtX5wyZa69AIH3>, 2016).



Figura 2. Temperatura en superficies pavimentadas en Phoenix, Arizona. Se observa una temperatura superficial de hasta 67 °C en el pavimento en verano (ASU, 2014).

Otro factor causante de la ICU es el efecto de los contaminantes atmosféricos en la absorción radiativa (Shepherd, 2005) y re-irradiación de energía emitida por la superficie urbana. Se ha observado que la pérdida nocturna de radiación de onda larga y el humo enfrían algunos grados centígrados el aire que se encuentra por encima de la capa de niebla. Este fenómeno genera una inversión de temperatura. La energía de onda corta que se recibe en las superficies urbanas se reduce por la absorción y dispersión producida por las capas de humo-niebla. Algunas horas después del amanecer las capas de humo-niebla se destruyen por las corrientes turbulentas asociadas a la insolación (Bomstein, 1968).

También se debe tomar en cuenta el efecto de cañón urbano en la ICU, el cuál es un fenómeno de la climatología urbana. El término define a una avenida conformada por edificios en ambos lados que le otorgan una configuración de cañón. Las ciudades están formadas por cañones urbanos que constituyen estructuras complejas que, por una parte, dificultan el flujo del aire disminuyendo la ventilación, y por el otro, provocan un estancamiento de los contaminantes (figura 3). Debido a la reducida ventilación, se pueden ocasionar niveles inadecuados de calidad del aire (LIPP, 2014). Esto causa una temperatura relativamente baja en las horas diurnas y una temperatura alta en las nocturnas debido a la inversión superficial. Sin embargo, esto sólo se aplica si la velocidad del viento es igual dentro y fuera de la ciudad (Yoshino, 1975).

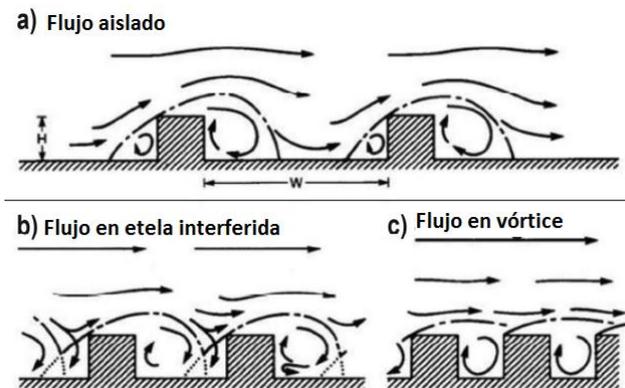


Figura 3. La altura de los edificios, H , y el ancho de la calle, W . Se establecen tres regímenes de flujo que dependen sobre todo de las relaciones entre la altura media de los edificios (H) y el ancho del cañón (W), y a la vez entre la longitud de la calle (L). Estos tres tipos de flujo pueden presentarse como (a) aislado, (b) en estela interferida, y (c) en vórtice (LIPP, 2014).

La forma espacial general de la isla de calor se asocia a las isotermas que forman un patrón semejante al de una “isla” (figura 4) que sigue aproximadamente la forma de la región urbanizada, rodeada por zonas más frías de la capa límite planetaria (PBL¹). A menudo hay un aumento intenso de la temperatura del aire en la capa de dosel urbano (UCL² por sus siglas en inglés). En el límite entre áreas rurales y

¹ Planet Boundary Layer

² Urban Canopy Layer

suburbanas, seguido por un aumento lento y a menudo variable hacia el núcleo de la ciudad donde se dan las temperaturas más altas. Las islas de calor de la capa límite urbana (UBL por sus siglas en inglés) muestran mucho menos variabilidad que los otros tipos de islas de calor; y un corte transversal, que su forma se parece a una simple cúpula o pluma, donde el aire más caliente es transportado por el viento fuera de la ciudad (figura 5) (Córdova Sáez, 2011).

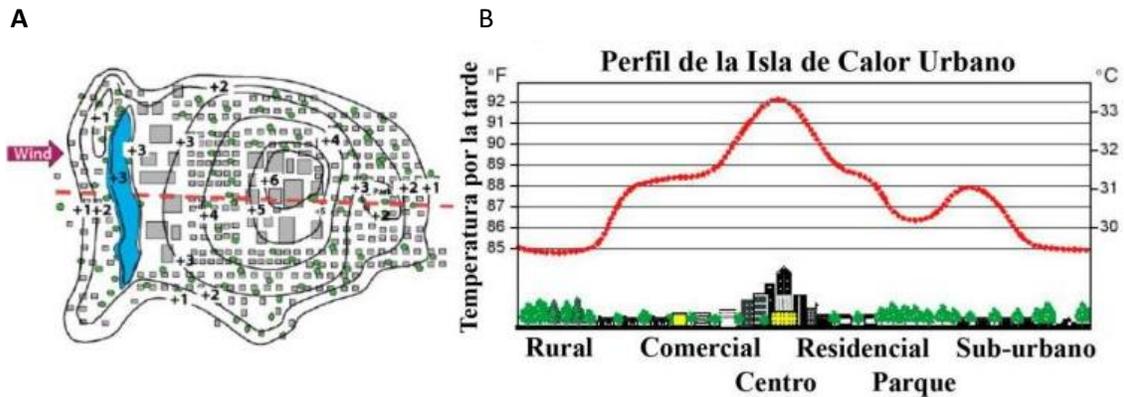


Figura 4. Representación gráfica de las isotermas y formas de las islas de calor (A) y variación transversal de la temperatura en el ámbito urbano-rural (B). (Obtenido de: <https://goo.gl/fc08kH>, 2016).

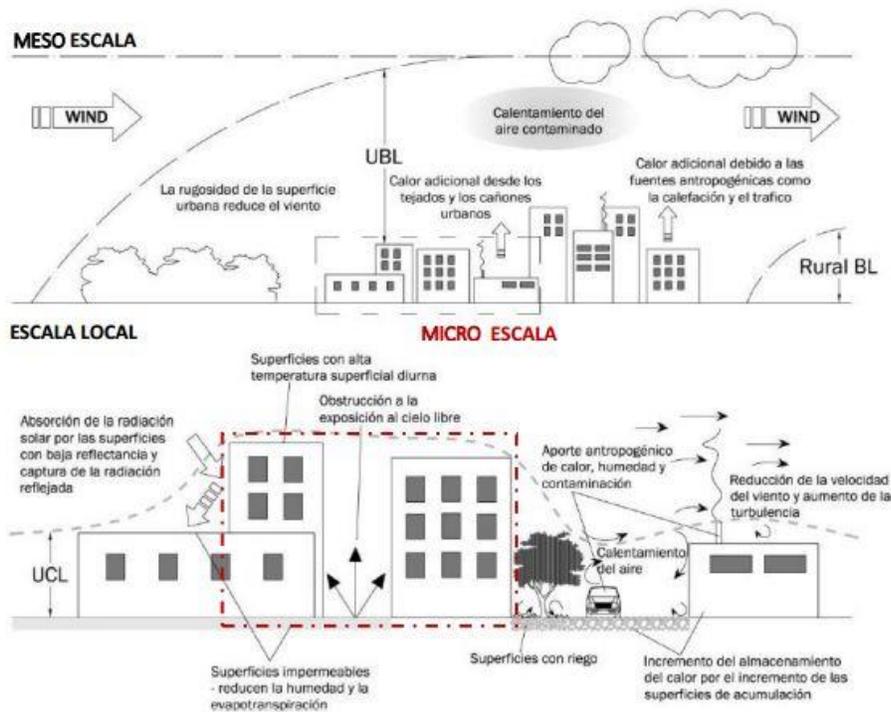


Figura 5. Isla de calor en ambientes urbanos y su relación con sistema ambiental (Modificado de Shepherd, 2005). Se muestra la capa del dosel urbano (UCL) y la capa límite urbana (UBL). (Obtenido de: <https://goo.gl/085TBa>, 2016).

La magnitud de la ICU (gradiente de temperatura entre el entorno rural y urbano) está relacionada de manera proporcional con el tamaño de la ciudad (a mayor tamaño de la urbe, la isla de calor será mayor) (Oke, 1981). El efecto más apreciable se da después del ocaso. La circulación de la isla de calor puede ser observada de manera más clara durante el día debido a que se cuenta con la presión del gradiente urbano-rural y se generan mezclas verticales de aire (permitiendo el movimiento de masas de aire caliente) (Shreffler, 1978).

Para comprender de mejor manera el origen de la isla de calor, es necesario retomar la ecuación sobre el balance de energía, que no es más que la primera ley de la termodinámica:

$$Q_N + Q_H + Q_L + Q_G + Q_A = 0 \quad (1)$$

Los términos en la ecuación (1) hacen referencia a: Q_N (radiación neta incluye radiación de onda corta y onda larga), Q_H (flujo de calor sensible superficial), Q_L (flujo de calor latente superficial), Q_G (flujo de calor molecular dentro de la superficie o calor almacenado por el tejido urbano) y Q_A (calor antrópico).

Radiación solar neta (Q_N)

La radiación incidente se considera como la suma de la radiación solar (de onda corta) (Q_{SW}) y la radiación de onda larga (Q_{LW}) capturada por las superficies construidas. La radiación solar (Q_{SW}) es la que incide sobre una superficie y esta depende directamente de diversos factores como: el tamaño y situación de la propia superficie, de condiciones atmosféricas y estacionales. Este tipo de radiación es definido por la suma de dos magnitudes, la radiación directa y la radiación difusa. El concepto de radiación directa implica exposición directa al Sol, de modo que, en caso de existir un obstáculo (arbolado o edificios cercanos) que proporcione sombra a la superficie, este término es nulo. La radiación difusa es la suma de aportes de radiación que ha incidido y reflejado en algún lugar (Sangines, 2013). Su origen es muy variado, una superficie expuesta en un lugar general recibe tanto reflexiones de radiación directa desde la atmósfera u otras partículas, como reflexiones del entorno en función del albedo. La radiación global incidente en las superficies urbanas puede ser reducida o limitada por altos niveles de contaminación atmosférica (Sang J, 2000).

Además de la radiación visible proveniente del Sol, las superficies urbanas emiten radiación de onda larga (Q_{LW}), conocida como radiación infrarroja. Esta es invisible para los humanos, pero sus efectos se muestran al emitir energía térmica al medio ambiente. Este tipo de radiación depende directamente de las propiedades de los materiales de las superficies constructivas y de su relación con el entorno. Se caracteriza por emitir la energía térmica en el infrarrojo lejano (Sangines, 2013).

Flujo de calor sensible superficial (Q_H) hace referencia al calor que puede ser percibido. Se asocia a la transferencia continua de calor entre la atmósfera y diversas superficies. Es calor que se transfiere por conducción entre varios materiales encontrados en las superficies y por convección (movimiento vertical) o advección (movimiento horizontal) conforme al movimiento del aire.

El calor sensible va en función de diversas variables. Generalmente, la atmósfera en contacto con la superficie terrestre es más cálida que la masa de aire sobre ésta y da lugar al ascenso de aire debido a la diferencia de densidad. Este movimiento vertical, también conocido como convección, mezcla el aire de distintas temperaturas dando lugar a una transferencia de calor. En las zonas urbanas se produce un incremento de calor sensible por convección relacionada a la velocidad del viento y las propiedades superficiales de los materiales de construcción (Sucking, 1980).

Flujo de Calor latente (Q_L).

El calor latente es transferido de la superficie a la atmósfera mediante la evaporación del agua en la superficie y la transpiración debida al dosel vegetal. La evapotranspiración depende de la humedad del suelo y la permeabilidad de la superficie. Este fenómeno comprende de dos procesos, la evaporación de agua del suelo y la transpiración, la cual hace referencia al movimiento de agua del suelo a las plantas y finalmente a la atmósfera.

Aumentar la densidad de vegetación promueve la evapotranspiración. El efecto de esto será que estimulará la disipación de energía por el flujo del calor latente y dará lugar a una disminución de la temperatura en el ambiente.

Calor antrópico (Q_A).

El calor antrópico representa el calor generado por fuentes estacionarias y móviles en el área de interés debido a la actividad humana. Se reporta que el Q_A debe convertirse en calor sensible, calor latente o ser almacenado (Vogt & Christen, 2004). La literatura hace referencia al calor antrópico como la suma del calor generado por edificios, vehículos y personas (Sailor & Lu, 2004). Sin embargo, para áreas urbanas como la Ciudad de México la mayoría de las veces este flujo de calor no es significativo comparado con la radiación neta.

Oke (1988) reporta que la magnitud del calor antrópico se asocia a la población de la zona, así como de su consumo energético per cápita. Taha (1997) reporta que el calor antrópico tiene un efecto menor que el albedo y la cobertura vegetal. Offerle (2005) menciona que el efecto o aporte de calor antrópico es

mayor en invierno en ciudades de clima frío y que éste cuenta con variaciones diurnas, estacionales o semanales.

La figura 6 muestra una representación asociada a los diversos flujos de calor en un medio rural y uno urbano. Estos valores son representativos y reportan datos promedio obtenidos de distintas ciudades. Los valores fueron tomados de Sass (2012).

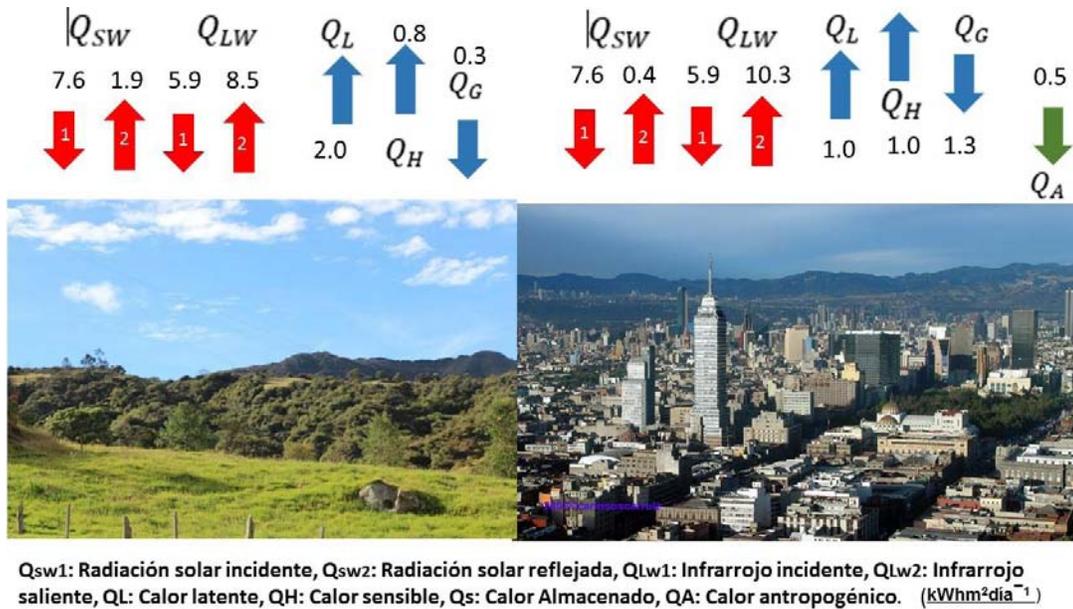


Figura 6. Representación sobre los diversos flujos de calor en un medio rural y uno urbano. Estos valores se asocian a datos promedio obtenidos de distintas ciudades. En este caso se asocian a la Ciudad de México con fines ilustrativos. Fuente (Sass, 2012).

Como se mencionó previamente, el Sol emite radiación de onda corta, la cual es absorbida con distinta intensidad en función del color, textura y albedo del material o de la superficie. Por otro lado, la radiación de onda larga es emitida a todas horas por la Tierra y los materiales que retuvieron la energía durante el día. Se puede observar que la radiación solar incidente (*input* Q_{SW}) en ambos casos (área rural y urbana) tiene magnitudes iguales de $7.6 \text{ kW h m}^2 \text{ día}^{-1}$. Se observa que el valor promedio para la radiación solar reflejada en la zona rural es de $1.9 \text{ kW h m}^2 \text{ día}^{-1}$, mientras que, en la zona urbana el valor promedio es de $0.4 \text{ kW h m}^2 \text{ día}^{-1}$; Esto debido al color y tonalidades de las superficies impermeables (figura 1) utilizadas dentro de las ciudades (concreto, asfalto, ladrillo y otros materiales de construcción). Mediante estos valores se comprende que las zonas urbanas cuentan con mayor capacidad de absorción de radiación solar incidente.

La radiación de onda larga en términos del infrarrojo incidente (Q_{LW}) presenta un comportamiento similar, se tienen los mismos valores en la entrada mientras que en el infrarrojo saliente el valor difiere de $8.5 \text{ kW h m}^2 \text{ día}^{-1}$ y $10.3 \text{ kW h m}^2 \text{ día}^{-1}$ para el medio rural y urbano respectivamente. Esto es razonable teniendo en cuenta el albedo de las distintas superficies, ya que en las zonas urbanas el valor del albedo es menor y por ende más energía solar es absorbida en las superficies, la cual es emitida como infrarrojo durante todo el día.

Para los valores de calor latente, se reporta que las ciudades de latitud media (35° a 65°) muestran menos evapotranspiración que sus alrededores rurales. Tomando en cuenta que el calor latente se encuentra principalmente en función de la vegetación, y en las ciudades, las áreas verdes cubren un área pequeña de la superficie, es de esperarse que durante el día la magnitud de Q_L en zonas urbanas represente cerca del 20% del balance de calor total, mientras que, en las zonas rurales, el calor latente puede representar valores de hasta 60% (Christen & Vogt, 2004).

La magnitud del calor sensible en la ciudad se relaciona con la transferencia horizontal por el viento. La intensidad y dirección, así como la humedad y temperatura del aire, alteran los valores obtenidos. En la figura 4 se observa un valor de transferencia de calor sensible de $1.0 \text{ kW hm}^2 \text{ d}^{-1}$ de las superficies calientes al aire encontrado encima de éstas. En este caso se esperaría un aumento en la temperatura de casi $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$ mediante una mezcla vertical. Esto generaría una disminución en la temperatura de las superficies, pero un aumento en las masas de aire. Si el entorno urbano cuenta con movimiento, esto mueve la masa de aire caliente, dejando la zona más fría o más cálida, esto depende de la temperatura del viento que mueve estas masas (Sass, 2012).

Un factor que difiere en las dos zonas es el calor antrópico. Se debe principalmente al uso de combustibles fósiles (Sailor & Lu, 2004.). El calentamiento antrópico generalmente tiene mayor impacto durante la estación de invierno de los climas fríos en el núcleo del centro de la ciudad (Taha, 1997). En casos especiales, en ciudades construidas de forma muy densa, pueden presentar calentamiento antrópico severo durante la época de verano como consecuencia de un alto uso de energía para enfriar las edificaciones (Taha, 1997).

1.1.1 Relevancia de la isla de calor urbana.

Las altas temperaturas de la isla de calor urbana (particularmente durante el verano) pueden afectar la calidad ambiental de la ciudad y la calidad de vida de los habitantes. La primera afectación consta del aumento del consumo energético de los edificios para el enfriamiento en condiciones de verano. El

fenómeno de la isla de calor puede producirse tanto de día como de noche, provocando un aumento de temperatura que puede alcanzar hasta los 12 °C (Oke, 1997).

El problema del enfriamiento de los edificios en los climas cálidos es muy importante, ya que aumenta el consumo energético y genera emisiones. En específico, se incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero como: óxidos de sulfuros (SO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y del material particulado (PM_{10, 2.5}).

El aumento de la temperatura tiene serias consecuencias para la salud humana y el medioambiente. Los NO_x, producidos en procesos de combustión a alta temperatura son un precursor en la formación del ozono troposférico (O₃), el cual es definido como el principal contaminante del smog fotoquímico. La producción de O₃ se genera bajo la acción de los rayos solares y es mayor en los meses más calurosos y en las horas de mayor soleamiento (Tumini, 2009). Otro efecto documentado es la relación directa entre los picos de la ICU y las afecciones/fatalidades cardiacas y pulmonares.

Durante eventos extremos de olas de calor, la ICU presenta el potencial de prevenir el enfriamiento de los entornos urbanos, por lo que se mantienen altas temperaturas en la noche que afectan la salud y confort en los humanos. Las mayores afecciones registradas son golpe de calor, insolación y síncope por calor, donde los grupos más afectados son los ancianos y los niños (Anónimo, 2015).

1.1.3 Isla de calor urbana en la Ciudad de México

En la zona metropolitana de la Ciudad de México, se enfrenta un proceso de urbanización desmedida. Esto ha generado un cambio climático en el cual la diferencia máxima de temperatura entre el área urbana y rural puede ser normalmente de 3 a 5 °C (Barradas, 2013), frecuentemente se alcanzan diferencias máximas hasta de 10 °C (Ballinas M., 2015).

En específico, el centro histórico es más cálido que el sur de la ciudad y su humedad es menor. Además, en la metrópoli son escasas las áreas verdes; por ejemplo, en la colonia Escandón sólo el 6% de la superficie está compuesta por vegetación, y al no existir evaporación de las plantas, el aire se calienta y exagera la isla de calor. Al comparar mediciones de temperatura en la zona de la Merced con respecto a Chapingo, en el Estado de México, la diferencia puede ser de hasta 10 °C, aunque ello puede deberse a las condiciones meteorológicas en aquella área, considerada rural (nublados, lluvia y/o vientos fuertes) (Barradas, 2012).

Se espera que conforme crece la ciudad y su zona conurbada, se extienda más el centro cálido hacia áreas del norte y noroeste. Un aspecto de gran relevancia es que, contrario a lo que se pensaba antes, las islas de calor urbanas no son un fenómeno que sólo se registra en las primeras horas del día o durante la noche,

sino durante todo el día, según mediciones realizadas en los años 2009 y 2010 (Ballinas M., 2015); Si se sobrepasa el intervalo de confort humano, se produce lo que se denomina como polución térmica. (Barradas, 2012).

1.1.4 El balance de energía en la Ciudad de México

Jáuregui (1995) determinó el balance de energía en la Ciudad de México basándose en mediciones realizadas en la azotea del edificio del Servicio Meteorológico Nacional, donde menciona que:

El valor del calor que genera la ciudad Q_A en la Ciudad de México es relativamente pequeño, ya que muy pocos edificios cuentan con clima artificial. Esto resulta en poco gasto energético para este fin. En términos del flujo de calor sensible superficial Q_H se debe tener en cuenta que una parte considerable de la radiación neta se utiliza para calentar el aire urbano. El flujo de calor latente superficial Q_L se asocia a la proporción de áreas verdes en el área de estudio, donde éstas son escasas debido a que de acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) hasta el 2006, de los 632.66 km² que comprende la Ciudad de México sólo 128.28 km² corresponde a áreas verdes, aproximadamente un 20% de la superficie total. Sin embargo, la distribución de zonas con vegetación no es equitativa.

El flujo de calor molecular dentro de la superficie Q_S representa la radiación solar que incide sobre una superficie y depende directamente de diversos factores, como: el tamaño y propiedades de la propia superficie. En la Ciudad de México este valor de almacenamiento es considerable.

En un estudio más reciente, Ballinas (2015) reporta mediciones realizadas entre enero y mayo en la Ciudad de México donde la radiación neta incrementa de manera rápida desde el amanecer hasta el mediodía, alcanzando valores máximos de 693.5 W m⁻². En la tarde, los valores de Q_N promedio son de 449.0 W m⁻² y presentan su mínimo en la puesta del Sol.

Los flujos de calor sensible y latente aumentan en la mañana, alcanzando su máximo al medio día. La mayor parte de la energía disponible se disipa en flujos de calor sensible (Q_N) con valores promedio de 224.0 W m⁻². El flujo de calor alcanza valores máximos en la mañana y presenta un valor promedio de 153.0 W m⁻². Los valores promedio más bajos se asocian a Q_E de 72 W m⁻².

Adicionalmente reporta que a las 6 h se genera un centro cálido en: la zona del Cerro de la Estrella, San Agustín, Villa de las Flores, FES Acatlán y Pedregal. En estas zonas la diferencia de T_A varía en un rango de 3.5° a 8.5°C.

A las 14 horas, la zona cálida se ha movilizó al oeste de la ciudad y se reporta un centro cálido de menor tamaño; donde la diferencia de T_A más grande es de 2.5°C . Cabe mencionar que los factores del viento y la topografía tienen efectos considerables en los resultados.

En el mes de mayo, la distribución de la ICU es similar a aquel en enero, sin embargo, a la diferencia en la T_A aumenta en casi 0.5°C (6 h) y 2.0°C (14 h).

1.2. Monóxido de Carbono

1.2.1 Química del CO en la atmósfera.

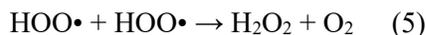
Un componente de gran relevancia en la formación del smog fotoquímico es el monóxido de carbono (CO). La oxidación del CO puede resumirse con las siguientes reacciones:



La reacción genera como producto el radical hidropéroxilo:



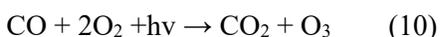
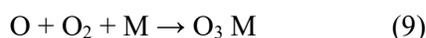
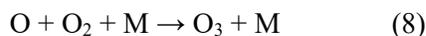
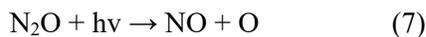
y se genera el radical hidroxilo $\text{HO}\cdot$ a partir del $\text{HOO}\cdot$ por medio de las siguientes reacciones:



La reacción previa es seguida por la disociación fotoquímica del H_2O_2 para generar $\text{OH}\cdot$ (Stanley, 2007):



Sin embargo, también se debe mencionar que una vez generado el dióxido de nitrógeno, se generan las siguientes reacciones subsecuentes:

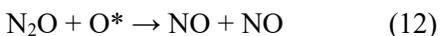


Estos átomos de oxígeno excitados, también pueden reaccionar con otros constituyentes, por ejemplo, el vapor de agua.

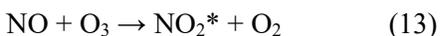


A través de esta reacción se produce uno de los más importantes constituyentes químicos presentes en la atmósfera, el radical hidroxilo (OH). Este radical reacciona muy eficientemente con hidrocarburos, CO y algunos elementos tóxicos.

