

Estudio para el análisis de calidad del aire en la
Zona Metropolitana del Valle de Toluca para determinar
la viabilidad de la implementación del programa “Hoy No Circula”

INFORME FINAL



Financiado por el Fideicomiso 1490 para apoyar Programas,
Proyectos y Acciones Ambientales en la Megalópolis.

Noviembre de 2022.

Estudio para el análisis de calidad del aire en la Zona
Metropolitana del Valle de Toluca para determinar la
viabilidad de la implementación del Acuerdo
“Hoy No Circula”

INFORME FINAL

Preparado por:
Tejeda Le Blanc & Cía., S.C.
LT Consulting

Preparado para:
Secretaría de Medio Ambiente del
Gobierno del Estado de México

Financiado por el Fideicomiso 1490 para apoyar Programas,
Proyectos y Acciones Ambientales en la Megalópolis.

Toluca de Lerdo, México, a 11 de noviembre de 2022.

Contenido

| | |
|---|-----|
| Contenido | i |
| Lista de figuras | iii |
| Lista de tablas | v |
| | |
| Resumen ejecutivo | vii |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Antecedentes | 4 |
| 3. Esquema de análisis del proyecto..... | 10 |
| 4. Objetivos | 13 |
| 4.1. Objetivo general | 14 |
| 4.2. Objetivo específico | 14 |
| 5. Diagnóstico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en materia de calidad del aire relacionado con los vehículos en circulación..... | 15 |
| 5.1. Integración y localización geográfica de la ZMVT | 16 |
| 5.2. Aspectos socioeconómicos de la ZMVT | 17 |
| 5.3. Características y crecimiento de la flota vehicular de la ZMVT | 20 |
| 5.3.1. Índice de motorización | 21 |
| 5.3.2. Composición de la flota por tipo de vehículo..... | 22 |
| 5.3.3. Composición de la flota vehicular por tipo de combustible..... | 23 |
| 5.3.4. Composición de la flota vehicular por antigüedad..... | 23 |
| 5.4. Programa de verificación vehicular en la ZMVT | 25 |
| 5.5. Calidad del aire en la ZMVT | 27 |
| 6. Calidad del aire y emisiones vehiculares | 29 |
| 6.1. Datos de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca | 30 |
| 6.1.1. Evaluación del cumplimiento de las NOM de calidad del aire..... | 32 |
| 6.1.2. Comportamiento durante las horas del día, los días de la semana y los meses del año..... | 34 |
| 6.2. Emisiones de contaminantes a la atmósfera en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca..... | 38 |
| 6.3. Emisiones de contaminantes a la atmósfera de vehículos automotores en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca | 39 |
| 6.4. Correlación de emisiones vehiculares e indicadores de calidad del aire | 48 |

| | |
|--|----|
| 7. Evaluación de implementación del Programa “Hoy No Circula” | 51 |
| 7.1. Definir escenarios para el Programa “Hoy No Circula” | 52 |
| 7.1.1. Escenarios de modelación de emisiones con MOVES México | 53 |
| 7.1.2. Escenarios de modelación fotoquímica..... | 61 |
| 7.2. Evaluar la viabilidad de implementar el Programa “Hoy No Circula” en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. | 83 |
| 7.3. Actualizar el Acuerdo del Programa “Hoy No Circula” | 85 |
| 8. Conclusiones..... | 87 |
| 9. Bibliografía | 90 |
| Anexo A. Cambios de velocidades por episodios de contingencia en los municipios de Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz, Estado de México..... | 96 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama del desarrollo del proyecto. | 12 |
| Figura 2. Ubicación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. | 16 |
| Figura 3. Tendencia y tasa de crecimiento de la población de la ZMVT. | 19 |
| Figura 4. Crecimiento de la flota vehicular en la ZMVT. | 20 |
| Figura 5. Composición de la flota vehicular de la ZMVT. | 22 |
| Figura 6. Porcentaje de flota vehicular por tipo de combustible en la ZMVT. | 23 |
| Figura 7. Composición de la flota vehicular de la ZMVT por edad. | 24 |
| Figura 8. Porcentaje de hologramas otorgados en la ZMVT. | 25 |
| Figura 9. Tipo de holograma por estrato de edad en la ZMVT. | 26 |
| Figura 10. Cumplimiento de las NOM de calidad del aire en la ZMVT de acuerdo a los valores reportados en los Informes Nacionales de Calidad del Aire elaborados por el INECC. | 28 |
| Figura 11. Cumplimiento de las NOM de la calidad del aire en la ZMVT. | 32 |
| Figura 12. Comportamiento de los contaminantes durante las horas del día en la ZMVT, 2019. | 34 |
| Figura 13. Comportamiento de los contaminantes durante los días de la semana en la ZMVT, 2019. | 35 |
| Figura 14. Comportamiento mensual de los contaminantes en la ZMVT, 2019 | 37 |
| Figura 15. Contribución a la emisión de contaminantes atmosféricos por fuente en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2016. | 39 |
| Figura 16. Distribución de flota vehicular por categoría. | 42 |
| Figura 17. Distribución de flota vehicular por año modelo. | 43 |
| Figura 18. Perfil de velocidades de circulación en vialidades urbanas. | 44 |
| Figura 19. Porcentaje de emisiones por tipo de vehículo en la ZMVT. | 46 |
| Figura 20. Comportamiento de NOx en un día típico en la ZMVT (entre semana y en fin de semana). | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Comportamiento de CO en un día típico en la ZMVT (entre semana y en fin de semana)..... | 49 |
| Figura 22. Comportamiento O ₃ , NO _x y CO a lo largo de la semana de forma horaria. | 50 |
| Figura 23. Dominio de modelación. | 64 |
| Figura 24. Perfil temporal de temperaturas del modelo y observaciones. Periodo 4-6 de enero de 2019. | 66 |
| Figura 25. Perfil temporal de CO, NO y O ₃ : Observado, Escenario base y Escenario HNC. Periodo 4-6 de enero de 2019. | 67 |
| Figura 26. Perfil temporal de temperaturas del modelo y observaciones. Periodo 6-8 de mayo de 2019..... | 69 |
| Figura 27. Perfil temporal de CO, NO, SO ₂ y O ₃ : Observado, Escenario base y Escenario HNC. Periodo 6-9 de mayo de 2019..... | 71 |
| Figura 28. Perfil temporal de temperaturas del modelo y observaciones. Periodo 6-8 de mayo de 2019..... | 73 |
| Figura 29. Perfil temporal de CO, NO ₂ , SO ₂ y O ₃ : observado, Escenario base y Escenario HNC. Periodo 13-15 de octubre de 2019..... | 75 |
| Figura 30. Porcentaje de cambio de Ozono, para los días 4, 5 y 6 de enero de 2019 de 10 a 15 horas..... | 78 |
| Figura 31. Porcentaje de cambio de Ozono, para los días 6, 7 y 8 de mayo de 2019, 10 a 15 horas..... | 80 |
| Figura 32. Incendios durante el 9 de mayo de 2019..... | 81 |
| Figura 33. Porcentaje de cambio de Ozono, para los días 6, 7 y 8 de octubre de 2019, 10 a 15 horas..... | 82 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Densidad poblacional municipal en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca..... | 18 |
| Tabla 2. Motorización municipal en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca..... | 21 |
| Tabla 3. Estaciones de monitoreo de calidad del aire en la ZMVT. | 27 |
| Tabla 4. Especificaciones técnicas de las Normas Oficiales Mexicanas vigentes en el periodo de evaluación..... | 31 |
| Tabla 5. Inventario de emisiones contaminantes a la atmosféricos por fuente en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2016..... | 38 |
| Tabla 6. Kilómetros recorridos por tipo de vehículo en la ZMVT..... | 43 |
| Tabla 7. Inventario de emisiones de fuentes móviles para la ZMT. | 45 |
| Tabla 8. Emisiones de contaminantes criterio de fuente móviles en la ZMVT. | 46 |
| Tabla 9. Emisiones de gases de efecto invernadero de fuente móviles en la ZMVT..... | 47 |
| Tabla 10. Emisiones de compuestos tóxicos de fuente móviles en la ZMT. | 47 |
| Tabla 11. Distribución de tipo de hologramas por año modelo. | 55 |
| Tabla 12. Limitación de circulación de vehículos en el Acuerdo de Hoy No Circula. | 56 |
| Tabla 13. Distribución de la cantidad de vehículos por tipo de holograma. | 57 |
| Tabla 14. Distribución de la cantidad de vehículos por tipo de holograma que participarían en el Acuerdo de Hoy No Circula respecto al Escenario 2. | 59 |
| Tabla 15. Emisiones vehiculares del escenario base y escenarios de reducción de emisiones. | 60 |
| Tabla 16. Reducción de toneladas de emisiones en cada escenario. | 60 |
| Tabla 17. Porcentaje de reducción de emisiones en cada escenario. | 61 |
| Tabla 18. Reducciones en las emisiones por aplicación del HNC en la ZMVT..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Tabla 19. Coeficientes de correlación entre los resultados de la modelación y los observados para el periodo del 4 al 6 de enero de 2019..... | 66 |
| Tabla 20. Coeficientes de correlación entre los resultados de la modelación y los observados para el periodo del 6 al 8 de mayo de 2019. | 70 |
| Tabla 21. Coeficientes de correlación entre los resultados de la modelación y los observados para el periodo del 13 al 15 de octubre..... | 74 |
| Tabla 22. Porcentaje de reducciones de emisiones vehiculares por aplicación del Acuerdo de HNC. | 83 |
| Tabla 23. Porcentajes de reducción y/o aumento de O ₃ por la aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula | 84 |
| Tabla 24. Porcentajes de reducción y/o aumento de O ₃ por la aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula | 85 |
| Tabla 25. Días SIN y CON contingencia ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México. | 96 |
| Tabla 26. Velocidades horarias para Naucalpan de Juárez en episodios de contingencia ambiental..... | 97 |
| Tabla 27. Velocidades horarias para Tlalnepantla de Baz en episodios de contingencia ambiental..... | 98 |
| Tabla 28. Promedio del porcentaje de aumento de velocidades por episodios en Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla e Baz. | 99 |
| Tabla 29. Cambio de velocidades entre los años 2021 y 2022 en Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz. | 99 |

Resumen Ejecutivo

Este documento contiene la información y análisis requeridos como parte del **Informe Final del Estudio para el análisis de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca para determinar la viabilidad de la implementación del Acuerdo “Hoy No Circula”**.

Contiene una *introducción* que incluyen aspectos generales del tema de calidad del aire, emisión de contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud humana, así como una sección que describe los *antecedentes* y características del programa “Hoy No Circula” en México, así como las experiencias internacionales en la materia.

Adicionalmente, se presenta una sección de *diagnóstico*, en la cual se hace una descripción de la localización de la zona de estudio, aspectos socioeconómicos y se profundiza en el análisis de la calidad del aire, incluyendo el comportamiento y cálculo de indicadores de cumplimiento de norma horaria, diaria y mensual para el ozono (O₃), partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, bióxido de nitrógeno (NO₂), bióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO).

Con relación al *inventario de emisiones* contaminantes al aire que son emitidos por los vehículos automotores en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se estimó el escenario base, es decir, las emisiones actuales sin considerar algún escenario de control y se analizó su comportamiento horario con respecto a los indicadores de calidad del aire para el año 2019.

Para la evaluación de la implementación del Programa Hoy No Circula (HNC) se han estimado escenarios de emisiones vehiculares con el uso del modelo MOVES México, considerando la circulación de toda la flota vehicular y aplicando los criterios del Acuerdo de HNC, como resultados generales de estos escenarios se han obtenido reducciones en emisiones que van desde un 14.5 %, hasta un 21.7%, dependiendo del tipo de contaminante.

La reducción de emisiones estimadas, resultado de la aplicación del Acuerdo de HNC, han sido modeladas fotoquímicamente para conocer la reducción de ozono (O_3) en la ZMVT, de estos resultados, destacan que dependiendo de la temporada del año, se logran alcanzar reducciones de hasta el 8% en las concentraciones de O_3 ; sin embargo, se observan incrementos en la concentración de este contaminante en municipios conurbados con la Ciudad de México, así como en el norte del estado de Morelos.

De acuerdo con los resultados obtenidos con la modelación fotoquímica, si se implementará el Acuerdo del programa “Hoy No Circula” en la ZMVT, se tendrían reducciones en las concentraciones de O_3 , por lo que esta zona se vería beneficiada, siendo de esta forma factible la implementación del Acuerdo. Sin embargo, se recomienda evaluar el impacto del aumento de O_3 en los municipios fuera de la ZMVT y en zonas ajenas al territorio mexiquense, en los cuales se presentan aumentos en O_3 .

1. Introducción

Información del 2022 de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que el 99% de la población mundial respira un aire que supera los límites de calidad recomendados para partículas y ozono. Esta situación pone en peligro la salud de los individuos, por lo que subraya la importancia de frenar el uso de combustibles fósiles y tomar medidas tangibles para reducir los niveles de contaminación de la contaminación del aire. Adicionalmente, la OMS indica que las exposiciones más altas a la mala calidad del aire se presentan en países con ingresos bajos y medianos (OMS, 2022), como sería el caso de un porcentaje de la población mexicana, ya que de acuerdo con la clasificación elaborada por el Banco Mundial, nuestro país está catalogado como una economía de ingreso medio-alto (The World Bank, 2022).

La exposición a contaminantes atmosféricos está asociada con efectos crónicos y agudos hacia la salud humana. Entre los efectos se encuentran, principalmente, síntomas respiratorios, disminución de la función pulmonar, respuesta inmunológica alterada y exacerbación de cuadros asmáticos, así como el incremento en las tasas de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (COFEPRIS, 2017). En 2017, el Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud (IHME, por sus siglas en inglés), estimó para México un total de 48,072 muertes prematuras a causa de la contaminación del aire; y para ese mismo año el Sistema de Cuentas Nacionales de México determinó que los costos por degradación ambiental atribuible a la contaminación atmosférica fueron de 619,114 millones de pesos, que equivalió al 2.8% del Producto Interno Bruto Nacional (PIB), (INECC, 2020).

En cuanto a la mala calidad del aire, las ciudades mexicanas no están exentas de este problema, ya que en el año 2019 de las 114 estaciones de monitoreo atmosférico en las que se pudo evaluar la norma de ozono, en el 90% no se cumplió, mientras que en relación a las partículas PM_{10} , el incumplimiento fue de prácticamente el 92% de las estaciones en donde se puede evaluar el cumplimiento (INECC, 2020).

En lo que respecta a la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), el Informe Nacional de Calidad del Aire 2019 para México, muestra que el número de días en que se incumplió al menos una norma de salud ambiental, a nivel de toda la zona metropolitana, fue de 231 lo que equivale al 63% de los días del año. Los

contaminantes que con mayor frecuencia superaron alguno de sus límites normados fueron las PM₁₀ (52% de los días del año), seguido del ozono (32%) y las PM_{2.5} (24%). Niveles de concentración que determinaron una condición de extremadamente mala calidad del aire en esta zona (INECC, 2020).

Esta condición de mala calidad del aire en la ZMVT está relacionada con la emisión de contaminantes de origen antropogénico, como son las provenientes de los vehículos automotores. Información del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de México 2018-2030, muestra que esta fuente de emisión contribuye con el 80% de monóxido de carbono (CO), 59% de óxidos de nitrógeno (NO_x), 18% de compuestos orgánicos volátiles (COV), 24% de dióxido de azufre (SO₂), 9% de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} (Gobierno del Estado de México, 2018). Las emisiones de óxidos de nitrógeno y de compuestos orgánicos volátiles son de particular interés por ser precursores de la formación de ozono (O₃), contaminante que tiene efectos adversos hacia la salud humana.

Ante la problemática de calidad del aire y sus efectos en la salud de la población que habita la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, el Gobierno de Estado de México, a través de la Secretaría del Medio Ambiente de esta entidad, ha decidido realizar el *Estudio para el análisis de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca para determinar la viabilidad de la implementación del programa “Hoy No Circula”*, a fin de que contribuya a la reducción de las emisiones contaminantes al aire, mejorar la calidad del aire y en consecuencia la calidad de vida de los habitantes de esta zona del Estado de México.

2. Antecedentes

La calidad del aire de las ciudades está determinada por diferentes factores, entre los que se encuentran las condiciones topográficas y meteorológicas de la región y la cantidad y tipo de fuentes de emisión como las puntuales (industrias), de área (comercios, servicios y zonas habitacionales), así como los vehículos automotores.

Entre las principales fuentes de emisión de contaminantes al aire se encuentra el uso de los vehículos automotores, ya sea para el transporte de pasajeros, mercancías o la prestación de algún servicio. Entre los parámetros más importantes que influyen en la cantidad y tipo de contaminantes se encuentran la calidad de los combustibles utilizados, el mantenimiento mecánico de la unidad, los sistemas de control de emisiones con los que cuenta el vehículo, el uso que se le da e inclusive la forma de manejo.

Es así, que se han diseñado medidas que incluyen la mejora en la calidad de los combustibles o su cambio (P. ej. Uso de gas natural en lugar de gasolina); impuesto a la congestión vial¹; elevar los precios de los parquímetros para desincentivar el uso del auto articular²; impuesto a los combustibles de uso vehicular; carriles exclusivos para autos con más de dos pasajeros³; así como la restricción vehicular por número de placa^{4,5}, así como el programa “Hoy No Circula” implementado en la Zona Metropolitana del Valle de México, entre otras medidas.

¹ Impuesto a la congestión vial en Estocolmo y Gotemburgo. Información consultada en: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/Other-languages/Espanol/impuesto-a-la-congestion-vial-en-estocolmo-y-gotemburgo/>

² Rachel WeInbeRgeR., et., 2010. Políticas Estadounidenses de Estacionamiento: una visión general de las estrategias de gestión. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo.

³ State of California, 2019. Manual del Automovilista. Department of Motor Vehicles. Información disponible en: www.dmv.ca.gov

⁴ Restricción vehicular en Chile. Información disponible en: <https://www.mtt.gob.cl/restriccion-vehicular-2022>

⁵ Restricción vehicular en Colombia. Información disponible en: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/pico_y_placa_2022

Programa “Hoy No Circula” en México

Debido a los problemas de calidad del aire que se presentaron en la década de los ochentas en la Zona Metropolitana del Valle de México, a mediados de esta década dio inicio una medida de control de emisiones vehiculares llamada “Un día sin auto”, la cual era de carácter voluntario, pero para el año 1989 se convirtió en obligatoria durante el periodo invernal con el nombre de “Programa Hoy No Circula (HNC)”.

Para el año de 1990 se estableció dicho programa de forma obligatoria y permanente, con las siguientes exenciones al paso del tiempo:

- 1992, exención de la restricción de circulación de unidades que utilizaban gas licuado de petróleo o gas natural comprimido, en lugar de gasolina o diésel.
- 1997, exención a los vehículos a gasolina de bajo nivel de emisiones contaminantes, por lo que las unidades 1993 y posteriores que utilizaban convertidor catalítico de tres vías en circuito cerrado fueron beneficiados identificándolos con el holograma “0”.
- 1999, se incentivó a vehículos que cumplieran con los niveles de emisión más estrictos de las normas internacionales. Se les exentó del programa HNC los dos primeros años de uso, identificándolos con el holograma “doble cero”.

El objetivo inicial del programa “Hoy No Circula”, fue disminuir los niveles de emisión de contaminantes, con los siguientes beneficios:

- Restricción diaria de la circulación del 20% del parque vehicular matriculado en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Reducción del consumo de 11 mil 500 barriles diarios de combustible.
- Reducción de la emisión de 30 mil toneladas anuales de contaminantes.
- Incentivo a la adquisición de vehículos nuevos. Las ventas incrementaron un 60%.

Sin embargo, también se ha relacionado al programa “Hoy No Circula” con adquisición de vehículos usados por parte de las familias, para tener un auto “comodín”, lo cual incrementó el parque de vehículos usados. Esta situación pudo haber limitado el alcance original del programa HNC.⁶

Actualmente, el programa “Hoy No Circula” de la Zona Metropolitana del Valle de México tiene como principal objetivo “Establecer medidas aplicables a la circulación de vehículos automotores para prevenir, minimizar y controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera en la ZMVM”. Aplica en las 16 delegaciones de la Ciudad de México⁷, así como en 18 municipios conurbados del Estado de México⁸, en un horario de 5:00 a 22 horas de lunes a sábado.^{9,10}

Hoy No Circula (Holograma 1 y 2 con terminación de placa):

- Lunes: 5 y 6.
- Martes: 7 y 8.
- Miércoles: 3 y 4.
- Jueves: 1 y 2.
- Viernes: 9 y 0.

Restricciones a la circulación:

- Sábados:
 - Holograma 1: Placa impar, 1er y 3er sábado del mes. Placa par, 2do y 4to sábado del mes.
 - Holograma 2: Deja de circula todos los sábados.
- Automóviles foráneos:
 - Un día a la semana dependiendo terminación de dígito de la placa.
 - Todos los sábados.
 - De lunes a viernes de 5:00 a 11:00 horas.

⁶ María Concepción M. R., 2015. Gobernanza Ambiental: Orígenes y estudios de caso. ISBN: 978-607-402-844-7

⁷ Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Venustiano Carranza y Xochimilco.

⁸ Municipios del Estado de México conurbados a la Ciudad de México: Atizapán de Zaragoza, Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Chimalhuacán, Chicoloapan, Ecatepec de Morelos, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, Nicolás Romero, Tecámac, Tlalnepantla de Baz, Tultitlán y Valle de Chalco.

⁹ Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2022. Programa Hoy No Circula que aplica en la Zona Metropolitana del Valle de México.

¹⁰ Información consultada en: <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/hoy-no-circula>

Exentos:

- “00”, “0”, eléctricos, híbridos, de energía solar, emergencia, transporte escolar con permiso, cortejo fúnebre y servicios funerarios, conducidos por persona con discapacidad, transporte público federal de pasajeros con autorización, vehículos con pase turístico.

Cabe destacar que, con excepción de la Zona Metropolitana del Valle de México, no existe en el país alguna otra ciudad o zona donde se aplique el programa “Hoy No Circula” o algún programa similar, incluyendo a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Experiencias internacionales

A continuación, se presenta un resumen de las experiencias internacionales con relación a los programas de restricción vehicular similares al “Hoy No Circula” que se aplica en México.

- ✓ **Brasil.** Aplica para vehículos particulares conforme al último dígito de la matrícula. No hay restricción de circulación para los fines de semana, días festivos ni en vacaciones. Los horarios en que aplica la restricción son de 7 a 10 horas y de 17 a 20 horas.
- ✓ **Colombia.** El programa de restricción a la circulación vehicular se conoce como “Pico y placa” haciendo referencia a las horas de mayor congestionamiento vial y al último dígito del número de matrícula para administrar quien no debe circular. La medida aplica únicamente para vehículos particulares en un horario de 6:00 a 8:30 am y de 3:00 a 7:30 pm.
- ✓ **Costa Rica.** La restricción aplica para vehículos de uso particular para una zona específica de la capital San José. Se aplica de lunes a viernes y es para en un horario de 6:00 a 8:30 horas y de 16:30 a 19:00 horas, según el número final de la placa: lunes (1 y 2), martes (3 y 4), miércoles (5 y 6), jueves (7 y 8) y viernes (9 y 0).

- ✓ **Inglaterra.** Se limita o desincentiva el uso de vehículos particulares a través de una cuota de peaje denominada “Tarifa de congestión”, que se cobra a los automovilistas que desean ingresar a la zona centro de la ciudad entre las 7:00 y las 18:00 horas de lunes a viernes.
- ✓ **Italia.** La restricción vehicular se conoce como “Zona de Tráfico Limitado” y se aplica para la zona del centro histórico de Roma. El acceso a dicha zona es únicamente para residentes, trabajadores del área y huéspedes de hoteles.
- ✓ **Grecia.** El sistema restringe la circulación de lunes a viernes en forma alternada para los vehículos con matrícula que termina en números par e impar. Quedan exentos de la media los autobuses, taxis, motocicletas, bicicletas, vehículos de alquiler y visitantes con matrícula extranjera.
- ✓ **China.** En episodios de alta contaminación, la mitad de los automóviles privados no circulan, alternándose conforme al número par o impar de la matrícula. También se limita la circulación de los vehículos pesados.
- ✓ **India.** Cuando se presenta episodios críticos de contaminación, se cierran las autopistas y se alterna el permiso de circulación vehicular de acuerdo al número par o impar de la matrícula.