También los átomos de oxígeno excitados pueden reaccionar con óxido nitroso y generar óxido nítrico.



Los óxidos de nitrógeno también participan en otras reacciones.



En la ecuación 14, se forma el ácido nítrico (HNO₃) a partir del dióxido de nitrógeno y el radical hidroxilo, este proceso en la atmósfera hace que los NO_x se consuman y formen lluvia ácida (Wayne, 2000).

1.2.2. Tiempo de residencia del CO

El fenómeno de nucleación se origina cuando especies con baja presión de vapor de agua se condensan formando una nueva partícula. Éstas se clasifican en dos clases: la primera es la nucleación homogénea que ocurre cuando los gases involucrados originan una nueva partícula sin ayuda de una superficie y la segunda se denomina nucleación heterogénea, donde existe una superficie en donde los gases se condensan (Puigcerver, 2008).

La coagulación es un fenómeno físico de choque entre partículas, dando como resultado la adherencia de las partículas involucradas. La coalescencia es un proceso mediante el cual las partículas chocan entre sí formando partículas de mayor tamaño. Las transformaciones químicas pueden dar origen a la formación de nuevas especies y a la eliminación de las originales. Estos procesos definen la vida media de las especies (Jacobson, 2002).

Un punto clave dentro de la química atmosférica es la capacidad oxidante que presenta la atmósfera. Ésta se encuentra gobernada, principalmente, por la concentración del radical hidroxilo OH. La oxidación de compuestos asociados a las actividades antrópicas (e.g. hidrocarburos) es un proceso decisivo debido a que transforma especies tóxicas volátiles en especies semi-volátiles, las cuales se pueden condensar en aerosoles y de tal manera son removidas de la atmósfera. Otra especie oxidante de gran relevancia es el ozono (O₃), debido a que es el precursor del radical OH (figura 7).

En ciudades que cuentan con un gran parque vehicular, plantas industriales y considerables núcleos de población, la concentración puede alcanzar una proporción de 0.5% en el aire (Ledesma, 2011).

Las concentraciones globales de fondo se encuentran entre los 70 y 120 ppb en la troposfera (en el hemisferio norte) y aproximadamente el 60% de estas emisiones se atribuyen a actividades humanas (Raub & WHO, 1999). Los patrones asociados al comportamiento del CO son muy variables, pueden ser anuales, estacionales y diarios, ya que depende de factores meteorológicos.

Cuando el CO está presente por encima de las concentraciones normales de fondo causa complicaciones en la salud debido a la toxicidad asociada a la exposición crónica. Produce hipoxia tisular. Este efecto tóxico es derivado principalmente de la disminución del oxígeno unido a la hemoglobina (Lorenzo, 2012).

Se ha determinado que, en una gran ciudad, en una hora pico la concentración de CO en una calle muy transitada puede alcanzar hasta 115 ppm (Alvarado, 2008), superando ampliamente las 9 ppm consideradas como el nivel guía de calidad de aire de exteriores como promedio para ocho horas de exposición (OMS, 2014).

1.2.4 Monóxido de carbono en la Ciudad de México.

La calidad del aire de la ZMVM está determinada por el balance dinámico entre las emisiones contaminantes, generadas por los diferentes factores de presión (crecimiento poblacional, vehicular y de consumo energético) y la capacidad atmosférica de dicha zona para eliminar o reducir la carga de emisiones (SEDEMA, 2012). A esto se suman factores adversos como la gran altitud a la que se encuentra, que provoca una menor eficiencia en los procesos de combustión; el relieve orográfico de la zona (cuenca cerrada) que no permite la dispersión de los contaminantes; así como la intensa radiación solar que recibe debido a su latitud tropical y que promueve una mayor reactividad para la formación de contaminantes secundarios como el ozono.

En el año 2012, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), publicó el Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012 (IECEI 2012). Inventario que provee información sobre las modificaciones en las emisiones de contaminantes relevantes para este estudio.

De acuerdo al Sistema de Consulta de los Censos Económicos 2009 del INEGI, se identificó que existen 30,934 establecimientos industriales en el Distrito Federal y 33,807 en los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM. Al realizar un análisis de los establecimientos manufactureros con potencial generador de emisiones a la atmósfera, se determinó que de los 64,741 reportados por los Censos Económicos 2009 del INEGI en la ZMVM, aproximadamente 30,881 de ellos son generadores de

emisiones contaminantes y de efecto invernadero (SEDEMA, 2012). La aglutinación de las principales industrias y los vientos dominantes que provienen de la zona norte de la ZMVM, ocasionan que las emisiones impacten directamente en las áreas densamente pobladas.

De acuerdo con el Programa de Calidad del Aire 2002-2010 (Proaire 2002-2010), los vehículos automotores de la ZMVM son la principal fuente de contaminación atmosférica (figura 8A). Para que ese alto impacto ambiental se produzca concurren varios factores: la cantidad de automotores, superior a los tres millones de unidades, la expansión del área urbana la cual impacta en el incremento del kilometraje recorrido por viaje, y la saturación creciente de la red vial que obliga a incrementar el tiempo de operación de los motores en condiciones ineficientes y bajas velocidades de circulación. Del parque vehicular que utiliza gasolina, el 52% de los vehículos son anteriores a 1990, carecen de tecnología ambiental, son altamente emisores y aportan cerca del 68% de las emisiones totales. El 48% restante de los vehículos y que son los de 1991 en adelante, cuentan con tecnología ambiental y participa con el 32% de las emisiones.

Teniendo en cuenta la información referente al factor de emisión asociada a las bajas velocidades, intuitivamente se sabe que, en avenidas altamente congestionadas, la concentración de monóxido de carbono será mayor. De acuerdo a la distribución de emisiones por año, las emisiones más apreciables, se generan dentro del área central de la ZMVM, donde se registran los flujos vehiculares más importantes. Donde las zonas de mayor emisión se encuentran en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez y Venustiano Carranza (figura 8B).

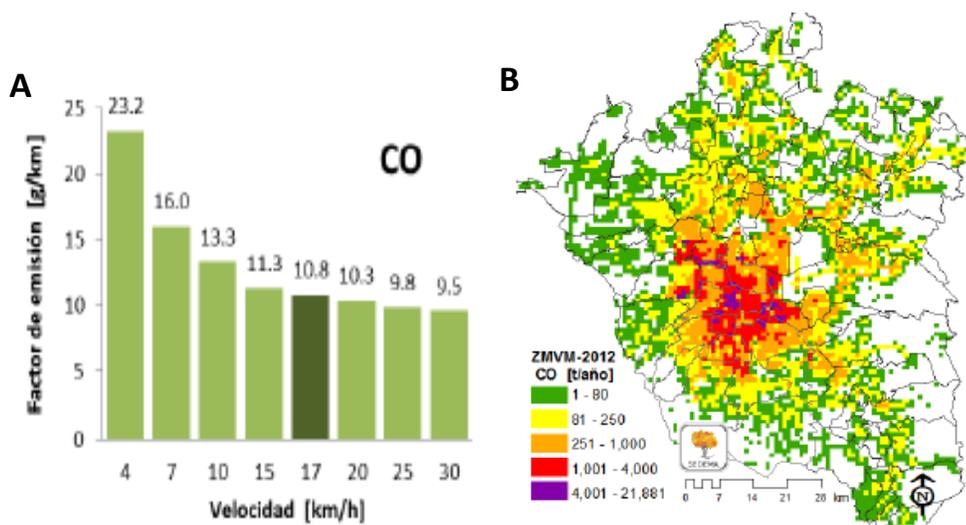


Figura 8. Emisión de autos particulares por cambio de velocidad (A) y distribución espacial de CO en la ZMVM, 2012 (B) (IECEI, 2012).

Desde 2004 la concentración de monóxido de carbono se encuentra por debajo del límite permisible de la NOM-021-SSA1-1993, además es el único contaminante cuya concentración en el aire se encuentra

por debajo del estándar de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA) y la recomendación de la OMS (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de las concentraciones de monóxido de carbono con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana, y de la EPA y la recomendación de la OMS.

	Norma Oficial Mexicana (ppm)	OMS (ppm)		USA EPA (ppm)	
	Máximo 8h	Máximo 1h	Máximo 8h	Máximo 1h	Máximo 8h
Límite permisible	11	18	9	35	9
Zona metropolitana	3.8	6.1	3.06	7.5	3.8
Distrito Federal	3.8	6.1	3.06	7.5	3.8
Estado de México	3.5	5	2.82	6.2	3.5

El Centro Mexicano de Derecho Ambiental indica que el sector transporte es uno de los principales emisores de contaminantes a nivel nacional en México, siendo responsable del 90.03% de las emisiones de monóxido de carbono y del 45.67% de óxidos de nitrógeno, a nivel nacional. Dentro del sector transporte los vehículos de pasajeros -denominados ligeros- emiten el 74.41% de CO, el 52.55% de NO_x, 73.55% de compuestos orgánicos volátiles (COV) y 94.50% de amoniaco (NH₃) (CEMDA, 2014).

Mientras que el reporte del Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (PROAIRE 2011-2020), indican que, en el año 2008, los automóviles representaban el 41% de las emisiones de CO, mientras que los servicios de transporte público (vagonetas, microbuses y autobuses) emiten 255,665 toneladas al año, lo que representa el 16.47% de emisiones de CO (Tabla 2).

Tabla 2. Emisiones de contaminantes generadas por fuentes móviles y porcentajes asociadas a cada tipo de fuente móvil (Elaboración propia, 2016, con datos obtenidos de PROAIRE, 2011).

Sector	Emisiones (ton/año)							
	CO		SO ₂		NO _x		COV	
Fuentes Móviles	1,552,204	%	3,306	%	154,919	%	185,384	%
Autos particulares	638,104	41.11	1,665	50.36	60,662	39.16	90,653	48.90
Taxi	190,259	12.26	322	9.74	20,995	13.55	14,362	7.75
Vagonetas (combis)	114,161	7.35	87	5.23	5,868	3.79	7,585	4.09
Microbuses	106,237	6.84	102	3.09	10,923	7.05	14,063	7.59
Pick up	106,005	6.83	118	3.57	4,930	3.18	9,526	5.14
Vehículos de carga hasta 3 toneladas.	44,535	2.87	100	3.02	2,791	1.80	4,816	2.60
Tractocamiones	27,177	1.75	241	7.29	16,702	10.78	4,544	2.45
Autobuses	35,267	2.27	402	12.16	22,005	14.20	5,588	3.01
Vehículo de carga mayor a 3 toneladas	134,444	8.66	178	5.38	8,194	5.29	7,985	4.31
Motocicletas	155,951	10.05	88	2.66	1,648	1.06	26,225	14.15
Metrobuses	64	<0.1	3	0.09	38	0.02	37	0.02

1.2.5. Modelos de dispersión de CO.

El modelo CAL3QHC es un modelo generado por la EPA, que calcula la concentración de monóxido de carbono (CO) y partículas suspendidas totales (PST) en las cercanías de caminos. Estos provienen de vehículos en circulación o funcionando en marcha muerta. También calcula la longitud de las filas de vehículos encendidos sin moverse que se pueden formar en cruces con semáforos.

El componente de dispersión usado en CAL3QHC es el mismo que el utilizado en CALINE-3 el cual es un modelo de dispersión en línea desarrollado por el Departamento de Transporte de California (EPA E. P., 2016). La estimación de la concentración de contaminantes atmosféricos se basa en la hipótesis que las emisiones resultantes de los vehículos en movimiento en una avenida se pueden representar como una "emisión de fuente en línea", y que los contaminantes se dispersarán de acuerdo a un modelo de dispersión gaussiana a partir de una capa de mezcla definida, sobre la avenida.

1. 3. Justificación

La Ciudad de México es considerada una de las cuatro ciudades con mayor densidad de población en el mundo. Aunado a esto, también es considerada como la segunda urbe con el peor tráfico del mundo (Forbes, 2015), alcanzado un pico de congestión vial del 93% durante las mañanas. Algunas razones de este fenómeno son la gran cantidad de habitantes que prefieren el uso de transporte privado, falta de sincronía en los semáforos y carencia en la regulación en el transporte público (Dongsheng et al, 2015). En porcentaje, las fuentes móviles son responsables del 98.97% de las emisiones de monóxido de carbono, de las cuales los autos particulares se relacionan con el 40.7% (PROAIRE, 2011).

A pesar de que al CO se le considera como un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento débil, tiene una gran influencia en el clima debido a sus efectos indirectos. Su presencia afecta las concentraciones de otros GEI debido a que el CO reacciona velozmente con el radical hidroxilo (OH) disminuyendo su abundancia. El CO es responsable del 13% de reducción de la concentración del radical OH (ESSEA, 2010).

Esto recobra importancia debido a que el OH es responsable de la disminución del tiempo de residencia de GEI tales como: metano, ozono troposférico y dióxido de carbono (NOAA, 2012), los cuales sí presentan un efecto de calentamiento ampliamente documentado en la literatura.

Una de las principales fuentes de generación de CO está asociada a la emisión de los automóviles, a pesar de contar con mucho control en el tema de movilidad, un reporte emitido por la Organización

Mundial de la Salud (WHO³ por sus siglas en inglés) indica que la concentración ambiental de CO en áreas urbanas depende de la densidad del tránsito vehicular, así como de la topografía y condiciones atmosféricas. Se reporta que las concentraciones promedio (durante un intervalo de 8 horas) son menores a los 20 mg/m³ (17 ppm) con picos de hasta 60 mg/m³ (53 ppm) (WHO, 2000).

Debido a lo mencionado previamente, el CO adquiere gran relevancia ya que se involucra en diversos procesos atmosféricos. Se trata de un contaminante relacionado directamente con las fuentes móviles y funciona como indicador del estado de las mismas. También es utilizado como indicador sobre el flujo de autos en las rutas más transitadas. Adicionalmente, se trata de un contaminante criterio el cual afecta a la salud de los transeúntes y conductores.

Por todos éstos motivos, se hace necesario determinar los niveles de concentración atmosférica de forma periódica, para realizar un seguimiento estadístico de los promedios en distintos horarios, así como intervalos diarios, para contrastar su comportamiento con parámetros meteorológicos, al igual que con las concentraciones de otros gases atmosféricos, principalmente el CO₂. De esta manera será posible determinar cómo se modifica la concentración ante diferentes factores ambientales, como la radiación solar, la temperatura del aire y la afluencia de autos; todo esto, considerando las propiedades fisicoquímicas de la molécula de CO.

Tomando en cuenta el proceso de oxidación del CO en CO₂ y efectos indirectos ya mencionados con otros GEI, se plantea una intensificación del efecto de isla de calor en zonas puntuales asociadas a embotellamientos vehiculares.

Otra razón por la cual adquiere relevancia la generación de este estudio se debe a que las fuentes de información y diagnóstico sobre el CO son escasas, además de no estar adecuadamente actualizadas, porque los últimos reportes emitidos por el INECC y SEDEMA fueron publicados en el 2011. Además, que, al contar con un periodo de estudio amplio, permite observar los comportamientos que ha tenido el CO y la intensificación de la ICU. Donde el fenómeno de ICU puede correlacionarse con una oxidación más rápida de CO, generando el dióxido de carbono, el cual puede favorecer el patrón de calentamiento diferenciado en las zonas urbanas.

³ World Health Organization

2. Hipótesis y Objetivos

2.1. Hipótesis

La distribución de monóxido de carbono ocurre principalmente en avenidas amplias generando una mayor concentración de CO y por ello un efecto en la isla de calor y calentamiento diferenciado en los ‘*hot spots*’ vehiculares.

2.2. Objetivo General

Cuantificar la distribución de monóxido de carbono en la Ciudad de México y determinar si se generan patrones que se asocien con el efecto de isla de calor urbana.

2.3. Objetivos Particulares

Determinar las diferencias de la temperatura del aire (T_A) y las concentraciones de CO ([CO]) en la Ciudad de México en horas pico utilizando las bases de datos de la RedMet y RAMA, y examinar la posible relación de la [CO] con T_A en las diversas estaciones meteorológicas/calidad del aire.

Generar a través de los datos de las estaciones meteorológicas/calidad del aire las distribuciones de T_A .

Analizar la dispersión del monóxido de carbono mediante el modelo CAL3QH de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA).

Determinar si la dispersión del monóxido de carbono se asocia a patrones de mayor concentración cerca de avenidas amplias.

3. Sitio de Estudio

La zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) enfrenta un acelerado proceso de urbanización, en el cual al incorporar a municipios conurbados del Estado de México se conforma la zona metropolitana más grande del país y una de las más grandes del mundo. Este aumento en la tasa demográfica aunado a la considerable inmigración, han resultado en una serie de problemas ambientales, sociales, de planeación urbana y una saturación de servicios públicos.

La ZMVM, se localiza en la porción meridional, de la Altiplanicie Mexicana a una altitud promedio de 2240 msnm. Su clima es subtropical de altura, con un periodo de lluvias de mayo a octubre y una época seca durante el resto del año. Las temperaturas oscilan de 5.3 °C (promedio mínimo en enero) a 26.5 °C (promedio máximo en abril y mayo). Los vientos dominantes provienen del noreste (NE) y sureste (SE) (INECC, 2007).

De 1950 a 1980, la ciudad triplicó su población y superficie. Aproximadamente, una tercera parte de su población se ubicó en los municipios conurbados; la superficie del área urbana pasó de 117 km², en la

primera fecha, a más de 9,560 km² en la segunda. Se inició la conurbación con el Estado de México, perfilándose lo que sería la ZMVM (INE, 2005). La ZMVM presenta una población total 19,239,910 habitantes (INEGI, 2009).

En estas zonas se observa una centralización de la actividad económica y vialidades; la población ha sido crecientemente desplazada hacia la periferia urbana donde existen severas carencias de servicios públicos, deficiencias en la conectividad y la movilidad, que repercuten en distancias, tiempos y costos para acceder a las fuentes de empleo, educación y salud (ONU, 2015).

En la Ciudad de México existen cuatro delegaciones centrales que acumulan el 19% de la población, generan el 53% del total de empleos formales y las remuneraciones promedio por persona ocupada superan hasta cinco veces el de las demarcaciones periféricas (Tabla 3) (INEGI, 2009). En cierta medida, esto explica la elevada cantidad de viajes con destino a la Ciudad de México que generan conflictos ambientales y de movilidad, ocasionando una constante congestión vial y el incremento de los tiempos de traslado. Se estima que una persona invierte 3.5 horas al día, considerando todos los viajes diarios que realiza (INEGI, 2007).

Tabla 3. Encuestas origen-destino de movilidad en 1994 y proyecciones para el 2020. Fuente: (INEGI 1994), análisis y proyecciones SETRAVI.

Ámbito Geográfico	1994	%	2020	%
Ciudad de México	13 673.1	66.5	17 426.3	61.5
Viajes al interior de la Ciudad de México	11 598.6	56.4	14 647.3	51.7
En delegaciones	4 977.4	24.2	6 398.1	22.6
Entre delegaciones	6 621.1	32.2	8 249.2	29.1
Viajes metropolitanos	2 074.5	10.1	2 778.9	9.8
Municipios conurbados del Estado de México	6 900.6	33.5	10 914.3	38
Viajes al interior de la ZMEM	4 744.1	23.1	8 101.7	28.6
En municipios	3 168.0	15.4	5 340.8	18.8
Entre municipios	1 576.0	7.7	2 760.8	9.7
Viajes metropolitanos	2 156.5	10.5	2 812.6	9.9
Total viajes en la ZMVM	20 573.7	100	28 340.6	100
Total de viajes internos	8 145.5	39.6	11 738.9	41.4
Total de viajes entre municipios/delegaciones	8 197.2	39.8	11 010.1	38.8
Total de viajes metropolitanos	4 231.1	20.6	5 591.6	19.7

Fuente: INEGI, 1994. Encuesta Origen – Destino. Análisis y Proyecciones de SETRAVI.

En la tabla 3 se puede observar las proyecciones realizadas por la SETRAVI con base en los datos recolectados por el INEGI EN 1994. Dentro de la fila “Ciudad de México”, se reporta el total de viajes realizados en auto, de los cuales, un apartado corresponde a viajes dentro de una delegación, entre delegaciones y viajes con el Estado de México como destino (Estos viajes no son considerados dentro del apartado “Viajes al interior de la Ciudad de México”). Lo mismo ocurre para el apartado “Municipios conurbados del Estado de México”.

La fila “Total de viajes en la ZMVM” toma en cuenta la suma de los viajes realizados en la ciudad de México y los viajes realizados dentro de los municipios conurbados del Estado de México. En las siguientes columnas se reporta qué porcentaje representan viajes internos (dentro de una delegación/municipio), viajes entre municipios/delegaciones y finalmente, los viajes metropolitanos (viajes realizados entre la Ciudad de México y el Estado de México).

Al realizar una comparación entre las proyecciones y los datos reportados en el año 2014, se puede observar una clara subestimación en los datos. A la fecha el parque vehicular suma 5.5 millones de automóviles; para 2020 la cifra alcanzará de 7.5 a 11 millones de autos en circulación, lo que resultará en un colapso de vialidades en la Ciudad de México (SEMOVI, 2014).

3.1. Caracterización de los micrositos de estudio.

Este estudio se centra en la estimación de la contaminación atmosférica por CO en sitios seleccionados de la Avenida de los Insurgentes (Insurgentes). Esta avenida es una de las vías principales de la Ciudad de México, pues tiene la particularidad de ser una de las entradas viales más importantes para el movimiento de la población que conecta las autopistas México-Pachuca y México-Cuernavaca.

La vía Insurgentes tiene una longitud de 28.8 km y atraviesa de sur a norte (y de norte a sur) la mayor parte de la zona urbana de la ciudad. Se divide en tres tramos principales, de norte a sur: la Zona Norte de la calle Acueducto de Guadalupe y la Carretera Federal México –Laredo No. 85 a la calle de Mosqueta; Zona Centro entre la calle de Mosqueta y el Paseo de la Reforma; la Zona Sur: de Paseo de la Reforma a la calle Guadalupe Victoria, Carretera Federal México–Cuernavaca 95 y Autopista México–Cuernavaca (SETRAVI, 2010).

De igual manera Insurgentes, presenta entronques con otras vías altamente transitadas, por ejemplo: Mixcoac, Viaducto Miguel Alemán a la altura de Coyoacán e Insurgentes, cruces como Eje 4 Sur, Río Mixcoac, Eje 10 Sur, Periférico y San Fernando, son nodos en donde la circulación vehicular se detiene

hasta por 15 minutos debido a la reducción de carriles. A bordo de un auto particular de norte a sur, las principales dificultades son atravesar los cruces de La Raza, el Eje 1 Norte Álzate, Paseo de la Reforma, la Glorieta de Insurgentes, el Eje 3 Sur Baja California y Viaducto. Puntos como Fórum Buenavista, en el Eje 1 Norte, Eulalia Guzmán y el cruce de Avenida Puente de Alvarado se vuelven complicados para los automovilistas por la alta concentración de peatones (López, 2014).

Los congestionamientos en las horas de máxima demanda son de las 07:30 a las 09:00 horas; así como de las 14:30 a las 16:00 y de las 19:00 a las 21:00 horas (Reforma, 2006).

Los cruces que se eligieron para estimar las concentraciones de CO con ayuda del software CAL3QH fueron: Insurgentes y Reforma, Insurgentes y Eje 1 Norte e Insurgentes y Eje 3 Sur (Figura 9). Se eligieron estos sitios debido a que la SETRAVI indica que, a bordo de un auto particular, las principales dificultades son atravesar los cruces de La Raza, Paseo de la Reforma, la Glorieta de Insurgentes, el Eje 3 Sur Baja California, Viaducto y el Eje 1 Norte Álzate, donde éste último presenta problemáticas adicionales debido a la marea de peatones (López, 2014).



Figura 9. Imágenes satelitales de los cruces elegidos para el estudio (Obtenido Google Earth).

3.2. Descripción del Parque Vehicular

El número total de vehículos muestra varios rasgos que complican su eficiencia y equidad. Existe un claro predominio de los autos particulares, a pesar de que sólo representan alrededor del 16% de los viajes persona-día. El incremento en el número de vehículos particulares está asociado a diferentes factores, entre los que destacan el crecimiento económico, las mejoras sectoriales de ingresos, distancias

cada vez más largas, deficiencias en el transporte público y facilidades de crédito. De acuerdo con los datos del Programa de Verificación Vehicular 2001, el número de vehículos en circulación es de 1.7 millones de automóviles particulares con placas del Ciudad de México, y 0.6 millones con placas del Estado de México. En conjunto, más del 95% del total de vehículos automotores que operan en la ZMVM capturaron menos del 20% del total de la demanda del tramo de viajes.

La cantidad de automotores, superior a los tres millones de unidades, la expansión de la superficie urbana, la cual impacta en el incremento del kilometraje recorrido por viaje, y la saturación creciente de la red vial obligan a incrementar el tiempo de operación de los motores en condiciones ineficientes y bajas velocidades de circulación. Para satisfacer la demanda de energía de esta flota inmensa, con viajes largos y bajas velocidades, se requieren de 4.5 millones de litros de diésel, 18 millones de litros de gasolina y 700 mil litros de gas licuado de petróleo diariamente.

De acuerdo al inventario de emisiones de la ZMVM, del total de vehículos, 94% de ellos utilizan gasolina, el 5% consumen diésel y el 1% gas LP. Del parque vehicular que utiliza gasolina, el 52% de los vehículos son anteriores a 1990, carecen de tecnología ambiental, son altamente emisores y aportan cerca del 68% de las emisiones totales. El 48% restante de los vehículos que son de 1991 en adelante, cuentan con tecnología ambiental y participa con el 32% de las emisiones ((INECC, 2011).

3.3. Reporte de Movilidad

La movilidad se refiere tanto a la demanda de viajes que requiere una población creciente y con empleos, viviendas y accesos a educación, cultura y comercio, cada vez más distanciados entre sí, y por otro lado, a la oferta de infraestructura vial de calles y avenidas, con sus intersecciones, así como a los diversos servicios que se utilizan para realizar los viajes, desde el auto particular, el transporte público de mediana y gran capacidad, como los autobuses y el metro, y una creciente dotación de transporte concesionado como los taxis y los microbuses.

4. Metodología

La metodología se divide en dos secciones, la primera consta del procesamiento de los datos obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y la Red Meteorológica y Radiación Solar (RedMet), la segunda consta de la obtención de datos para ser utilizados en el software CAL3QH.

4.1. Procesamiento de datos obtenidos por la RAMA y RedMet

Para la realización de este estudio se utilizaron los datos de libre acceso publicados por la RAMA y RedMet. Durante un periodo de 10 años se analizaron los datos por hora de cada estación meteorológica, desde enero de 2005 hasta diciembre de 2015. Esto brindó un total de aproximadamente 87,610 datos por cada estación meteorológica y de monitoreo atmosférico. Los datos fueron procesados con ayuda del software STATISTICA™ (versión 13, Statasoft) y Excel (2013, Office).

En primera instancia, se descargaron los datos de temperatura, humedad relativa, dirección de viento y concentración de CO de cada una de las estaciones meteorológicas.

Al contar con los datos necesarios, se examinaron los años de operación para determinar qué estaciones se tomarían en cuenta para generar los mapas de distribución de CO y de temperatura del aire (Anexo 1). Una vez determinadas, se prosiguió a dividir el año en temporadas: temporada cálida seca (TSC, abril a junio), temporada seca fría (TSF, noviembre a marzo) y temporada húmeda (TH, julio a octubre). Se delimitaron las temporadas debido al movimiento de los contaminantes en relación a la humedad, radiación solar, viento y temperatura. Esta clasificación se maneja para generar los mapas de distribución de temperatura y CO.

En el caso de la temperatura del aire, el propósito es observar el comportamiento de la isla de calor y para ello se construyeron mapas de distribución de temperatura con un programa computacional (Surfer™, versión 8 Golden Software) a las 6 y 14 horas de 2005 al 2015, sin tomar en cuenta los años 2006, 2007, 2009 y 2010 debido a que un número considerable de estaciones meteorológicas no funcionaron y otras no recogieron datos representativos de las tres temporadas (Anexo 1).

A su vez, se reportan las diferencias más grandes entre los valores de T_A (denominado ΔT_A) en las zonas urbanas y las zonas conurbanas.

A continuación (figura 10), se presentan las estaciones meteorológicas y de monitoreo atmosférico, su ubicación y altitud. Éstas estaciones pertenecen tanto a la RAMA como a la RedMet y fueron todas aquellas utilizadas a lo largo del análisis (2005 a 2015). Algunas estaciones salieron de servicio en diversos años y otras fueron añadidas, en el anexo 1 se puede encontrar toda la información relacionada con sus periodos de funcionamiento.

	Estación		Altitud (m)
1	ACO	Acolman	2198
2	ARA	Aragón	2200
3	AZC	Azcapotzalco	2279
4	CAM	Camarones	2233
5	CCA	Centro de Ciencias de la Atmosfêra	2280
6	CES	Cerro de la Estrella	2219
7	CHO	Chalco	2253
8	CUA	Cuajimalpa	2704
9	CUI	Cuitláhuac	2255
10	CUT	Cuautitlán	2263
11	FAC	FES Acatlán	2299
12	HAN	Hangares	2235
13	HGM	Hospital General	2234
14	IMP	Instituto Mexicano del Petroleo	2250
15	IZT	Iztacalco	2238
16	LAG	Lagunilla	2223
17	LLA	Los Laureles	2230
18	LPR	La Presa	2302
19	MER	Merced	2245
20	MON	Montecillo	2252
21	NET	Netzahualcoyotl	2230
22	NEZ	Nezahualcóyotl	2235
23	PED	Pedregal	2326
24	PLA	Plateros	2345
25	SAG	San Agustín	2241
26	SFE	Santa Fe	2599
27	SJA	San Juan de Aragón	2258
28	SUR	Santa Úrsula	2279
29	TAC	Tacuba	2242
30	TAX	Taxqueña	2242
31	TLA	Tlalnepantla	2311
32	TPN	Tlalpan	2522
33	UAX	UAM Xochimilco	2246
34	UIZ	UAM Iztapalapa	2221
35	VAL	Vallejo	2248
36	VIF	Villa de la Flores	2242
37	XAL	Xalostoc	2160

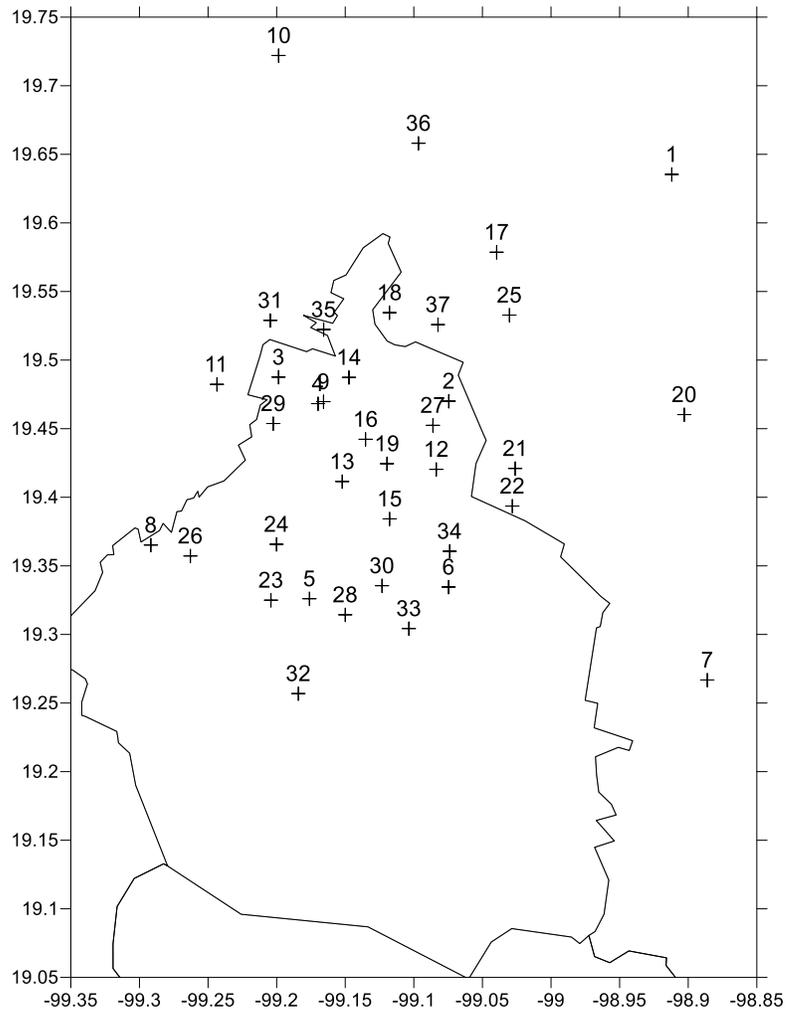


Figura 10. Distribución geográfica de las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA y RedMet en la ZMVM.

A su vez, se reportan las diferencias más grandes entre los valores de T_A del área urbana y rural (denominado ΔT_A) en las zonas urbanas y las conurbanas. También se construyeron mapas de la distribución del CO utilizando un programa computacional (Surfer™, versión 8 Golden Software) en

distintas horas del día. Para ello se eligieron dos intervalos, uno de las 7 a 9 horas y otro de 19 a 21 horas que son horas pico de tránsito vehicular. Adicionalmente, se graficaron rosas de viento de cada temporada y estación meteorológica en los intervalos de hora elegidos para cada caso.

4.1.2. Análisis estadístico de datos

La primera aproximación en el análisis de datos fue generar promedios de los diversos casos. Se obtuvieron promedios anuales, mensuales y temporales (TSC, TSF y TH) de CO y T_A . A partir de éstos, se generaron promedios durante las horas pico de tránsito vehicular (7:00 a 9:00 h y 19:00 a 21:00 h) en las distintas temporadas. Más adelante se graficó la variabilidad diaria que presenta el CO en función de la temperatura. También se graficó la variabilidad de CO cada hora durante el año 2005 y 2015 en la estación de la Merced (MER) y Pedregal (PED).

A continuación, se prosiguió a generar mapas de distribución, tomando a la T_A como variable independiente y concentración de CO como variable dependiente.

Al observar la tendencia general de los datos, se realizaron pruebas estadísticas para observar si los datos de temperatura y concentración de CO son normales, una vez verificado esto, se prosiguió a generar correlaciones lineales para ambas variables. Dentro de las correlaciones lineales, se dividieron los análisis en diurnos y nocturno, así como en las temporadas previamente mencionadas (Anexo 3).

4.2. Datos obtenidos mediante el software CAL3QH

El modelo de dispersión gaussiana se basa en una columna de humo emitida por la chimenea, la cual se eleva hasta cierta altura efectiva (H), que es la suma de la altura de la chimenea (h) más el ascenso (Δh) durante el momento inicial de emisión del humo.

A partir de H la columna de humo se mueve horizontalmente hacia dónde va el viento (dirección x) con velocidad u y se dispersa en las direcciones perpendiculares a éste, y y z . (y = horizontal, z = vertical). La dispersión en el plano yz se debe principalmente a la turbulencia atmosférica y puede calcularse como una distribución gaussiana (Figura 11).

Donde $C(x,y,z)$ es la concentración, Q es la cantidad de contaminante emitido por unidad de tiempo ($g\ s^{-1}$), u es la velocidad del viento y σ_y y σ_z son coeficientes de dispersión turbulenta que dependen de la clase de estabilidad y de la distancia al foco en la dirección del viento, x . El suelo se trata como una superficie plana que no absorbe contaminante.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \left(\exp\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$C(x, y, z)$: Concentración a nivel del suelo en el punto (x,y) en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}$: Distribución de masa en la columna (z) a una distancia (x).

Q: Emisión de contaminantes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$\frac{y^2}{2\sigma_y^2}$: Distribución de masa en la columna (y) a una distancia (x).

$\sigma_y\sigma_z$: Coeficientes de dispersión vertical y horizontal

H: Altura efectiva (m)

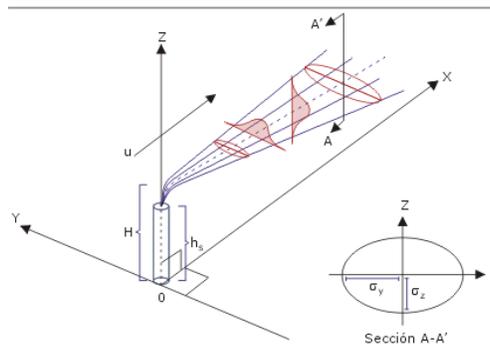


Figura 11. Ecuación asociada a los modelos de dispersión gaussiana y esquema representativo de cada término en la ecuación. Dónde: C representa la concentración, Q la cantidad de contaminante emitido por unidad de tiempo, u la velocidad del viento y σ_y y σ_z son coeficientes de dispersión turbulenta que dependen de la clase de estabilidad y de la distancia al foco en la dirección del viento, x (EPA, 2010).

Las variables que se requieren por correr el programa CAL3QH para generar resultados óptimos se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 4. Datos requeridos por el software CAL3QH para generar un reporte de la dispersión de contaminantes.

Variables meteorológicas	Tiempo de observación [min] Coeficiente de rugosidad del terreno [cm] Velocidad de asentamiento [cm/s] Velocidad de deposición [cm/s] Velocidad del viento [m/s] Nivel de estabilidad [1 to 6 = A to F] Altura de mezcla [m]	Variables de la zona de estudio	Coordenadas de la avenida [X,Y,Z] [m or ft] Ancho de la avenida [m or ft] Coordenadas del receptor [X,Y,Z] [m or ft]
Variables de tránsito	Volumen de tránsito [veh/hr] Velocidad del tránsito [mi/hr] Tiempo promedio que toma el cambio de luz en el semáforo para la intersección [s] Tiempo promedio que tarda el alto en la intersección [s] Tasa de flujo de saturación [veh/hr] Tipo de señalamiento Signal Type [pretimed, actuated, or semiactuated] Tasa de llegada [worst, below average, average, above average, best progression]		

En los tres micrositos de estudio se midió el ancho de cada cruceo, ancho de cada carril, tiempo de semáforo en alto y siga, número de autos que atraviesan los cruceo en cada siga, capacidad de cada

cruce y velocidad promedio de cruce. El ancho del cruce se midió en función del ancho de cada carril y el número de carriles en cada cruce, como se muestra en la figura 12, donde se toma como ejemplo el ancho promedio de 2.7 m en tres carriles, dando como resultado 8.1 m de distancia total en el cruce.

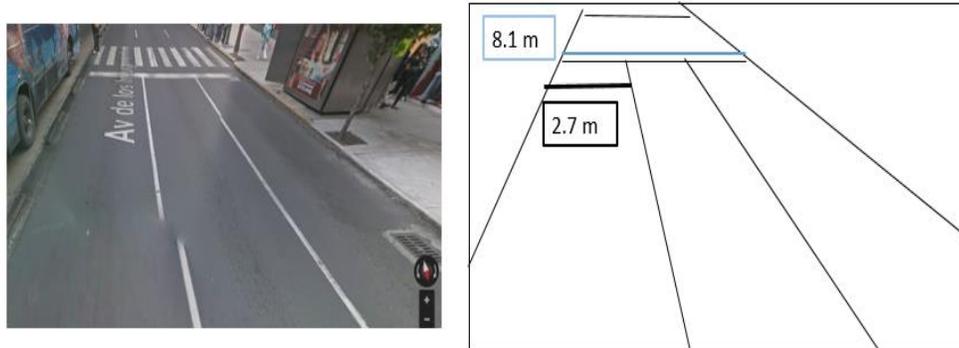


Figura 12. Determinación del ancho de cada cruce y carril en las distintas zonas de estudio. [Elaboración propia 2016, de una imagen de Google maps].

Para la variable de tiempo de alto y siga, se tomaron en cuenta 4 ciclos de cada semáforo, ya que, al cuantificar los datos, se observó que existen variaciones en estos intervalos. Para la variable sobre el número de autos que atraviesan el cruce durante cada siga, se tomó en cuenta el valor de la capacidad de cruce. Adicionalmente, se grabaron videos con una duración de cada semáforo en verde en intervalos de cada 10 minutos para determinar el desarrollo del tránsito de acuerdo a la hora.

La capacidad de cada cruce fue determinada, al calcular el número de autos que caben en una distancia de 50 metros a partir del cruce. En el ejemplo, se determina que la capacidad es de 16 autos cada 50 metros (figura 13). Cabe recalcar que el número de vehículos no incluye camiones debido a la diferencia en la tasa de emisión.

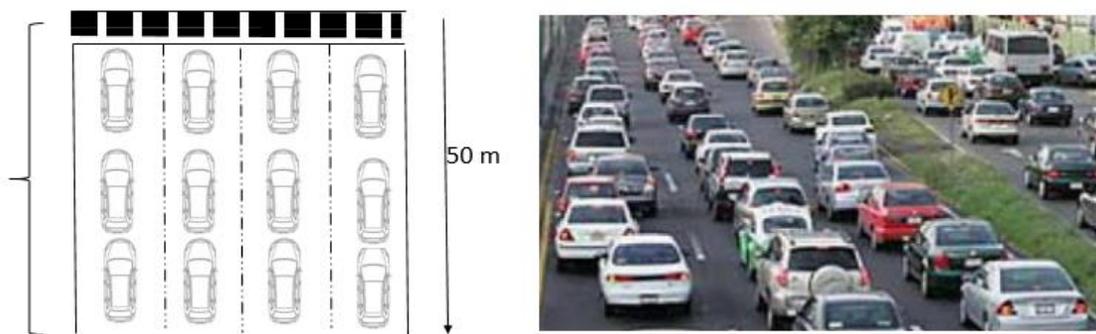


Figura 13. Ejemplo sobre la determinación de la capacidad de un cruce, tomando en cuenta el número de autos encontrados en 50 metros. [Elaboración propia 2016].

En la siguiente tabla (Tabla 4) se detallan los datos recaudados en cada zona de estudio que fueron utilizados en el programa CAL3QH.

Tabla 5. Formato utilizado para determinar los datos en el cruce Insurgentes y Eje 1 Norte.

Insurgentes y Eje 1 Norte, Reforma, Eje 3 Sur					
Número de cruces:		Tiempo de observación:		Coefficiente de rugosidad:	
Volumen de tránsito [veh/h]:			Velocidad de tránsito [km/h]:		
Factor de emisión en inactividad:			Factor de emisión en movimiento:		
	Capacidad en 50 m	Tiempo alto (s)	Tiempo siga (s)	Ancho de carriles [m]	Ancho de Cruce [m]
Cruce 1					
Cruce 2					
Cruce 3					

Una vez que se cuenta con los datos del formato previo, se prosigue a identificar el tipo de cruce al cual se asocia el sitio de estudio. Para los cruces de Eje 1 Norte y Eje 3 Sur se asoció el siguiente tipo de cruce:

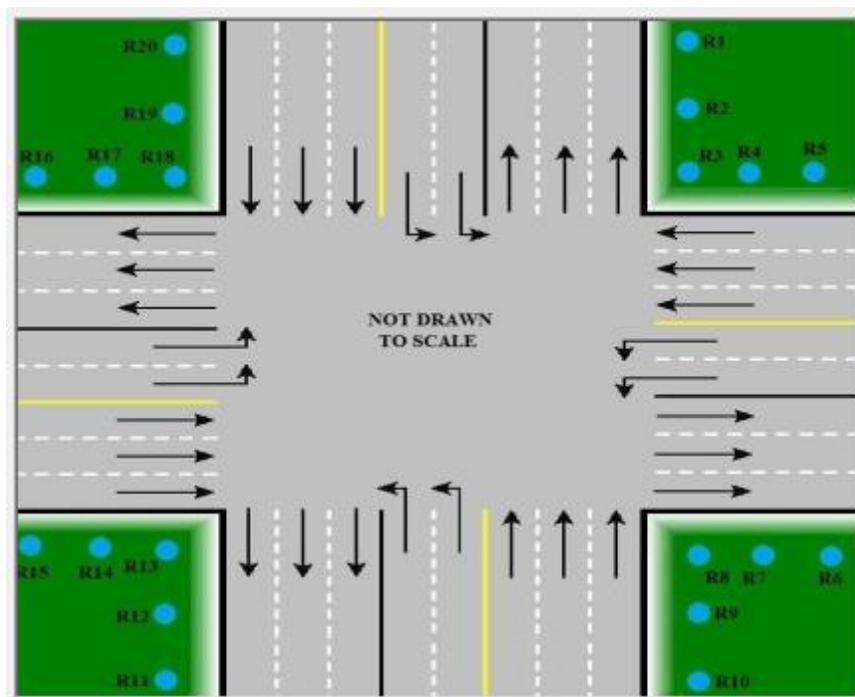


Figura 14. Representación del tipo de intersección 6X6 utilizada en el análisis de Eje 1 Norte y Eje 3 Sur. Este tipo de intersección debe ser elegido con la finalidad que la distribución del CO sea espacialmente adecuada. [Obtenida del manual de usuario CAL3QH (EPA, 2010)].

Se puede observar que dentro del cruce se encuentran 20 receptores (R1-R20) los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de los cruces. Con base en los datos obtenidos por el formato, el software CAL3QH utiliza el modelo de dispersión gaussiana y estima la concentración de CO en cada uno de éstos receptores, esto se hace con la finalidad de conocer dónde se encuentran las concentraciones más altas.

Por otro lado, en Reforma e Insurgentes se eligió el siguiente cruce que se muestra en la figura 15:

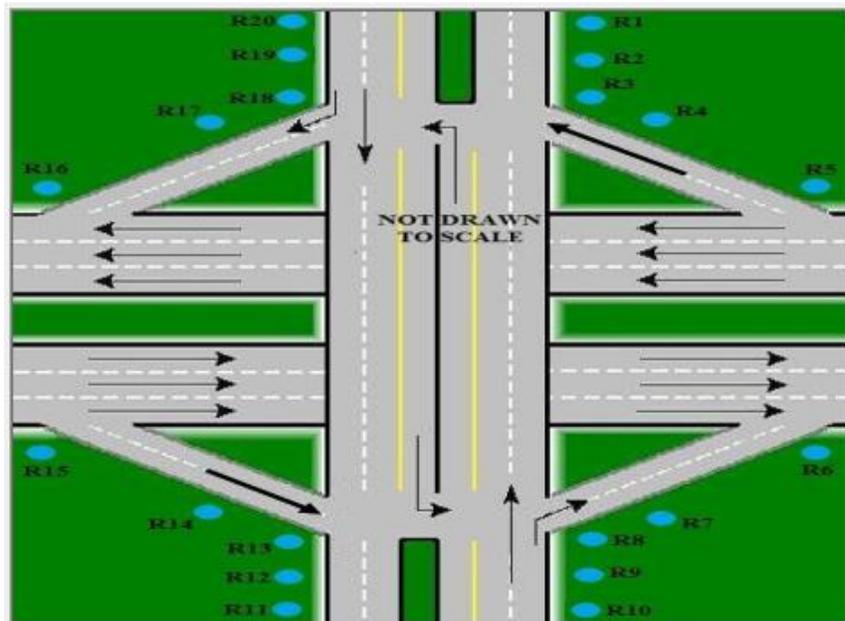


Figura 15. Representación del tipo de intersección 6X6 utilizada en el análisis de la avenida Paseo de la Reforma. Este tipo de intersección debe ser elegido con la finalidad que la distribución del CO sea espacialmente adecuada. [Obtenida del manual de usuario CAL3QH].

5. Resultados y discusión.

5.1. Comportamiento temporal de las concentraciones de CO.

En la figura 16, se puede observar una clara disminución en la concentración de CO a través del tiempo, desde el 2005 hasta el 2015. Esta disminución es casi del 50% en el 2015, de los valores reportados en el 2005, pasando de 1.6 a 0.78 ppm. Así mismo es perceptible que la disminución no es constante, ya que hay picos y años donde la pendiente se intensifica. En términos generales, esta disminución se asocia al endurecimiento de normas asociadas a la verificación vehicular en la ZMVM, a la implementación de convertidores catalíticos, adicional al aumento en la eficiencia de los motores, creación de vías rápidas e implementación de diversas rutas del Metrobús (INECC, Estudio de emisiones y características vehiculares en ciudades mexicanas. Reporte Final, 2011).

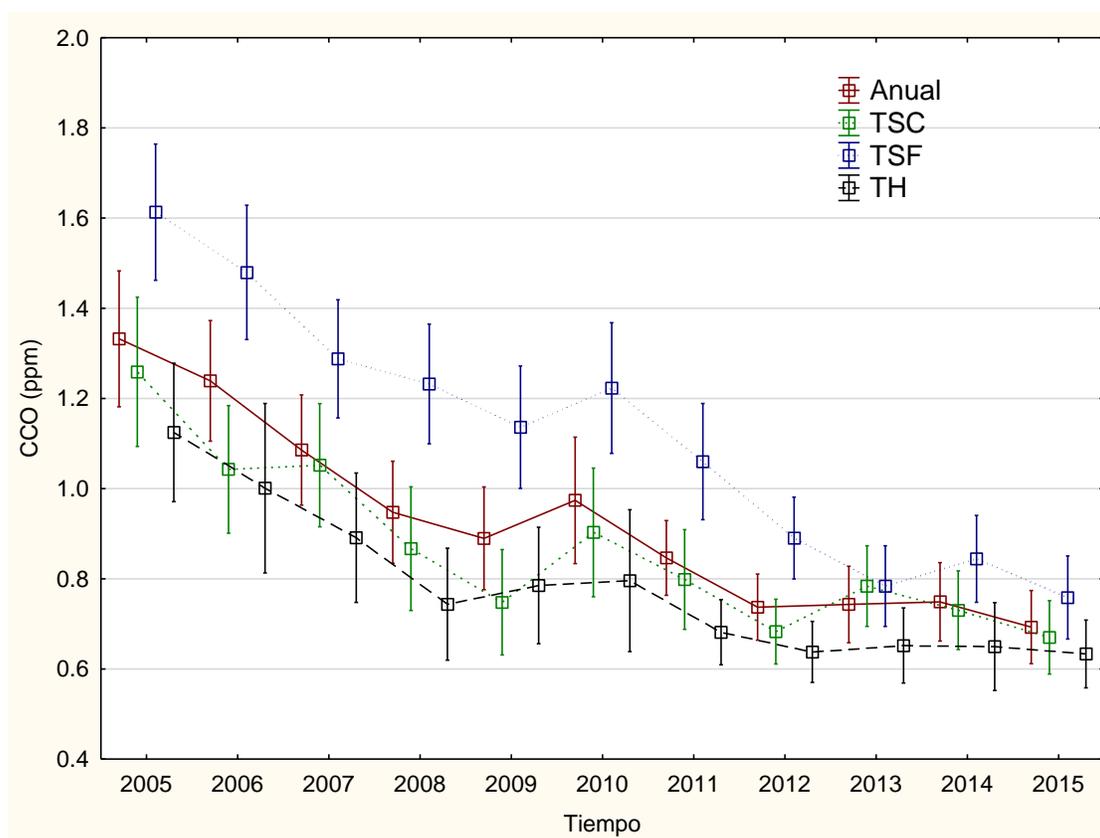


Figura 16. Comportamiento promedio de la concentración de CO en temporada seca fría (TSF), temporada seca cálida (TSC), temporada húmeda (TH) y promedio anual. [Elaboración propia, 2016].

En el año 2010 hay un claro pico en las concentraciones de CO, esto podría asociarse a que durante ese año el INEGI reporta un crecimiento vehicular mayor al promedio (Recordando que los autos particulares son los principales responsables de la emisión de CO) (INEGI, 2016). Durante este año también se reportaron T_A muy bajas, así como un gran número de frentes fríos e inversiones térmicas (SEGOB, 2010), (el efecto de temperatura baja se explica más adelante), estos eventos pudieron tener efecto sinérgico asociado a la alta tasa de crecimiento vehicular.