3. Esquema de análisis del proyecto

En el esquema de la Figura 1, se presentan las actividades del proyecto, a fin de tener claridad en las etapas del mismo y los productos obtenidos en cada una de ellas, los cuales son insumo para los análisis posteriores.

En general, el proceso consiste en 5 etapas: un diagnóstico de la zona de estudio, un análisis particular de calidad del aire de la ZMVT, en donde se realiza la evaluación de cumplimiento de las normas oficiales mexicanas en materia de calidad del aire, así como su comportamiento horario, diario y mensual. Este análisis de calidad del aire tiene como objetivo principal el establecer el antecedente de si se tienen problemas de calidad del aire en la zona, y de qué contaminantes.

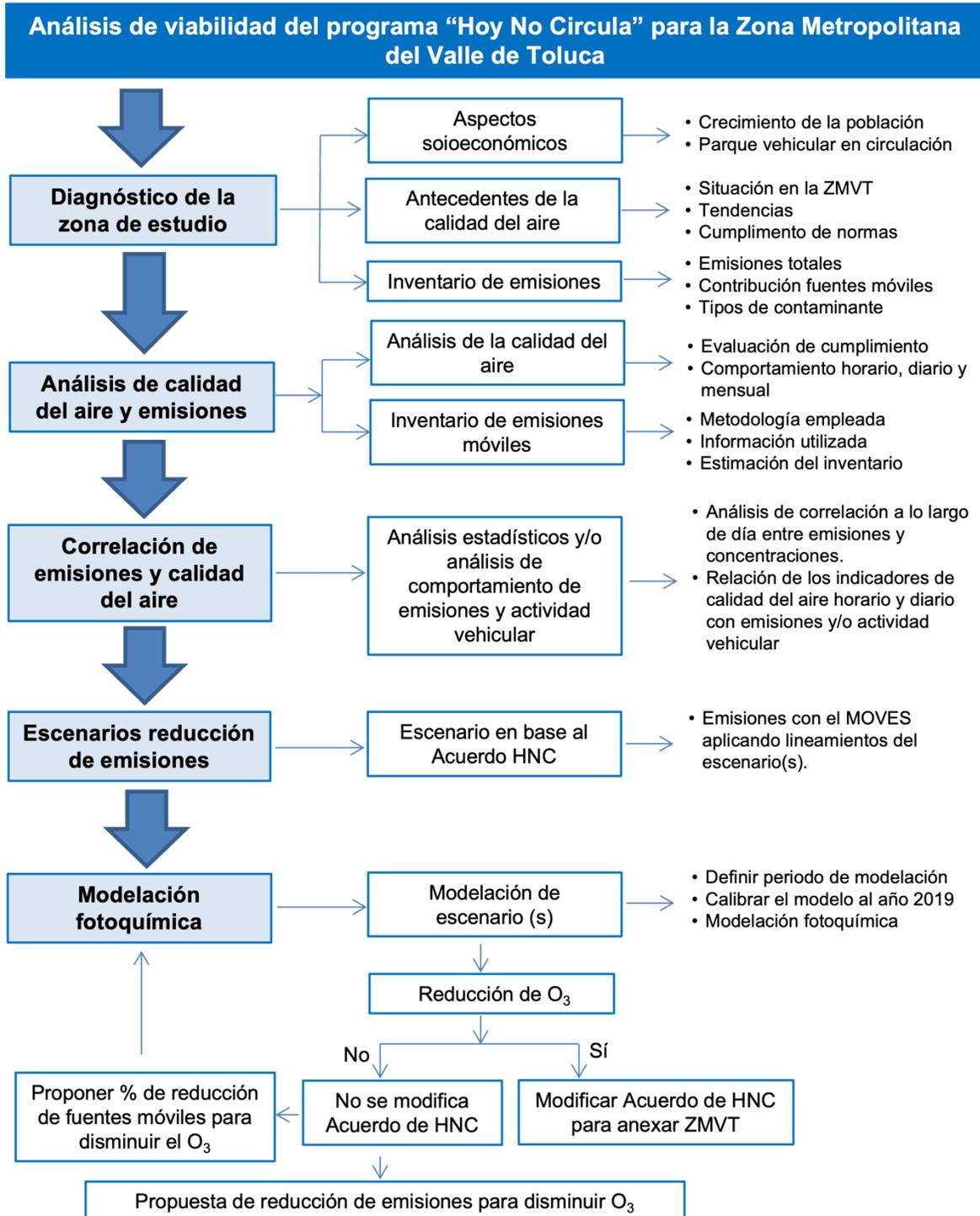
También se realiza la estimación de emisiones vehiculares para los escenarios base y de control para realizar el análisis de correlación o relación con los datos de calidad del aire.

Los resultados del análisis de correlación y/o relación entre indicadores de calidad del aire y emisiones y/o actividad vehicular, determinan la participación de las emisiones vehiculares en el deterioro de la calidad del aire.

Para conocer el grado de aporte de las emisiones de fuentes vehiculares en el deterioro de la calidad del aire, se realiza el escenario de modelación de emisiones con el MOVES en base a lo establecido en el Acuerdo de Hoy No Circula, el porcentaje de reducción de emisiones es modelado fotoquímicamente para ver el impacto que tiene esa reducción en las concentraciones de contaminantes en el aire, en especial atención en la formación de ozono, esta etapa es la que se reporta en el presente informe.

En el caso de resultar una disminución de concentración en la atmósfera al aplicar el escenario del Acuerdo de Hoy No Circula en la modelación fotoquímica, se realizará la modificación al Acuerdo de Hoy No Circula para anexar a los municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Figura 1. Diagrama del desarrollo del proyecto.



4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar la viabilidad de implementar el Programa “Hoy No Circula” en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

4.2. Objetivo específico

El presente informe es la tercera etapa del proyecto para determinar la viabilidad de la implementación del acuerdo “Hoy No Circula” en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), los objetivos 1 al 4 fueron alcanzados y documentados en el informe correspondiente a la segunda etapa del proyecto, bajo los temas de “diagnóstico de la ZMVT en materia de calidad del aire relacionado con los vehículos en circulación” y la “correlación de emisiones vehiculares e indicadores de datos de calidad del aire de forma anual”.

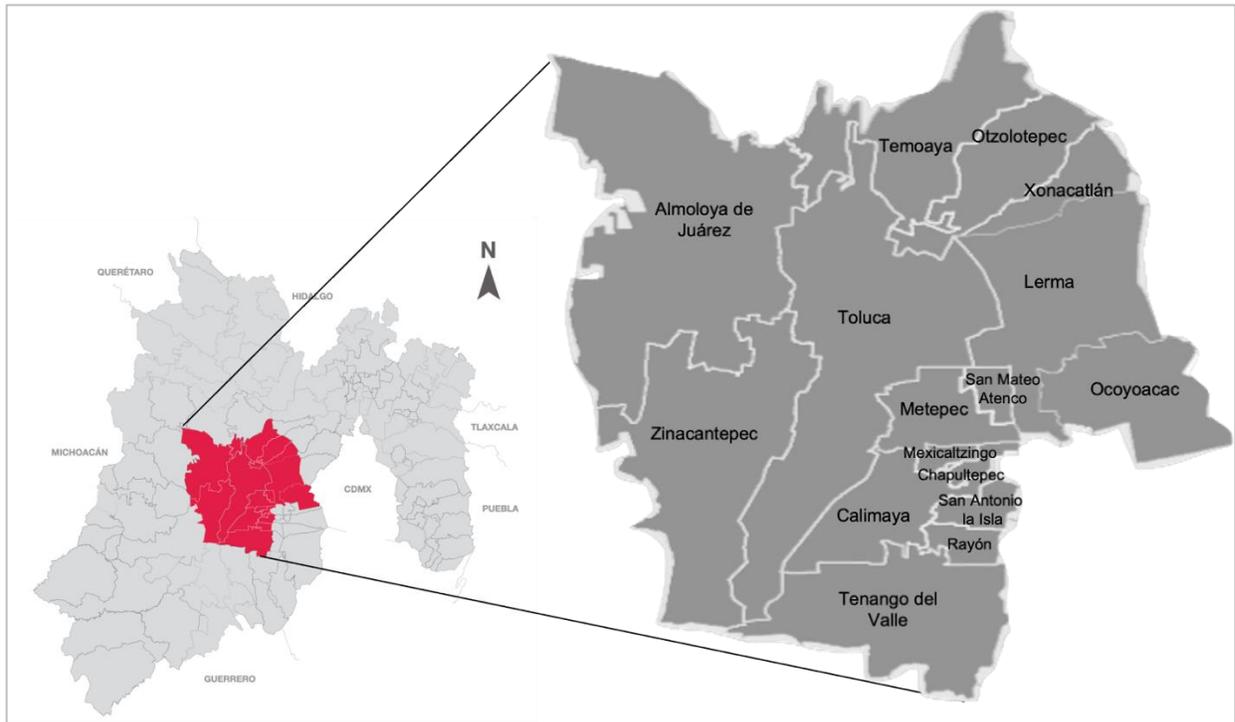
1. Establecer la tendencia de crecimiento del parque vehicular en la ZMVT.
2. Conocer el comportamiento y tendencia de los indicadores de calidad del aire, principalmente en CO, NO₂ y O₃.
3. Establecer si existe una correlación entre emisiones vehiculares y monitoreo de contaminantes de forma anual.
4. Estimar emisiones vehiculares en la ZMVT para el año 2019 y evaluar comportamientos respecto a las emisiones del 2016 y 2018.
5. Definir escenarios para el Programa “Hoy No Circula” para evaluar el impacto de la reducción de emisiones.
6. Estimar la reducción de emisiones de cada contaminante aplicando el Acuerdo de Hoy No Circula en la ZMVT.
7. Evaluar el impacto de la aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula a través de la modelación de emisiones y modelación fotoquímica.

**5. Diagnóstico de la Zona
Metropolitana del Valle de
Toluca en materia de
calidad del aire relacionado
con los vehículos en
circulación**

5.1. Integración y localización geográfica de la ZMVT

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se localiza en el centro de país; de acuerdo con el Sistema Estatal de Información Metropolitana (SEIM, s.f.), posee una superficie de 2,410.5 km² que integra un total de 16 municipios: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec.

Figura 2. Ubicación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.



Fuente: Elaboración propia.

El Valle de Toluca está rodeado por la Sierra de las Cruces, que separa a los Valles de Toluca y México, y se asienta en la región identificada como curso alto de la Cuenca del Río Lerma. En este valle se presentan tres tipos de clima: templado, semifrío y frío.

El valle se encuentra en la zona de influencia de los vientos alisios, que soplan con mayor intensidad en primavera y verano. Estos flujos tienen una dirección predominante del este y noreste, pero en otoño e invierno se debilitan predominando vientos provenientes

del sur. La Sierra de las Cruces y la Sierra Nevada ambas con orientación norte-sur, impiden que los alisios penetren con facilidad hacia los valles; por su parte el volcán Xinantécatl (Nevado de Toluca) obstaculiza considerablemente a los vientos que llegan por el sur, desviando su curso y haciendo que penetren al Valle por el sureste y suroeste.¹¹

5.2. Aspectos socioeconómicos de la ZMVT

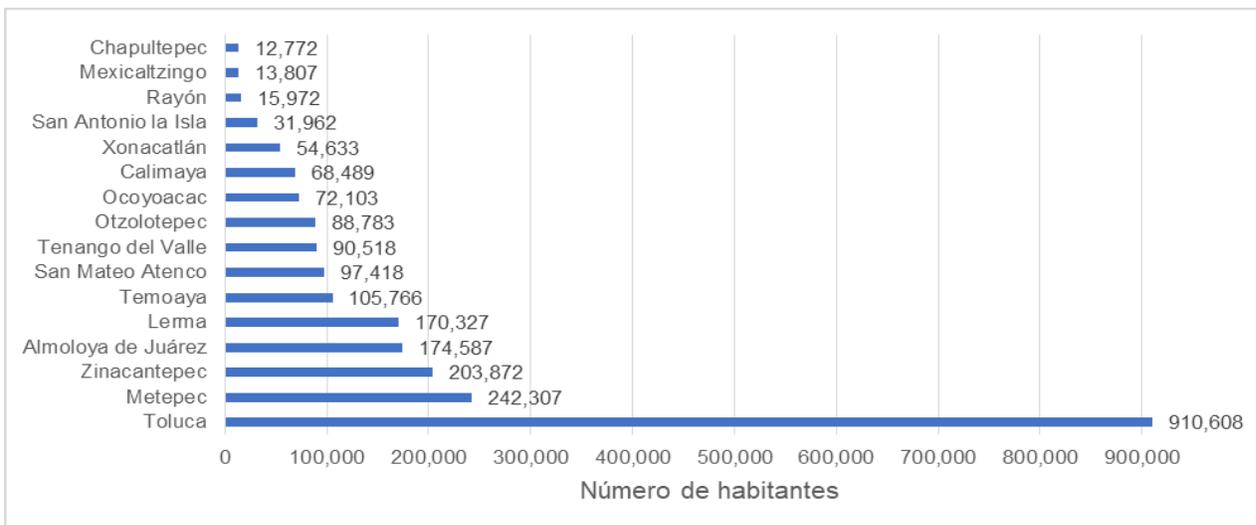
Actualmente, en la ZMVT habitan 2,353,924 personas, lo que representa el 13.85% de la población total de la entidad (INEGI, 2020). El municipio con mayor población es Toluca con 910,608 habitantes y el de menor población es Chapultepec con 12,772 habitantes.

La densidad poblacional promedio en toda la ZMVT es de 974.8 hab/km², presentando la mayor densidad poblacional el municipio de San Mateo Atenco con 4,542.6 hab/km², mientras que Almoloya de Juárez es el municipio con menor densidad poblacional con tan solo 364 hab/km², ya que este incluso es el municipio de mayor superficie en la ZMVT.

¹¹ INECC, 2012. Información consultada en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/folletos/299/carac.html>

Tabla 1. Densidad poblacional municipal en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

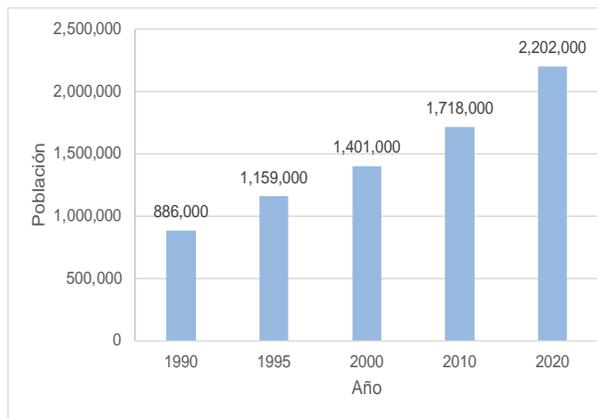
| ID | Municipio | Población | | Superficie (km ²) | | Densidad poblacional |
|-----------------------|---------------------|------------------|--------------|-------------------------------|--------------|----------------------|
| | | Total | % de la ZMVT | Total | % de la ZMVT | |
| 1 | Almoloya de Juárez | 174,587 | 7% | 485,21 | 20% | 360 |
| 2 | Calimaya | 68,489 | 3% | 101.19 | 4% | 677 |
| 3 | Chapultepec | 12,772 | 1% | 12.62 | 1% | 1,012 |
| 4 | Lerma | 170,327 | 7% | 212.83 | 9% | 800 |
| 5 | Metepec | 242,307 | 10% | 67.52 | 3% | 3,589 |
| 6 | Mexicaltzingo | 13,807 | 1% | 11.47 | 0% | 1,204 |
| 7 | Ocoyoacac | 72,103 | 3% | 134.72 | 6% | 535 |
| 8 | Otzolotepec | 88,783 | 4% | 116.67 | 5% | 761 |
| 9 | Rayón | 15,972 | 1% | 23.40 | 1% | 683 |
| 10 | San Antonio la Isla | 31,962 | 1% | 18.50 | 1% | 1,728 |
| 11 | San Mateo Atenco | 97,418 | 4% | 27.38 | 1% | 3,558 |
| 12 | Temoaya | 105,766 | 4% | 190.34 | 8% | 556 |
| 13 | Tenango del Valle | 90,518 | 4% | 207.54 | 9% | 436 |
| 14 | Toluca | 910,608 | 39% | 452.37 | 19% | 2,013 |
| 15 | Xonacatlán | 54,633 | 2% | 65.85 | 3% | 830 |
| 16 | Zinacantepec | 203,872 | 9% | 308.62 | 13% | 661 |
| Total/promedio | | 2,353,924 | 100% | 2,457.02 | 100% | 1,213 |



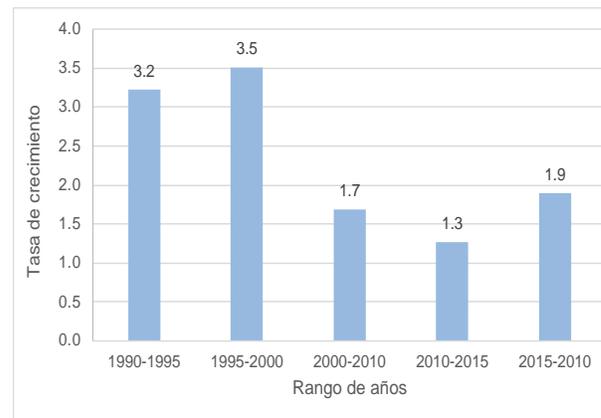
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI consultada en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/poblacion/>

La Figura 3 muestra la tendencia del crecimiento de la población de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, la cual ha incrementado de forma considerable desde la década de los años 90's, con una tasa de crecimiento de 3.5 en el periodo de 1995-2000.

Figura 3. Tendencia y tasa de crecimiento de la población de la ZMVT.



Fuente: Gobierno del Estado de México; Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, Datos 1960-2000 fuente de información Censos Generales de Población y Vivienda del Estado de México 1960, 1970, 1980, 1990 y 2000 y conteo 1995 INEGI.



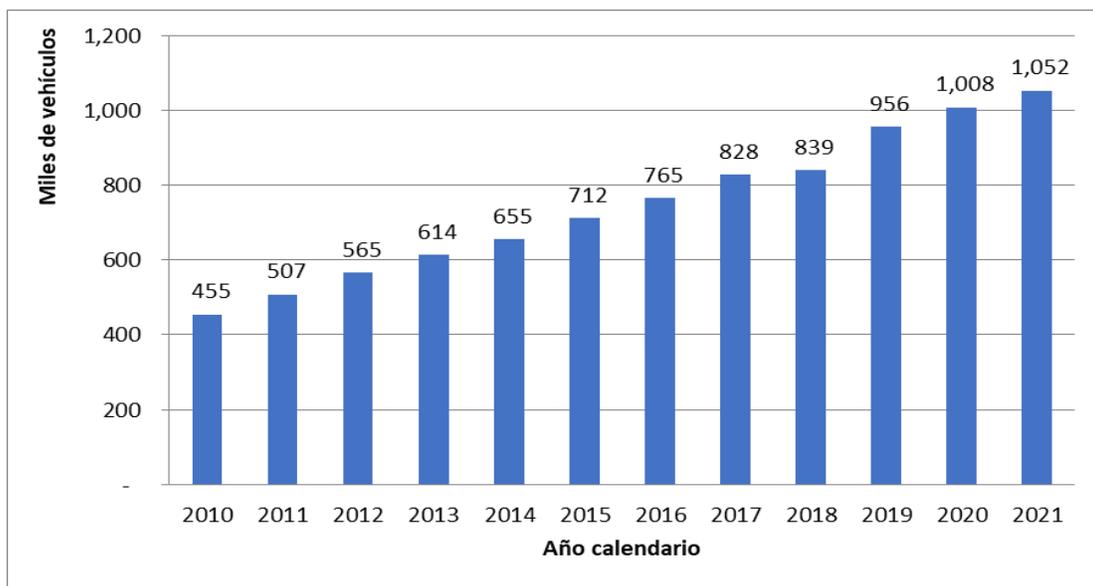
Fuente: Gobierno del Estado de México; Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, Datos 1960-2000 fuente de información Censos Generales de Población y Vivienda del Estado de México 1960, 1970, 1980, 1990 y 2000 y conteo 1995 INEGI.

Con relación a la economía, en el Estado de México destacan dos principales zonas: las de los valles de México, en primer lugar, en cuanto al aporte al producto interno (PIB) de esta entidad; y en segundo lugar la de Toluca. La población económicamente activa (PEA) de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se concentra en tres municipios (Toluca 42%, Metepec 12% y Zinacantepec 9%), que concentran en conjunto el 63% de la PEA y el 60% del PIB. Las principales economía de esta zona se concentra en las actividades industriales y comerciales.

5.3. Características y crecimiento de la flota vehicular de la ZMVT

La dinámica de crecimiento, tanto de la población como de las actividades económicas, ha llevado a que los viajes de desplazamiento para realizar sus actividades aumenten, así como el número de vehículos automotores, incrementando la emisión de contaminantes a atmosféricos de este sector. En la última década, el parque vehicular duplicó su tamaño en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, lo que ha derivado en problemas de congestión vial.

Figura 4. Crecimiento de la flota vehicular en la ZMVT.