A partir del 2013 se observa una menor pendiente negativa en términos de la concentración de CO promedio anual, es decir empieza a estabilizarse.

Además, es importante mencionar que en la figura se aprecian los diversos comportamientos que tiene el CO en cada una de las temporadas. Durante la TSF se observan los valores más altos, esto se debe probablemente al efecto que tienen las temperaturas bajas. La literatura reporta que las bajas temperaturas contribuyen a concentraciones ambientales de CO altas, es debido a que disminuye la eficiencia de combustión de los motores de vehículos, esto resulta en una combustión incompleta, donde el CO se genera a una mayor concentración (NAS, 2002). Adicionalmente, la capa de mezcla presenta menor altura, esto aunado a que en gran parte de la ZMVM, la velocidad del viento es muy baja, no permite una mezcla adecuada y los contaminantes se estancan (Morales, 2006).

Los valores de la TSC son menores comparándolos con el comportamiento anual. Esto se asocia a los meses de abril a junio, cuando la ZMVM presenta cielos parcialmente despejados, el radical OH (dependiente de la radiación solar) influye en las reacciones de oxidación del CO. Por este motivo, el CO se oxida a una mayor tasa, mermando su concentración en el ambiente. De igual manera, las lluvias generan un lavado de contaminantes, por este motivo se puede observar que la TH es aquella que presenta los valores más bajos en relación a la concentración de CO.

Considerando que el promedio de los valores de la concentración de CO se encuentra mermando por las horas en las cuales el tránsito es muy bajo, se realizaron gráficas donde se aplicó un filtro para la concentración de CO en hora pico: 7:00-9:00 h y 19:00-21:00 h (figura 17 y 18).

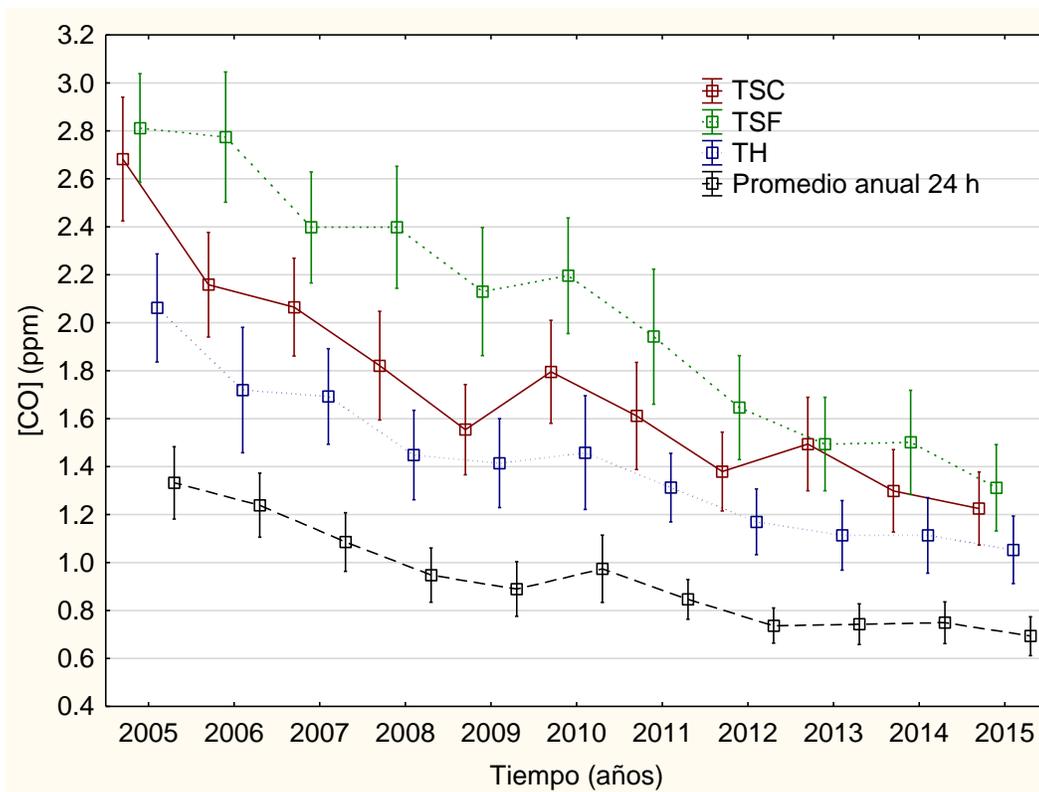


Figura 17. Distribución promedio de la concentración de CO [CO] en temporada seca cálida de 7:00-9:00 h en la temporada seca cálida (TSC), temporada seca fría (TSF), temporada húmeda (TH) y promedio anual.

La figura 17 muestra que en la hora pico 7:00-9:00 es dónde la concentración de CO es mayor. Esto es relevante, recordando que a esta hora posiblemente está actuando el radical OH, el cual está generando reacciones de oxidación del CO, procediendo como un sumidero del contaminante. A la vez, cabe mencionar que la diferencia entre las concentraciones a hora pico y el promedio anual disminuye a partir del 2005. Esto confirma que, efectivamente, las fuentes móviles están disminuyendo sus factores de emisión de CO.

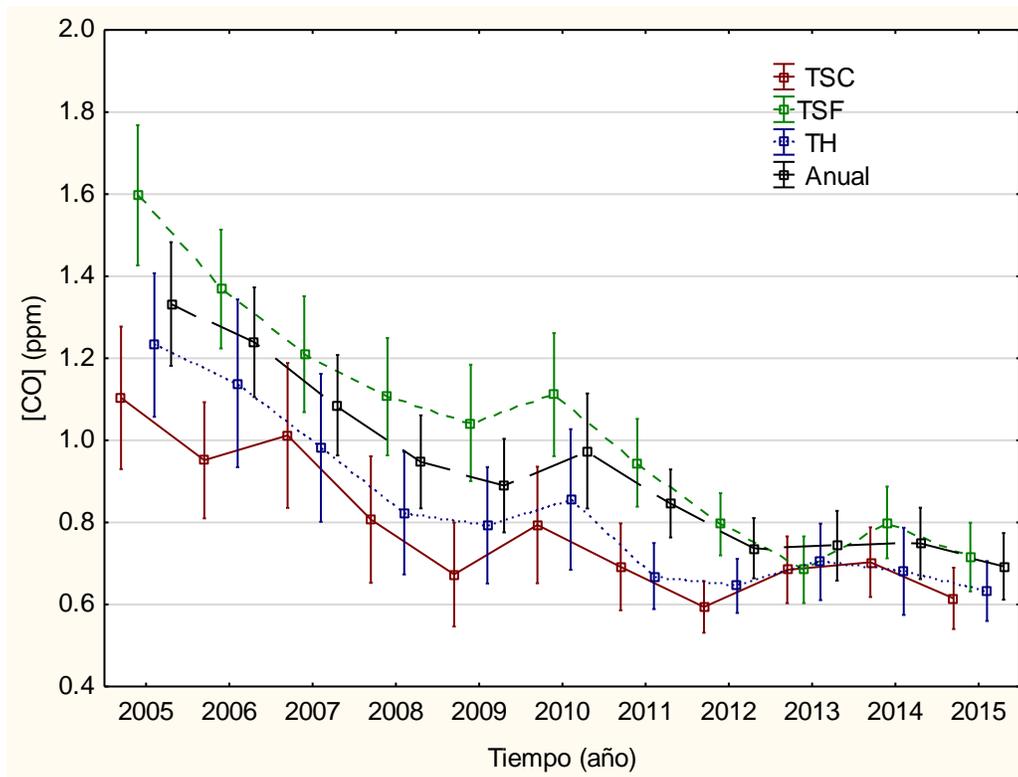


Figura 18. Distribución de la concentración de CO [CO] promedio en temporada seca cálida de 19:00-21:00 h en temporada seca cálida (TSC), temporada seca fría (TSF), temporada húmeda (TH) y anual.

Analizando los valores asociados a los promedios de las horas pico de las 19-21h (figura 18), resulta importante mencionar que en el año 2007 se cuenta con un valor máximo durante la TSF, el cual disminuye drásticamente para el siguiente año. Posteriormente se encuentra otro pico menos intenso en el año 2013. Se desconoce el motivo de éstos picos.

Al analizar los valores promedio de la T_A (Figura 17) y la concentración de CO (Figura 14) durante el intervalo de estudio, se puede observar que no hay ésta no tiene se asocia a un patrón de comportamiento asociado debido probablemente a su alta variabilidad. Pero que se mantiene constante a través del tiempo.

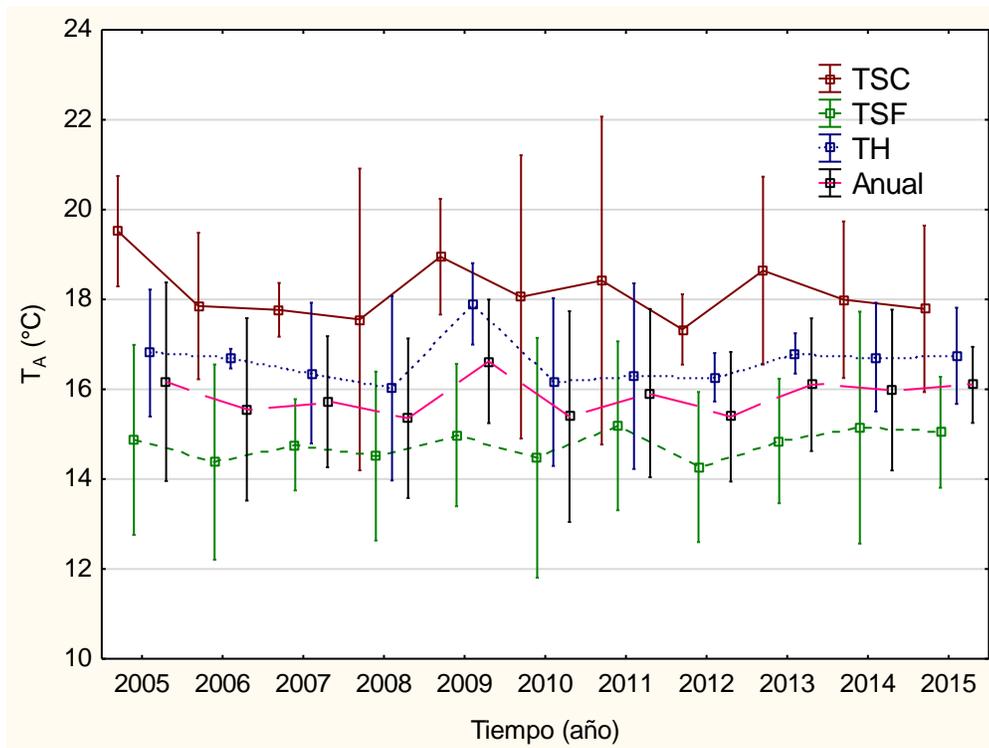


Figura 19. Distribución de la temperatura del aire (T_A) y de la temporada seca fría (TSF), temporada seca cálida (TSC) y temporada húmeda (TH).

Siendo los valores más altos en los años 2009 y 2005, y los más bajos en 2008 y 2012. El 2009 y el 2014, representan años en los que se presentó el fenómeno del Niño, donde el primero es catalogado con una intensidad moderada y el último con una intensidad débil (GGWS, 2016). Para los valores menores también hay una correlación con los eventos de la Niña, siendo de intensidad leve en ambos años (NOAA, 2014). Estos valores adquieren relevancia para el análisis de Isla de Calor en la ZMVM.

Tomando en cuenta ambas gráficas (figura 16 y 19), resulta difícil determinar una correlación entre ambas variables. Si tomamos en cuenta que el CO es considerado un gas de efecto invernadero con efecto relativamente bajo, y que presenta una banda de absorción en el infrarrojo, se intuiría que en los años donde se reportan concentraciones mayores, la temperatura sería mayor y que aquellos años donde la concentración de CO es menor se tendría una menor temperatura. Sin embargo, los promedios anuales de T_A y CO no presentan este comportamiento.

Con el propósito de comparar el comportamiento que presentan las horas pico de tránsito vehicular y los promedios anuales, se graficó la distribución de los mismos (figura 18). A primera vista se logra observar la gran diferencia que existe entre la concentración en la hora pico de 7:00 a 9:00 h, el promedio anual y la hora pico de 19:00 a 21:00 h.

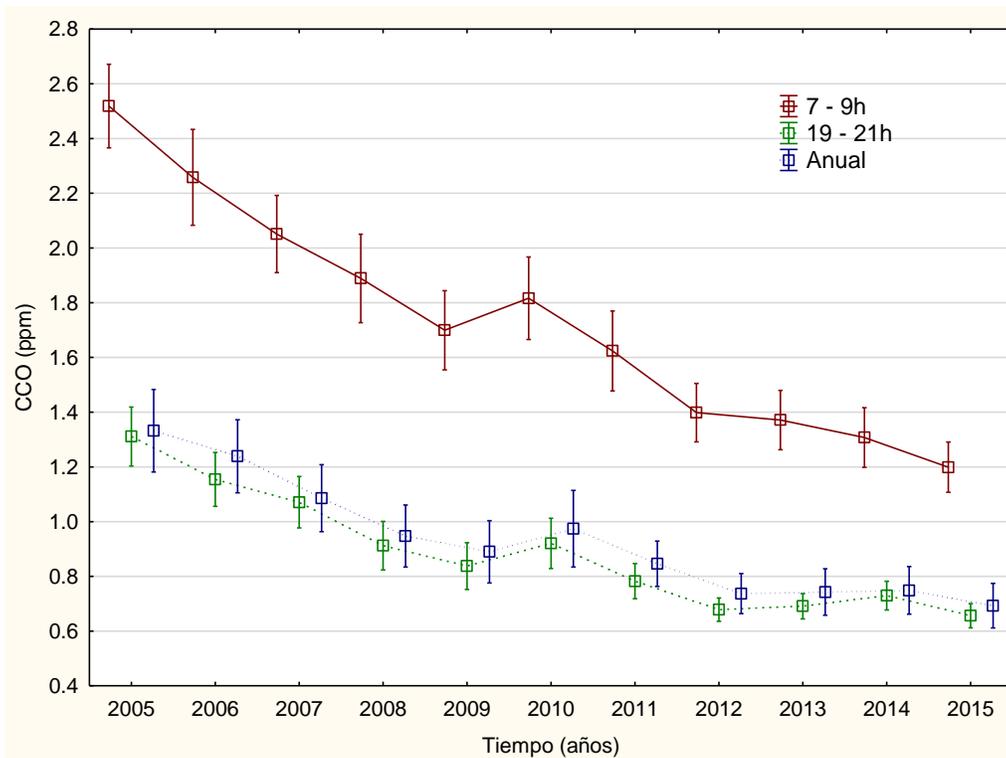


Figura 20. Distribución anual de la concentración de CO [CO] en los periodos de hora pico de 7:00 a 9:00 h y 19:00 a 21:00 h y anual desde 2005 a 2015. [Elaboración propia, 2016].

En estas figuras, se observa nuevamente una tendencia asociada a la disminución en la concentración de CO. Específicamente, se aprecia que la concentración de 7:00 a 9:00 h es aquella en la cual es más evidente el descenso de CO, ya que se reduce de 2.5 ppm a 1.2 ppm en 2015, cerca de un 48% del valor registrado en el 2005.

Por otro lado, se identifica nuevamente un pico en el año 2010 en todos los casos. Cómo se mencionó previamente. Este pico, probablemente se atribuye a valores bajos en la T_A durante este año debido, a un crecimiento vehicular mayor al promedio. Esto implica una probable capa de mezcla con menor altitud y una emisión de fuentes móviles más abundante.

Al tomar en cuenta los valores de concentración de CO de las 19:00 a las 21:00 h, éstos son más bajos que los valores anuales.

En la figura 21 se presentan las variaciones mensuales de [CO] a través del año en los años 2005 (concentraciones más altas y 2015 (concentraciones más bajas) donde es importante notar que en la época húmeda las concentraciones son bajas y casi constantes, mientras que en la época seca fría las concentraciones aumentan hasta 1 ppm (diciembre 2015).

Mientras que en la figura 20, se muestra las concentraciones mensuales para todos los años de estudio,

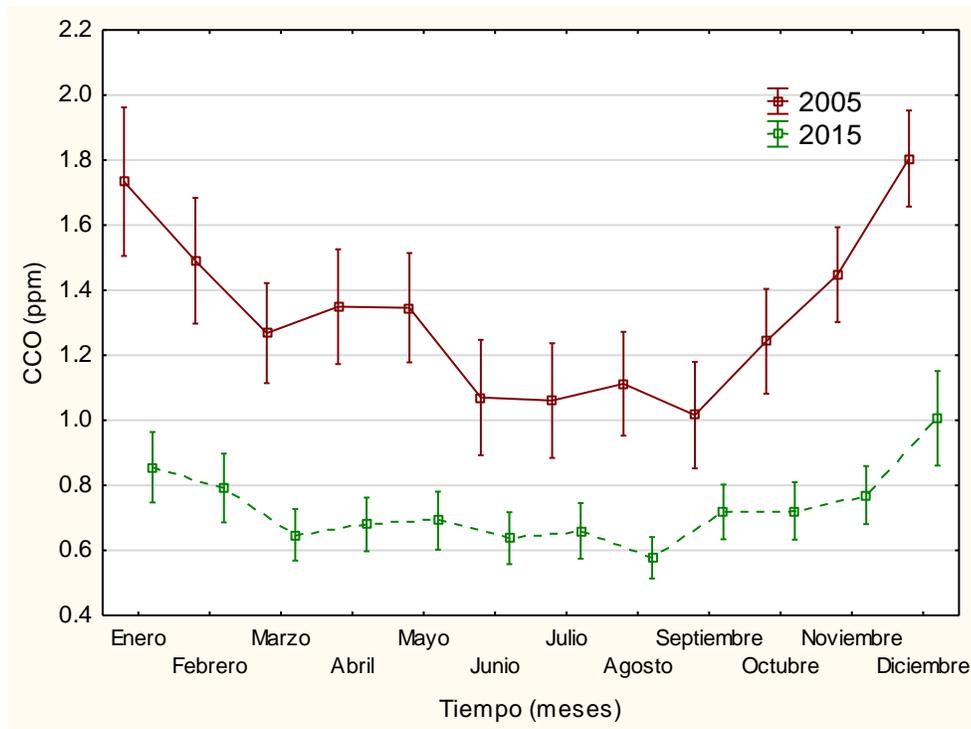


Figura 21. Comparación de comportamiento de CO en cada mes en los años 2005 y 2015.

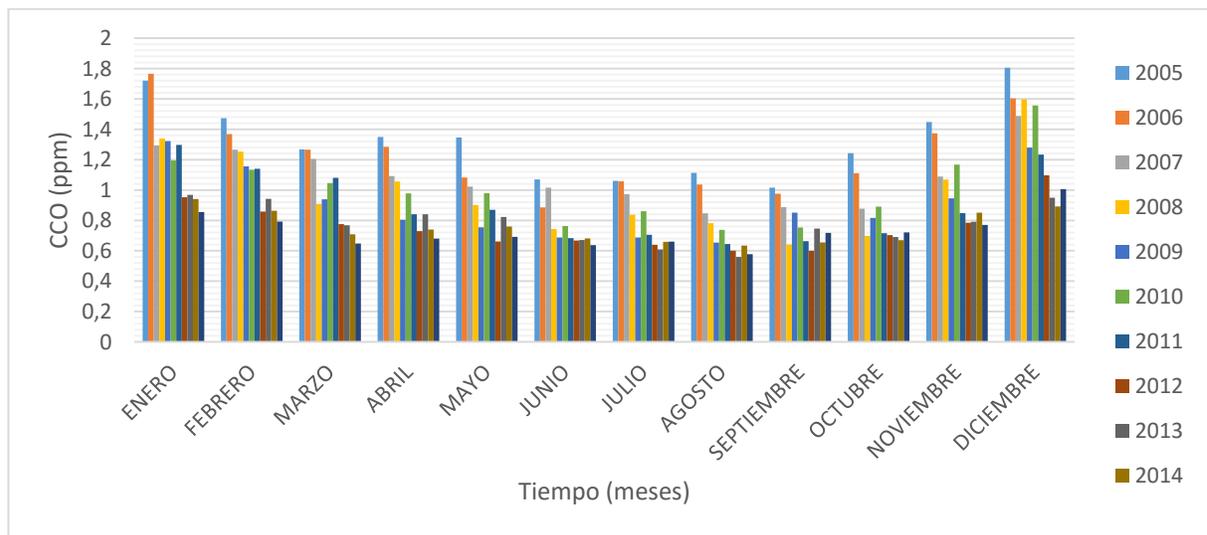


Figura 22. Variaciones mensuales a través del año en la concentración de CO desde el 2005 hasta el 2015. [Elaboración propia, 2016].

Se muestra en general que las concentraciones de CO aumentan en la temporada seca cálida y son menores en la temporada húmeda. Adicionalmente, en el 2015 los patrones no presentan variaciones tan grandes como en el año 2005.

5.2 Isla de Calor en la ZMVM

Con base en los datos emitidos por la RedMet, se calculó la diferencia entre la temperatura ambiente de las zonas urbanas y las zonas rurales (T_{U-R}) en la ZMVM (ΔT_A). Los cálculos fueron realizados para cada año del intervalo de estudio.

En la tabla 5 se aprecia que no en todos los casos el área urbana (MER) presenta una mayor T_A que en el área rural (MON), sin embargo, en la mayoría de los años, se puede identificar un efecto de isla de calor. De igual manera se identifica que el efecto más intenso de ICU se da a las 6:00 h y durante la temporada seca fría.

Tabla 5. Gradiente de temperatura entre la estación La Merced (MER urbana) y Montecillo (MON rural) en la ZMVM durante tres temporadas seleccionadas del año del 2005 al 2015. TSC (temporada seca cálida), TH (temporada húmeda) y TSF (temporada seca fría).

Año	$\Delta T_A (T_{U-R} \text{ } ^\circ\text{C})$							
	6:00 h				14:00 h			
	TSC	TH	TSF	Promedio	TSC	TH	TSF	Promedio
2005	0.7	0.7	1.98	1.12	2.25	1.49	1.52	1.75
2006	1.24	1.28	1.06	1.19	-1.46	-0.70	0.11	-0.68
2007	-	0.20	0.34	0.27	-	0.52	0.11	0.31
2008	-	0.07	0.18	0.7	0.07	0.71	0.15	0.31
2009	2.57	4.19	5.33	4.03	2.86	2.72	0.34	1.97
2010	2.69	3.48	6.16	4.11	0.11	0.95	1.46	0.84
2011	3.45	1.83	3.45	2.91	-0.41	0.01	0.50	0.03
2012	2.89	3.46	3.45	3.26	0.84	-0.27	1.23	0.6
2013	2.26	3.81	2.91	2.99	0.92	-0.23	1.55	0.74
2014	2.64	2.25	3.91	2.93	1.42	1.89	-0.80	0.83
2015	1.62	2.407	0.19	1.40	-0.07	0	-0.83	-0.3
Promedio	2.0	2.15	2.63	Promedio	0.65	0.64	0.48	

En especial durante el año 2010 se puede observar claramente un gradiente de temperatura promedio de $4.11 \text{ } ^\circ\text{C}$, alcanzando valores de hasta $6.16 \text{ } ^\circ\text{C}$, esto resulta importante tomando en cuenta los promedios de CO (figura 16), donde el año 2010 presenta pico en la concentración, el cual se desvía de la tendencia general.

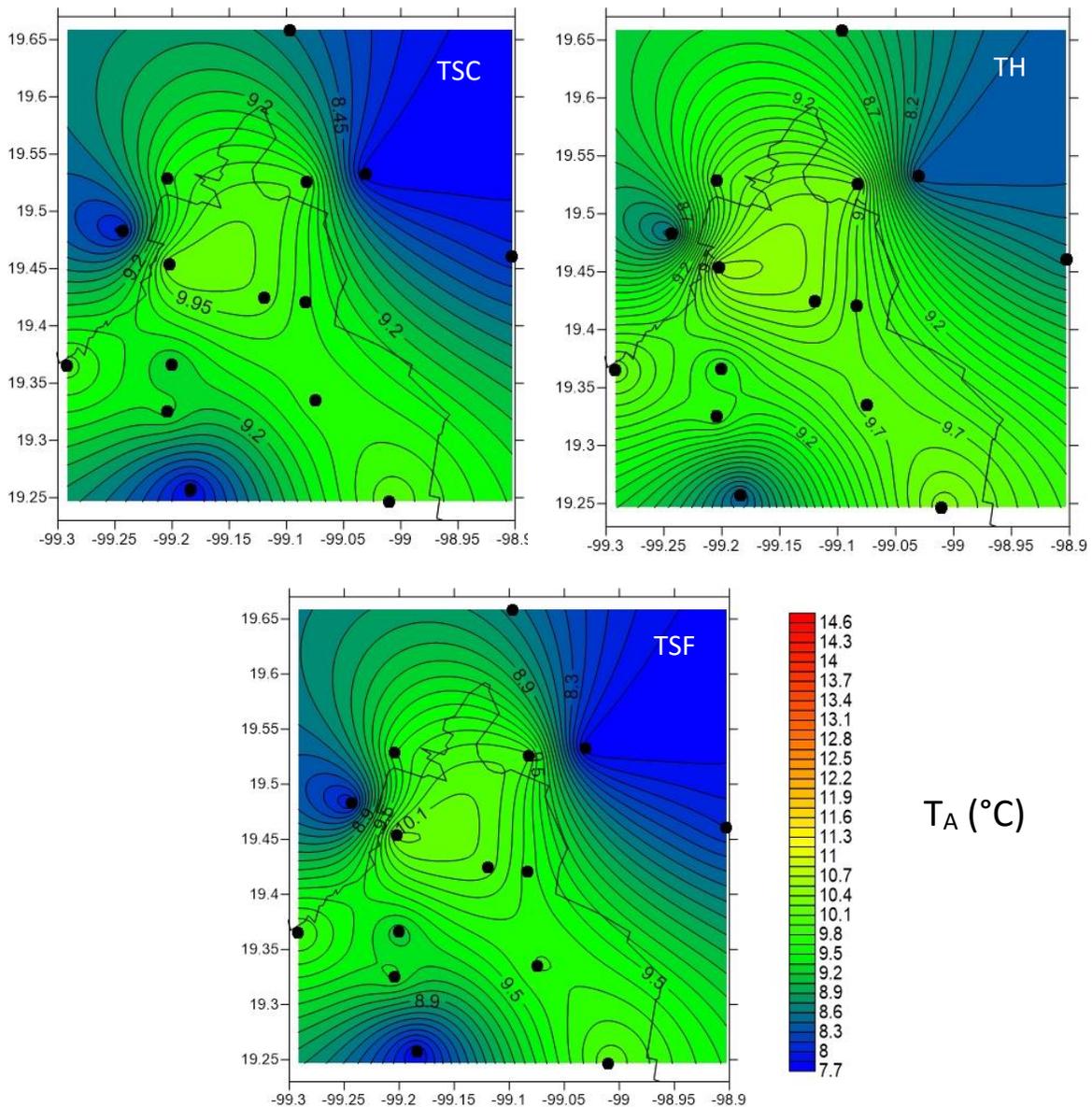


Figura 23. Distribución de la temperatura del aire (T_A) en el 2005 a las 6:00 h en la ZMVM. Cada punto indica dónde se encuentra una estación automática de monitoreo RedMet. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda).