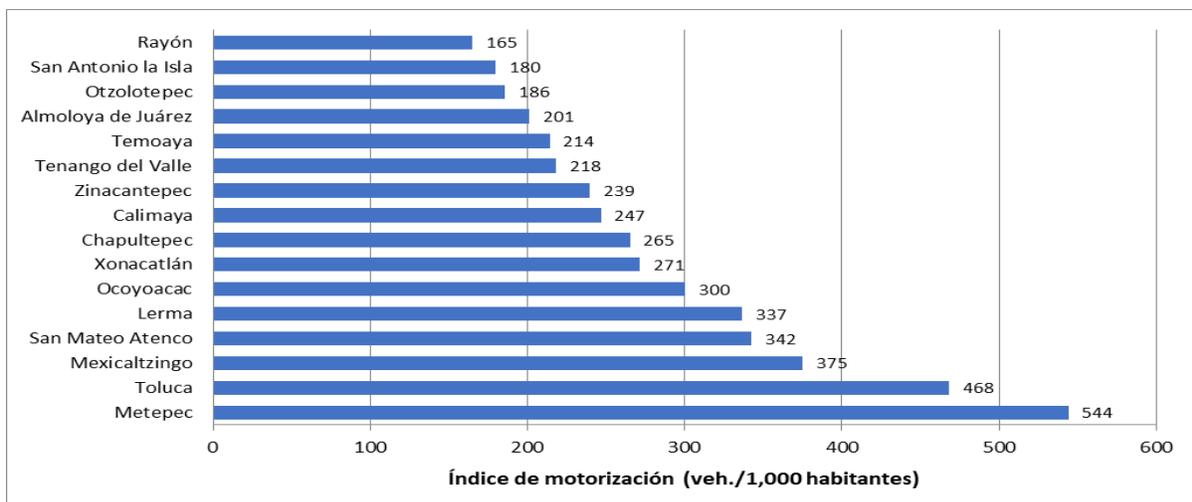
Fuente: elaboración propia con información de INEGI, 2021. Vehículo de motor registrados en circulación. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>

La información del INEGI muestra que para el año 2019 hay un registro de 956 mil vehículos automotores en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca; sin embargo, datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM) revelan una cifra de 978,951 unidades. Después de un proceso de depuración de la, en donde se aplicaron tasas de retiro y se eliminaron unidades no motorizadas, o etiquetadas de forma incorrecta, se obtuvo una flota vehicular de 861,947 automotores para el año 2019 en la ZMVT. Las características de esta flota de vehículos se discuten a continuación:

5.3.1. Índice de motorización

Tabla 2. Motorización municipal en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

| ID | Municipio | Población | | Flota vehicular | | Índice de motorización (veh./1,000 hab.) |
|-----------------------|---------------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|--|
| | | Total | % de la ZMVT | Total | % de la ZMVT | |
| 1 | Almoloya de Juárez | 174,587 | 7% | 35,086 | 4% | 201 |
| 2 | Calimaya | 68,489 | 3% | 16,895 | 2% | 247 |
| 3 | Chapultepec | 12,772 | 1% | 3,386 | 0% | 265 |
| 4 | Lerma | 170,327 | 7% | 57,322 | 7% | 337 |
| 5 | Metepec | 242,307 | 10% | 131,796 | 15% | 544 |
| 6 | Mexicaltzingo | 13,807 | 1% | 5,175 | 1% | 375 |
| 7 | Ocoyoacac | 72,103 | 3% | 21,634 | 3% | 300 |
| 8 | Otzolotepec | 88,783 | 4% | 16,492 | 2% | 186 |
| 9 | Rayón | 15,972 | 1% | 2,629 | 0% | 165 |
| 10 | San Antonio la Isla | 31,962 | 1% | 5,749 | 1% | 180 |
| 11 | San Mateo Atenco | 97,418 | 4% | 33,343 | 4% | 342 |
| 12 | Temoaya | 105,766 | 4% | 22,645 | 3% | 214 |
| 13 | Tenango del Valle | 90,518 | 4% | 19,736 | 2% | 218 |
| 14 | Toluca | 910,608 | 39% | 426,427 | 49% | 468 |
| 15 | Xonacatlán | 54,633 | 2% | 14,815 | 2% | 271 |
| 16 | Zinacantepec | 203,872 | 9% | 48,817 | 6% | 239 |
| Total/promedio | | 2,353,924 | 100% | 861,947 | 100% | 366 |



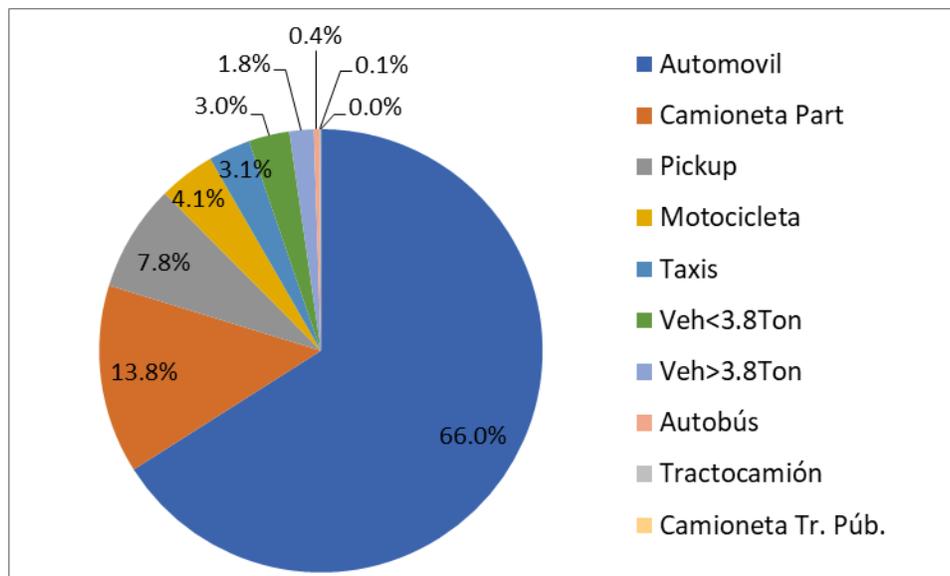
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

Como se observa en la Tabla 2, el mayor índice de motorización en municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se presenta en el municipio de Metepec con 544 vehículos por cada 1,000 habitantes, seguido por Toluca con 468 Mexicaltingo con 375. Los menores índices de motorización se presentan en Rayón con 165 vehículos por cada 1,000 habitantes, San Antonio la Isla con 180 y Oztolotepec con 186.

5.3.2. Composición de la flota por tipo de vehículo

La composición de la flota por tipo de vehículos proporciona información del tamaño y uso que se les da a las unidades que circulan en una zona de interés. En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca el 66% de los automotores que circulan son autos compactos, subcompactos, de lujo, deportivos, seguido por el 13.8% de las camionetas particulares representadas por las SUV y las VAN, así como el 7.8% de camionetas pick up. Cabe resaltar el alto porcentaje de motocicletas con el 4.1%.

Figura 5. Composición de la flota vehicular de la ZMVT.



Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

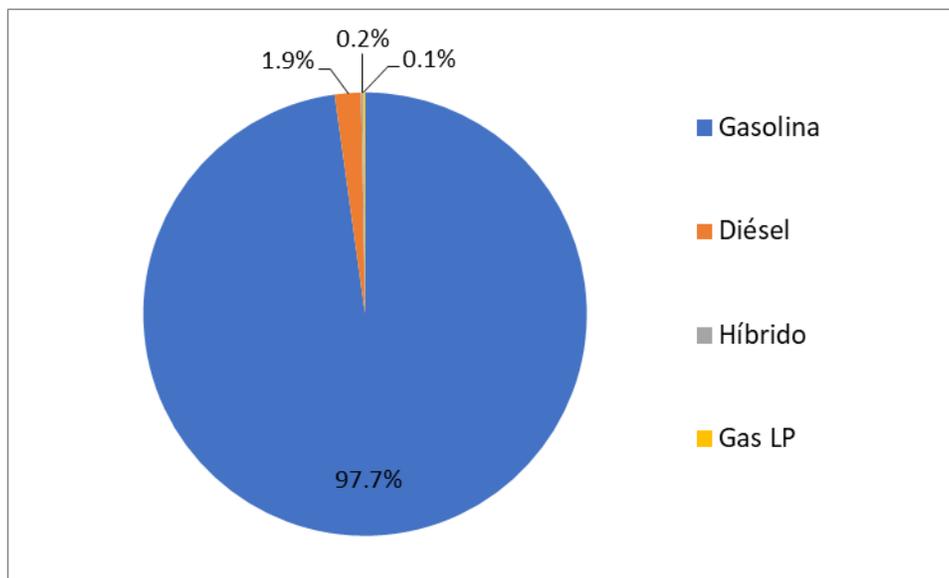
Los camiones pesados, tanto de carga como de pasajeros, representan el 1.8% de los camiones de más de 3.8 toneladas, 0.1% de los tractocamiones y el 0.4% de los autobuses.

5.3.3. Composición de la flota vehicular por tipo de combustible

El tipo de combustible que utiliza un vehículo automotor determina el tipo de contaminantes que emitirá. Por ejemplo, el uso de gasolina está relacionado con una mayor emisión compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos, mientras que el uso de diésel con la emisión, principalmente, de partículas y óxidos de nitrógeno.

El 97.7% de la flota de vehículos que circula en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca utiliza gasolina como combustible, seguida del 1.9% de unidades que consumen diésel, el 0.2% son vehículos híbridos y el 0.1% utiliza gas licuado de petróleo. El uso de otras fuentes de energía como el gas natural y la electricidad como en vehículos automotores representa menos del 0.1%.

Figura 6. Porcentaje de flota vehicular por tipo de combustible en la ZMVT.



Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

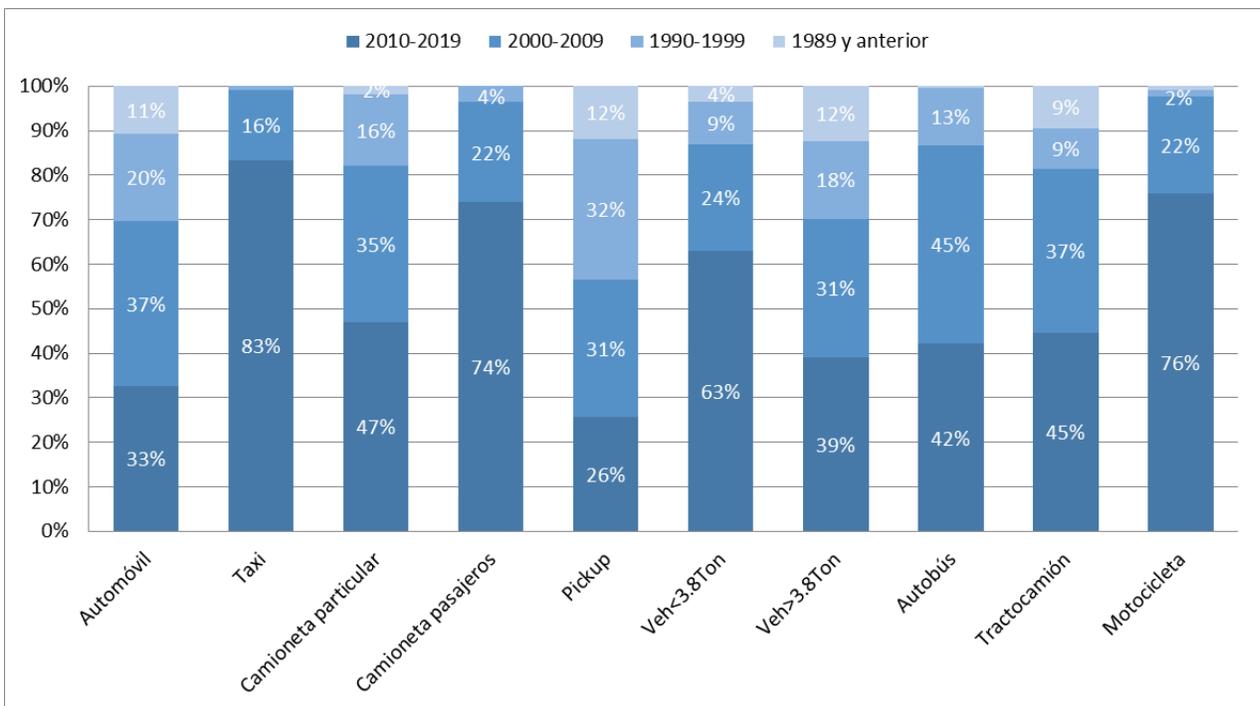
5.3.4. Composición de la flota vehicular por antigüedad

Sin dudas unos de los parámetros de mayor interés de una flota vehicular, hablando de cuestiones ambientales, es su edad, debido a que esto determina en gran medida la cantidad de emisiones a la atmósfera. Los anterior, debido a que la edad o año modelos del automotor está estrechamente relacionado con los sistemas de control de emisiones

que le fueron instalados desde fábrica, además que a medida que el vehículo va aumentando su edad también incrementan sus emisiones, por el desgaste natural que sufren sus componentes mecánicos.

Como se observa en la Figura 7, por tipo de vehículo, el mayor porcentaje de vehículos nuevos, modelos 2010-2019, lo representan los taxis con el 83%, debido en gran medida a que tienen una restricción de 10 años para poder ofrecer este servicio, le siguen las camionetas de pasajeros con el 74%. En cuanto a los automóviles de uso particular, los cuales constituyen el mayor porcentaje de la flota, el 37% se encuentra en el estrato de 2000-2009, es decir de entre 10 y 20 años de edad, seguido del estrato de 2010-2019, de entre 0 a 10 años, con el 33%. Entre las flotas de mayor antigüedad (1989 y anteriores), se tiene un 12% de pick up y vehículos de más de 3 toneladas (unidades pesadas de carga), automóviles de uso particular con el 11% y los tractocamiones con el 9%.

Figura 7. Composición de la flota vehicular de la ZMVT por edad.



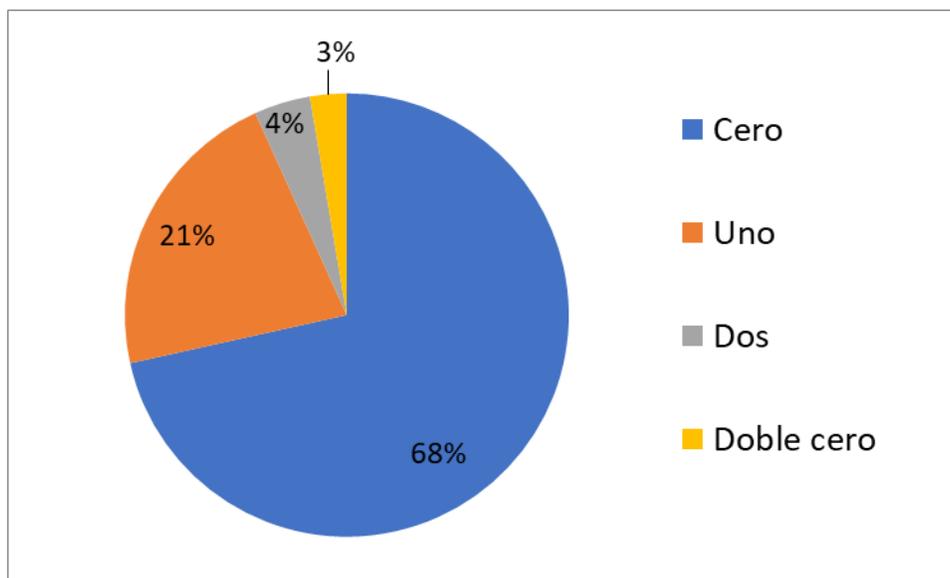
Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

5.4. Programa de verificación vehicular en la ZMVT

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) es obligatoria la verificación vehicular, por lo que los vehículos automotores de uso particular deben acudir 2 veces al año a realiza la prueba de emisiones. A partir de la información generada por la Secretaría de Medio Ambiente de Gobierno del Estado de México, a través de este programa, se presenta el siguiente análisis de los resultados obtenidos en el año 2022.

La mayor cantidad de hologramas otorgados corresponde al “Cero” con el 68%, seguido por el holograma “Uno” con el 21% y en menor cantidad “Dos” con el 4% y “Doble cero” con el 3%. El porcentaje de vehículos rechazados equivale al 5% de los vehículos que verifican de acuerdo a la información consultada.

Figura 8. Porcentaje de hologramas otorgados en la ZMVT.

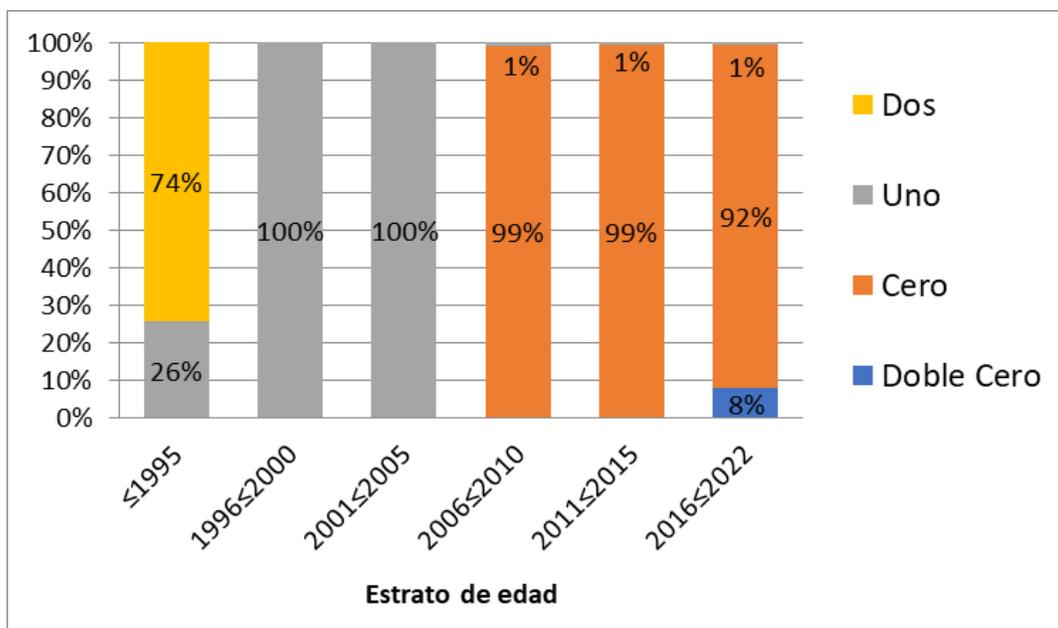


Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

La emisión del tipo de holograma que se otorga a cada vehículo está condicionado a su estrato de edad y tecnología. Por ejemplo, para lo cual, se el holograma “Cero” puede ser obtenido para aquellas unidades año modelo 2016 y posteriores que cuenten con sistema de diagnóstico a bordo (OBD) y que cumplan con los límites de emisión establecidos para esta categoría.”

En la Figura 9 se muestra un análisis del tipo de holograma otorgado por estrato de edad de la flota que circula en municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Resalta que para vehículos desde el año modelo 2006 a la fecha, prácticamente todos los vehículos tienen holograma “Cero”, es decir, que pueden circular todos los días, sumado a un 8% del año modelo 2016-2022 que cuentan con holograma “Doble Cero” y que es otorgado a los vehículos más recientes o nuevos.

Figura 9. Tipo de holograma por estrato de edad en la ZMVT.



Fuente: Elaboración propia con información de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

El 100% de los vehículos año modelo 1996 a 2005, es decir, entre 17 y 26 años tienen holograma “Uno”, los cuales dejan de circular un día a la semana y 2 sábados al mes. El 74% de los vehículos de más de 26 años (1995 y anteriores) tiene holograma “Dos” que no circula un día a la semana y todos los sábados, así como un 26% de unidades con holograma “Uno”.

5.5. Calidad del aire en la ZMVT

Actualmente en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) existen 6 estaciones de monitoreo de la calidad del aire; 4 estaciones en el municipio de Toluca, 1 en Metepec y otra en San Mateo Atenco, todas estas estaciones pertenecen a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM). En la Tabla 3 se indica la clave y nombre de cada estación, así como los contaminantes que miden y la representatividad de la medición.

Tabla 3. Estaciones de monitoreo de calidad del aire en la ZMVT.

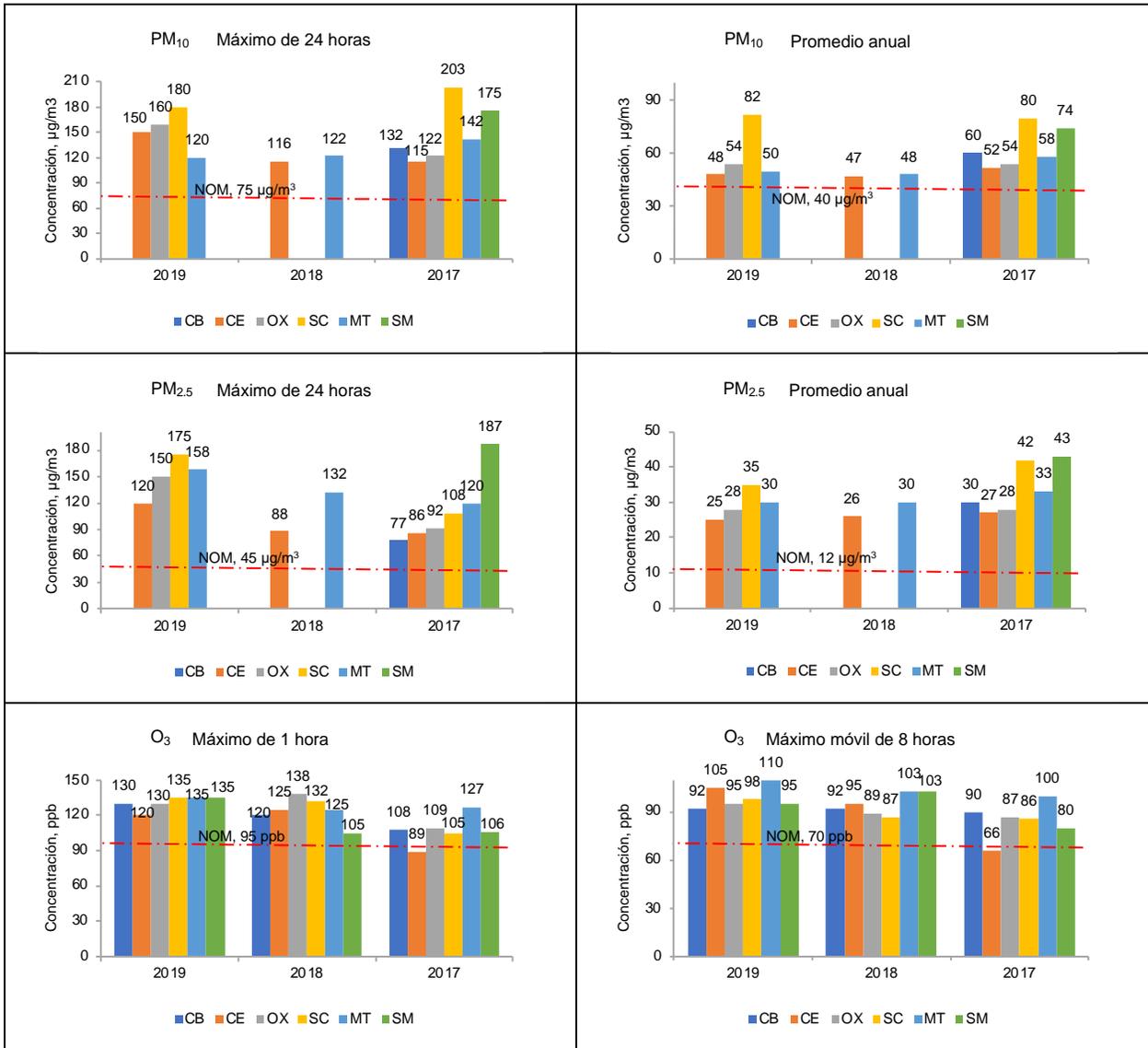
| Clave | Nombre | Contaminantes que mide | | | | | | Representatividad | Coordenadas | |
|-------|------------------|------------------------|----|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|
| | | O ₃ | CO | SO ₂ | NO ₂ | PM ₁₀ | PM _{2.5} | | Latitud | Longitud |
| SC | San Cristóbal | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Vecinal | 19° 19' 38.0" | 99° 38' 3.44" |
| CE | Toluca Centro | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Vecinal | 19° 16' 41.1" | 99° 39' 23.1" |
| OX | Oxtotitlán | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Vecinal | 19° 17' 0.40" | 99° 41' 0.51" |
| CB | Ceboruco | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Vecinal | 19° 15' 37.1" | 99° 38' 44.6" |
| MT | Metepec | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Vecinal | 19° 16' 12.7" | 99° 35' 42.7" |
| SM | San Mateo Atenco | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Vecinal | 19° 16' 49.5" | 99° 32' 30.0" |

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. <https://rama.edomex.gob.mx/estaciones>, e información proporcionada por la SMAGEM.

De la evaluación del cumplimiento de las normas de calidad del aire para los contaminantes medidos en las estaciones de la ZMVT, de acuerdo con lo reportado en los Informes Nacionales de la Calidad del Aire en los años 2017, 2018 y 2019 (INECC, 2020, 2019, 2018, 2017, 2016) se incumplió la norma referente a partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}, NOM-025-SSA1-2014 -DOF, 2014a-), así como ozono (O₃, NOM-020-SSA1-2014 -DOF, 2014-).

Referente a monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) los valores reportados se encuentran dentro de los límites máximos permisibles definidos en las normas correspondientes.

Figura 10. Cumplimiento de las NOM de calidad del aire en la ZMVT de acuerdo a los valores reportados en los Informes Nacionales de Calidad del Aire elaborados por el INECC.



Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes Nacionales de la Calidad del Aire, INECC, 2020, 2019 y 2018.

6. Calidad del aire y emisiones vehiculares

6.1. Datos de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Se han definido indicadores de calidad del aire a partir de los datos de las estaciones de monitoreo, éstos se estimaron en función de los lineamientos establecidos por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)¹². Cada indicador se generó una vez verificados los perfiles de los contaminantes y su cumplimiento con los criterios de datos del 75% de registros válidos.

Los indicadores evaluados para conocer el estado de la calidad del aire con respecto a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) fueron los siguientes:

a) Evaluación del cumplimiento de las NOM de calidad del aire.

Se evaluó el cumplimiento de las NOM correspondientes para PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ y CO. Es importante mencionar que sólo en el caso de los límites de la NOM-022-SSA1-2019 de SO₂, que recientemente entró en vigor (febrero de 2020), la evaluación del cumplimiento de esta NOM para el año 2020 se realizó de acuerdo con las especificaciones de la misma, donde se indica que además del año de evaluación, también se deben considerar en el análisis dos años anteriores, esto es, para evaluar el año 2020, se analiza el periodo 2018-2020. Adicionalmente, los años previos al 2020 se evaluaron con la norma anterior (NOM-022-SSA1-2010).