Al analizar el ICU a las 14:00 h (anexo 2), se identifica una intensidad mucho menor, donde se observan valores negativos de ΔT_A , es decir el área urbana es más fría que la rural. Se presentan valores máximos hasta de 2.86 °C. Durante los años del 2006 y del 2015 el promedio anual de ΔT_A en el área urbana es menor que aquella en el área rural a las 14:00 h. La concentración de CO parece no asociarse con éstas anomalías, ya que la estación La Merced (MER) registra concentraciones menores que aquellas registradas en Montecillo (MON).

En el año 2005 a las 6h, la T_A de la ZMVM fue relativamente baja. Además, se mantuvieron los patrones generales de temperatura.

En específico, durante la TSF, se muestra un mayor contraste entre el centro cálido y los alrededores de la ZMVM. Los valores registrados en la zona centro alcanzan T_A 10.1° C, mientras que las afueras reportan valores de 8° C. En el límite oeste entre la Ciudad de México y el Estado de México, se aprecia un gradiente considerable de T_A entre las estaciones de Tacuba (TAC), Azcapotzalco (AZC) y la FES Acatlán (FAC). Donde ésta última presenta el valor más bajo de temperatura de entre las tres estaciones.

Por otro lado, el centro cálido disminuye su intensidad durante la TH y existe un gradiente menor de T_A . En la TSC se mantiene la tendencia descrita en la TSF, a diferencia que el centro cálido registra menor T_A .

Cabe recalcar que a lo largo de todas las temporadas, los patrones de temperatura se mantuvieron: siendo el sur de la Ciudad de México, la zona donde se encontraron las temperaturas más bajas, específicamente en las estaciones meteorológicas de: Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Pedregal (PED). Los mapas también muestran que la zona este del Estado de México representa un punto frío, específicamente asociándose a la estación meteorológica de Montecillo (MON).

El mapa asociado al año 2013 (figura 23) a las 14:00 h presenta una variación de T_A , ya que se reportaron temperaturas más altas durante la TSF, donde los focos cálidos en la ZMVM se modificaron, siendo las estaciones con mayor temperatura: ACO, TPN y FAC, donde se alcanza a tener una diferencia de temperatura entre el centro y los alrededores, de poco más de 2° C. Éstos patrones se mantienen durante todo este año, ya que las islas cálidas se modifican del centro de la ciudad a los alrededores de la Ciudad de México.

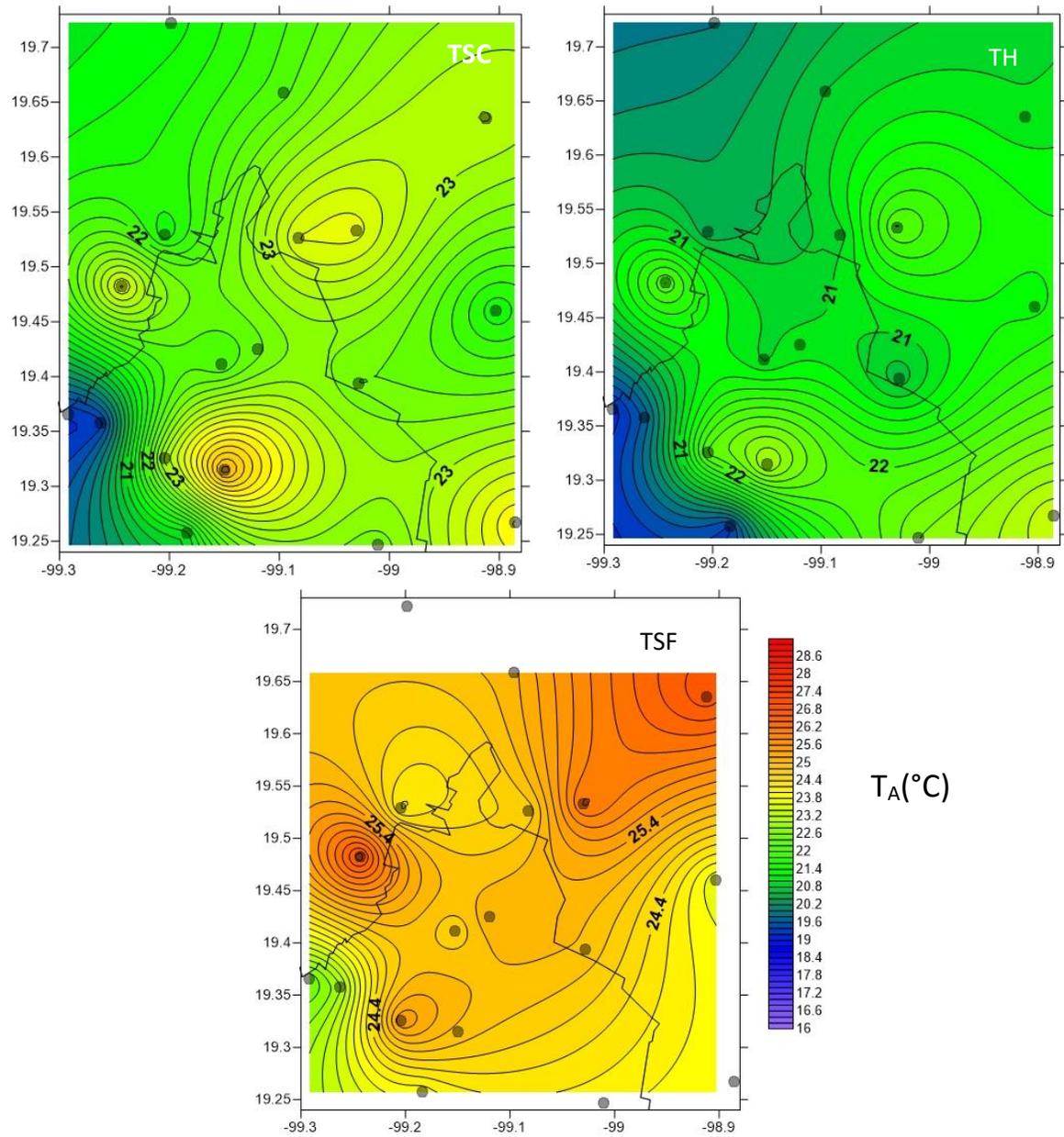


Figura 24. Isothermas de T_A en el 2013 a las 14:00 h en la ZMVM. Cada punto indica dónde se encuentra una estación automática de monitoreo. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda).

En la temporada seca cálida se presenta una mayor diferencia entre las diferencias de temperatura en la ZMVM, mientras que la en la temporada húmeda no muestra diferencias significativas.

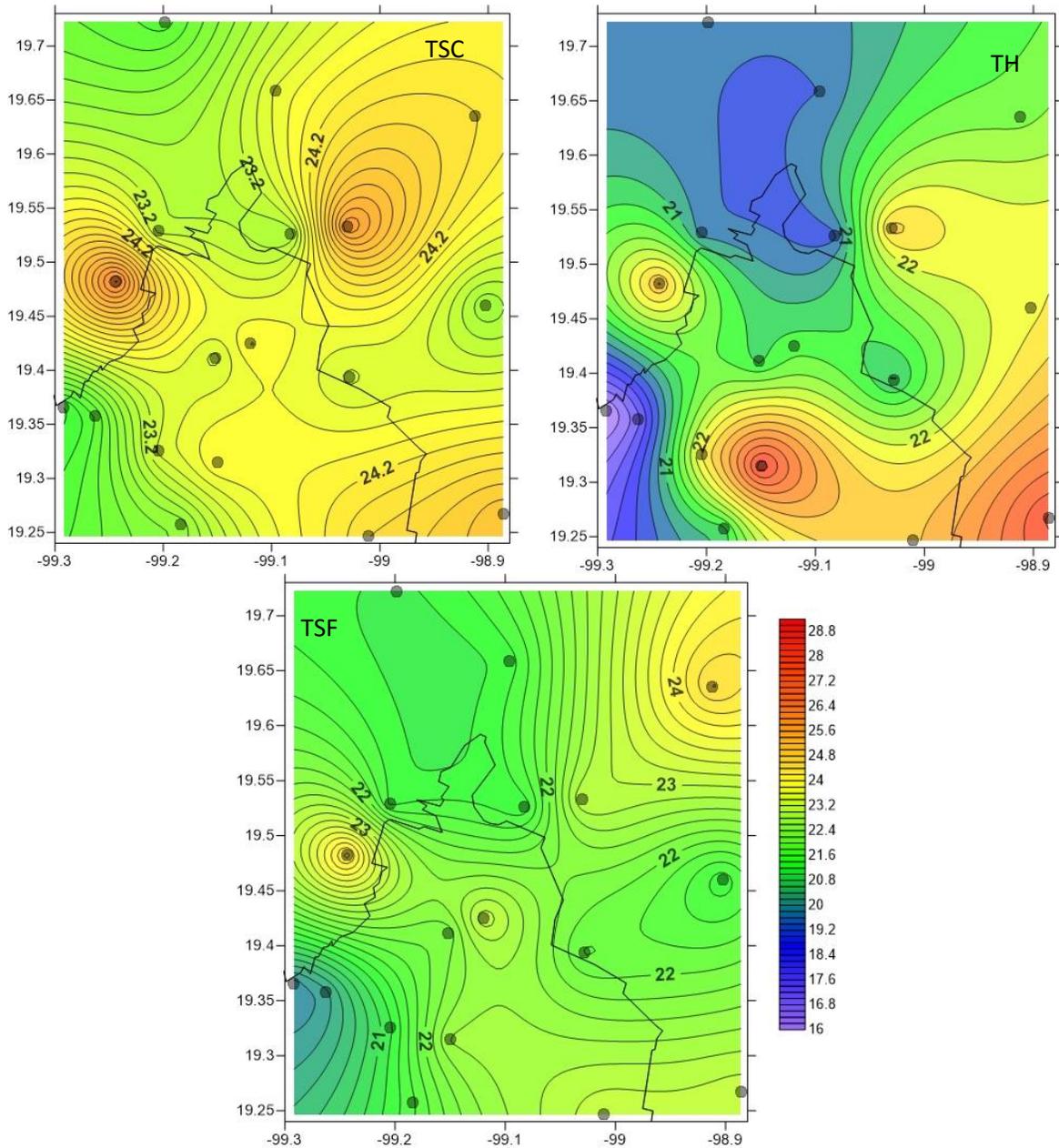


Figura 25. Distribución de la temperatura del aire (T_A) en el 2014 a las 14:00 h en la ZMVM. Cada punto indica dónde se encuentra una estación automática de monitoreo. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda).

En contraste con los reportado en las figuras previas, durante el año 2014, la TH es aquella que muestra el mayor gradiente de temperatura reportado en todos los años de estudio, donde nuevamente se modifican los patrones de la distribución de la temperatura, siendo las zonas más cálidas aquellas en la parte oeste, sureste y sur de la ZMVM, específicamente, en la estación FAC.

4.3 Distribución espacial de la concentración de CO en la ZMVM

Se determinó que de 7 a 9h, los años 2013 y 2015 la concentración más alta de día en la TSF, seguido de la TH y finalmente la TSC, mientras que en los años 2014, 2012, 2011, 2008 y 2007 la concentración más alta se registró durante la TSF, seguido de la TSC y finalmente la TH. Sólo los años 2006, 2009 y 2010 presentaron los valores máximos en la TSC.

Por otro lado, en el periodo de 19:00 a 20:00 h, un mayor número de años presentaron las concentraciones más altas de CO [CO] en la TSF. Los años 2014, 2010 y 2009 presentaron los valores máximos en la TH, seguido de la TSF y finalmente la TSC; Los años 2013 y 2007 cuentan con el valor más grande en la TSC, seguido de la TH y finalmente la TSF, un comportamiento completamente anómalo a lo visto en la literatura. Los años 2006, 2011 y 2012 fueron los cuales presentaron sus máximos en la TSF, seguido de la TH y TSC y finalmente, los años 2015 y 2008 registraron su máximo en la TSF, seguido de la TSC y finalmente la TH.

En la figura 26 se muestra la distribución de [CO] en el año 2005, y como se mencionó previamente, durante este año se reportaron las concentraciones más altas del intervalo de estudio. A grandes rasgos se puede observar que la TSF reporta las concentraciones más altas en la Ciudad de México y regiones aledañas en el Estado de México. La estación AZC registra las concentraciones más altas, de casi 3.9 ppm. Por otro lado, las estaciones de PED y UIZ registran las concentraciones más bajas en la ZMVM. Adicionalmente, al norte de la ZMVM se registra una disminución considerable en la concentración de CO, en especial la estación VIF.

Este patrón se asocia principalmente a la cantidad de fuentes móviles registradas, siendo el PED, una de las pocas estaciones colocadas en una zona con amplia vegetación. Bidwell (2011) describe la absorción de CO que presentan las plantas en un rango de 0 a 100 ppm; El CO puede ser metabolizado a CO₂ o reducido e incorporado a serina. La importancia de efecto de CO en las plantas reside en la concentración a la cual están expuestas, de manera que en zonas con concentraciones bajas de CO, la absorción puede ser baja, mientras que en zonas con alto grado de contaminación y emisión de CO, las plantas contribuyen de manera significativa al balance de CO.

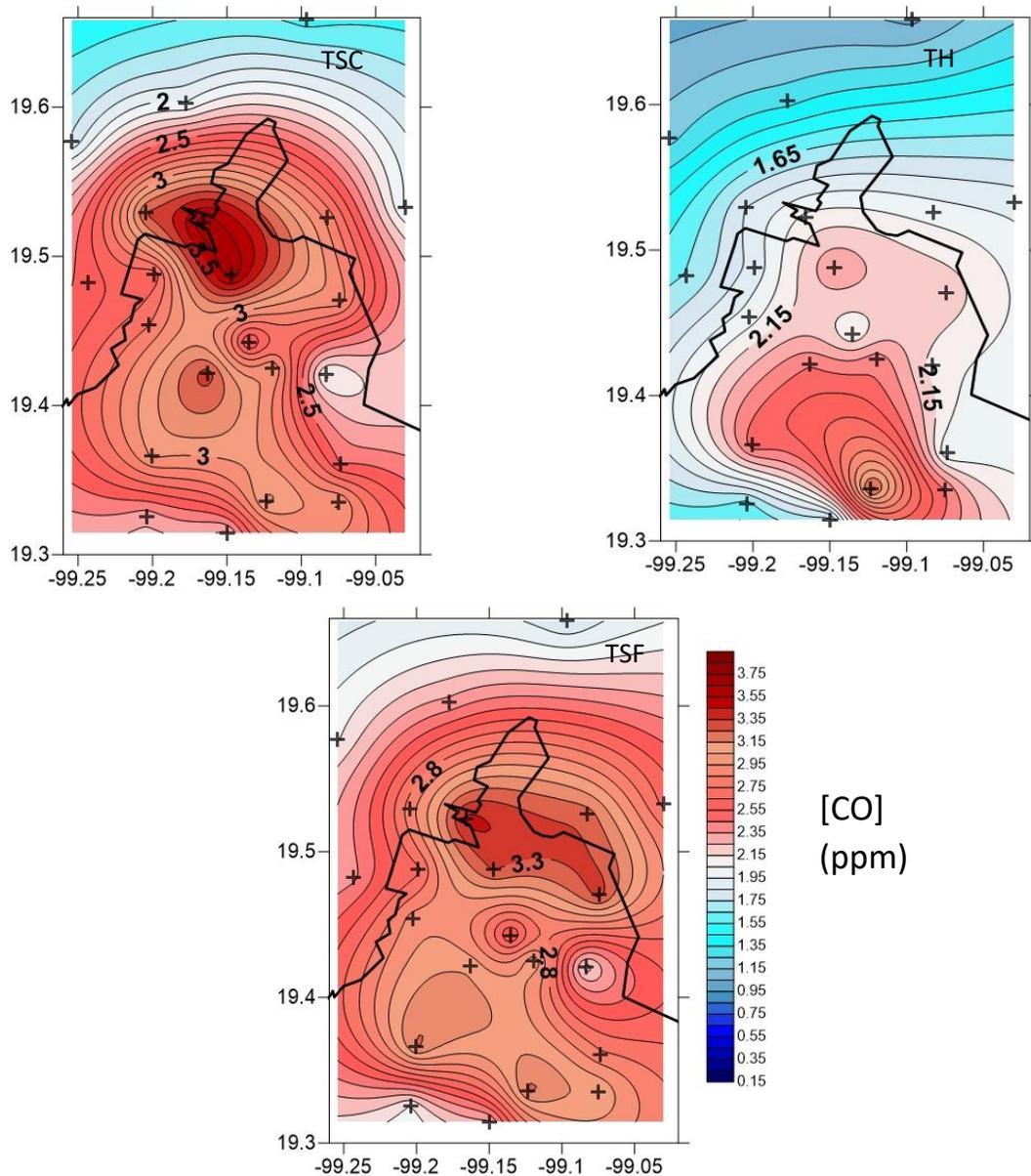


Figura 26. Distribución de la concentración de CO en la ZMVM en el periodo de 7:00 a 9:00 h en el año 2005. Datos obtenidos de la RAMA.

Durante la TSC, la estación AZC reporta la concentración promedio más alta registrada en todos los años. A diferencia de la TH, donde se dejan de observar esos valores tan altos de CO y las concentraciones altas se movilizan a la región sur de la Ciudad de México y son registradas por la estación TAX. Este cambio se relaciona con la diferencia de precipitación registrada en la Ciudad de México, donde se registra una mayor intensidad de precipitación en la zona norte centro de la ciudad y una disminución en la zona sureste (Betanzos, 2016).

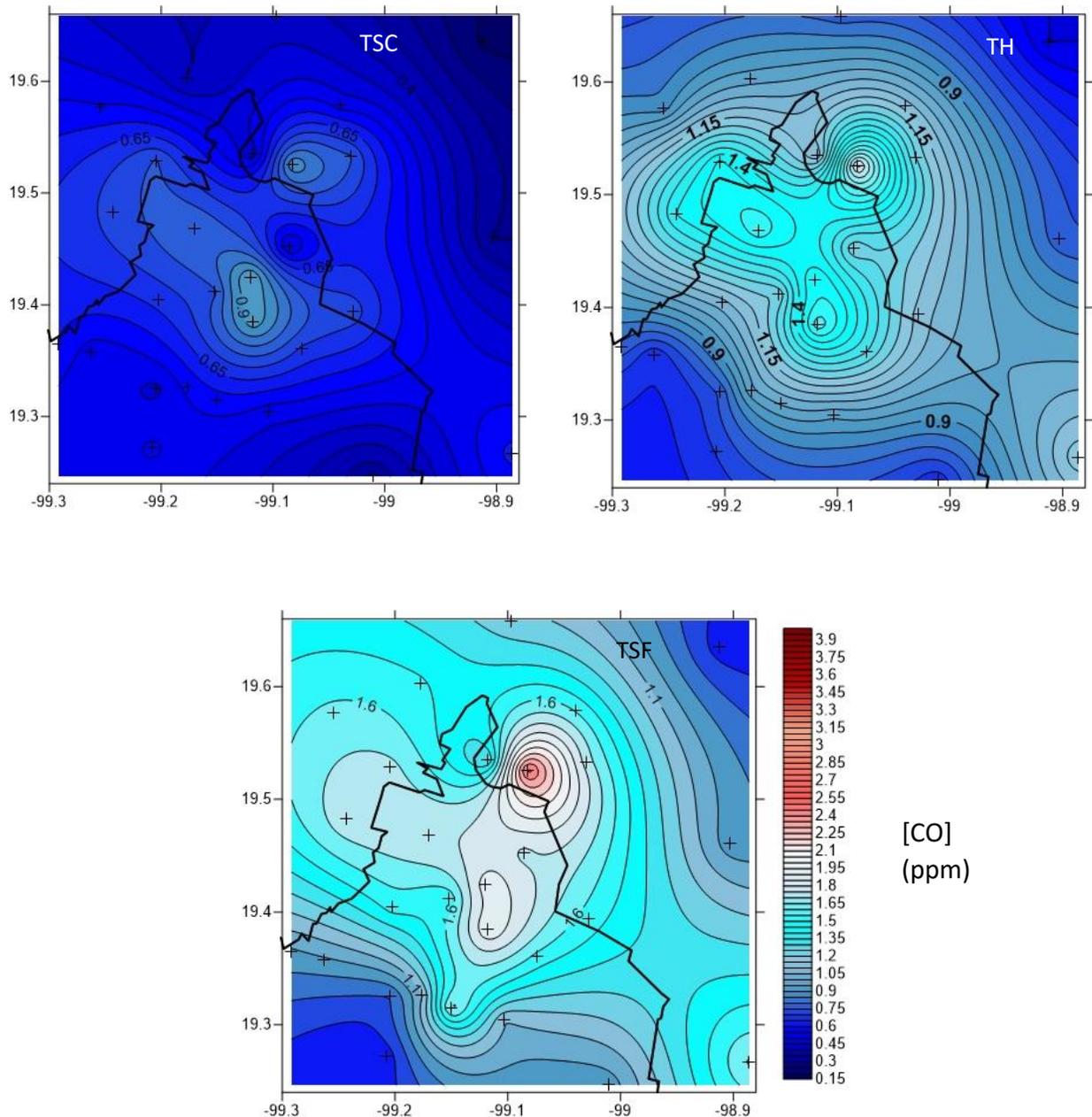


Figura 27. Distribución de la concentración de CO en el año 2015 en el periodo de 7:00 a 9:00 h. TSC (temporada seca cálida), TSF (temporada seca fría) y TH (temporada húmeda) [Elaboración propia, 2016].

El año 2015 es uno de los más relevantes durante el estudio, ya que se logra observar durante la hora pico de 7:00 a 9:00 h cómo las concentraciones de CO han disminuido a lo largo de 10 años, dando lugar a comportamientos relativamente homogéneos durante la TSC, mientras que en la TH aún se observan máximos en el centro de la ciudad. Sin embargo no difieren tanto de los valores mínimos, los cuales generalmente son encontrados en la zona sur de la ciudad. Además se puede identificar que las

concentraciones en la zona noreste de la ZMVM (ACO) han disminuido en comparación con lo observado en 2010; También se identifican cambios en los patrones de concentraciones máximas, movilizándose del centro de la ciudad a la zona próxima al este de la misma.

Este cambio en los patrones se asocia a la expansión de la zona urbana hacia el Estado de México, donde cada vez se genera mayor cambio de uso de suelo; Adicionalmente se cuenta con las emisiones de fuentes fijas situadas en el Estado de México, específicamente cerca de las estaciones VIF y XAL, las cuales adicionadas al tránsito vehicular en la zona, están generando altas concentraciones de CO.

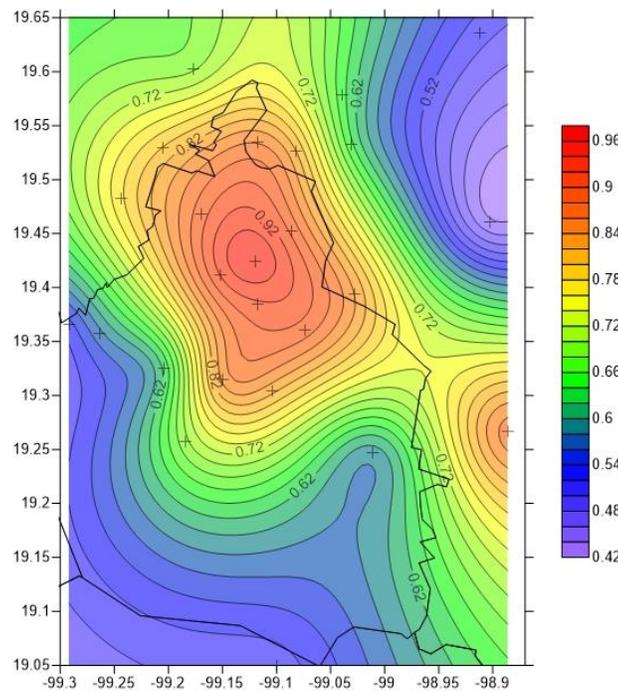


Figura 28. Distribución promedio de la concentración de CO de los diez años analizados.

En la figura 28 se observa nuevamente un patrón donde el centro de la ciudad registra las concentraciones más altas de CO, en especial en las estaciones LAG, MER, AZC, CAM. Al sur de la Ciudad se observa una disminución considerable en las concentraciones de CO, sin embargo, cabe mencionar que en la zona sur de la ciudad no se cuenta con tantas estaciones de monitoreo y por esta razón es difícil analizar de manera representativa los diez años de estudio. En el noreste de la ZMVM se muestra una zona con concentraciones bajas, donde se encuentran valores de hasta 0.42 ppm, éstos valores se registran en las estaciones Montecillo (MON) que se supone se encuentra en el área rural, San Agustín (SAG) que se encuentra en la periferia urbana., SAG. Finalmente, en el sureste de la ZMVM se registran concentraciones altas de CO en la estación Chapingo (CHO).