En el Tabla 4 se muestran las especificaciones técnicas vigentes de las Normas Oficiales Mexicanas con las que se realizó la evaluación del cumplimiento de los límites de cada uno de los contaminantes en las estaciones de monitoreo de la ZMVT.

b) Comportamiento durante las horas del día, los días de la semana y los meses del año.

Se generaron gráficos del comportamiento horario, diario y mensual de los contaminantes. Todos los indicadores del comportamiento se generaron a partir de los datos horarios de cada contaminante.

¹² Informes Nacionales de Calidad del Aire: disponibles en la página del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/informes.php>.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de las Normas Oficiales Mexicanas vigentes en el periodo de evaluación.

| Contaminante | Datos base para la evaluación | Exposición | Frecuencia Tolerada | Valor límite para la evaluación | Criterio de suficiencia anual | Norma Oficial Mexicana |
|---|-------------------------------|------------|---------------------|--|---|--|
| Partículas PM ₁₀ | Promedio 24 horas | Aguda | No se permite | 75 µg/m ³ Máximo | Por lo menos tres trimestres con al menos 75% de los promedios de 24 h válidas (DOF, 2014a) | NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014a) |
| | | Crónica | --- | 40 µg/m ³ Promedio anual | | |
| Partículas PM _{2.5} | Promedio 24 horas | Aguda | No se permite | 45 µg/m ³ Máximo | | |
| | | Crónica | --- | 12 µg/m ³ Promedio anual | | |
| Ozono (O ₃) | Dato horario | Aguda | No se permite | 0.095 ppm Máximo | Al menos 75% de los datos horarios | NOM-020-SSA1-2014 (DOF, 2014b) |
| | Promedios móviles de 8 horas | | No se permite | 0.070 ppm Máximo | Al menos 75% de los máximos diarias de los promedios móviles de 8 h (DOF, 2014b) | |
| Dióxido de azufre (SO ₂) ^d | Dato horario | Aguda | 1% de veces al año | 0.075ppm Promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales | Al menos 75% de los datos diarios por trimestre de tres años consecutivos | NOM-022-SSA1-2019 (DOF, 2019) |
| | Promedio 24 horas | Aguda | No se permite | 0.04 ppm Máximo de tres años consecutivos | Al menos 75% de los promedios de 24 hrs. | |
| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) | Dato horario | Aguda | 1 vez al año | 0.210 ppm Segundo máximo | Al menos 75% de los datos horarios | NOM-023-SSA1-1993(DOF, 1994) ^c |
| Monóxido de carbono (CO) | Promedio móvil de 8 horas | Aguda | 1 vez al año | 11 ppm Segundo máximo ^b | Al menos 75% de los promedios móviles de 8 hrs. | NOM-021-SSA1-1993 (DOF, 1994) ^c |

Fuente: Elaboración propia a partir de la Normatividad vigente para el periodo de evaluación.

NOM-025-SSA1-2014. DOF, NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación.

NOM-020-SSA1-2014. DOF, NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación.

NOM-021-SSA1-1993. DOF, NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO).

NOM-022-SSA1-2019. DOF, NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂).

NOM-023-SSA1-1993. DOF, NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂).

^a En el caso del dato horario de O₃ en el numeral 4.3.1.1 de la NOM se especifica que aún en el caso en el que no se cumpla el criterio del 75% de los valores horarios, se incumplirá la norma cuando al menos uno de los valores horarios sea mayor a 0.110 ppm.

^b Calculado sin traslape de información con el que se obtuvo el máximo.

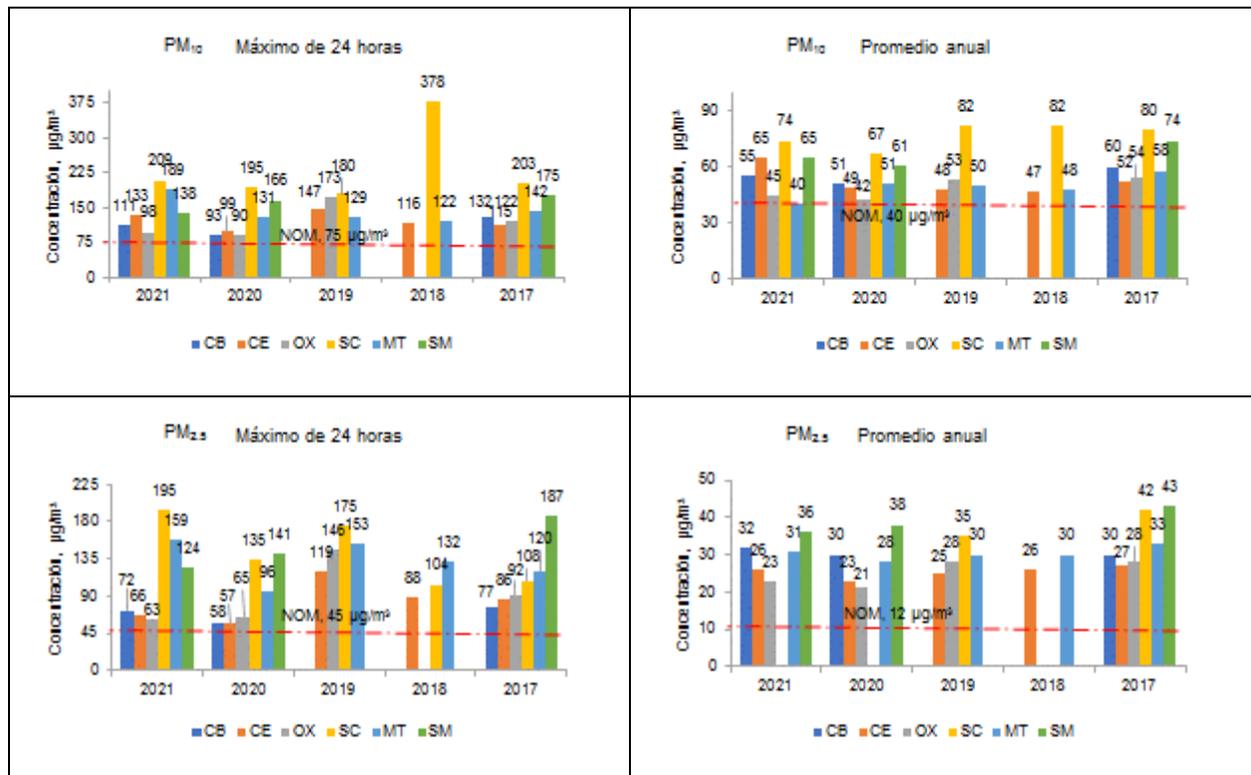
^c En estas NOM no se especifica cómo realizar el manejo de datos y tampoco criterios de suficiencia de información, pero en congruencia con las especificaciones de las NOM de Partículas, Ozono y SO₂ se aplica, en la agregación de cada dato, el criterio de 75% de suficiencia de información para obtener los indicadores.

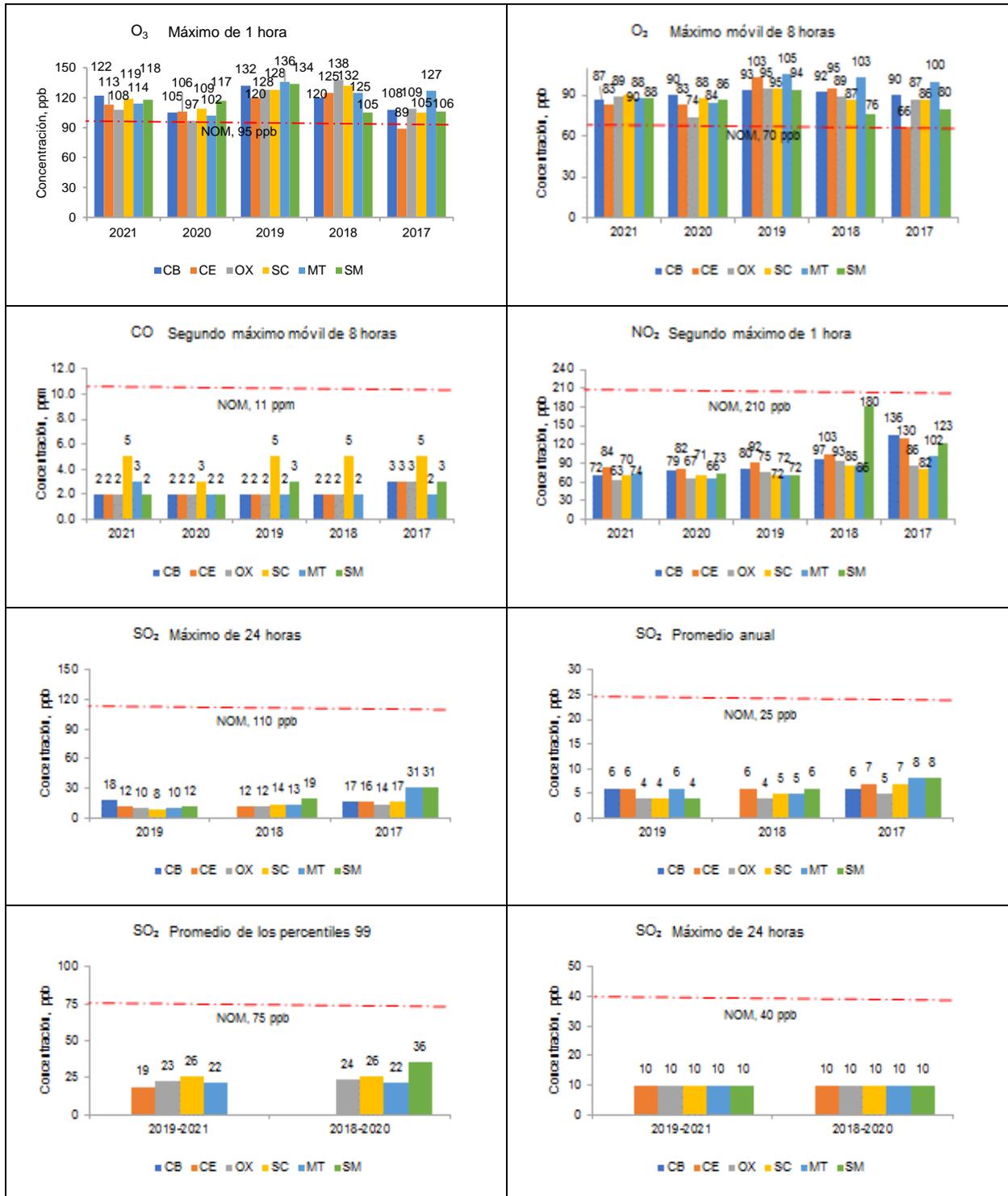
^d En esta NOM la evaluación de los límites se realiza para tres años consecutivos. Los criterios de suficiencia de información en el cuadro son los más estrictos.

6.1.1. Evaluación del cumplimiento de las NOM de calidad del aire.

El cumplimiento de las normas de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se aprecia en la Figura 11, de la que destaca que todas las estaciones de monitoreo ubicadas en la zona, han incumplido en los últimos 5 años las normas de ozono y de partículas, estas últimas, tanto en partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}), como partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$).

Figura 11. Cumplimiento de las NOM de la calidad del aire en la ZMVT.



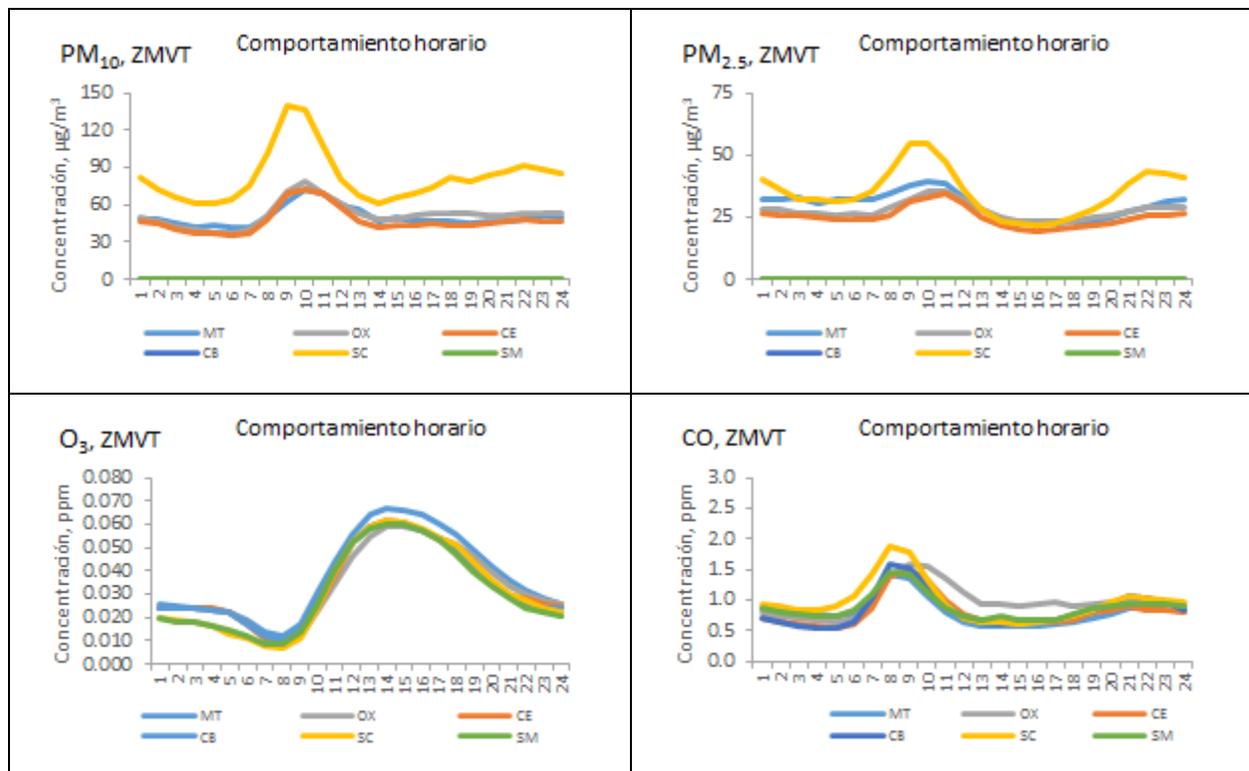


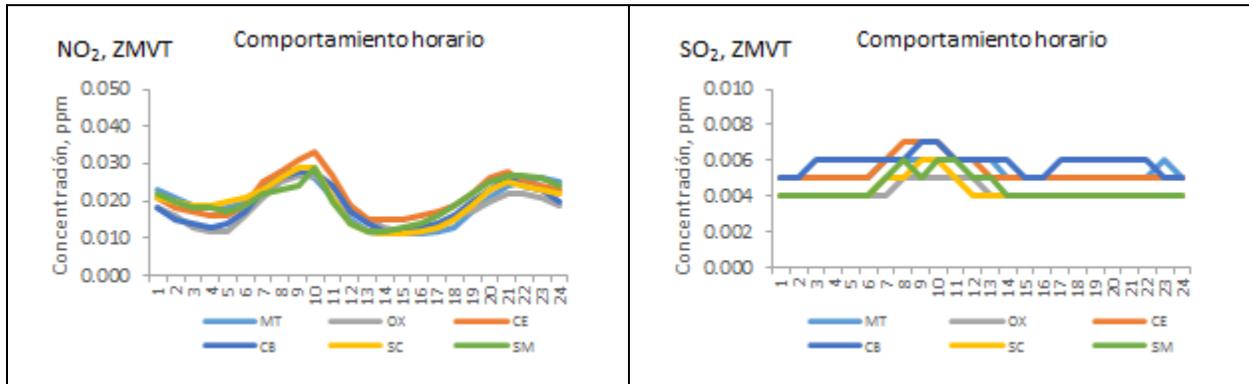
Fuente: Elaboración propia a partir de los Informes Nacionales de la Calidad del Aire, INECC, 2020, 2019 y 2018 y de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

6.1.2. Comportamiento durante las horas del día, los días de la semana y los meses del año.

En la Figura 12 se aprecia el comportamiento durante las horas del día de cada uno de los contaminantes. En estas figuras se aprecia de manera general un comportamiento similar en casi todas las estaciones: las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5}, CO y NO₂ se elevan en dos momentos durante el día, coincidiendo con las horas de más actividad vehicular; el O₃ por su parte exhibe el comportamiento típico de este contaminante durante el día, que responde básicamente a la actividad vehicular y a la incidencia de luz solar. Los vehículos emiten los precursores de la formación de ozono (compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno), que en presencia de la luz solar reaccionan para formar el O₃; y por último en el SO₂, las concentraciones son más o menos constantes durante el día, es muy probable que el comportamiento de este contaminante obedezca a los patrones de operación de las principales industrias asentadas en los alrededores de cada una de las estaciones.

Figura 12. Comportamiento de los contaminantes durante las horas del día en la ZMVT, 2019.

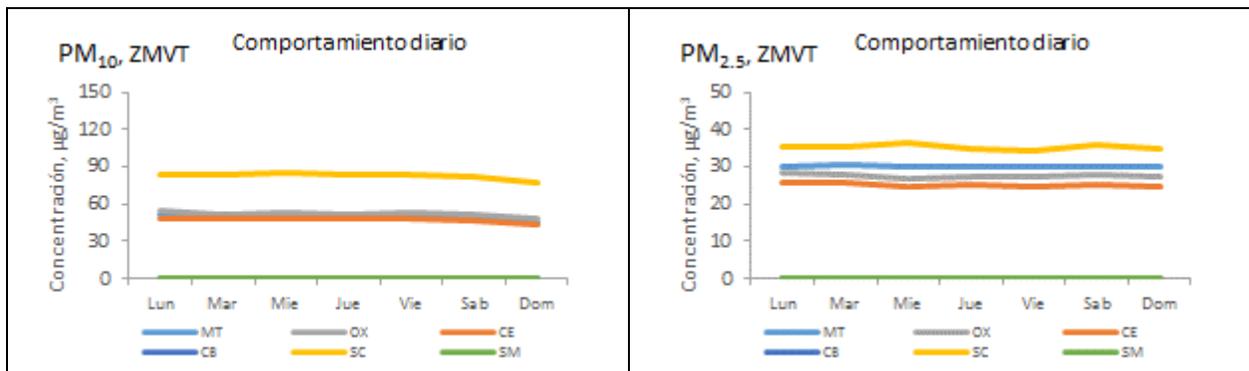


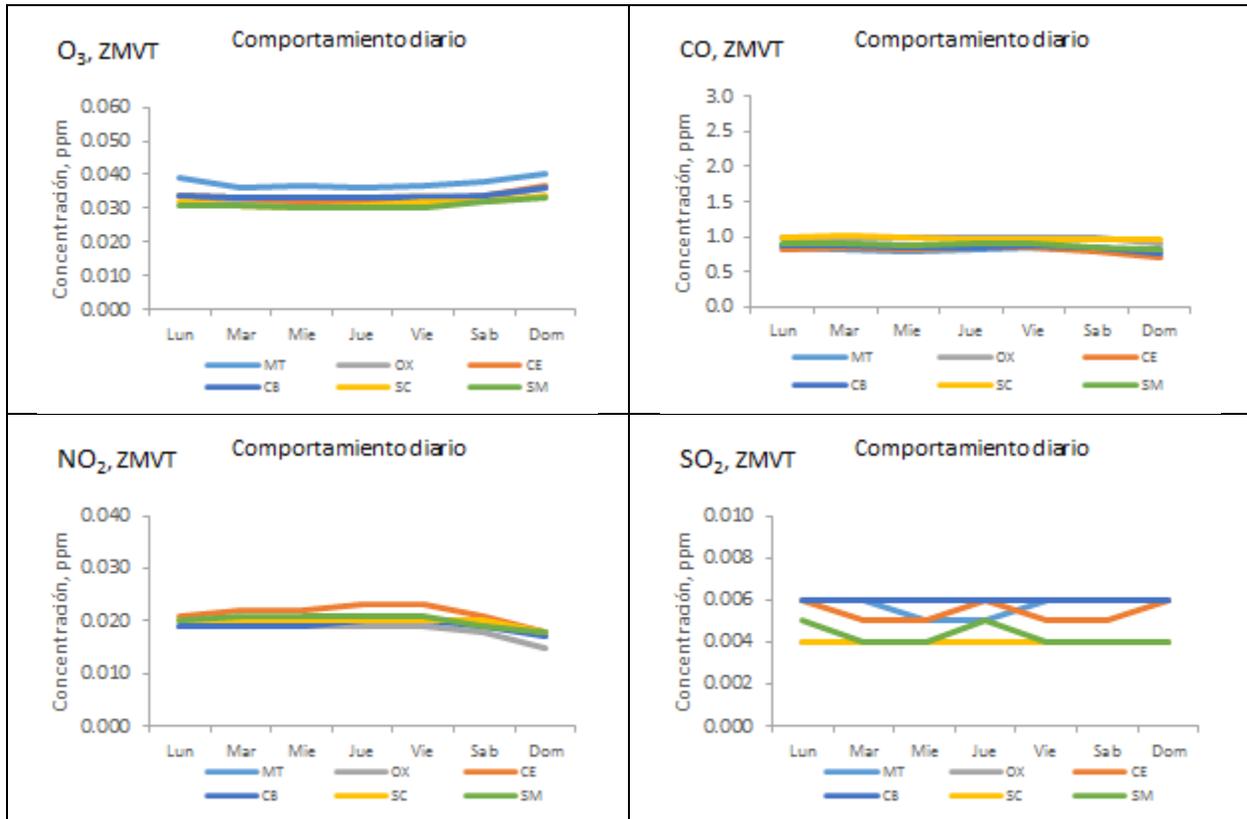


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

En la Figura 13 se aprecia el comportamiento durante los días de la semana de cada uno de los contaminantes, prácticamente en todos se aprecia una pauta más o menos constante en las concentraciones, con un descenso muy ligero durante el domingo en NO₂, contrario al aumento que se aprecia en el O₃. En el caso el SO₂ las concentraciones fluctúan en un intervalo de concentración muy pequeño en tres estaciones durante cada uno de los días de la semana.

Figura 13. Comportamiento de los contaminantes durante los días de la semana en la ZMVT, 2019.