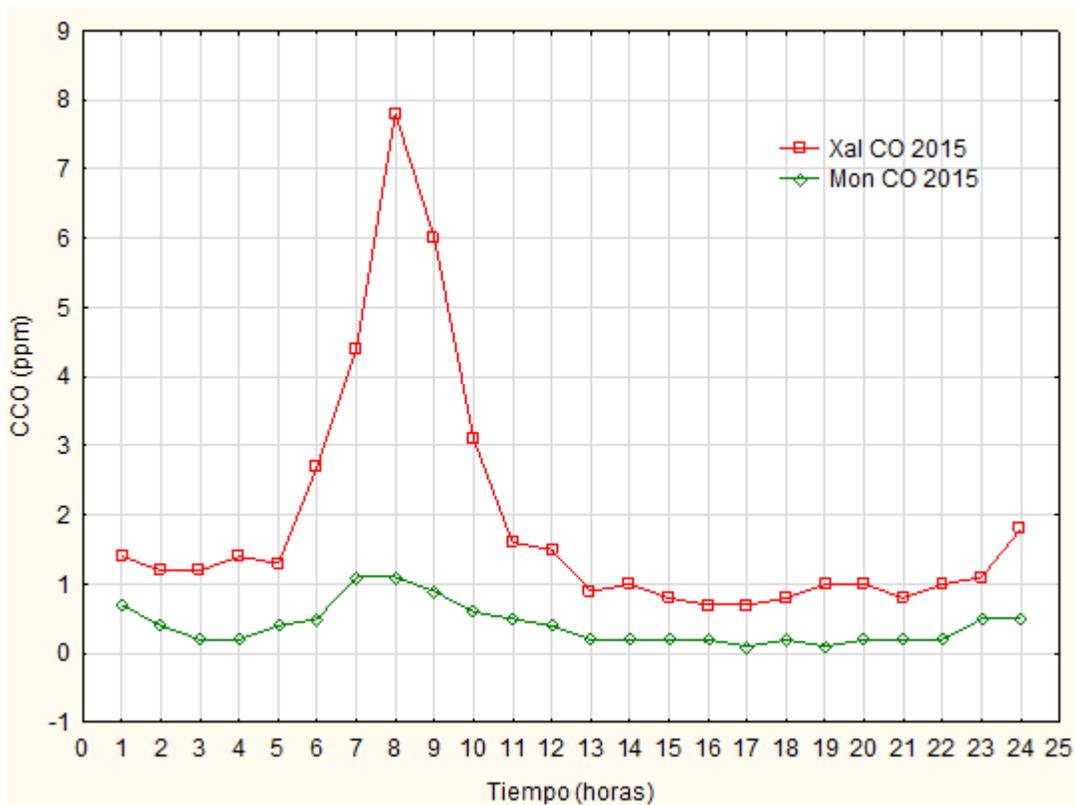


Figura 29. Variaciones diarias de CO. La línea roja se encuentra asociada a las concentraciones registradas por la estación XAL el día 23/01/2015. La línea verde se encuentra asociada a las concentraciones registradas por la estación MON el día 23/01/2015.

En la figura 29 se observa un contraste entre una estación que registra concentraciones de CO altas y una estación en la cual los registros del contaminante son bajos. Iniciando con el comportamiento de la estación Xalostoc (XAL), se toma como referencia la concentración de 1.3 ppm a la primera hora del día. Se presentan muy pocas variaciones hasta las cinco horas. A partir de las 6 horas aumenta la concentración hasta llegar a un máximo de 7.9 ppm a las ocho horas. Posteriormente la concentración de CO comienza a descender hasta las 12 horas alcanzando un valor de 1.5 ppm. Más adelante, la concentración alcanza un mínimo de 0.8 ppm entre las 16:00 h y 17:00 horas, hay un leve incremento (1 ppm) entre las 19:00 y 20:00 horas. A partir de las 23:00 horas se observa un tercer pico alcanzando valores de 1.9 ppm.

Por otro lado, la estación de Montecillo (MON) presenta una concentración de 0.7 ppm a la hora uno y presenta un mínimo de 0.1 ppm a las 4 horas, a partir de este punto, se llega a un máximo de 1.1 ppm en un intervalo de 7 a 8 horas, en las siguientes horas la concentración disminuye paulatinamente hasta alcanzar un segundo máximo a las 24 horas.

En la figura 30 podemos observar la variación diaria de T_A registrada el mismo día que la figura 32. La estación XAL inicia con una T_A de 14.9°C a la hora uno y disminuye progresivamente hasta alcanzar un mínimo de 11.8°C en un intervalo de 5 a 8 horas, a partir de las 9 horas la T_A aumenta hasta un valor de 21°C a las 15 horas. La T_A disminuye a partir de las 16 horas y alcanza un valor de 15°C a las 24 horas. En la estación MON durante la primera hora se registra T_A de 12.8°C y disminuye hasta alcanzar un mínimo en un intervalo de las 4 a las 7 horas, a partir de las 8 horas la T_A comienza a aumentar hasta alcanzar un máximo de 24°C entre las 16 y 17 horas. A partir de las 18 horas los valores disminuyen hasta llegar a 16°C a las 24 horas.

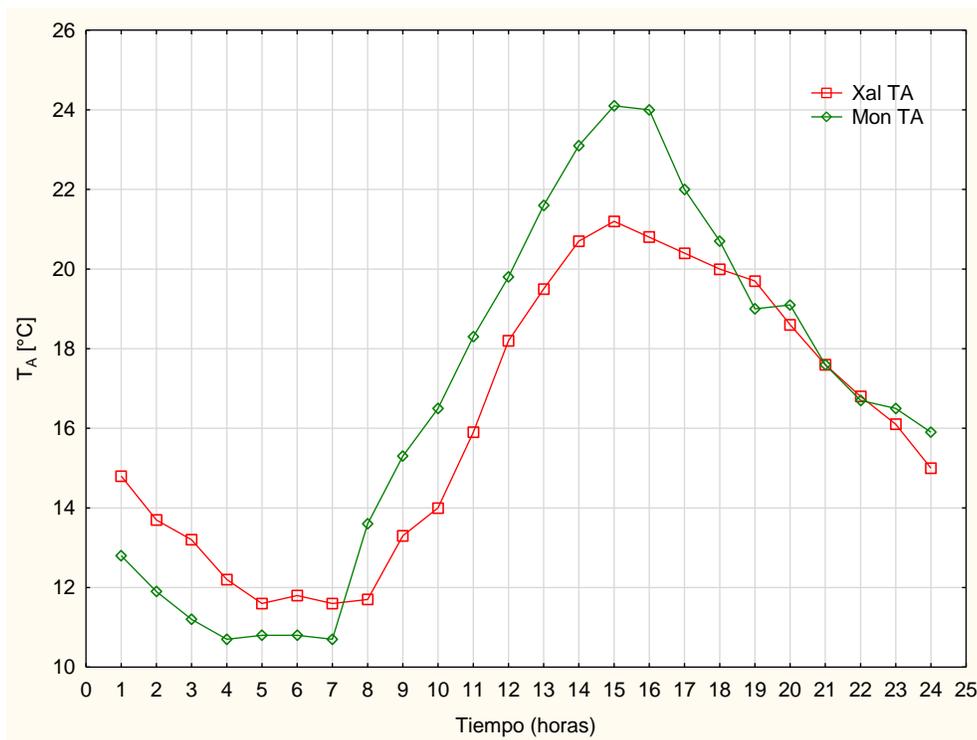


Figura 30. Variaciones diarias de la temperatura del aire (T_A) en la estación de Xalostoc (XAL) y Montecillo (MON) el día 23/01/2015.

Tomando en cuenta ambas variables en las dos estaciones de monitoreo con comportamiento contrastante, podemos observar que la estación XAL presenta un máximo de casi 8ppm, el promedio de temperatura durante todo el día es menor que los valores registrados por la estación MON, esto a pesar que ésta estación no rebasó 1.5 ppm durante todo el día.

Adicionalmente, se añadieron gráficas donde se calcularon las diferencias entre las concentraciones registradas en el 2015 y 2005 en la estación PED (figura 31).

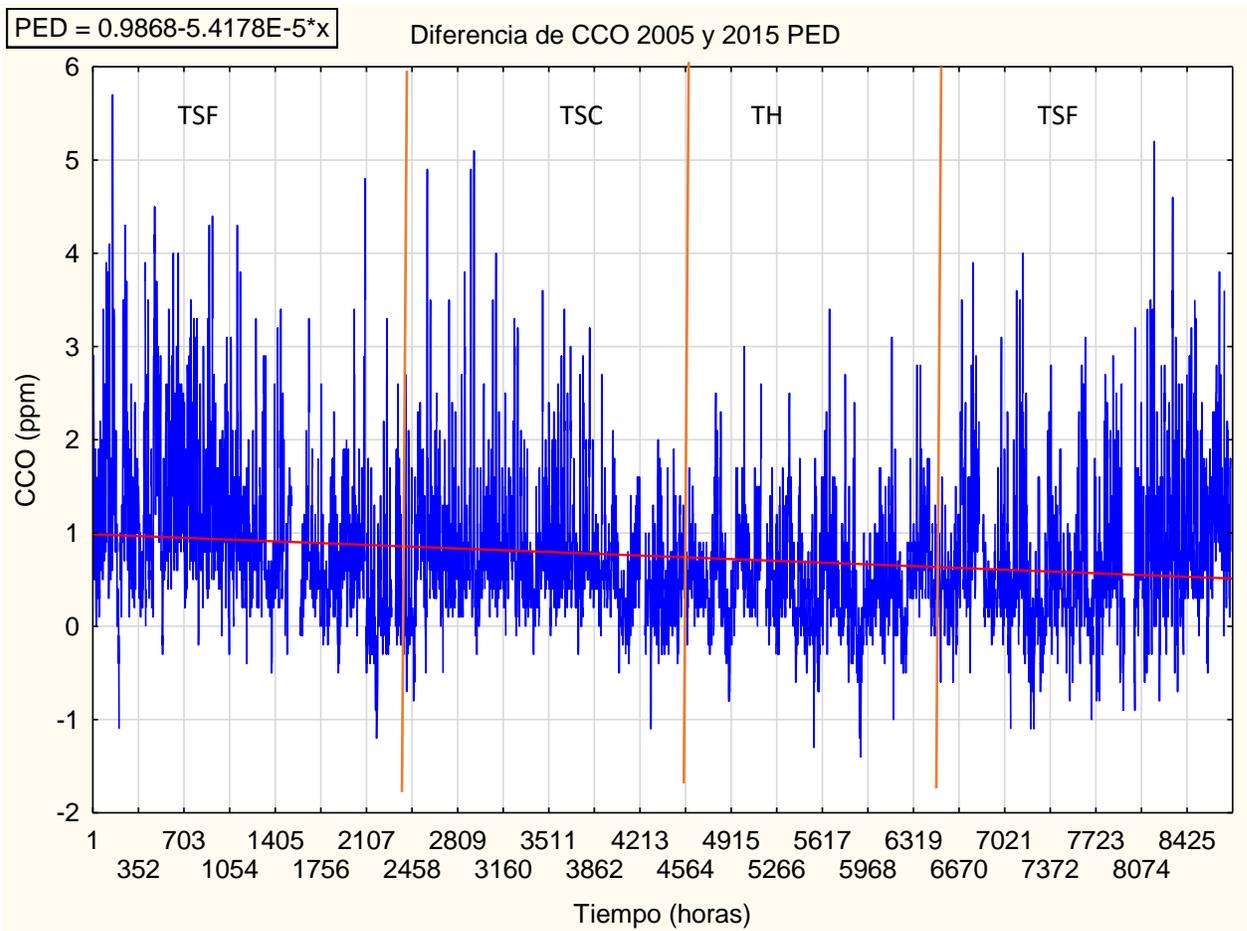


Figura 31. Diferencia entre valores registrados en la estación PED en el año 2005 y 2015. Las líneas naranjas indican la diferencia entre cada temporada, donde: TSC (temporada seca cálida), TH (temporada húmeda) y TSF (temporada seca fría). La línea roja indica la tendencia de los datos.

En la figura 31 se observa una clara disminución en la concentración de CO registrada por la estación PED, las diferencias llegan a ser de casi 6 ppm en su máximo y de 2 a 4 ppm en términos generales.

Resulta importante mencionar que las diferencias más grandes se dan en la TSF, mientras que las más pequeñas se dan en la TH.

Cómo se comentó previamente, se atribuyen estas diferencias en concentraciones de CO al aumento en la regulación de los automóviles, la implementación de los convertidores catalíticos y eficiencia en los motores. Adicionalmente, en el pedregal se observa que la vegetación presenta gran relevancia debido a la interacción que tiene con el CO (Bidwell, 2011).

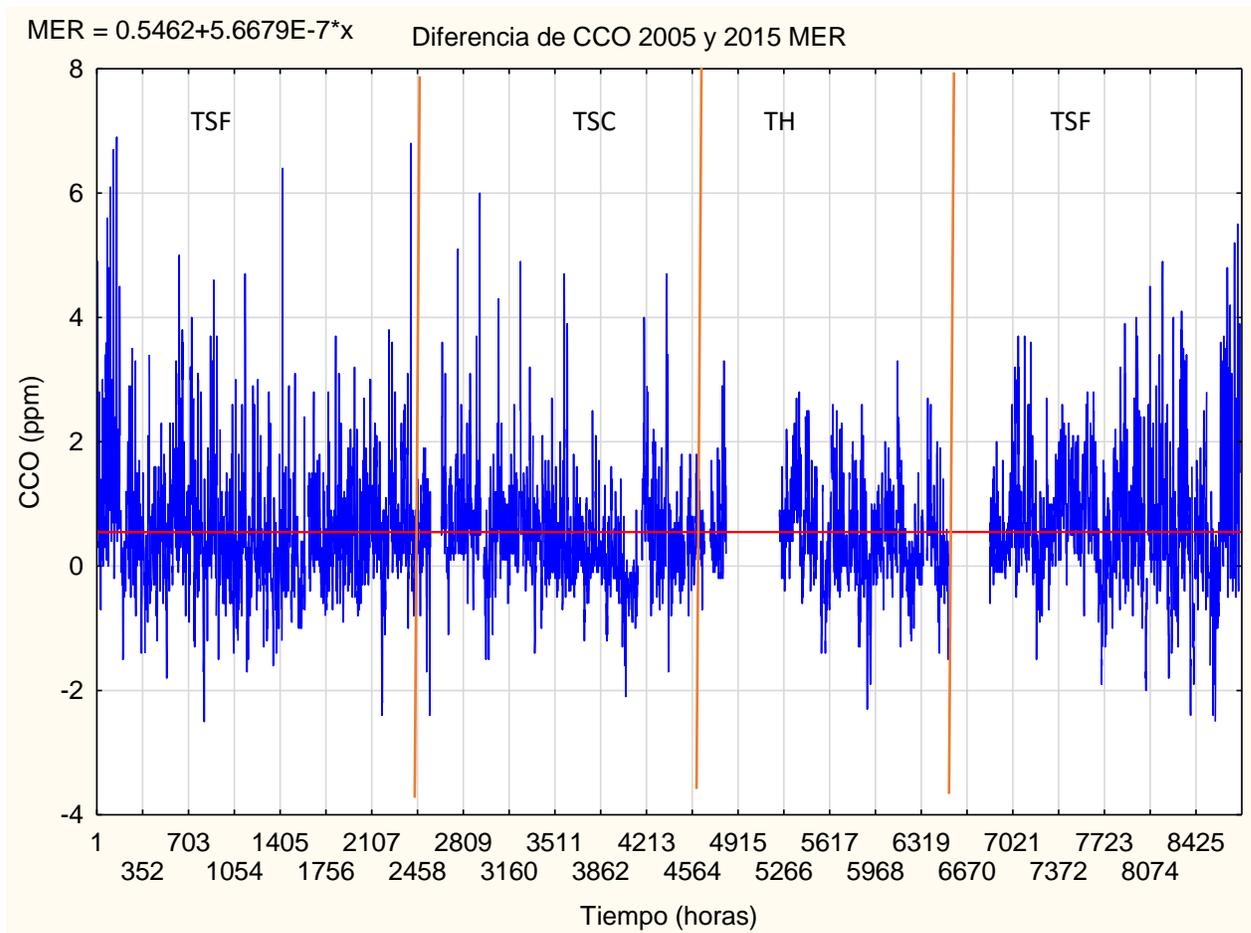


Figura 32. Diferencia entre valores registrados por la estación MER en el año 2005 y 2015. Las líneas naranjas indican la diferencia entre cada temporada, donde: TSC (temporada seca cálida), TH (temporada húmeda) y TSF (temporada seca fría). La línea roja indica la tendencia de los datos.

En la figura 32 se observa una clara disminución en la concentración de CO registrada por la estación MER, las diferencias llegan a ser de casi 7 ppm en su máximo y de 2 a 4.5 ppm en términos generales. Las diferencias más grandes se dan en la TSF, seguidas de la TSC y las más pequeñas se dan en la TH.

A diferencia del PED (figura 31), en ésta gráfica se logra observar en bastantes ocasiones que a lo largo del año, los valores son negativos; Esto indica que la concentración del 2015 llega a ser mayor que en el 2005. Al analizar más a fondo éstos datos, se logra identificar que las concentraciones de CO disminuyeron en términos generales, sin embargo se generan picos con concentraciones mucho mayores a las registradas en el 2005.

4.4 Análisis estadístico entre variables

Con la finalidad de conocer si efectivamente existe una relación, se realizaron matrices de correlación, así como correlaciones lineales entre CO y T_A. En el análisis exploratorio de datos se observó un patrón en el cual, a mayor T_A menor concentración de CO.

Tabla 6. Resultados de matrices de correlación entre concentración de CO (ppm) y T_A durante las 24 horas del día entre cada una de las estaciones de monitoreo de la RAMA y RedMet. Las cifras en rojo son consideradas como significativas de acuerdo al software STATISTICA.

Resultados de coeficientes de correlación de Pearson asociados a matrices de correlación entre [CO] y T _A en cada una de las estaciones. p < 0.05											
Año Estaciones	Valores r ²										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ACO								-0.789	-0.371	-0.238	-0.408
CES	-0.237										
CHO								-0.732			
CUA									-0.143	-0.243	-0.118
CUT								-0.608			
FAC	-0.186	-0.278	-0.127		-0.146	-0.133	-0.195	-0.709		-0.342	-0.291
HAN	-0.086	-0.134									
HGM									-0.281	-0.450	
IMP					-0.343						
MER	-0.174	-0.262	-0.336	-0.265		-0.408	-0.397	-0.634	-0.329	-0.461	-0.288
MON								-0.647			
NEZ								-0.603	-0.293	-0.487	-0.284
PED	-0.151			-0.056	-0.320		-0.155	-0.562	-0.225	-0.314	-0.047
PLA	-0.203		-0.167	-0.165	-0.197						
SAG	-0.385		-0.363	-0.400	-0.312	-0.383	-0.495	-0.806	-0.092		-0.407
SFE										-0.140	
SUR								-0.589		-0.483	
TAC	-0.164	-0.224		-0.254	-0.171						
TAH									-0.293	-0.534	-0.374
TLA	-0.154	-0.234	-0.123	-0.205	-0.085	-0.176	-0.196	-0.492		-0.357	-0.250
TPN								-0.448	-0.258		
VIF	-0.410	-0.451	-0.166	-0.487			-0.421	-0.809	-0.346	-0.331	-0.474
XAL	-0.394	-0.371		-0.432	-0.331	-0.152		-0.693		-0.466	-0.479

Como se puede observar en la tabla, en todos los casos existe una correlación negativa entre T_A y concentración de CO. En el año 2012 es aquel en el cual existe mayor valor correlación de Pearson en todas las estaciones, donde la estación San Agustín (SAG) y Villa de las Flores (VIF) se asocian al valor de r² más cercano a 1. Se piensa que ésta fuerte correlación se debe a que ambas estaciones se encuentran en zonas densamente pobladas en el estado de México. Esto concuerda con los datos calculados para la

estación de La Merced (MER), la cual se asocia al promedio más alto de correlación para el coeficiente r^2 y de igual manera, se encuentra en el centro de la Ciudad de México y se asocia a valores altos de densidad poblacional.

Con la finalidad de observar cómo se modificaba el coeficiente, se realizaron distintos análisis, donde se clasificaron los datos por temporadas y horarios. Dentro de las temporadas, en la TSF es aquella en la que se observa un mayor valor de correlación entre las variables, mientras que en la TH presentó valores más bajos (anexo 3). Por otro lado, en los horarios se tomó en cuenta un periodo nocturno y uno diurno; Donde el diurno mostró valores de correlación muy altos, mientras que el periodo nocturno mostró que no existía correlación alguna entre las variables. Otro de los análisis exploratorios se asoció a tomar en cuenta “retrasos” en los valores de CO respecto a la T_A , ya que cómo se observa en la figura 33, los máximos en ambas variables se encuentran desfasados. Sin embargo, se observó que la correlación entre las variables disminuía de manera considerable (anexo 3).

Tomando en cuenta éstos resultados y que el monóxido de carbono es considerado un gas de efecto invernadero con absorción en el espectro infrarrojo, resulta contrario a lo esperado observar que en las zonas con mayor densidad poblacional exista una correlación negativa significativa.

Adicionalmente, al tomar en cuenta los mapas de dispersión, las zonas de mayor emisión de CO y las zonas más cálidas de la ICU presentan patrones similares, sin embargo, cómo se mencionó en los antecedentes de éste trabajo, el efecto de calentamiento del CO es bajo si se compara con los demás GEI. Por éste motivo se asume que el monóxido de carbono por sí solo no es considerado relevante en término del calentamiento diferenciado en las zonas urbanas, y el dióxido de carbono, metano y ozono son aquellos que regulan el calentamiento asociado a los patrones de las ICU en las megaciudades.

4.5 Análisis concentración de CO realizadas mediante el Software CAL3QR

Una vez que se tuvo los datos de cada día durante las dos horas pico de tránsito en el mes de agosto, se calcularon promedios para lograr introducirlos en el software de la EPA, CAL3QR. Cada cruce presentó distintas concentraciones. Cabe mencionar que estas cuantificaciones fueron calculadas en zonas puntuales de la Ciudad de México y no representan un patrón general de emisiones de CO de la ciudad.

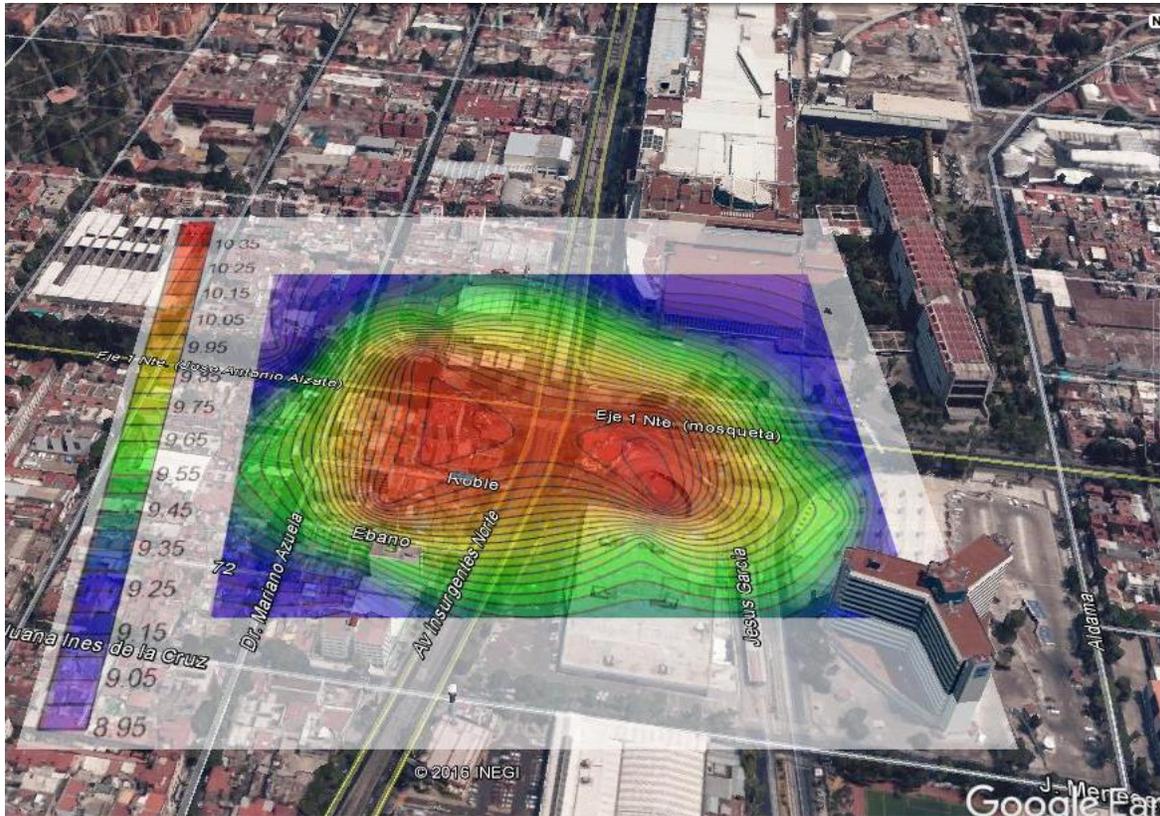


Figura 33. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Eje 1 Norte. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.

En la tabla ii (Anexo 4) se pueden observar los promedios calculados en el sitio de monitoreo, éstos valores fueron capturados e introducidos en el software CAL3QH en la versión *viewscreen*. Debido a la complejidad relacionada con la entrada de datos en la versión libre del software, se recurrió a utilizar otra versión. Dentro de ésta versión se encontraban más limitados ciertos factores ambientales que pudieron causar un poco de incertidumbre en los datos reportados.

En la figura 33 se observa un mapa de distribución de las concentraciones máximas en la zona de estudio. Los valores se encuentran en un rango de 9.1 a 10.4 ppm. Tomando en cuenta que la NOM-021-SSA-1997 y la OMS definen cómo límite permisible 11 ppm, resulta de importancia aplicar medidas enfocadas a controlar las emisiones de fuentes móviles, ya que tanto los transeúntes como los conductores se encuentran expuestos a concentraciones que se asocian a efectos nocivos en la salud.

Al realizar el monitoreo durante horas pico de tránsito vehicular, se observan patrones, donde la mayor parte del tránsito vehicular y atascos se dan en el Eje 1 Norte, y no en Insurgentes. Parte de éste problema se asocia a la falta de sincronía en los semáforos del cruce, y los tiempos de siga y alto en cada cruce, ya que Insurgentes cuenta con hasta 3 veces más tiempo para circular que el Eje 1 Norte.

Adicionalmente, el cruce de peatones que no respetan los semáforos entorpece el flujo vehicular de los autos que se incorporan del eje a Insurgentes dirección norte. Esto provoca que los camiones de pasajeros y el metrobus no logren atravesar el cruce dentro del tiempo marcado, lo cual a su vez entorpece aún más la circulación y cómo se muestra en la figura 8A, las emisiones asociadas a velocidades bajas se asocian a mayores emisiones de CO.

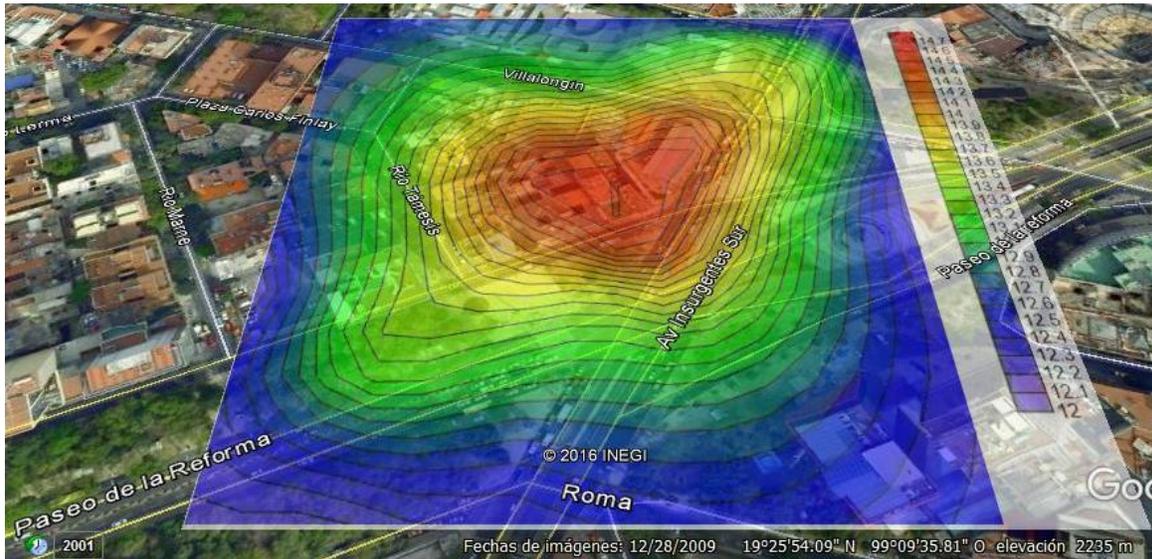


Figura 34. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Paseo de la Reforma. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.

La figura 34 muestra la distribución especial del CO en el cruce de Insurgentes Centro y Paseo de la Reforma. Se puede observar en la tabla 9 que los valores se encuentran en un intervalo de 12.2 a 14.6 ppm, esto indica que las concentraciones más bajas en el cruce sobrepasan los límites de NOM-021. Este fue el único cruce que se encuentra saturado en ambas horas pico, especialmente de 7 a 9 h. En promedio, a un auto que circula por Paseo de la Reforma, le toma entre 15 y 25 minutos avanzar 50 metros. De esta manera, los transeúntes y automovilistas están expuestos al CO durante un periodo considerable.

Este cruce es el más complicado de las 3 zonas de monitoreo ya que presenta saturación en la mayor parte de las vialidades. Un problema observado es que la Avenida de los Insurgentes cuenta con un lapso muy grande de siga, esto genera que los conductores de las avenidas aledañas no respeten los semáforos y queden atravesados en la avenida, entorpeciendo el flujo vehicular.

El gobierno de la Ciudad de México indica que en esta zona se cuenta con semáforos inteligentes, sin embargo se observa que los tiempos de siga y alto no se modifican en función del tránsito vehicular, por lo que no cumplen con su objetivo de evitar embotellamientos.

En éste cruce es donde se observa con mayor frecuencia que los automóviles son usados por una sola persona, lo cual implica una alta tasa de emisiones por personas.

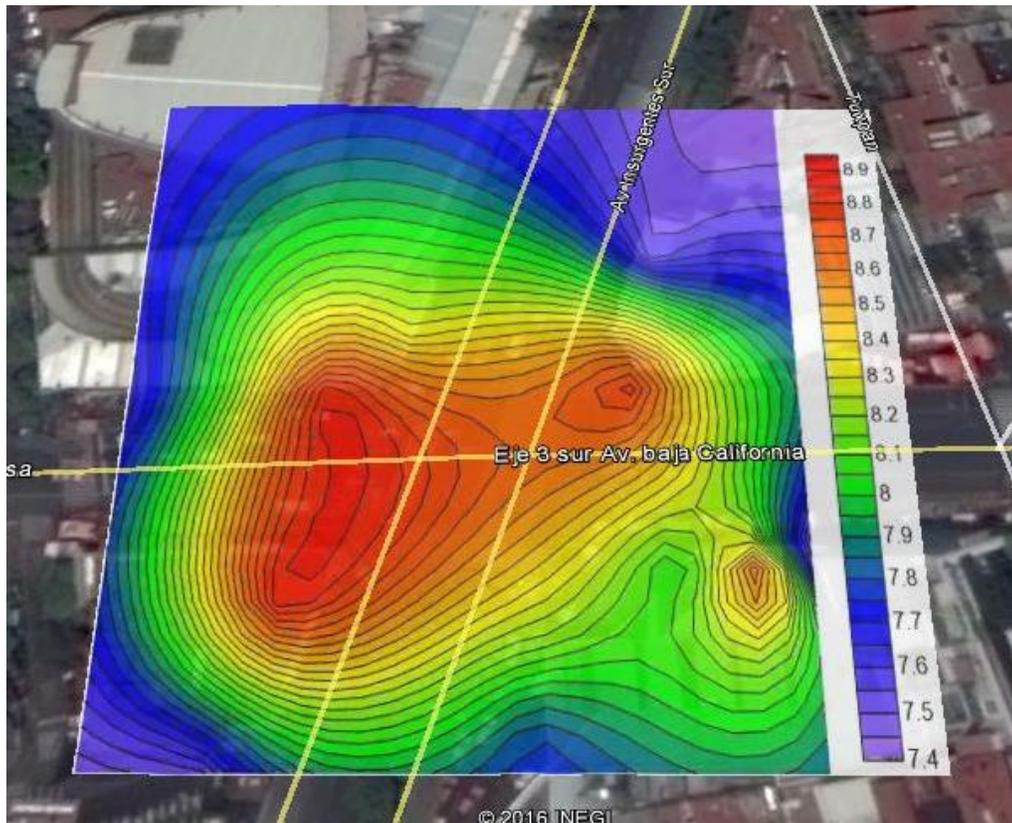


Figura 35. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Eje 3 Sur. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.

La figura 35 muestra la distribución especial del CO en el cruce de Insurgentes Sur y Eje 3 Sur, este cruce no presentan una problemática de movilidad tan grande como los demás cruces. Esto se puede apreciar en los valores de CO, donde el intervalo se encuentra entre 7.5 y 8.3 ppm.

La velocidad se mantiene relativamente constante en éste cruce, el horario en el cual se reporta mayor tránsito vehicular, es de 19 a 21 horas. En este cruce, el paso de los peatones entorpece el flujo vehicular.

5. Conclusiones y recomendaciones.

Tomando en cuenta los resultados obtenido en este estudio, se concluye que el CO no influye de manera directa en las variaciones de T_A , sino al contrario, la T_A influye en la concentración de CO que se tiene en el medio. A pesar de esto, se logran identificar que los patrones de zonas cálidas se asocian a los patrones donde se registran concentraciones altas de CO, eso se relaciona a que éstas zonas presentan una alta densidad poblacional, donde se emite una mezcla de GEI. Esto puede comprobarse al observar

cómo se transforma el comportamiento general de la ICU. Se generan nuevas zonas cálidas en el norte de la ZMVM (Ecatepec, Coacalco), específicamente donde se registra el mayor crecimiento poblacional.

De esta manera se puede observar que el CO puede ser considerado como un indicador del crecimiento poblacional y modificaciones en los asentamientos humanos.

Es necesario mencionar que a pesar que el CO no presente una influencia directa con un calentamiento diferenciado, es considerado un contaminante criterio principalmente emitido por fuentes móviles. Además de esto, es importante tomar en cuenta que el CO juega un papel importante en la oxidación de otros GEI y es uno de los precursores del smog fotoquímico.

Analizando los valores obtenidos por el software CAL3QH, se observa que en la mayoría de los casos se superan los límites permisibles establecidos para el CO. Esto a pesar que dentro de las aproximaciones no se lograron modificar las tasa de emisión, ya que el software tiene como predeterminado los valores de Estados Unidos. Teniendo en cuenta que en México una porción importante el parque vehicular tiene entre 5 y 8 años (SEDEMA, 2012) y que no todos los automóviles cumplen con las regulaciones establecidas por la SEDEMA, es razonable pensar que las concentraciones reportadas son menores a las reales y los efectos nocivos son más severos a lo estimado. Por éstas razones es imprescindible contar con medidas de regulación en torno a la emisión de CO.

Al considerar medidas de regulación para el CO, es forzoso tomar en cuenta el efecto que tienen los automóviles. El Instituto Mexicano del Transporte reporta una disminución preocupante en la velocidad promedio de los autos, ésta disminución tiene una gran importancia debido a que se asocian a un aumento en sus factores de emisión. Tomando en cuenta que los autos movilizan a 1.5 habitantes, es necesario incentivar el uso del transporte público. Sin embargo, en México, específicamente en la ZMVM el transporte público es muy poco eficiente e inseguro. Por éste motivo resulta de vital importancia enfocar recursos del erario público al transporte público con la finalidad de mejorar su calidad.

Una de las recomendaciones más importantes se relaciona con campañas de educación ambiental, con la finalidad de informar sobre los efectos nocivos que se asocian a las emisiones de las fuentes móviles y como se mencionó previamente, incentivar el uso de otros medios de transporte o de compartir auto con la finalidad de disminuir el número de automóviles que circulan todos los días. Dentro de las campañas también es necesario introducir información sobre educación vial, ya que cómo se mencionó previamente, en las zonas de estudio, uno de los principales problemas se asocia a que los peatones no respetan los semáforos ni los cruces designados, esto resulta en entorpecimiento del flujo de autos y medios de transporte colectivos, además de asociarse a accidentes.

Otra medida aplicable es aumentar la vegetación en la ZMVM, ya que ésta tiene efectos positivos tanto en la mitigación de la ICU, como en la regulación de algunos contaminantes atmosféricos. Una de las formas en las cuales se puede aumentar la vegetación, es mediante el uso de azoteas verdes, ya que éstas presentan un gran número de beneficios.

Referencias

- Alvarado, J. (2008). *EFFECTOS DEL MONÓXIDO DE CARBONO EN LA SALUD DE LOS COMERCIANTES DE LA CIUDAD DE LOJA, ABRIL – AGOSTO 2008*. Loja, Ecuador. Obtenido de <https://goo.gl/TKJKhs>
- Anónimo. (11 de Marzo de 2015). *The green city*. Obtenido de The causes and effects of the Urban heat island Effect: <http://thegreencity.com/the-causes-and-effects-of-the-urban-heat-island-effect/>
- ASU. (2014). Pavement Effects on Near Surface Air Temperature and Urban Heat Island. *National Center of Excellence on Smart Innovations Arizona State University*.
- Ballinas M., B. V. (2015). The Urban Tree as a Tool To Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A simple Phenomenological Model. *Journal of Environmental Quality*. doi:10.2134/jeq2015.01.0056
- Barradas, V. (20 de Junio de 2012). Obtenido de Sistemas de vegetación urbana, antídoto contra las islas de calor: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012_407.html
- Barradas, V. (01 de Enero de 2013). *Oikos*. Obtenido de Ecología Web. La isla de calor urbana y la vegetación arbórea.: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/oikos-historico/numeros-anteriores/47-la-isla-de-calor-urbana-y-la-vegetacion-arborea>
- Betanzos, L. (2016). *Distribución espacial y temporal de la precipitación pluvial en la Ciudad de México y su aplicación en la planeación urbana*. Ciudad de México: Tesis UNAM.
- Bidwell, R. G. (2011). Carbon monoxide fixation by plants. *Canadian Journal of Botany* 52(8), 1841-1847 .
- Bomstein, R. (1968). Observations of the urban heat island effect in New York city. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 4: 575-582.
- CEMDA, C. M. (20 de 07 de 2014). *CEMDA*. Obtenido de <http://www.cemda.org.mx/>
- Chen, X. L. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104, 133-146.
- Christen, & Vogt. (2004). ENERGY AND RADIATION BALANCE OF A CENTRAL EUROPEAN CITY. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, 1395–1421.
- CONAPO, C. N. (2010). *DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO 2010*. Ciudad de México: SEDESOL, Secretaría de Desarrollo Social.
- Córdova Sáez, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre - 2009, marzo - 2010. *Terra Nueva Etapa*, vol. XXVII, núm. 42, julio-diciembre, 2011, pp. 95-122.
- Dongsheng et al. (2015). Performance evaluation of CAL3QHC and CALINE4 for short-term simulation of fine particulate matter and carbon monoxide concentrations at road intersection. *Researchgate*, 3-5.
- EPA. (2009). *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de Heat Island Effect: <https://www.epa.gov/heat-islands>

- EPA. (2010). *User's Guide to CAL3QHC, A Modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations*. Environmental Protection Agency.
- EPA, E. P. (27 de 09 de 2016). *Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM)*. Obtenido de https://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm
- ESSEA, A. E. (23 de 12 de 2010). *Earth System Science Education Alliance, Carbon Monoxide: Its Environmental Impact*. Obtenido de http://esseacourses.strategies.org/module.php?module_id=170
- FIMEVIC, F. p. (2012). *SEDEMA*. Obtenido de <http://www.fimevic.df.gob.mx/index.htm>
- Finlayson-Pitts, J. B. (2000). *Chemistry of the upper and lower atmosphere :theory, experiments, and applications* . California: Elsavier Inc.
- Forbes. (31 de Marzo de 2015). *Forbes*. Obtenido de Ciudad de México es (casi) la ciudad con el peor tráfico en el mundo: <http://scl.io/cRQitvr-#gs.=YAFKLs>
- GGWS, G. G. (10 de Octubre de 2016). *Golden Gate Weather Services*. Obtenido de El Niño and La Niña Years and Intensities, based on Oceanic Niño Index: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Hassid, S., Santamouris, M., & Papanikolaou, P. (2000). The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Building*, pp 131-141.
- IECA. (2016). *Instituto español del cemento y sus aplicaciones*. Obtenido de Inercia química: https://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=692
- INE, I. N. (2005). *Marco de Referencia*. Obtenido de Situación ambiental de la Zona Metropolitana del Valle de México: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/268/metro3.html>
- INECC. (2007). *DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE. INFORME FINAL DE TRABAJO*. Obtenido de <https://goo.gl/DwV2XA>
- INECC. (27 de Octubre de 2011). *Estudio de emisiones y características vehiculares en ciudades mexicanas. Reporte Final*. Obtenido de http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/2010_rep_fuentes_vehiculares.pdf
- INEGI. (2009). *Censo Económico 2009*. Obtenido de www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/
- INEGI. (2016). *Vehículos de motor registrados en circulación*. Obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/registros/economicas/vehiculosmotor/default.html>
- INEGI, I. N. (2007). *Encuesta Origen–Destino 2007. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de http://inigo.bicite-kas.org/wp-content/uploads/2013/07/2007_Encuesta_Origen_
- Jacobson, M. Z. (2002). *Atmospheric pollution: history, science, and regulation*. Cambridge University Press.
- Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo de clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Investigaciones Geográficas Boletín*, núm 31, pp. 10-45.

- Ledesma, M. J. (2011). *Principios de Meteorología y Climatología*. Madrid, España: Paraninfo.
- LIPP, D. (2014). EL CAÑÓN URBANO SU INCIDENCIA EN LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE. *Actas Congreso Internacional de Geografía*, 123- 125.
- Logan, e. a. (1981). . *Tropospheric chemistry: A global perspective*. urnal of Geophysical Research.
- López, J. (18 de Marzo de 2014). *Frenan desperfectos Avenida Insurgentes*. Obtenido de <http://ciudadanosenred.com.mx/frenan-desperfectos-avenida-insurgentes/>
- Lorenzo, W. e. (2012). *Intoxicación con monóxido de carbono*. Guatemala. Obtenido de <https://goo.gl/UKbWdb>
- Morales, G. D. (2006). *Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago, Chile*. Santiago: Colección de Química Ambiental, Editorial universitaria.
- NAS, N. A. (2002). *The Ongoing Challenge of Managing Carbon Monoxide Pollution in Fairbanks, Alaska*. Estados Unidos: National Academies Press. Recuperado el 2016
- NOAA. (10 de 02 de 2012). *National Centers for Environmental Information*. Obtenido de <http://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/greenhouse-gases.php#carbonmonoxide>
- NOAA. (4 de Noviembre de 2014). *National Weather Service*. Obtenido de Climate Prediction Center: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- Offerle, B. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*.
- Oke. (1981). Canyon geometry and nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *J. Climatol.*, 1:237–254.
- Oke. (Diciembre de 1988). *Physical Geography*. Obtenido de The urban energy balance: <http://ppg.sagepub.com/content/12/4/471.extract>
- Oke. (1997). *Urban climates and global change*. In Perry A and Thompson R eds *Applied Climatology: Principles and Practices*. Lóndres.
- OMS, O. M. (Marzo de 2014). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Calidad del aire (exterior) y salud. Nota descriptiva N°313: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- ONU, H. (2015). *Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015*. Ciudad de México: ONU Hábitat.
- Puigcerver, M. (2008). *El medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Madrid: Universitat de Barcelona.
- Raub, J., & WHO. (1999). *Carbon Monoxide*. Geneva: World Health Organization.
- Reforma, P. (01 de Noviembre de 2006). *Hay en el Distrito Federal 380 cruceros viales conflictivos*. Obtenido de <https://goo.gl/ObfVEv>

- Sailor, D., & Lu, L. (20 de Marzo de 2004). *Atmospheric Environment*. Obtenido de A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231004001529>
- Sailor, D., & Lu, L. (2004.). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment.*, 38: 2737–2748.
- Sang J, L. H. (2000). Observational and numerical studies of winter time urban boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 243–258.
- Sangines, D. (2013). *Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana*. Zaragoza: Tesis Doctoral de la Universidad de Zaragoza.
- Sass, R. (2012). *It's not cool to be hot in Houston*. Obtenido de <http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html>
- SEDEMA, S. d. (2012). *Inventario de emisiones de la ZMVM 2012*. Obtenido de www.sedema.gob.mx
- SEGOB, S. D. (12 de Febrero de 2010). *DOF, Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de DECLARATORIA de Desastre Natural por la ocurrencia de lluvias severas los días 3 y 4 de febrero de 2010, en 4 delegaciones del Distrito Federal.: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5131661&fecha=12/02/2010
- Seinfeld, P., & Pandis, S. (2006). *Atmospheric chemistry and Physics, From air pollution to climate change* (Segunda Edición ed.). Wiley.
- SEMOVI. (2014). *Programa Integral de Movilidad 2013- 2018*. Programa Integral de Movilidad. Obtenido de <https://goo.gl/x5RJ5m>
- SETRAVI. (30 de Diciembre de 2010). *Avenida Insurgentes*. Obtenido de <https://goo.gl/9TzGT4>
- SETRAVI, S. d. (14 de Mayo de 2014). *SETRAVI*. Obtenido de Avenida Insurgentes: http://web.archive.org/web/20140514015723/http://www.setravi.df.gob.mx/wb/stv/avenida_insurgentes
- Shepherd, J. M. (2005). A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interactions*, 9, paper 12, 27 pp.
- Shreffler, J. H. (1978). Detection of centripetal heat-island circulations from tower data in St. Louis. *Bound.-Layer Meteor.* 15:229–242.
- Sportisse, B. (2010). *Fundamentals in air pollution*. New York: Springer.
- Stanley, E. M. (2007). *Introducción a la química ambiental*. España: Reverté, S.A.
- Sucking, P. (1980). The energy balance microclimate of a suburban lawn. *Journal of Applied Meteorology*, 606– 608.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* , 25: 99–103.

- Tumini, I. (2009). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. *Sustainable Buildings*, pp 1 -15.
- Vigueras, L. (2010). *Alternativas para la sustentabilidad en el suministro de agua potable en la Ciudad de México*. Ciudad de México: Tesis Maestría, IPN.
- Vogt, R., & Christen, A. (26 de Agosto de 2004). *International Journal of Climatology*. Obtenido de Energy and radiation balance of a central European city:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1074/full>
- Wayne, R. (2000). *Chemistry of Atmospheres* (3era ed.). Oxford University Press.
- WHO, W. H. (2000). *World Health Organization, Chapter 5.5 Carbon Monoxide*. Obtenido de Air Quality Guidelines - Second Edition:
http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/123059/AQG2ndEd_5_5carbonmonoxide.PDF
- Yoshino, M. (1975). *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology*. Columbia University Press.

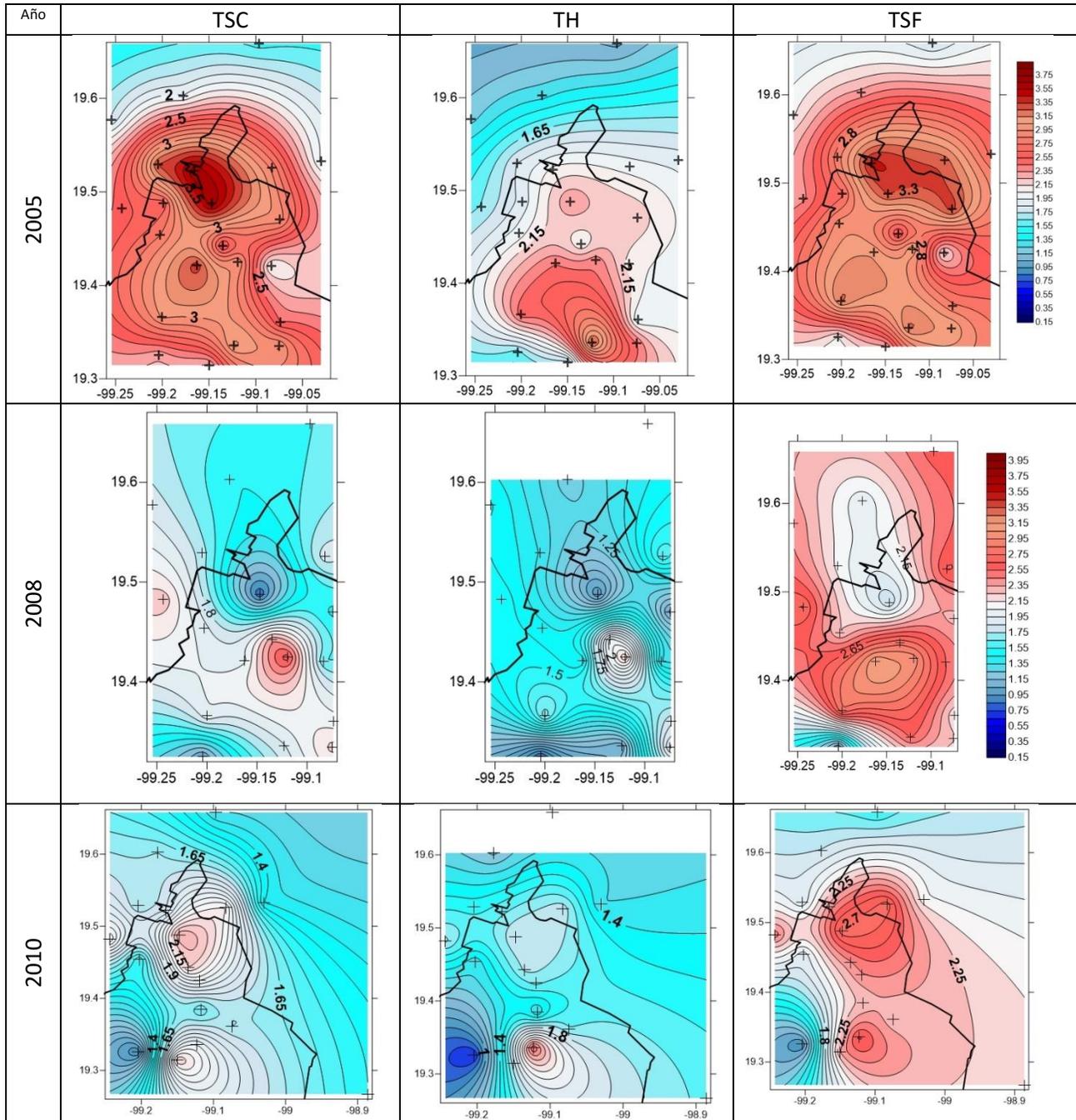
Anexo 1.