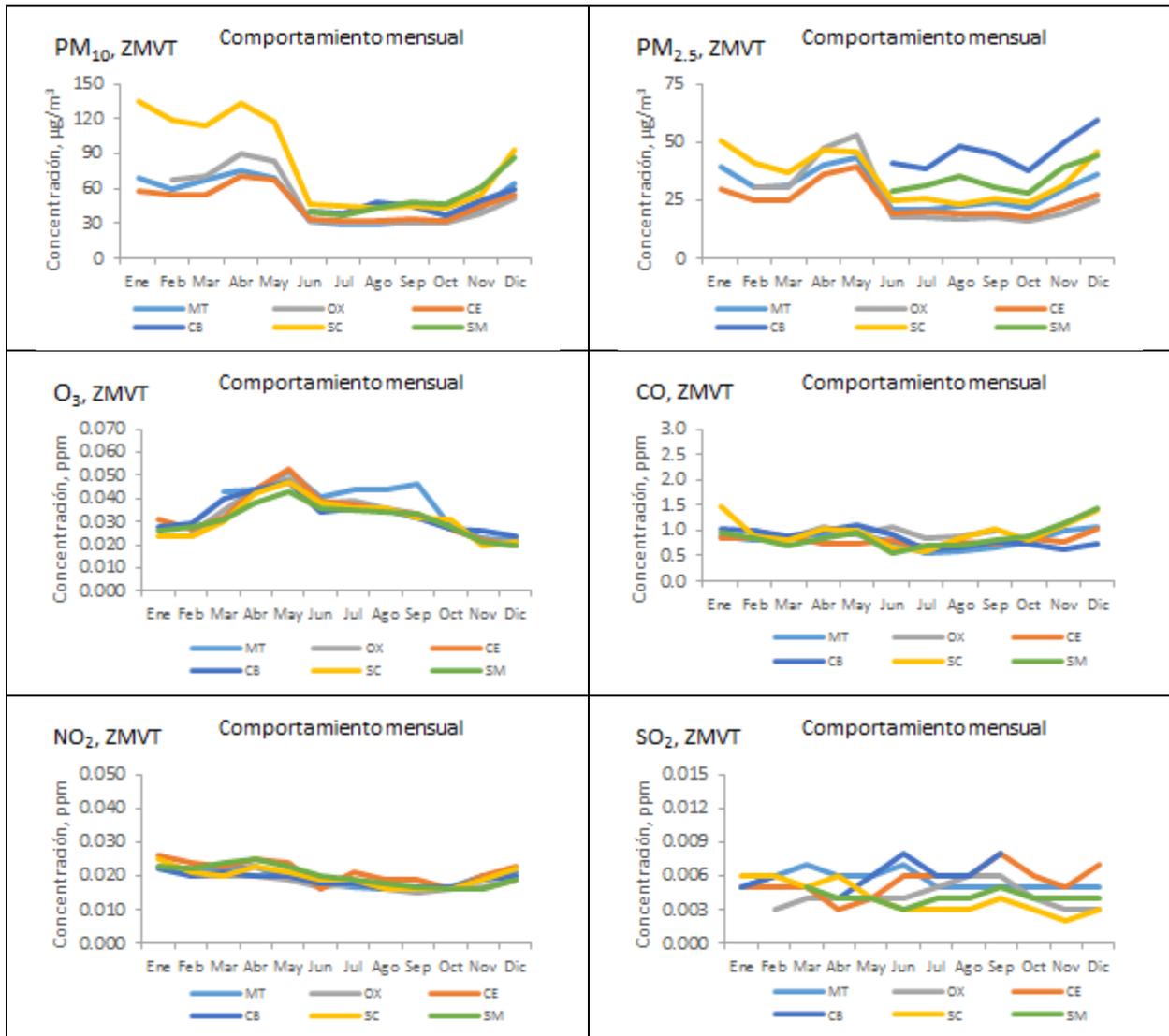




Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

Por último, en la Figura 14 se ilustra el comportamiento mensual de cada uno de los contaminantes. Las PM₁₀ y PM_{2.5} registran las menores concentraciones en los meses de lluvia, de junio a septiembre, y mayores concentraciones en los meses fríos y secos del año. El O₃ por su parte, los niveles más altos ocurren durante los meses con alta radiación solar y poca lluvia, es decir, la primavera y los primeros meses del verano, las concentraciones disminuyen durante los meses de otoño, probablemente porque la velocidad del viento aumenta y se favorece la dispersión de los contaminantes atmosféricos, las concentraciones más bajas de este contaminante se presentan, de manera general, durante los meses invernales. Para el CO y NO₂, las concentraciones ligeramente más altas se presentan durante el invierno, entre noviembre a enero, lo anterior puede ser debido a que este contaminante es predominantemente vehicular, este comportamiento podría ser el resultado del aumento de la actividad vehicular en los últimos meses del año. En tanto que, para el SO₂, las concentraciones fluctúan en un intervalo de concentración muy pequeño durante todo el año.

Figura 14. Comportamiento mensual de los contaminantes en la ZMVT, 2019



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

6.2. Emisiones de contaminantes a la atmósfera en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Los principales contaminantes criterio que se emitieron en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el año 2016 fueron el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NOx). Los COV y los NOx son de particular interés por ser precursores de la formación de ozono (O₃) uno de los principales contaminantes de preocupación en ciudades mexicanas por su efectos adversos hacia la salud humana.

Tabla 5. Inventario de emisiones contaminantes a la atmosféricos por fuente en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2016.

| Fuente | Emisiones (Mg/año) | | | | | | |
|--------------|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NOx | COV | NH ₃ |
| Área | 4,634.00 | 2,987.74 | 104.18 | 20,284.05 | 1,353.86 | 25,544.85 | 5,442.19 |
| Fijas | 552.93 | 442.17 | 1,233.23 | 432.21 | 1,698.28 | 3,087.47 | 14.42 |
| Móviles | 491.24 | 450.22 | 78.93 | 70,353.33 | 17,025.60 | 8,002.33 | 153.95 |
| Naturales | - | - | - | - | 8,592.46 | 28,191.09 | - |
| Total | 5,678.16 | 3,880.13 | 1,416.34 | 91,069.59 | 28,670.20 | 64,825.73 | 5,610.56 |

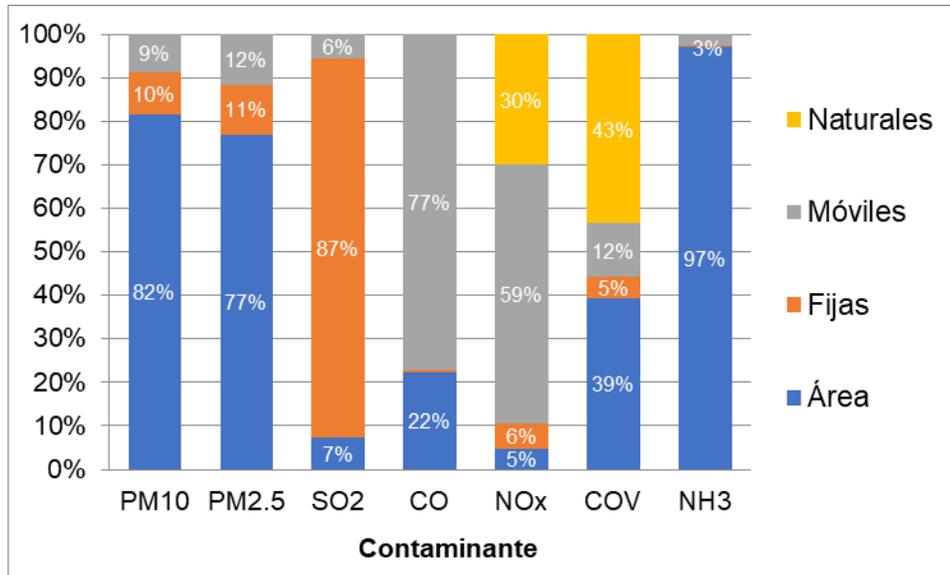
Fuente: Elaboración propia con información de Semarnat (INEM-2016).

Respecto a la contribución a la emisión de contaminantes por fuente, como se observa en la Figura 15, las fuentes de área (comercios y servicios, actividades agrícolas y ganaderas) contribuyen con el 97% del amoniaco, por la actividad ganadera; 82% de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} proveniente de labranza y quemas agrícolas, así como combustión doméstica por quema de leña.

La actividad industrial emite, principalmente, bióxido de azufre (SO₂) por la quema de combustibles fósiles en sus procesos productivos. Las fuentes naturales contribuyen con el 43% de COV y el 30% de los NOx, resultado de la actividad biogénica.

En cuanto a los vehículos automotores, su contribución se concentra en la emisión de monóxido de carbono (CO) con el 77% del total, 59% de los óxidos de nitrógeno (NOx), 12% de los compuestos orgánicos volátiles (COV) y las partículas PM₁₀.

Figura 15. Contribución a la emisión de contaminantes atmosféricos por fuente en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2016.



Fuente: Elaboración propia con información de Semarnat (INEM-2016).

6.3. Emisiones de contaminantes a la atmósfera de vehículos automotores en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Los vehículos automotores que circulan por vías públicas son las denominadas fuentes móviles carreteras. La estimación de emisiones a la atmósfera provenientes de los vehículos automotores considera tres elementos:

- Actividad vehicular. Refiere a la distancia recorrida por los vehículos (generalmente representada en kilómetros) y la forma en la cual ésta fue recorrida.
- Factor de emisión. Es la tasa promedio de contaminantes emitidos durante el curso del viaje (expresada en gramos por kilómetro). El factor de emisión depende de diversas variables: tipo de vehículo, año modelo, velocidad, temperatura, humedad, tipo de combustibles, entre otros.
- Flota vehicular. Refiere a cuántos vehículos circulan en el área de estudio y cuáles son sus características tecnológicas.

6.3.1. Método de estimación

En la estimación de las emisiones generadas por fuentes móviles se hace uso del modelo MOVES-México. MOVES es el Simulador de Emisiones de Vehículos de Motor de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés). El acrónimo MOVES proviene del inglés Motor Vehicle Emissions Simulator (USEPA, 2014).

Los cálculos de emisiones se realizan dentro del modelo MOVES. Para ello, es necesario ingresar una serie de archivos de MySQL que definen las características de la flota vehicular en circulación, así como su actividad, tipo de combustible y las condiciones climatológicas. MOVES-México procesa la información insumo proporcionada y da como resultado una serie de tablas con las emisiones en unidades de masa, por contaminante y tipo de vehículo. Internamente MOVES maneja una serie de algoritmos donde pondera una gran cantidad de factores de emisión, dadas las condiciones ingresadas, para finalmente presentar las emisiones totales.

Para la estimación de emisiones totales, MOVES-México utiliza la siguiente formulación general:

$$E_{total,i} = \sum_j^n E_i$$

Donde:

- E= Emisiones de cada contaminante.
- i= Tipo de vehículo.
- j= Cada uno de los tipos de vehículos definidos.

El cálculo de emisiones parciales lo realiza MOVES-México utilizando información de la cantidad de vehículos registrados y su actividad vehicular, de acuerdo a la siguiente formulación:

$$E_{ijk} = \sum FV_{ij} * DA_{il} * FE_{ijkl}$$

Donde:

- E_{ijk} = Emisión del tipo de vehículo i, año modelo j, del contaminante k.
- FV_{ij} = Flota vehicular del tipo de vehículo i, año modelo j.

DA_{ij} = Dato de actividad de kilómetros recorridos por tipo de vehículo i , a las velocidades l .

FE_{ijkl} = Factor de emisión definido dentro de MOVES-México para cada tipo de vehículo i , año modelo j , contaminante k , velocidad l .

Las emisiones totales se obtienen sumando las emisiones parciales de cada contaminante para cada tipo de vehículo. Los tipos de vehículos definidos para el presente estudio son los siguientes:

- Automóviles particulares
- Camionetas particulares
- Motocicleta
- Taxis
- Camionetas de transporte público
- Pickup
- Autobús
- Vehículos de carga ≤ 3.8 toneladas
- Vehículos de carga > 3.8 toneladas
- Tractocamiones

Contaminantes evaluados

Partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco (NH_3), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), carbono negro (CN), benceno, tolueno, etilbenceno y xileno

Datos de actividad

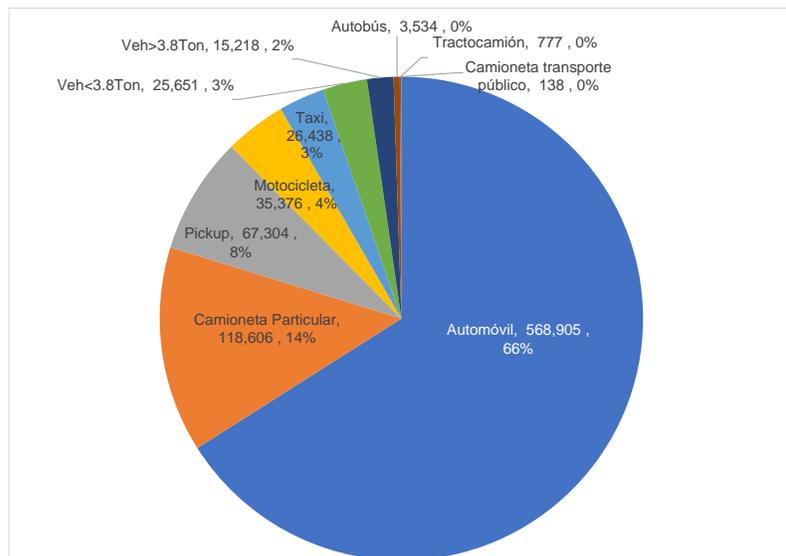
Se realiza la estimación a través del modelo MOVES, preparando los archivos referentes a los siguientes parámetros.

- a) *Caracterizar la flota vehicular.* A partir del padrón vehicular (SEGAM, 2020a), se analiza la información para adecuarla a las categorías vehiculares utilizadas en el modelo MOVES, que corresponden a las reportadas en el Inventario Nacional de Emisiones de emisiones de México (INEM), así como el tipo de flota en circulación en la entidad.

Del padrón vehicular año base 2019 estandarizado y caracterizado que comprende 861,947 vehículos.

En la Figura 16 se muestra la distribución de la flota vehicular por categoría, resultado de la depuración de la base de datos de los registros vehiculares de la ZMVT del año 2019 (SMAGEM, 2020a) y de las estadísticas básicas municipales (IGECEM, 2020). De esta figura destaca la presencia de vehículos de uso particular (66 % de automóviles y 14% de camionetas). La cantidad de vehículos de transporte público es pequeña comparada con el total de la flota, los taxis 3%, los autobuses 0.41% y las combis 0.02%. Los tractocamiones tan sólo son el 0.09% de flota vehicular de la ZMVT.

Figura 16. Distribución de flota vehicular por categoría.

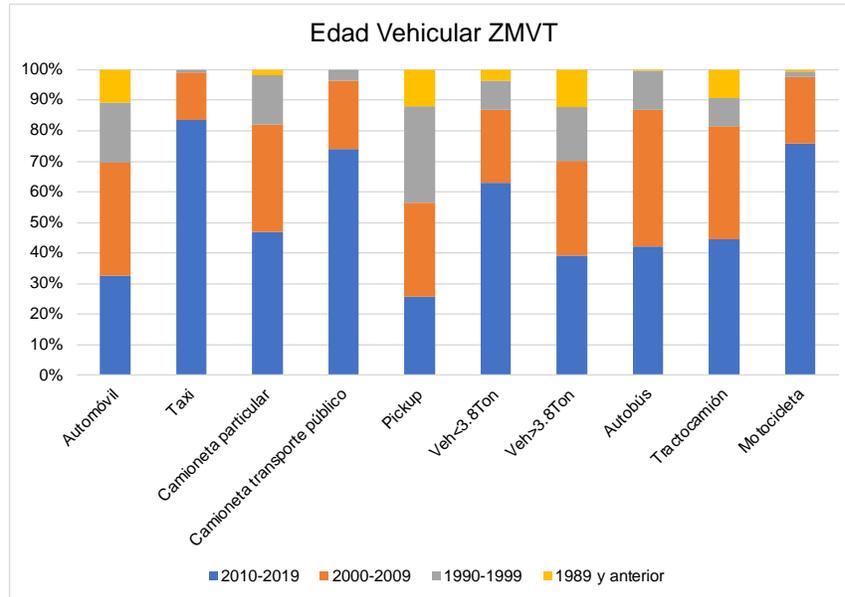


NOTA: El porcentaje de autobús es 0.41%, tractocamión 0.09% y combi 0.02%.

Fuente: Elaboración propia con información de SMAGEM, 2020a y IGECEM, 2020.

Los vehículos particulares no solo representan la mayor cantidad de flota, sino que también tienen una mayor distribución de vehículos de antigüedad más de 10 años, inclusive una cantidad importante de más de 30 años (ver Figura 17).

Figura 17. Distribución de flota vehicular por año modelo.



Fuente: Elaboración propia con información de SMAGEM, 2020a y IGCEM, 2020.

b) *Actividad vehicular.* Definida por los siguientes parámetros:

- Kilómetros recorridos por tipo de vehículo: Se generaron los archivos de entrada al modelo MOVES-México que contienen la distancia (kilómetros) recorrida por categoría vehicular y el porcentaje de distancia que los vehículos circulan en las diferentes vialidades.

Tabla 6. Kilómetros recorridos por tipo de vehículo en la ZMVT.

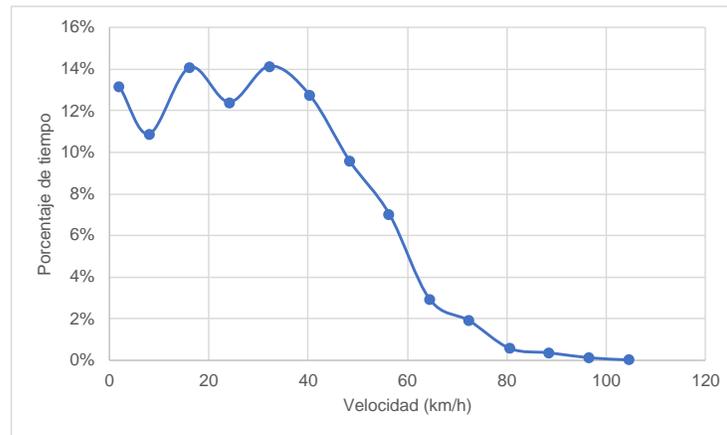
| Kilómetros Anuales Recorridos | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|--------|----------------------|------------------------------|--------|------------|-------------|
| Motocicletas | Automóvil | Taxis | Camioneta particular | Camioneta Transporte Público | Pickup | Veh<3.8Ton | Veh>3.8 Ton |
| 19,465 | 14,165 | 38,890 | 14,165 | 58,793 | 13,980 | 27,102 | 17,956 |

Fuente: Información obtenida a partir de odómetro de PVVO (SMAGEM, 2020b) y estadísticas carreteras (SCT, 2020).

- Velocidad de circulación: A partir del estudio de actividad vehicular realizado por INECC y SEMARNAT, así como bases de datos de aplicaciones de movilidad integradas en la plataforma de DAT'S WHY se establecieron los perfiles de velocidades de circulación por tipo de vialidad para ingresarla al MOVES-México.

En la Figura 18 se presenta la gráfica de perfil de velocidades promedio de circulación para vialidades urbanas, de acuerdo a los rangos de velocidades de circulación definidas en el modelo MOVES México. En esta gráfica se aprecia que se permanece en velocidades bajas la mayor parte del tiempo, en este caso el promedio de todo el perfil indica 28.9 km/h, correspondiente a las velocidades promedio obtenidas mediante telemetría y con perfiles generados en campo con vehículos instrumentados en estudios de actividad vehicular.

Figura 18. Perfil de velocidades de circulación en vialidades urbanas.



Fuente: elaboración propia con información de perfiles de velocidades (INECC, SEMARNAT, 2010 y DAT'S WHY, 2022).

- c) *Características del combustible.* El archivo de tipo de combustible y sus características, se generó a partir de la información del tipo de combustible utilizado por el tipo de flota vehicular registrada en el padrón vehicular (SMAGEM, 2020a), y los valores de las características de la composición del combustible, se definieron en base a los valores establecidos en la normatividad.
- d) *Meteorología.* Se integran las bases de datos con la información meteorológica relacionada con la temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica requerida por MOVES-México para la zona de estudio a modelar. La información incluida para los archivos de modelación son los datos de la meteorología del año base 2019.

6.3.2. Emisiones vehiculares

El Tabla 7 muestra las emisiones estimadas de los vehículos automotores dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) para los contaminantes criterio, gases de efecto invernadero (GEI) y los compuestos tóxicos benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX).

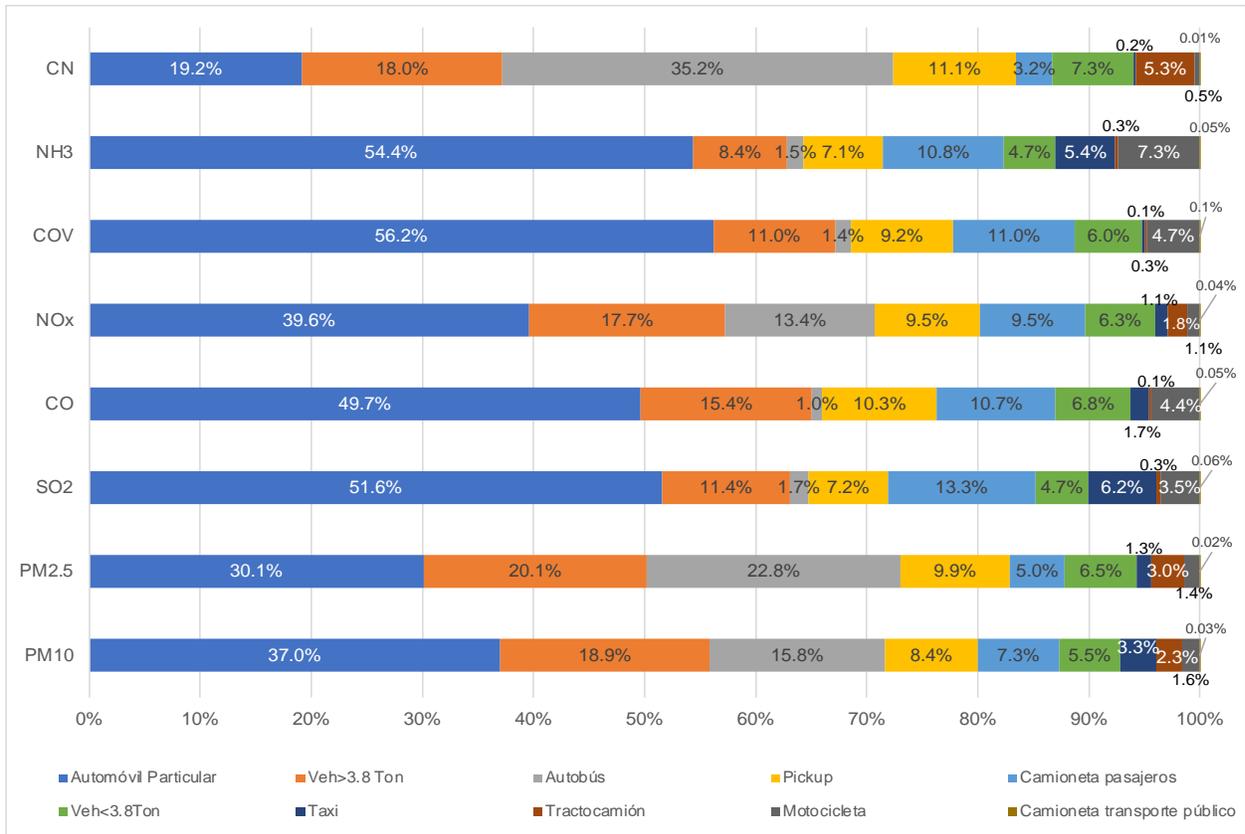
Tabla 7. Inventario de emisiones de fuentes móviles para la ZMT.

| Contaminantes | | Emisiones (Ton/año) |
|-----------------------------|-------------|------------------------|
| Criterio | PM10 | 1,444.99 |
| | PM2.5 | 754.73 |
| | SO2 | 85.65 |
| | CO | 108,519.86 |
| | NOx | 21,961.02 |
| | COV | 13,632.27 |
| | NH3 | 251.70 |
| | CN | 267.67 |
| Gases de efecto invernadero | CO2 | 4,926,589.57 |
| | CH4 | 538.29 |
| | N2O | 157.09 |
| Compuestos tóxicos (BTEX) | Benceno | 426.76 |
| | Tolueno | 1,199.93 |
| | Etilbenceno | 282.16 |
| | Xileno | 964.22 |

Fuente: elaboración propia,

La Figura 19 presenta el aporte de emisiones de vehículos automotores por categoría vehicular, destacan las emisiones de los automóviles particulares, siendo esta categoría la que aporta la mayor cantidad de cada uno de los contaminantes, esto se atribuye principalmente a la cantidad de este tipo de vehículos y su antigüedad, el 30% de estos vehículos cuentan con una antigüedad de 10 años o menos, otro 30% son de más de 20 años.

Figura 19. Porcentaje de emisiones por tipo de vehículo en la ZMVT.



Las Tablas 8, 9 y 10 muestra las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y compuesto tóxicos por categoría vehicular.