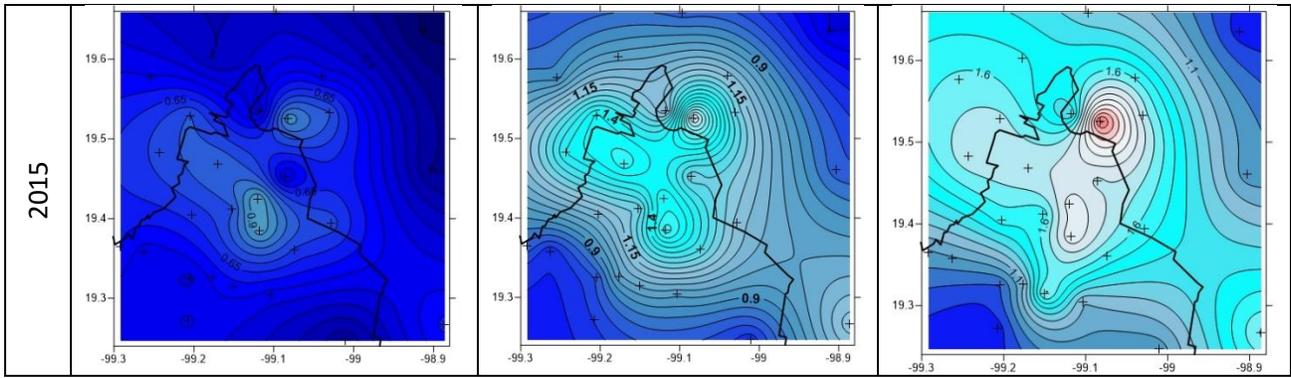
Tabla i. Estaciones meteorológicas y de monitoreo pertenecientes a la RedMet y otras y los años de registro [Elaboración propia, 2016].

Estación		Fecha de funcionamiento	T _A	CO	Ubicación	Tránsito
Acolman	ACO	2007 - actual	x	x	Urbana	Moderado
Aragón	ARA	2005 - 2010		x	Urbana	Moderado
Atizapán	ATI	1994 - actual		x	Semiurbana	Moderado
Azcapotzalco	AZC	2005 - 2010		x	Urbana	Alto
Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	2014 - actual		x	Semiurbana	Moderado
Cerro de la Estrella	CES	2005 - 2010		x	Urbana	Alto
Chalco	CHO	2007 - actual	x	x	Semirural	Bajo
Cuajimalpa	CUA	1994 - actual	x	x	Urbana	Moderado
Cuautitlán	CUT	2012 - actual	x		Urbana	Alto
FES Acatlán	FAC	1986 - actual	x	x	Urbana	Moderado
Hangares	HAN	2005 - 2010	x		Semiurbana	Alto
Hospital General	HGM	2012 - actual			Urbana	Alto
Inst. Mexicano del Petróleo	IMP	2005 - actual		x	Urbana	Alto
Iztacalco	IZT	2007 - actual	x	x	Urbana	Alto
Lagunilla	LAG	2005 - 2010		x	Urbana	Alto
Los Laureles	LLA	1986 - actual	x		Urbana	Bajo
La Presa	LPR	1986 - actual	x		Urbana	Bajo
Merced	MER	1986 - actual	x	x	Urbana	Alto
Metro Insurgentes	MIN	2005 - 2007	x		Urbana	Alto
Montecillo	MON	1994 - actual	x	x	Urbana	Moderado
Nezahualcóyotl	NEZ	2011 - actual	x		Urbana	Alto
Pedregal	PED	1986 - actual	x	x	Urbana	Bajo
Plateros	PLA	2005 - actual	x	x	Urbana	Moderado
San Agustín	SAG	1986 - actual	x	x	Urbana	Bajo
Santa fe	SFE	2012 - actual	x	x	Urbana	Alto
San Juan Aragón	SJA	2003 - actual	x		Urbana	Alto
Santa Úrsula	SUR	1986 - actual	x	x	Urbana	Bajo
Tacuba	TAC	2005 - 2010	x	x	Urbana	Alto
Taxqueña	TAX	2005 - 2010	x		Urbana	Alto
Tlalnepantla	TLA	2005 - 2015	x	x	Urbana	Alto
Tlalpan	TPN	2005 - 2015		x	Urbana	Alto
Villa de las Flores	VIF	2005 - 2015	x	x	Urbana	Moderado
Xalostoc	XAL	2005 - 2015	x	X	Semirural	Bajo

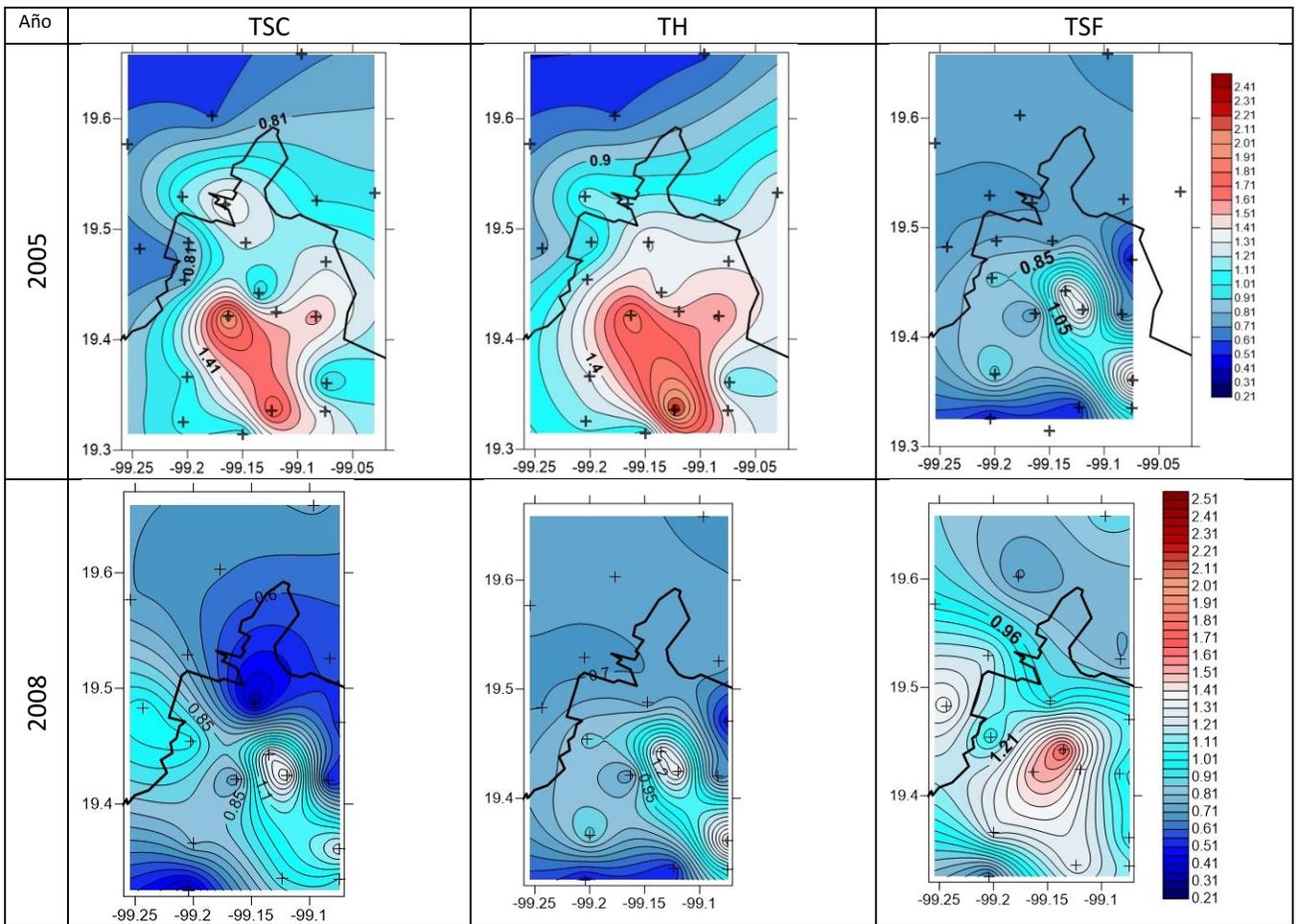
Anexo 2

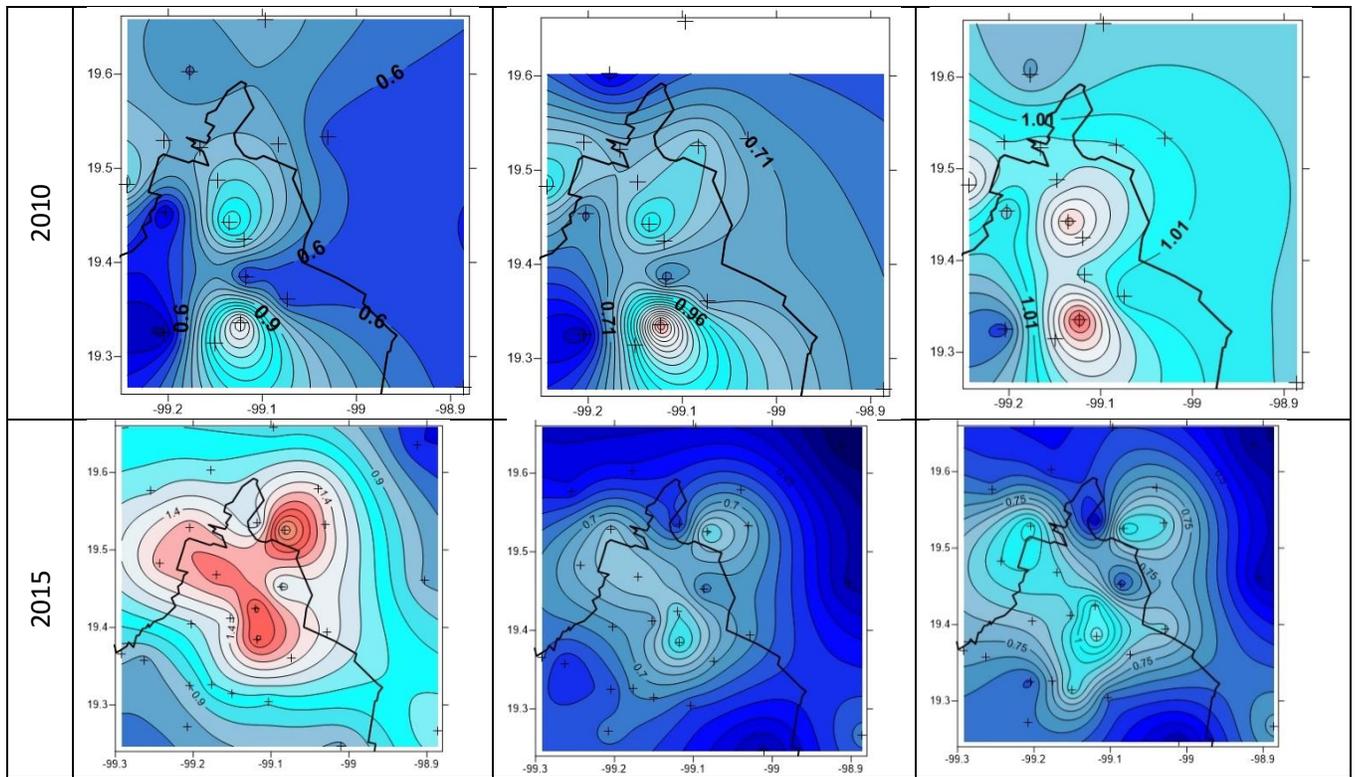
Distribución de la concentración de CO (en ppm) en la ZMVM con base en los datos reportados por la RAMA en el periodo de 7:00 a 9:00 h.





Distribución de la concentración de CO (en ppm) en la ZMVM con base en los datos reportados por la RAMA en el periodo de 19:00 a 21:00 h.





Anexo 3

Matrices de correlación entre dos estaciones meteorológicas y de monitoreo atmosférico. Se comparan las variables entre la temperatura del aire (T_A) y la concentración de CO [CO].

Matriz de Correlación entre T_A y [CO] 2015				
$p < .05$ N=1115				
Variable	Promedio	Std.Dev.	MER CO (ppm)	MER T_A ($^{\circ}$ C)
MER CO	1.34242	0.715376	1.000000	-0.621389
MER T_A	17.25587	5.195822	-0.621389	1.000000

Matriz de Correlación entre T_A y [CO] 2015				
$p < .05$ N=1582				
Variable	Promedio	Std.Dev.	PED CO	PED T_A
PED CO	0.60683	0.397451	1.000000	-0.358172
PED T_A	17.20348	5.114885	-0.358172	1.000000

Anexo 4

Tabla ii. Datos obtenidos en el cruce Eje 1 Norte e Insurgentes Norte. Se muestran promedios calculados durante el monitoreo realizado de 7:00 a 9:00 h durante el mes octubre de 2016.

Insurgentes y Eje 1 Norte					
Número de cruces:	3	Tiempo de observación:	1 h	Coefficiente de rugosidad:	108 cm
Volumen de tránsito [veh/h]:			Velocidad de tránsito [km/h]:	20 km/h	
Factor de emisión en inactividad:	23.3 g/km		Factor de emisión en movimiento:	12 g/km	
	Capacidad en 50 m	Tiempo alto (s)	Tiempo siga (s)	Ancho de carriles [m]	Ancho de Cruce [m]
Cruce 1 Insurgentes norte	36	30	90	2.7	8.1
Cruce 2 Insurgentes sur	24	30	90	2.7	8.1
Cruce 3 Eje 1 norte	100	90	30	3	15

Receptor	Max 1 h (ppm)	Max 8 h (ppm)
1	9.1	5.5
2	9.6	5.8
3	10.4	6.2
4	9.6	5.8
5	9.4	5.6
6	9.1	5.5
7	9.6	5.8
8	10.3	6.2
9	9.7	5.8
10	9.5	5.7
11	9.0	5.4
12	9.6	5.8
13	10.3	6.2
14	9.5	5.7
15	9.4	5.6
16	9.1	5.5
17	9.6	5.8
18	10.3	6.2
19	9.6	5.8
20	9.4	5.6

Tabla iii. Datos obtenidos en el cruce Paseo de la Reforma e Insurgentes Norte. Se muestran promedios calculados durante el monitoreo realizado de 7:00 a 9:00 h durante el mes octubre de 2016.

Insurgentes y Reforma					
Número de cruces:	8	Tiempo de observación:	1 hr	Coefficiente de rugosidad:	108cm
Volumen de tránsito [veh/h]:	24,300		Velocidad de tránsito [km/h]:	13 km/h	
Factor de emisión en inactividad:			Factor de emisión en movimiento:		
	Capacidad en 50 m	Tiempo alto (s)	Tiempo siga (s)	Ancho de carriles [m]	Ancho de Cruce [m]
Cruce 1 (James Sullivan)	27 Saturado	95	25	3	9
Cruce 2 (Calzada Manuel Villalongin)	29 autos Saturado	60	25	3	9
Cruce 3 (Lateral de paseo de la Reforma)	18 autos	25	60	3	6
Cruce 4 (Paseo de la Reforma dir. Santa Fe)	40 autos	25	60	3	12
Cruce 5 (Paseo de la Reforma dir. La Villa)	32 autos	25	60	3	12
Cruce 6 (Lateral de paseo de la Reforma)	12 autos	25	60	3	6
Cruce 7 Insurgentes (dirección Sur)	24 autos	25	90	3	9
Cruce 8 Insurgentes (Dirección nte)	32 autos	25	90	3	9

Receptor	Max 1h (ppm)	Max 8h (ppm)
1	12.2	7.3
2	13.3	8.0
3	14.7	8.8
4	13.4	8.0
5	12.7	7.6
6	12.3	7.4
7	13.3	8.0
8	14.6	8.8
9	13.6	8.2
10	12.9	7.7
11	12.2	7.3
12	13.3	8.0

13	14.6	8.8
14	13.4	8.0
15	12.6	7.6
16	12.3	7.4
17	13.3	8.0
18	14.6	8.8
19	13.4	8.0
20	12.6	7.6

Tabla iv. Datos obtenidos en el cruce Eje 3 Sur e Insurgentes Norte. Se muestran promedios calculados durante el monitoreo realizado de 7 a 9 h durante el mes octubre de 2016.

Insurgentes y Eje 3 Sur					
Número de cruces:	3	Tiempo de observación:	1 hr	Coefficiente de rugosidad:	108cm
Volumen de tránsito [veh/h]:			Velocidad de tránsito [km/h]:	25	
Factor de emisión en inactividad:		Factor de emisión en movimiento:			
	Capacidad en 50 m	Tiempo alto (s)	Tiempo siga (s)	Ancho de carriles [m]	Ancho de Cruce [m]
Cruce 1	20	90	45	3	18
Cruce 2	40	45	90	2.7	8.1
Cruce 3	45	45	90	2.7	8.1

Receptor	Max 1h (ppm)	Max 8h (ppm)
1	7.5	4.5
2	8	4.8
3	8.8	5.3
4	8.2	4.9
5	7.9	4.7
6	7.5	4.5
7	8	4.8
8	8.8	5.3
9	8.2	4.9
10	7.8	4.7
11	7.5	4.5
12	8.1	4.9
13	8.9	5.3
14	8.2	4.9
15	7.8	4.7
16	7.6	4.6
17	8.1	4.9
18	8.9	5.3
19	8.3	5
20	7.8	4.7

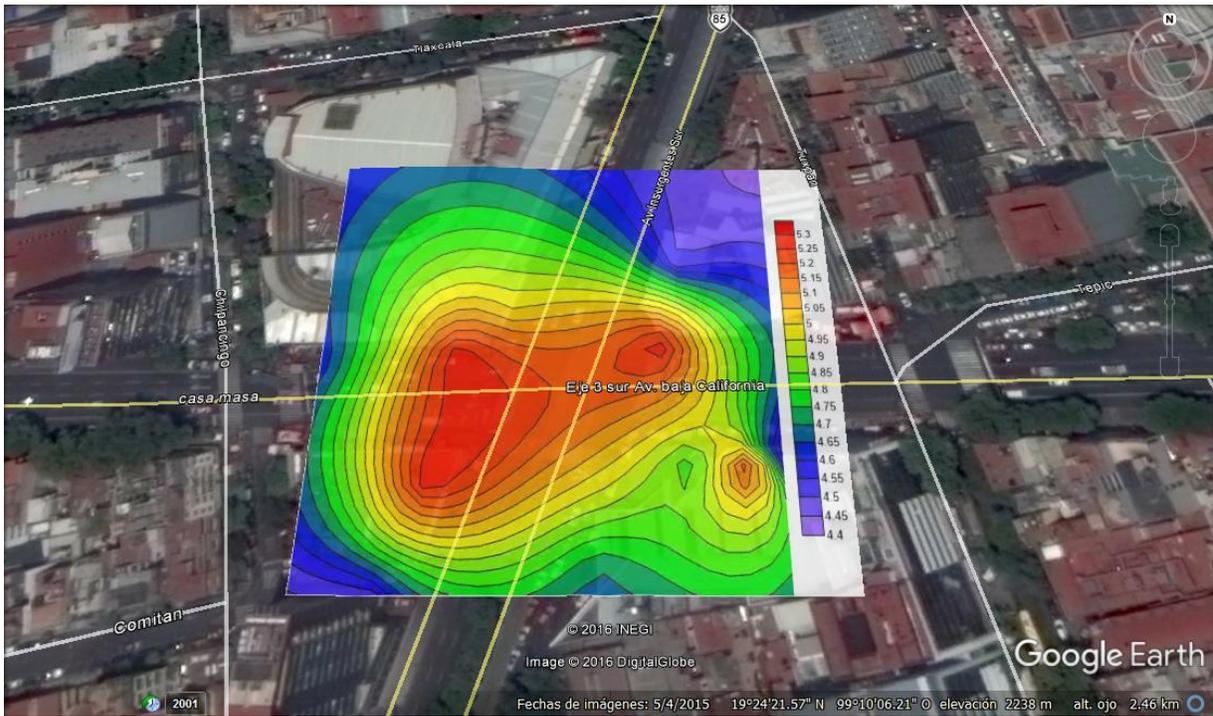


Figura 36. Distribución espacial de CO en Insurgentes Sur y Eje 3 Sur. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.

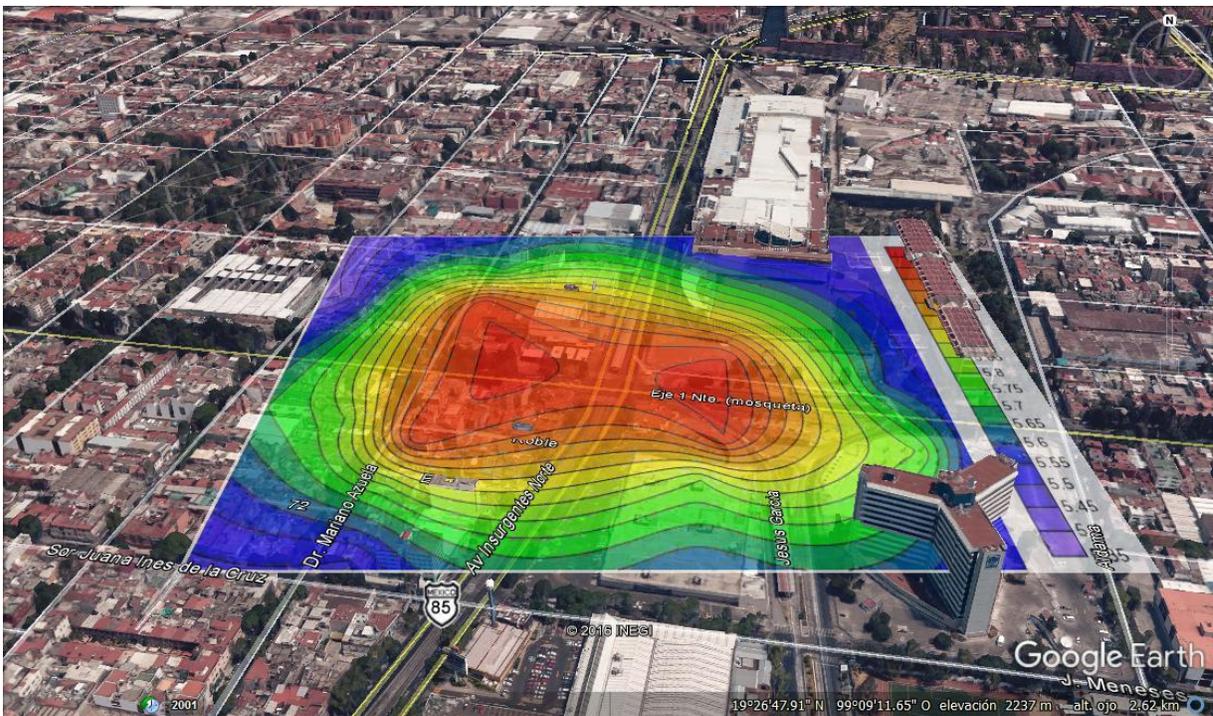


Figura 37. Distribución espacial de CO en Insurgentes Norte y Eje 1 Norte. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.

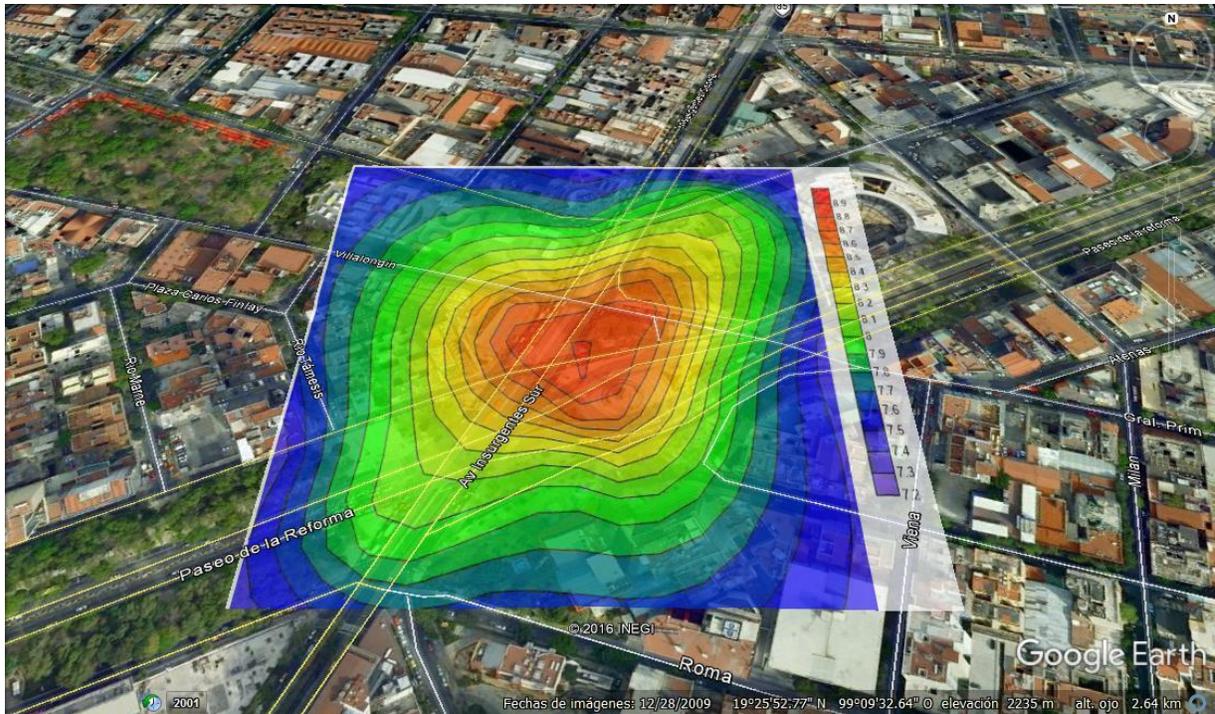


Figura 38. Distribución espacial de CO en Insurgentes Sur y Paseo de la Reforma. Datos obtenidos mediante software CAL3QH (EPA), imágenes obtenidas Google Earth.