Tabla 8. Emisiones de contaminantes criterio de fuente móviles en la ZMVT.

| Categoría vehicular | Emisiones (Ton/año) | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|---------------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NOx | COV | NH ₃ | CN |
| Motocicleta | 23.02 | 10.35 | 3.00 | 4,761.38 | 248.85 | 645.62 | 18.38 | 1.28 |
| Automóvil Particular | 534.63 | 227.14 | 44.21 | 53,882.54 | 8,694.73 | 7,659.05 | 136.87 | 51.41 |
| Taxi | 47.16 | 9.55 | 5.31 | 1,805.82 | 244.77 | 37.53 | 13.56 | 0.59 |
| Camioneta pasajeros | 105.99 | 37.42 | 11.38 | 11,562.56 | 2,077.55 | 1,498.49 | 27.29 | 8.58 |
| Camioneta transporte público | 0.49 | 0.17 | 0.05 | 53.19 | 9.56 | 6.89 | 0.13 | 0.04 |
| Pickup | 120.68 | 74.43 | 6.13 | 11,203.05 | 2,093.98 | 1,252.22 | 17.98 | 29.81 |
| Veh<3.8Ton | 79.45 | 49.00 | 4.04 | 7,375.80 | 1,378.62 | 824.43 | 11.84 | 19.63 |
| Autobús | 227.75 | 171.99 | 1.44 | 1,044.09 | 2,939.21 | 191.82 | 3.76 | 94.12 |
| Veh>3.8 Ton | 272.68 | 151.94 | 9.80 | 16,704.81 | 3,886.27 | 1,495.99 | 21.24 | 48.12 |
| Tractocamión | 33.15 | 22.72 | 0.29 | 126.63 | 387.49 | 20.22 | 0.65 | 14.11 |
| Total | 1,444.99 | 754.73 | 85.65 | 108,519.86 | 21,961.02 | 13,632.27 | 251.70 | 267.67 |

Fuente: elaboración propia,

Tabla 9. Emisiones de gases de efecto invernadero de fuente móviles en la ZMVT.

| Categoría vehicular | Emisiones (Ton/año) | | |
|------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
| Motocicleta | 156,655.14 | 17.15 | 1.69 |
| Automóvil Particular | 2,312,319.49 | 145.56 | 72.93 |
| Taxi | 278,264.42 | 4.27 | 1.57 |
| Camioneta pasajeros | 596,107.01 | 47.70 | 21.80 |
| Camioneta transporte público | 2,742.09 | 0.22 | 0.10 |
| Pickup | 381,581.02 | 69.65 | 23.31 |
| Veh<3.8Ton | 251,223.33 | 45.86 | 15.35 |
| Autobús | 230,881.95 | 54.34 | 0.73 |
| Veh>3.8 Ton | 668,672.90 | 140.39 | 19.50 |
| Tractocamión | 48,142.23 | 13.16 | 0.11 |
| Total | 4,926,589.57 | 538.29 | 157.09 |

Fuente: elaboración propia,

Tabla 10. Emisiones de compuestos tóxicos de fuente móviles en la ZMT.

| Categoría vehicular | Emisiones (Ton/año) | | | |
|------------------------------|---------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | Benceno | Tolueno | Etilbenceno | Xileno |
| Motocicleta | 19.28 | 55.77 | 13.40 | 45.17 |
| Automóvil Particular | 240.97 | 706.95 | 166.27 | 565.33 |
| Taxi | 1.54 | 3.31 | 0.76 | 2.70 |
| Camioneta pasajeros | 48.65 | 137.77 | 32.32 | 110.27 |
| Camioneta transporte público | 0.22 | 0.63 | 0.15 | 0.51 |
| Pickup | 40.44 | 105.87 | 24.73 | 85.62 |
| Veh<3.8Ton | 26.62 | 69.70 | 16.28 | 56.37 |
| Autobús | 1.78 | 2.33 | 0.73 | 2.62 |
| Veh>3.8 Ton | 47.04 | 117.19 | 27.42 | 95.14 |
| Tractocamión | 0.22 | 0.41 | 0.10 | 0.51 |
| Total | 426.76 | 1,199.93 | 282.16 | 964.22 |

Fuente: elaboración propia,

6.4. Correlación de emisiones vehiculares e indicadores de calidad del aire

Se ha definido que para la correlación de emisiones vehiculares e indicadores de calidad del aire, se realice el análisis con el contaminante de óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO), estos contaminantes provienen principalmente de los vehículos automotores. La importancia de analizar los NOx se debe a que éstos son precursores de ozono. Como ya se observó en la sección de cumplimiento de normas, el ozono se incumple en todas las estaciones de monitoreo para todos los años analizados.

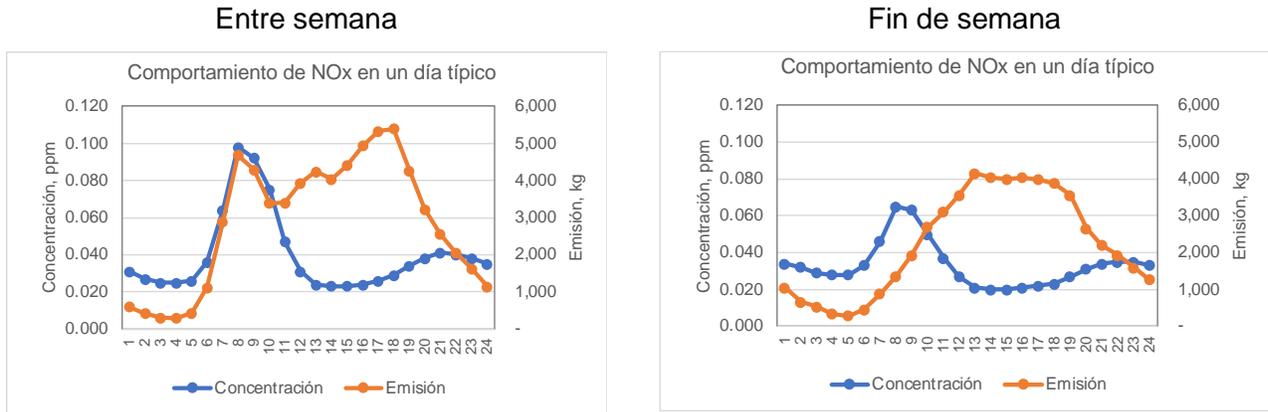
Se realizaron corridas del modelo MOVES México de forma horaria con los datos del escenario base 2019, para comparar estos valores de emisiones con los valores del indicador de calidad del aire de comportamiento horario durante el día, también para el año 2019.

De lo anterior se realizaron análisis estadísticos para ambos grupos de datos (emisiones y concentraciones horarias de NOx y CO) para tratar de establecer una correlación entre ambos, lo cual no fue posible, ya que como se observa en las Figuras 16 y 17, el comportamiento de ambos grupos de datos en ciertas horas del día es muy diferente.

Debido a que no se encontró una correlación entre ambos grupos de datos, éstos se compararon entre sí, para analizar su comportamiento, el cual se observa para los NOx en la Figura 20, y para CO en la Figura 21.

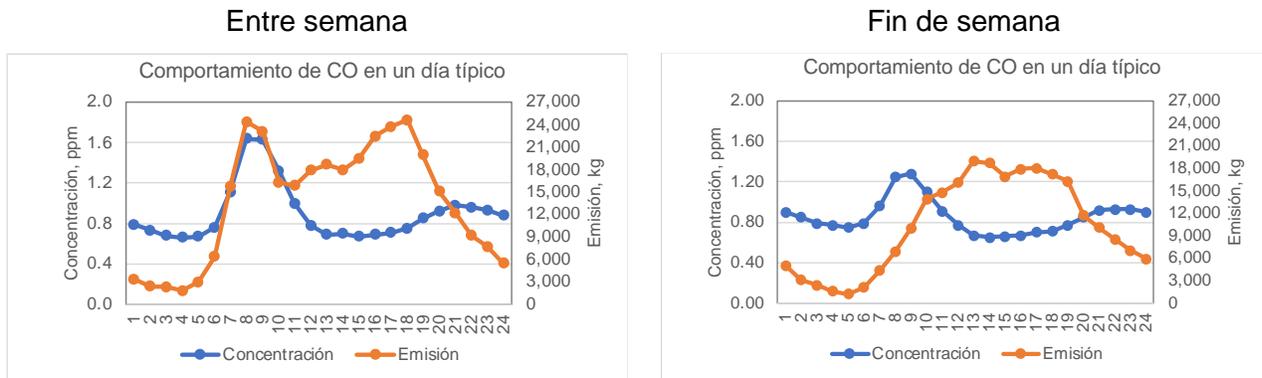
Del análisis del comportamiento tanto de los NOx como del CO, se observa que ambos grupos de datos (emisiones y concentraciones), tienen un comportamiento muy similar en las horas de la mañana. Es importante mencionar que las estaciones de monitoreo miden las concentraciones en el aire de los contaminantes provenientes de varias fuentes, y no sólo de fuentes móviles, además de que varias de estas estaciones no están cercanas a las fuentes móviles, por lo que no representan el comportamiento de las emisiones de los vehículos automotores.

Figura 20. Comportamiento de NOx en un día típico en la ZMVT (entre semana y en fin de semana).



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

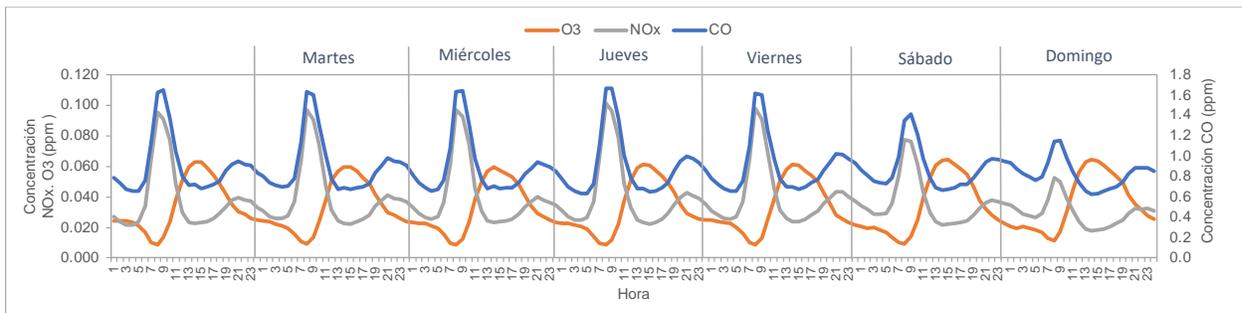
Figura 21. Comportamiento de CO en un día típico en la ZMVT (entre semana y en fin de semana).



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

La Figura 22 muestra la relación que existe entre los indicadores de calidad del aire de NOx y CO con la actividad vehicular, que a su vez se refleja con las emisiones vehiculares de CO y NOx. En esta figura se observa que los NOx y CO se emiten en las horas de mayor flujo vehicular, y para el fin de semana disminuyen como consecuencia de la disminución de la actividad vehicular, sin embargo, el O₃ a lo largo de la semana se mantiene en los mismos niveles, esto seguramente porque la atmósfera se encuentra saturada y se requiere una reducción considerable en NOx y los precursores de ozono para que se perciba una reducción en este contaminante.

Figura 22. Comportamiento O₃, NOx y CO a lo largo de la semana de forma horaria.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT.

7. Evaluación de implementación del programa “Hoy No Circula”

7.1. Definir escenarios para el Programa “Hoy No Circula”

En el Estado de México el Programa “Hoy No Circula” aplica en los municipios conurbados con Ciudad de México, y este programa se denomina: “Acuerdo de Hoy No Circula”.

Para evaluar si es factible la implementación de este acuerdo en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), se consideran los mismos criterios definidos dentro del Acuerdo de Hoy No Circula que actualmente está vigente en los municipios del Estado de México pertenecientes a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

| Características del Programa Hoy No Circula del Valle de México |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Aplica en un horario de 5:00 a 22 horas de lunes a sábado.• Restricción a la circulación por la terminación del número de placa para hologramas 1 y 2:<ul style="list-style-type: none">○ Lunes: 5 y 6○ Martes: 7 y 8○ Miércoles: 3 y 4○ Jueves: 1 y 2○ Viernes: 9 y 0• Sábados<ul style="list-style-type: none">○ Holograma 1: Placa impar, 1er y 3er sábado del mes. Placa par, 2do y 4to sábado del mes.○ Holograma 2: Deja de circula todos los sábados.• Autos foráneos<ul style="list-style-type: none">○ Un día a la semana dependiendo terminación de dígito de la placa.○ Todos los sábados.○ De lunes a viernes de 5:00 a 11:00 horas.• Excentos:<ul style="list-style-type: none">○ “00”, “0”, eléctricos, híbridos, de energía solar, emergencia, transporte escolar con permiso, cortejo fúnebre y servicios funerarios, conducidos por persona con discapacidad, transporte público federal de pasajeros con autorización, vehículos con pase turístico. |

Se ha realizado la modelación de emisiones a través del MOVES México (USEPA, 2014), aplicando las consideraciones del “Acuerdo de Hoy No Circula”, estas variaciones de emisiones han sido aplicadas a escenarios de modelación fotoquímica para conocer si éstas mejorarán la calidad del aire con respecto a las concentraciones de ozono.

7.1.1. Escenarios de modelación de emisiones con MOVES México

En la Segunda Etapa del presente proyecto se desarrolló el inventario de emisiones móviles carretera para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), año base 2019, en este inventario se estimaron los siguientes contaminantes: partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), amoniaco (NH_3), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), carbono negro (CN), benceno, tolueno, etilbenceno y xileno; todas estas emisiones estimadas por año modelo para las categorías vehiculares de: automóviles y camionetas de uso particular, pickup, motocicletas, taxis, camionetas de transporte público, autobuses, vehículos de carga menores y mayores a 3.8 toneladas y tractocamiones.

Los escenarios para aplicar el Acuerdo Hoy No Circula, se construyen a partir del escenario base de emisiones vehiculares 2019, para lo cual es necesario recalcular las emisiones vehiculares con el modelo MOVES México, siguiendo el mismo método utilizado que para el escenario base, considerando los siguientes elementos:

- Actividad vehicular. Refiere a la distancia recorrida por los vehículos (generalmente representada en kilómetros) y la forma en la cual ésta fue recorrida.
- Factor de emisión. Es la tasa promedio de contaminantes emitidos durante el curso del viaje (expresada en gramos por kilómetro). El factor de emisión depende de diversas variables: tipo de vehículo, año modelo, velocidad, temperatura, humedad, tipo de combustibles, entre otros.
- Flota vehicular. Refiere a cuántos vehículos circulan en el área de estudio y cuáles son sus características tecnológicas.

Los cálculos de emisiones se realizan dentro del modelo MOVES. Para ello, es necesario ingresar una serie de archivos de MySQL que definen las características de la flota vehicular en circulación, así como su actividad, tipo de combustible y las condiciones climatológicas. MOVES-México procesa la información insumo proporcionada y da como resultado una serie de tablas con las emisiones en unidades de masa, por contaminante y tipo de vehículo. Internamente MOVES maneja una serie de algoritmos donde pondera

una gran cantidad de factores de emisión, dadas las condiciones ingresadas, para finalmente presentar las emisiones totales.

Para la estimación de emisiones totales, MOVES-México utiliza la siguiente formulación general:

$$E_{total,i} = \sum_j^n E_i$$

Donde:

- E= Emisiones de cada contaminante.
- i= Tipo de vehículo.
- j= Cada uno de los tipos de vehículos definidos.

El cálculo de emisiones parciales lo realiza MOVES-México utilizando información de la cantidad de vehículos registrados y su actividad vehicular, de acuerdo a la siguiente formulación:

$$E_{ijk} = \sum FV_{ij} * DA_{il} * FE_{ijkl}$$

Donde:

- E_{ijk} = Emisión del tipo de vehículo i, año modelo j, del contaminante k.
- FV_{ij} = Flota vehicular del tipo de vehículo i, año modelo j.
- DA_{il} = Dato de actividad de kilómetros recorridos por tipo de vehículo i, a las velocidades l.
- FE_{ijkl} = Factor de emisión definido dentro de MOVES-México para cada tipo de vehículo i, año modelo j, contaminante k, velocidad l.

Las emisiones totales se obtienen sumando las emisiones parciales de cada contaminante para cada tipo de vehículo.

7.1.1.1. Definición de escenarios de modelación de emisiones vehiculares aplicando el Acuerdo de “Hoy No Circula”

Se han desarrollado tres escenarios partiendo del escenario base, de información del Programa de Verificación Vehicular, utilizando los criterios establecidos en el Acuerdo de Hoy No Circula.

Programa de Verificación Vehicular.

Como resultado del análisis de la información de verificación vehicular de lo reportado en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), en el Tabla 1 se muestra la distribución de tipo de hologramas otorgados por rangos de año modelo, los cuales son la base para la asignación del tipo de holograma en los escenarios a construir para aplicar el Acuerdo de Hoy No Circula.

Tabla 11. Distribución de tipo de hologramas por año modelo.

| Distribución por tipo de holograma | | | | | |
|---------------------------------------|------------|--------|--------|-------|--------|
| Rango de año modelo | DOBLE CERO | CERO | UNO | DOS | |
| ≤1995 | - | - | 6.5% | 99.7% | |
| 1996≤2000 | - | - | 27.5% | 0.1% | |
| 2001≤2005 | - | - | 63.9% | 0.1% | |
| 2006≤2010 | - | 22.6% | 0.7% | 0.1% | |
| 2011≤2015 | - | 34.5% | 0.6% | 0.1% | |
| 2016≤2022 | 100.0% | 42.9% | 0.8% | - | |
| Total | 100.0% | 100.0% | 100.0% | - | |
| Distribución por grupos de año modelo | | | | | |
| Rango de año modelo | DOBLE CERO | CERO | UNO | DOS | Total |
| ≤1995 | 0.0% | 0.0% | 25.7% | 74.3% | 100.0% |
| 1996≤2000 | 0.0% | 0.1% | 99.9% | 0.0% | 100.0% |
| 2001≤2005 | 0.0% | 0.1% | 99.9% | 0.0% | 100.0% |
| 2006≤2010 | 0.0% | 99.0% | 0.9% | 0.1% | 100.0% |
| 2011≤2015 | 0.0% | 99.5% | 0.5% | 0.0% | 100.0% |
| 2016≤2022 | 8.0% | 91.5% | 0.5% | 0.0% | 100.0% |

Fuente: Información obtenida a partir del PVVO (SMAGEM, 2020b)

Acuerdo de Hoy No Circula.

La Tabla 12 muestra para cada día cuales son los vehículos que no circulan cada día de acuerdo con las terminaciones de su placa, para el caso del sábado se establece qué vehículos no circulan, no sólo por el tipo de terminación de su placa, sino por el tipo de holograma que se les fue asignado por el Programa de Verificación Vehicular.

De acuerdo con la terminación de placas se determina el número de vehículos que dejan de circular un día, debido a que no se cuenta con las placas del padrón vehicular, se considera una distribución homogénea de terminación de placa de los vehículos de holograma 1 o 2 para que no circulen ciertos días de la semana, y de esta forma aplicar los criterios de la Tabla 2 para generar los escenarios del Hoy No Circula, recordando que los vehículos con hologramas doble cero y cero circularan todos los días.

Tabla 12. Limitación de circulación de vehículos en el Acuerdo de Hoy No Circula.

| Día | Limitación de la circulación de lunes a sábado |
|-----------|---|
| Horario | De 5:00 a 22:00 horas |
| Lunes | Amarillo (5 y 6) |
| Martes | Rosa (7 y 8) |
| Miércoles | Rojo (3 y 4) |
| Jueves | Verde (1 y 2) |
| Viernes | Azul (9 y 0), permisos y matriculas sin número |
| Sábado | El primer y tercer sábado del mes los vehículos con holograma 1, placa terminación en impar. El segundo y cuarto sábado del mes los vehículos con holograma 1, placa terminación en par. Todos los sábados vehículos con holograma 2. |

Fuente: Acuerdo de Hoy No Circula (Gaceta del Gobierno del Estado de México, 2014).

El padrón vehicular utilizado para el escenario base 2019 comprendió 861,947 vehículos en el que se incluyen todas las categorías vehiculares, de este total 780,466 son vehículos que cumplen con las características establecidas en el Acuerdo de Hoy No Circula (HNC), para que participen en el mismo.

De acuerdo con el porcentaje de distribución de hologramas por año modelo presentado en la Tabla 1, los vehículos con año modelo 2006 y superiores cuentan con holograma 0 o doble 0, y los vehículos de año modelo 2005 y menores tienen holograma 1 o 2. Los 780,466 vehículos potenciales para que participen en el HNC, 91% de estos son años modelos ≥ 2006 (710,224 vehículos), y el 9% modelos ≤ 2005 (70,242 vehículos), tal

como se observa en la Tabla 3, por lo que el 9% (70,242 vehículos) de los vehículos serían los que dejarían de circular un día entre semana y de 2 a 4 sábados al mes, dependiendo del holograma 1 o 2, respectivamente.

Tabla 13. Distribución de la cantidad de vehículos por tipo de holograma.

| Año modelo | Vehículos a participar en el HNC | |
|------------|----------------------------------|----------|
| | Porcentaje | Cantidad |
| ≤2005 | 9% | 70,242 |
| ≥ 2006 | 91% | 710,224 |
| Total | 100% | 780,466 |

Fuente: Elaboración propia con información de SMAGEM, 2020a, IGCEM, 2020 y del Acuerdo de Hoy No Circula.

Escenario 1. Aplicación del HNC a vehículos con hologramas 1 y 2, modelos menores a 2006.

En este escenario los vehículos con holograma 1 dejarían de circular un día entre semana y 2 sábados al mes, los vehículos con holograma 2 no circularían también un día entre semana, más todos los sábados del mes. Los días que dejarían de circular dependen de la terminación de placa. Lo anterior se traduce a lo siguiente:

Holograma 1. Los vehículos de holograma 1, dejarían de circular 52 días entre semana, más 24 sábados, haciendo un total de 76 días al año.

Holograma 2. Los vehículos de holograma 2, dejarían de circular 52 días entre semana, más 52 sábados, haciendo un total de 104 días al año.

La cantidad de días antes mencionados se aplicó a la flota vehicular de 70,242 que son 9% de vehículos de holograma 1 y 2 presentados en la Tabla 13, esto se traduce como reducción de cantidad de vehículos en circulación y en kilómetros recorridos. Esta información se ingresó al modelo MOVES México para estimar las emisiones para este escenario.

Escenario 2. Aplicación del HNC a vehículos con hologramas 1 y 2, modelos menores a 2006 y ajustes a velocidades de circulación.

Este escenario 2 tiene las mismas características y consideraciones que el Escenario 1, con la única diferencia que se modificó la variable relacionada con la velocidad de circulación, ya que se espera que con una restricción a la circulación de un porcentaje de la flota vehicular, se consumirá menos combustible, disminuirán las emisiones de gases de escape, habrán menos congestionamientos viales y por consecuencia aumentará la velocidad de circulación de los automotores en las vialidades (Sun et al., 2014; Li et al., 2015; Liu et al., 2018).

Los análisis cuantitativos para estudiar los efectos de la política de restricción de la circulación a vehículos automotores son limitados, debido, principalmente, a la falta de información y al rápido cambio que experimentan las flotas vehiculares en las megaciudades. Sin embargo, un análisis sobre los efectos de políticas de restricción vehicular realizado en China muestra que la velocidad de circulación de la red aumentó un 12.85% en horas pico de medio día y 8.21% en horas valle (horas de menos tráfico vehicular). (Liu et al., 2018). No se encontró, durante la búsqueda bibliográfica, información de cambios en la velocidad de circulación de la flota vehicular por la aplicación del programa Hoy No Circula en la Zona Metropolitana del Valle de México, que pudiera utilizarse como referencia para el análisis del mismo programa para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Sin embargo, se recabó información a través de DAT´s Why¹³, de velocidades horarias para un día con contingencia y otro día sin contingencia, tanto para el año 2021, como para el año 2022, estas velocidades son promedio para la zona urbana de Tlalnepantla de Baz y Naucalpan de Juárez (ambos municipios del Estado de México).

La información de las velocidades horarias para las zonas urbanas de Tlalnepantla de Baz y Naucalpan de Juárez fue analizada estadísticamente y con comparaciones de los días con contingencia y no contingencia, inclusive entre los años 2021 y 2022. Del análisis de días con episodios con contingencia resultó, que en horas pico se alcanzan porcentajes de aumento de velocidad de hasta 9 km/h, mientras que en hora valle son alrededor de 1 km/h. En promedio para las dos zonas en el año 2021, aumentó la velocidad 2.74%, mientras que para el 2022, 4.6%.

¹³ Dat´s Why, Dic 2022. Velocidades promedio para zonas urbanas de los municipios de Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz, Estado de México para días con contingencia y sin contingencia en los años 2021 y 2022.

Del análisis de las velocidades de los años 2021 y 2022, se obtuvo que para el año 2022 hubo una reducción en velocidad de hasta 4.39 km/h en la zona en horas pico, esto se justifica porque en el año 2021 aún predominaba el atender varias actividades desde casa, resultando en una reducción de vehículos en circulación. Para mayor detalle de este análisis, consultar el Anexo A. Cambios de velocidades por episodios de contingencia en los municipios de Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz.

Para la modelación del Escenario 2 del programa Hoy No Circula para el Valle de Toluca se consideró que aumenta la velocidad promedio de circulación en 5 kilómetros por hora, un valor conservador que toma en cuenta que se pueden presentar otros factores que influyen en la disminución de la velocidad de circulación, como son la compra de un “auto sustituto” para poder circular cuando uno de los autos no circula, así como el porcentaje de vehículos que no respetan la restricción a la circulación el día que les toca descansar.

Escenario 3. Aplicación del HNC a vehículos con hologramas 1 y 2, modelos menores a 2010 y ajustes a velocidades de circulación.

Para este escenario se utilizó el mismo perfil de velocidades del escenario 2, pero la cantidad de vehículos y km recorridos se redujeron considerando que los vehículos de año modelo menores a 2010 tendrían hologramas 1 y 2, por lo que la cantidad de vehículos que dejarían de circular de acuerdo con los criterios del Hoy No Circula serían 95,997 vehículos (ver Tabla 14).

Tabla 14. Distribución de la cantidad de vehículos por tipo de holograma que participarían en el Acuerdo de Hoy No Circula respecto al Escenario 2.

| Año modelo | Vehículos a participar en el HNC | |
|--|----------------------------------|----------|
| | Porcentaje | Cantidad |
| Holograma 1 y 2: vehículos año modelo \leq 2009 | 12.3% | 95,997 |
| Holograma 0 y 00: vehículos año modelo \geq 2010 | 87.7% | 684,469 |
| Total | 100% | 780,466 |

Fuente: Elaboración propia con información de SMAGEM, 2020a, IGECM, 2020 y del Acuerdo de Hoy No Circula.

7.1.1.2. Resultados de los escenarios de emisiones vehiculares

Las emisiones vehiculares para el escenario base y de los tres escenarios de aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula (HNC) se aprecian en la Tabla 5, mientras que en la Tabla 6 se muestran las toneladas de reducción de emisiones de cada escenario respecto al escenario base, de esta tabla destaca que el Escenario 3 es en el que presentan la mayor reducción de toneladas para cada contaminante, seguido por las reducciones presentadas en el Escenario 2. Se recomienda que se modele fotoquímicamente el Escenario 2, ya que éste considera los criterios de asignación de hologramas del actual Programa de Verificación Vehicular.

Tabla 15. Emisiones vehiculares del escenario base y escenarios de reducción de emisiones.

| Escenario | Emisiones (Ton/año) | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------|-------------------|-----------------|---------|-----------------|--------|-----------------|-----|-----------------|-----------------|------------------|---------|---------|--------------|--------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NO _x | COV | NH ₃ | CN | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Benceno | Tolueno | Etil-benceno | Xileno |
| Escenario base | 1,926 | 946 | 107 | 123,770 | 24,578 | 16,430 | 317 | 307 | 6,173,947 | 651 | 182 | 477 | 1,446 | 344 | 1,168 |
| Escenario 1 | 1,777 | 858 | 100 | 107,903 | 22,362 | 14,461 | 290 | 284 | 5,766,459 | 612 | 155 | 413 | 1,044 | 246 | 840 |
| Escenario 2 | 1,524 | 756 | 88 | 100,742 | 20,905 | 13,014 | 256 | 263 | 5,095,602 | 549 | 143 | 388 | 1,137 | 270 | 916 |
| Escenario 3 | 1,496 | 745 | 85 | 96,460 | 20,185 | 12,599 | 247 | 260 | 4,950,273 | 536 | 140 | 374 | 1,101 | 261 | 888 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Reducción de toneladas de emisiones en cada escenario.

| Reducción de emisiones | Tonelas de emisiones reducidas por escenario | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|-------------------|-----------------|--------|-----------------|-------|-----------------|----|-----------------|-----------------|------------------|---------|---------|--------------|--------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NO _x | COV | NH ₃ | CN | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Benceno | Tolueno | Etil-benceno | Xileno |
| Escenario 1 | 148 | 87 | 8 | 15,868 | 2,216 | 1,969 | 28 | 24 | 407,487 | 39 | 27 | 64 | 402 | 98 | 329 |
| Escenario 2 | 401 | 190 | 19 | 23,028 | 3,673 | 3,415 | 62 | 45 | 1,078,345 | 102 | 39 | 90 | 309 | 75 | 252 |
| Escenario 3 | 429 | 200 | 22 | 27,310 | 4,393 | 3,831 | 70 | 47 | 1,223,674 | 116 | 42 | 103 | 345 | 83 | 281 |

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 17 se presentan los porcentajes de reducción de emisiones en cada escenario respecto al Escenario base, estas reducciones en promedio para el Escenario 1 son de 13%, para el Escenario 2 del 19% y para el Escenario 3 del 21%, en estudio similar al presente estudio, realizado para la Zona Metropolitana del Valle de México, se consideró una reducción de emisiones del 20% sin importar la especie de contaminante (García Reynoso, A., Jazcilevich, A., Ruíz Suárez, L. G., Torres Jardón, R., Suárez Lastra, m., & Reséndiz Juárez, N. A. (2009).

Tabla 17. Porcentaje de reducción de emisiones en cada escenario.

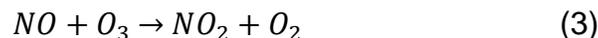
| Reducción de emisiones | Porcentaje de emisiones | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|-----------------|------------------|---------|---------|--------------|--------|
| | PM ₁₀ | PM _{2.5} | SO ₂ | CO | NO _x | COV | NH ₃ | CN | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Benceno | Tolueno | Etil-benceno | Xileno |
| Delta Escenario 1 | 7.7 | 9.2 | 7.1 | 12.8 | 9.0 | 12.0 | 8.7 | 7.7 | 6.6 | 6.0 | 14.8 | 13.5 | 27.8 | 28.5 | 28.1 |
| Delta Escenario 2 | 20.8 | 20.1 | 17.9 | 18.6 | 14.9 | 20.8 | 19.4 | 14.5 | 17.5 | 15.6 | 21.5 | 18.8 | 21.4 | 21.7 | 21.6 |
| Delta Escenario 3 | 22.3 | 21.2 | 20.4 | 22.1 | 17.9 | 23.3 | 22.1 | 15.3 | 19.8 | 17.7 | 23.3 | 21.7 | 23.8 | 24.2 | 24.0 |

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2. Escenarios de modelación fotoquímica

Información del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de México 2018-2030, muestra que los vehículos automotores en la ZMVT, contribuye con el 80% de monóxido de carbono (CO), 59% de óxidos de nitrógeno (NO_x), 18% de compuestos orgánicos volátiles (COV), 24% de dióxido de azufre (SO₂), 9% de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}.¹⁴ Las emisiones de NO_x y de COV son de particular interés por ser precursores de la formación de ozono (O₃), contaminante que tiene efectos adversos hacia la salud humana, en específico, para la ZMVT, el O₃ y las partículas superan las normas oficiales mexicanas de calidad del aire (INECC, 2020).

De forma natural el O₃ se genera cuando el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se encuentran en presencia de luz solar, como el resultado de la fotólisis del NO₂ por la radiación con longitud de onda menor a los 424 nm. Este desarrollo cinético corresponde al ciclo natural de los óxidos de nitrógeno, sin la injerencia de la contaminación por COV (Seinfeld y Spiros, 1997).



Tanto los COV como los NO_x son precursores de la formación de O₃, cada especie de COV tiene un impacto diferente en el incremento de las concentraciones de O₃, el cual está directamente relacionado con el Potencial de Formación de Ozono (PFO) que se determina principalmente a partir de la reactividad incremental máxima (MIR).

¹⁴ Gobierno del Estado de México, 2018. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México (ProAire 2018-2030). Secretaría del Medio Ambiente. Documento disponible en: <https://proaire.edomex.gob.mx/sites/proaire.edomex.gob.mx/files/files/mis%20pdf/ProAire%202018-2030.pdf>

Para conocer la influencia que tiene la reducción de emisiones vehiculares en la calidad del aire como resultado de aplicar el Acuerdo Hoy No Circula (HNC) en la ZMVT, se realizó la modelación fotoquímica de estas emisiones para conocer su impacto en la formación de ozono. Para ello se usó el modelo de calidad del aire WRF-Chem (versión 4.3.3 de enero 2022) (Grell et al., 2005).

Los escenarios a modelar a través de la aplicación del modelo fotoquímico fueron dos:

Escenario base. Modelación fotoquímica de emisiones de año base 2019, las emisiones ingresadas al modelo fueron escaladas del inventario de emisiones del 2016 (García-Reynoso et al., 2018) a las emisiones del 2019, con las cuales se obtiene la concentración de los contaminantes en la región. La información de las variables meteorológicas proviene de National Centers for Environmental Prediction: North American Mesoscale de 12 km¹⁵.

Escenario de reducción de emisiones vehiculares al aplicar el Acuerdo de HNC. Modelación fotoquímica con las mismas condiciones establecidas en el escenario base, pero aplicando el porcentaje de emisiones obtenido en el Escenario 2 de reducción de emisiones por tipo de contaminante reportado en la tabla 6. Solo se modela fotoquímicamente la reducción de emisiones del Escenario 2, ya que éste se refleja las características y criterios del Programa de Verificación Vehicular Obligatorio (PVVO) en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La estimación de reducción de emisiones de los Escenarios 1 y 3, se realizaron para tener de referencia la sensibilidad del modelo MOVES México a los cambios en los parámetros de actividad vehicular y cantidad de flota de diferentes años modelo.

Para realizar la modelación fotoquímica, se definieron los episodios a modelar, los cuales se seleccionaron a partir de la información de calidad del aire reportada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (SMAGEM, 2019), eligiendo aquellos periodos donde se presentaron altas concentraciones de ozono.

Se realizó la evaluación de las concentraciones de ozono durante el año 2019, se ubicó el 5to máximo de concentración y el percentil 90, sin embargo, estas concentraciones

¹⁵ <https://doi.org/10.5065/G4RC-1N91>, 2015.

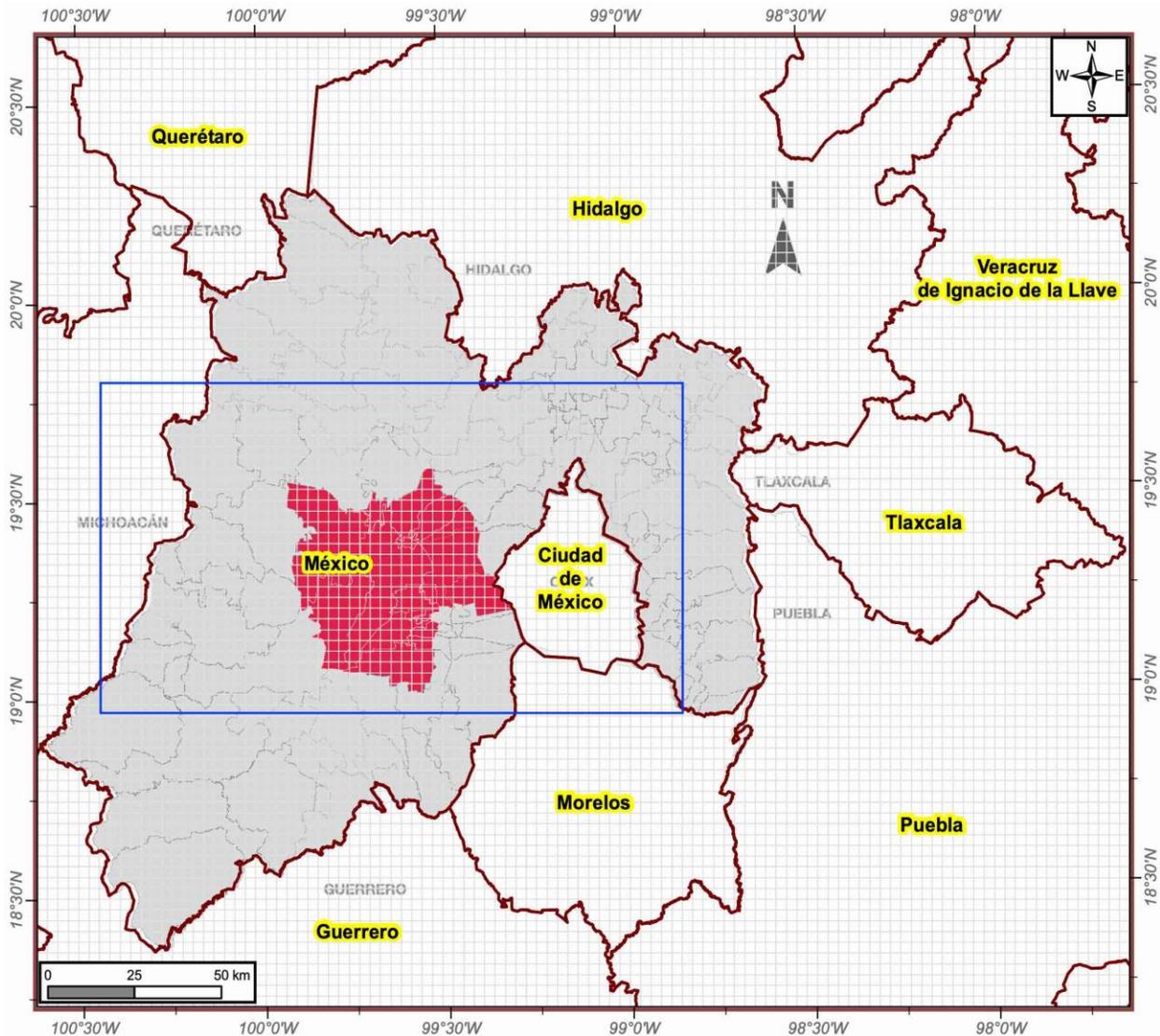
ocurrieron en días donde hubo incendios (mes de mayo). Por lo que se procedió a seleccionar días con concentraciones altas de ozono durante las temporadas de secas frías (meses de enero y octubre) y la de secas caliente (mes de mayo), periodos que se enlistan a continuación:

- 4 al 6 de enero.
- 6 al 8 de mayo.
- 13 al 15 de octubre.

En el mes de mayo se tuvo el registro de las concentraciones más altas del año seleccionándose los días 6 al 8, donde la influencia de incendios fue menor, ya que el objetivo principal de esta modelación es la evaluación de emisiones vehiculares y no naturales.

El dominio de modelación abarca la parte norte del estado de Guerrero, este de Michoacán, oeste de la Ciudad de México y sur de Querétaro. Las celdas de modelación tienen una resolución de 3x3 km y el dominio abarca una zona de 315 km x 270 km, realizando un acercamiento de una malla de 90 km x 168 km con centro en la ZMVT (ver Figura 23).

Figura 23. Dominio de modelación.



Los porcentajes de reducción de emisiones aplicando el Acuerdo de HNC se muestran en la siguiente Tabla, estas reducciones corresponden a los valores obtenidos en el Escenario 2 de emisiones vehiculares.

Tabla 18. Reducciones en las emisiones por aplicación del HNC en la ZMVY.

| Compuesto | | Δ de reducción de emisiones en el Escenario 2 | |
|--------------------------------|-------------------|---|---------------|
| | | Porcentaje | Toneladas/año |
| Partículas de 10 μm | PM ₁₀ | 20.8% | 401 |
| Partículas de 2.5 μm | PM _{2.5} | 20.1% | 190 |
| Dióxido de azufre | SO ₂ | 17.9% | 19 |
| Monóxido de carbono | CO | 18.6% | 23,028 |
| Óxidos de nitrógeno | NO _x | 14.9% | 3,673 |
| Compuestos Orgánicos Volátiles | COV | 20.8% | 3,415 |
| Amoníaco | NH ₃ | 19.4% | 62 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 17.5% | 1,078,345 |
| Metano | CH ₄ | 15.6% | 102 |
| Carbono negro | CN | 14.5% | 45 |

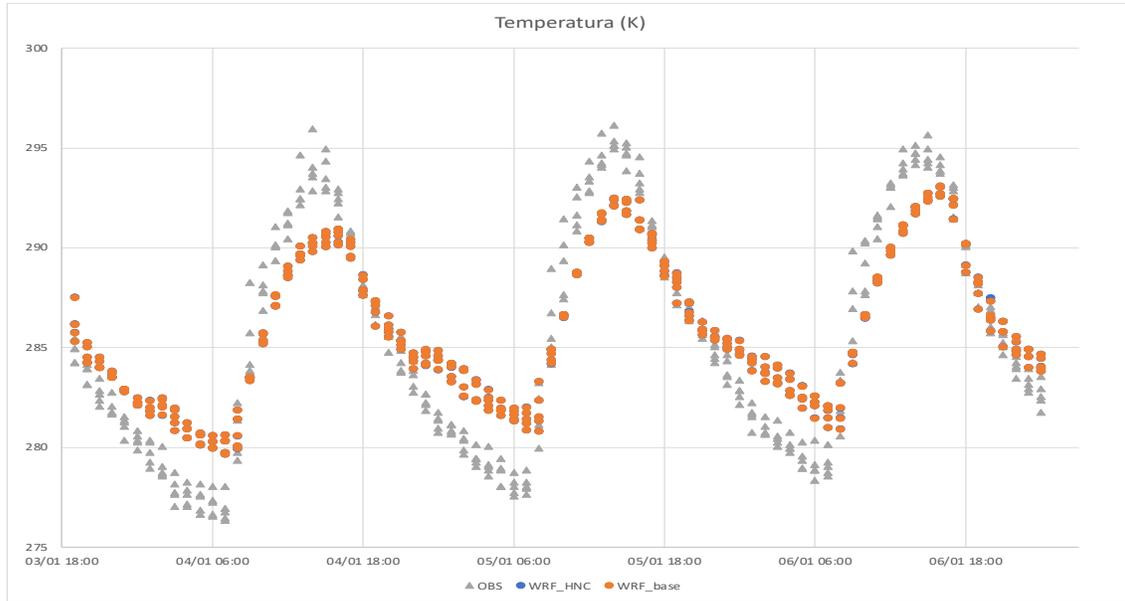
7.1.2.1. Resultados de la modelación fotoquímica

Se presentan las comparaciones de los resultados del escenario base (WRF) y el escenario de la implementación del Acuerdo de Hoy No Circula (WRF_HNC) y las observaciones (OBS) de los datos obtenidos a través Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Se realizan las comparaciones para la temperatura, monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃) para los periodos simulados en los meses de enero, mayo y octubre del 2019.

Periodo del 4 al 6 de enero del 2019

Para ambos escenarios modelados fotoquímicamente (escenario base y escenario HNC), los datos de los parámetros meteorológicos son los mismos. La Figura 24 muestra el perfil temporal de temperaturas obtenido con la modelación comparado con los datos observados. En cuanto a temperatura se tiene una subestimación en las temperaturas máximas y una sobrestimación en las temperaturas mínimas.

Figura 24. Perfil temporal de temperaturas del modelo y observaciones. Periodo 4-6 de enero de 2019.



Las métricas estadísticas entre el modelo y las observaciones se presentan en la Tabla 19, el Error Cuadrático Medio, el coeficiente de correlación de Pearson (valor cercano a 1 representa alto grado de correlación), el coeficiente de eficiencia (1 modelo perfecto, 0 no pudo predecir y negativo es menos efectivo que la media observada para predecir la variación de las observaciones), el índice de concordancia (1 representa una concordancia perfecta entre el modelo y observaciones).

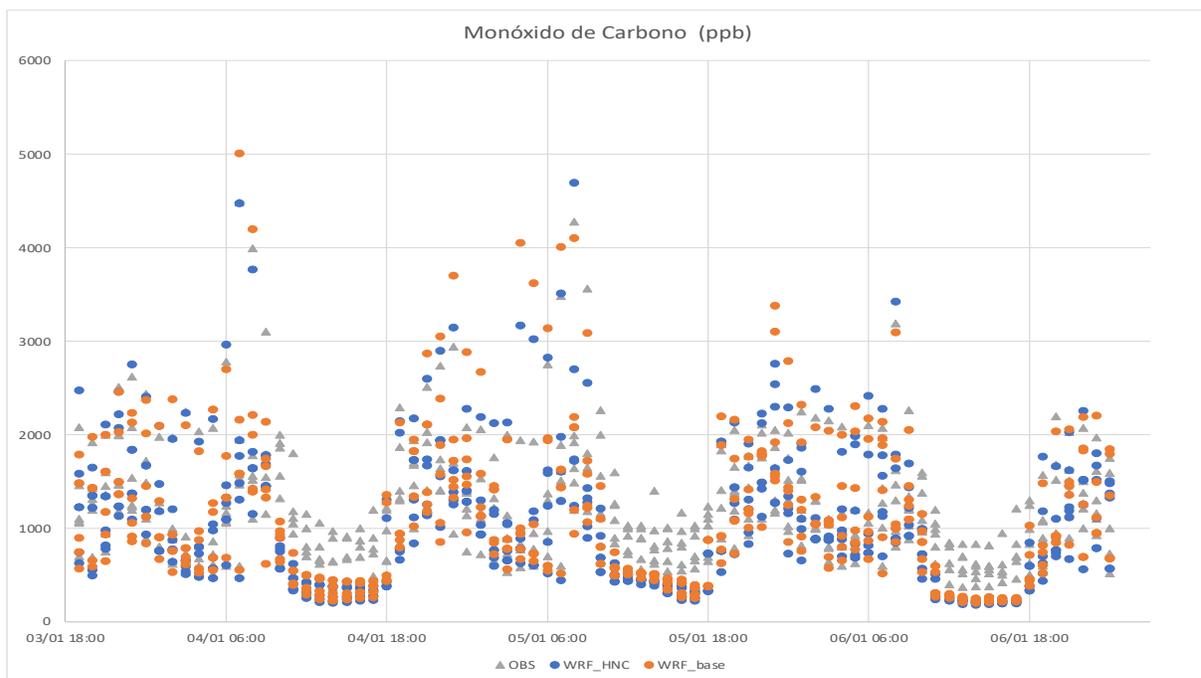
De esta tabla destaca que el escenario simulado tiene una buena relación para el O₃, CO y para la temperatura.

Tabla 19. Coeficientes de correlación entre los resultados de la modelación y los observados para el periodo del 4 al 6 de enero de 2019.

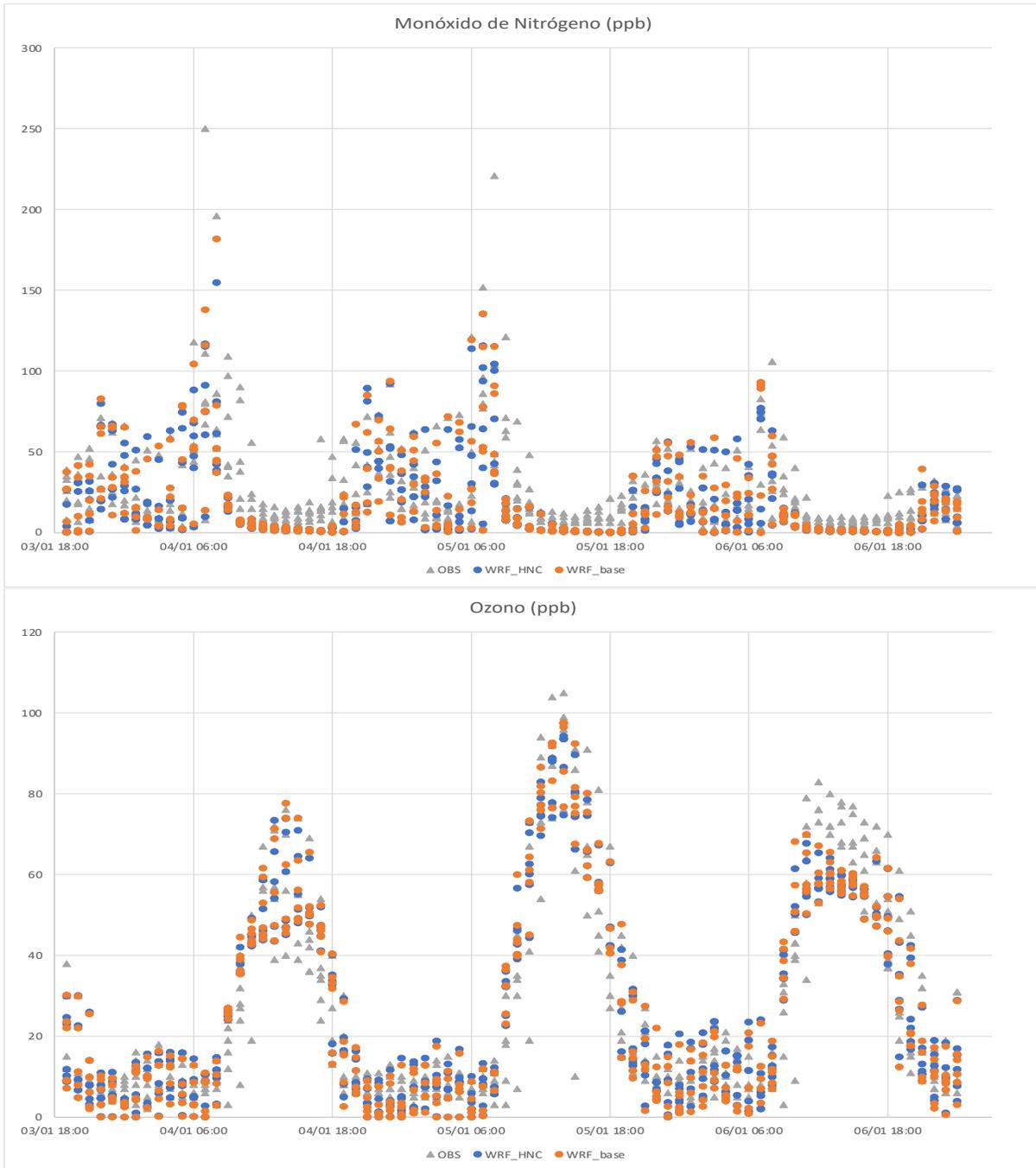
| Variable | Error cuadrático Medio | Correlación de Pearson | Coefficiente de Eficiencia | Índice de concordancia |
|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|
| O ₃ | 8.6 | 0.943 | 0.755 | 0.878 |
| Temperatura | 2.4 | 0.961 | 0.588 | 0.794 |
| CO | 432.5 | 0.835 | 0.304 | 0.652 |
| NO ₂ | 12.5 | 0.616 | 0.050 | 0.525 |
| SO ₂ | 2.6 | 0.414 | -0.090 | 0.455 |

La Figura 25 muestra la comparación de los perfiles temporales de CO, NO y O₃ para el escenario base (WRF_base), escenario HNC (WRF_HNC), y datos observados (OBS), de esta figura destaca la gran correlación que existe entre los tres grupos de datos para el O₃. También en la gráfica se observa que los valores de concentraciones obtenidos en el escenario WRF_HNC son menores que los del escenario base y que los observados.

Figura 25. Perfil temporal de CO, NO y O₃: Observado, Escenario base y Escenario HNC. Periodo 4-6 de enero de 2019.



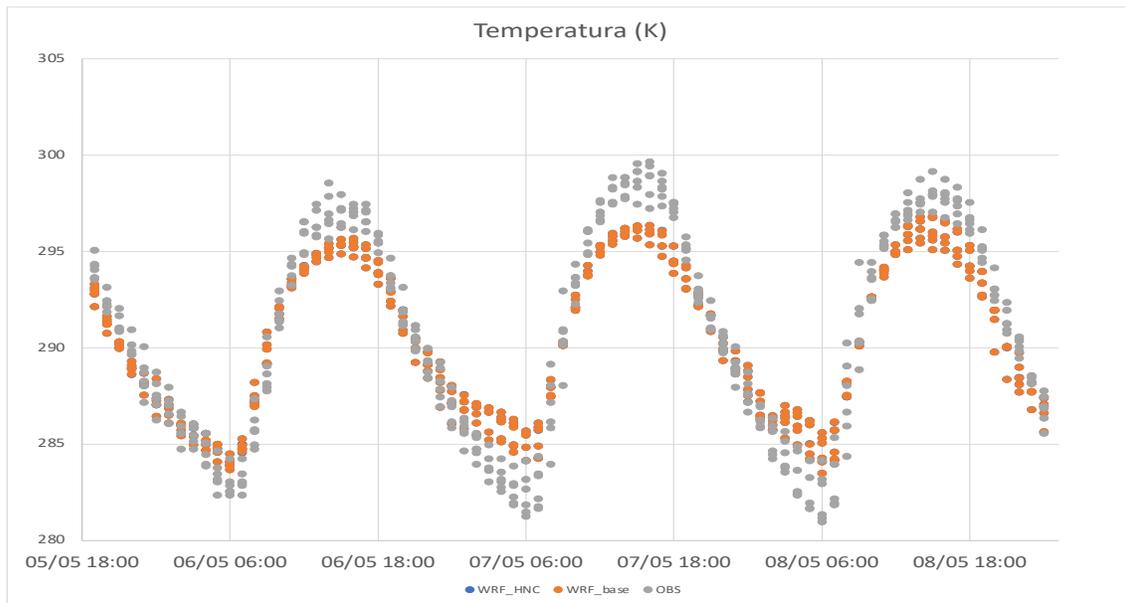
ESTUDIO PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA “HOY NO CIRCULA”.



Periodo del 6 al 8 de mayo del 2019

El perfil temporal de temperaturas modelado comparado con el observado, se muestra en la Figura 26, en cuanto a la temperatura modelada se tiene una subestimación en las temperaturas máximas y una sobrestimación en las temperaturas mínimas.

Figura 26. Perfil temporal de temperaturas del modelo y observaciones. Periodo 6-8 de mayo de 2019.



Las correlaciones entre los resultados del modelo y los datos observados se muestran en la Tabla 20, en esta tabla se muestran las métricas estadísticas del Error Cuadrático Medio, el coeficiente de correlación de Pearson (valor cercano a 1 representa alto grado de correlación), el coeficiente de eficiencia (1 modelo perfecto, 0 no pudo predecir y negativo es menos efectivo que la media observada para predecir la variación de las observaciones), el índice de concordancia (1 representa una concordancia perfecta entre el modelo y observaciones).

De esta tabla destaca que el escenario simulado tiene una buena correlación para el CO, NO₂, O₃ y para la temperatura.

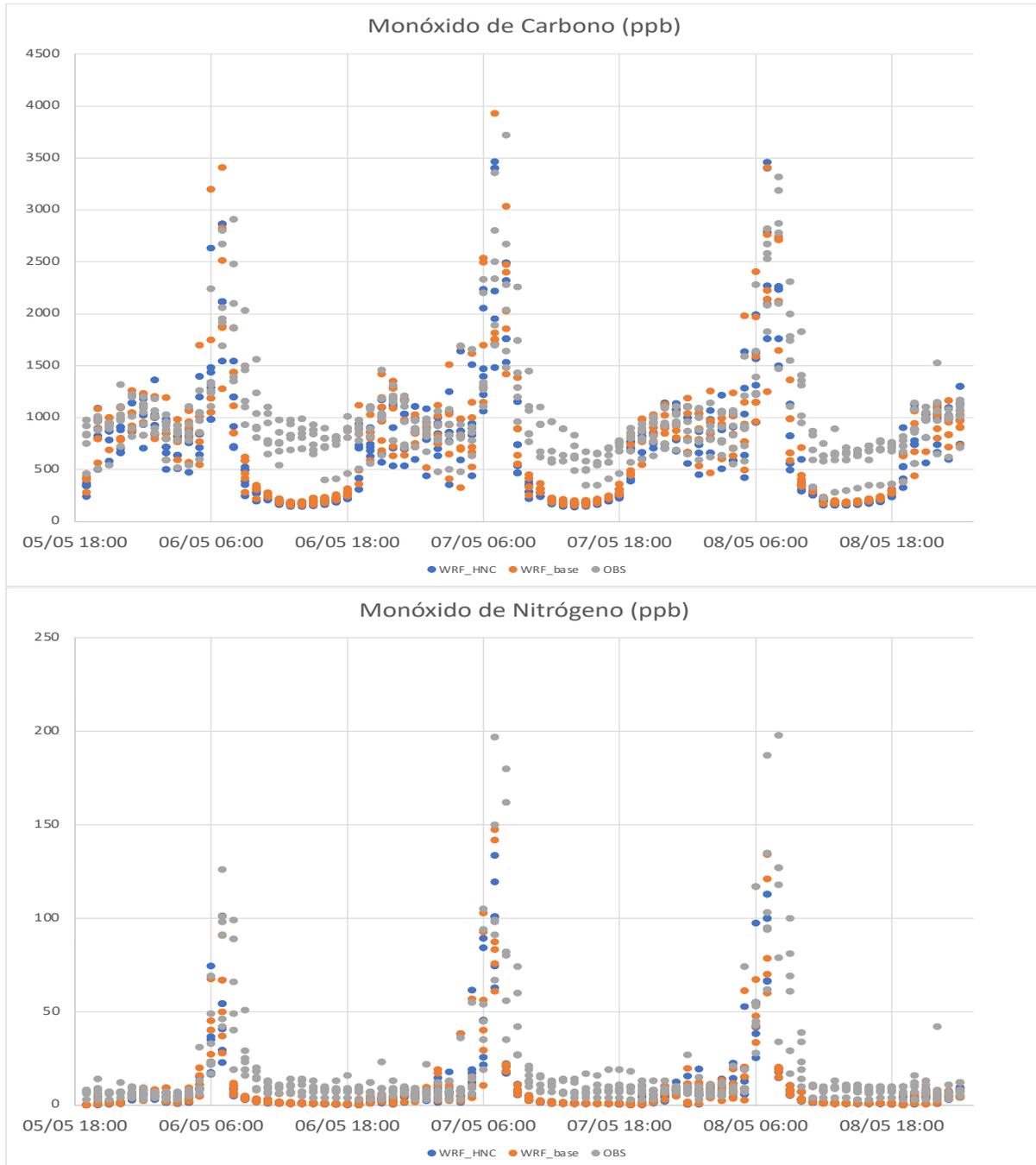
Tabla 20. Coeficientes de correlación entre los resultados de la modelación y los observados para el periodo del 6 al 8 de mayo de 2019.

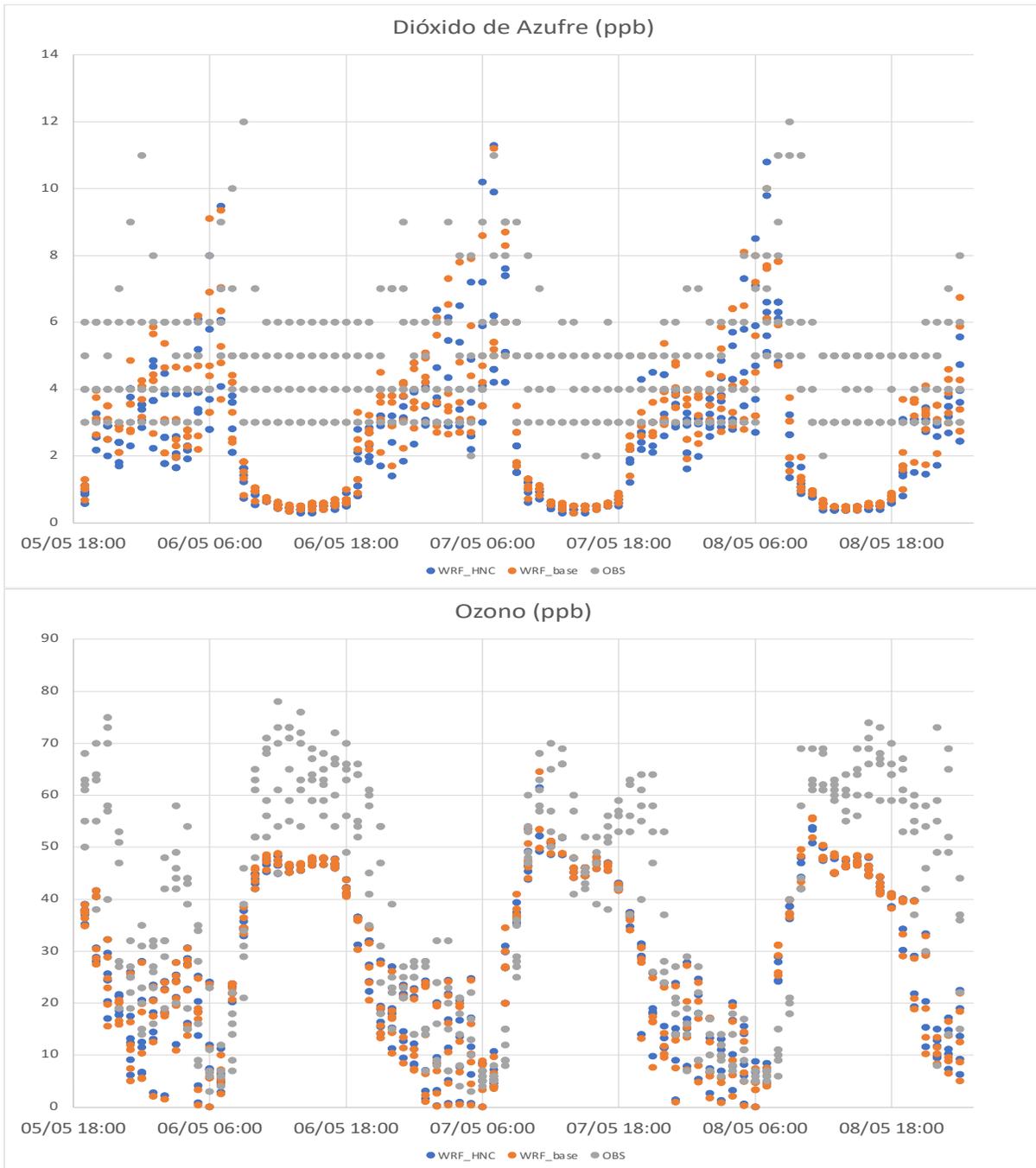
| Variable | Error cuadrático Medio | Correlación de Pearson | Coefficiente de Eficiencia | Índice de concordancia |
|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|
| O ₃ | 18.4 | 0.764 | 0.328 | 0.664 |
| Temperatura | 1.8 | 0.980 | 0.688 | 0.844 |
| CO | 421.0 | 0.808 | 0.104 | 0.552 |
| NO ₂ | 9.1 | 0.769 | 0.368 | 0.684 |
| SO ₂ | 2.6 | 0.543 | -0.421 | 0.289 |

La información de monitoreo de las concentraciones de SO₂ posee valores bajos en ppb, están redondeadas a enteros lo cual no permite una comparación detallada con el modelo, lo que se puede apreciar es que los picos de concentraciones y la magnitud del SO₂ obtenida por el modelo se encuentran en horas y con magnitudes de concentraciones similares.

La Figura 27 muestra la comparación de los perfiles temporales de CO, NO, SO₂ y O₃ para el escenario base (WRF_base), escenario HNC (WRF_HNC), y datos observados (OBS), de esta figura destaca la correlación que existe entre los tres grupos de datos para el CO, NO y O₃, mientras que para SO₂ existen una gran dispersión entre los datos simulados respecto a los observados. Referente al O₃, en la Figura 26 se observa que prácticamente no hubo una reducción de concentración de O₃ para el periodo simulado en los días de mayo.

Figura 27. Perfil temporal de CO, NO, SO₂ y O₃: Observado, Escenario base y Escenario HNC. Periodo 6-9 de mayo de 2019.

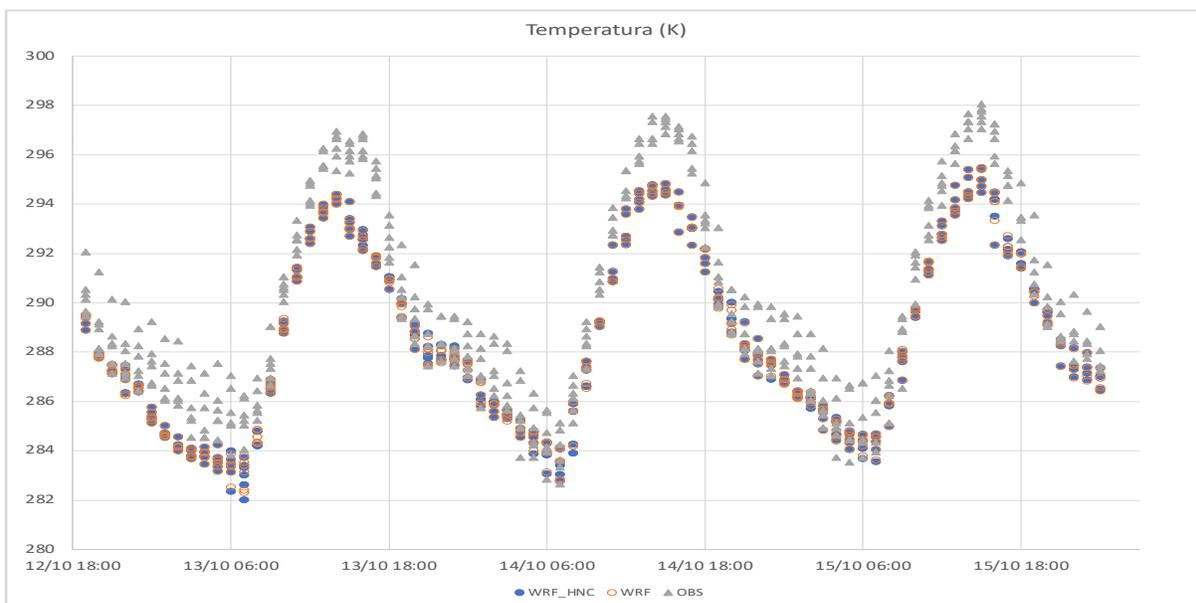




Periodo del 13 al 15 de octubre de 2019

El perfil temporal de temperaturas modelado comparado con el observado, se muestra en la Figura 28. Para este mes de octubre, la temperatura proveniente del modelo tiene una subestimación en las temperaturas comparadas con las observadas.

Figura 28. Perfil temporal de temperaturas del modelo y observaciones. Periodo 6-8 de mayo de 2019.



Las correlaciones entre los resultados del modelo y los datos observados se muestran en la Tabla 21, en esta tabla se muestran las métricas estadísticas del Error Cuadrático Medio, el coeficiente de correlación de Pearson (valor cercano a 1 representa alto grado de correlación), el coeficiente de eficiencia (1 modelo perfecto, 0 no pudo predecir y negativo es menos efectivo que la media observada para predecir la variación de las observaciones), el índice de concordancia (1 representa una concordancia perfecta entre el modelo y observaciones). De esta tabla destaca que el escenario simulado tiene una buena correlación para el O₃ y la temperatura.

Tabla 21. Coeficientes de correlación entre los resultados de la modelación y los observados para el periodo del 13 al 15 de octubre.

| Error cuadrático Medio | Correlación de Pearson | Coefficiente de Eficiencia | Índice de concordancia | Error cuadrático Medio |
|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| O ₃ | 10.79 | 0.87 | 0.574 | 0.79 |
| Temperatura | 1.857 | 0.97 | 0.552 | 0.78 |
| CO | 359.1 | 0.61 | -0.12 | 0.44 |
| NO ₂ | 9.037 | 0.51 | -0.38 | 0.31 |
| SO ₂ | 1.961 | 0.37 | -0.26 | 0.37 |

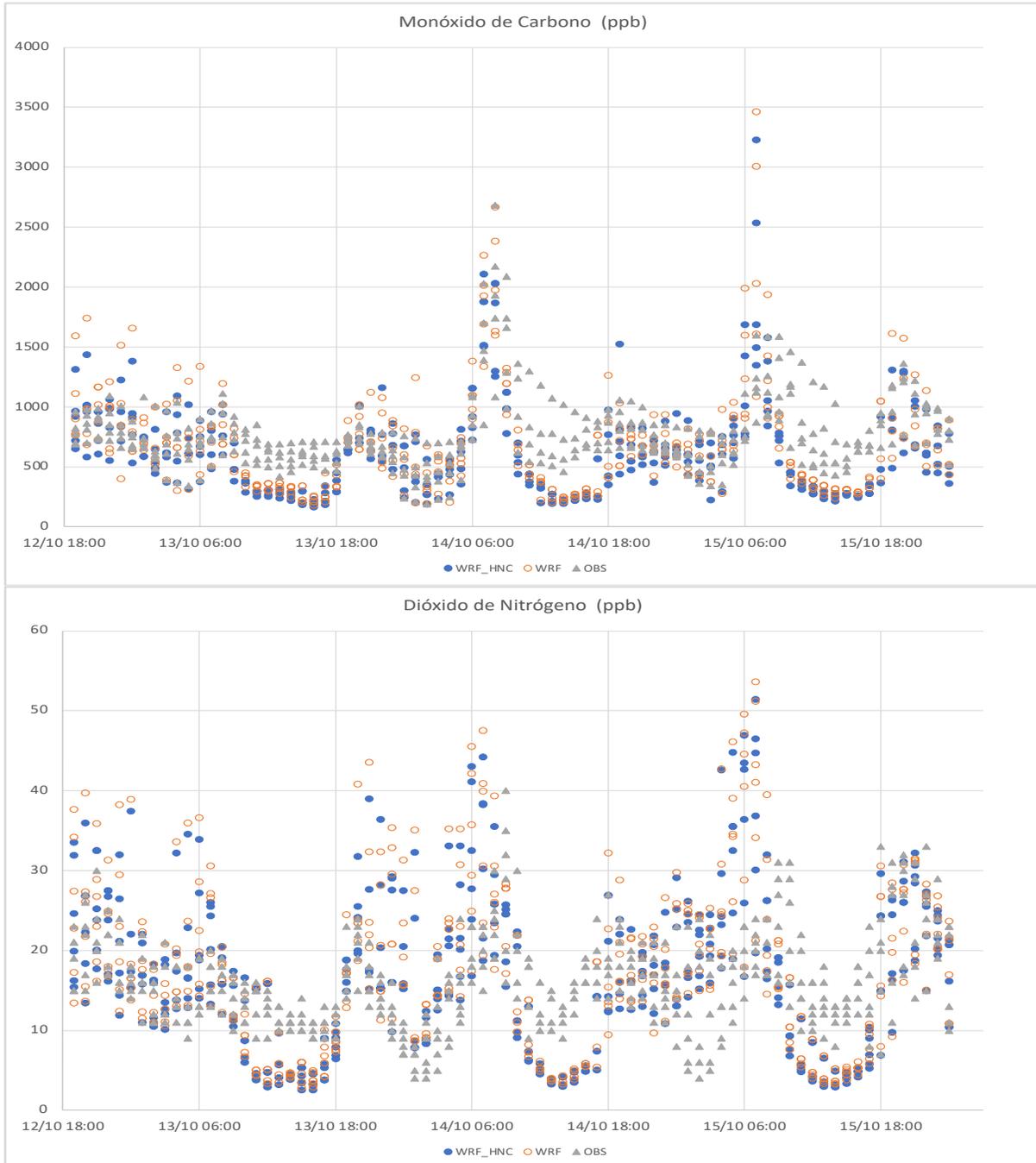
En este período se observa que las concentraciones de NO₂ y CO en las horas pico son mayores que las observadas (Figura 28), debido a esto el Coeficiente de Eficiencia y el índice de Concordancia reducen su magnitud, aunque los coeficientes de correlación son superiores a 0.5.

La Figura 29 muestra la comparación de los perfiles temporales de CO, NO₂, SO₂ y O₃ para el escenario base (WRF_base), escenario HNC (WRF_HNC), y datos observados (OBS), de esta figura destaca la correlación que existe entre los tres grupos de datos para el O₃. Para el CO, el comportamiento de los datos sigue la misma tendencia, pero para horas pico las concentraciones observadas son mayores que las simuladas, para el NO₂, se muestra una correlación apenas mayor a 0.5 lo cual se refleja en el comportamiento de los datos simulados con respecto a los observados que se presentan en la Figura 28.

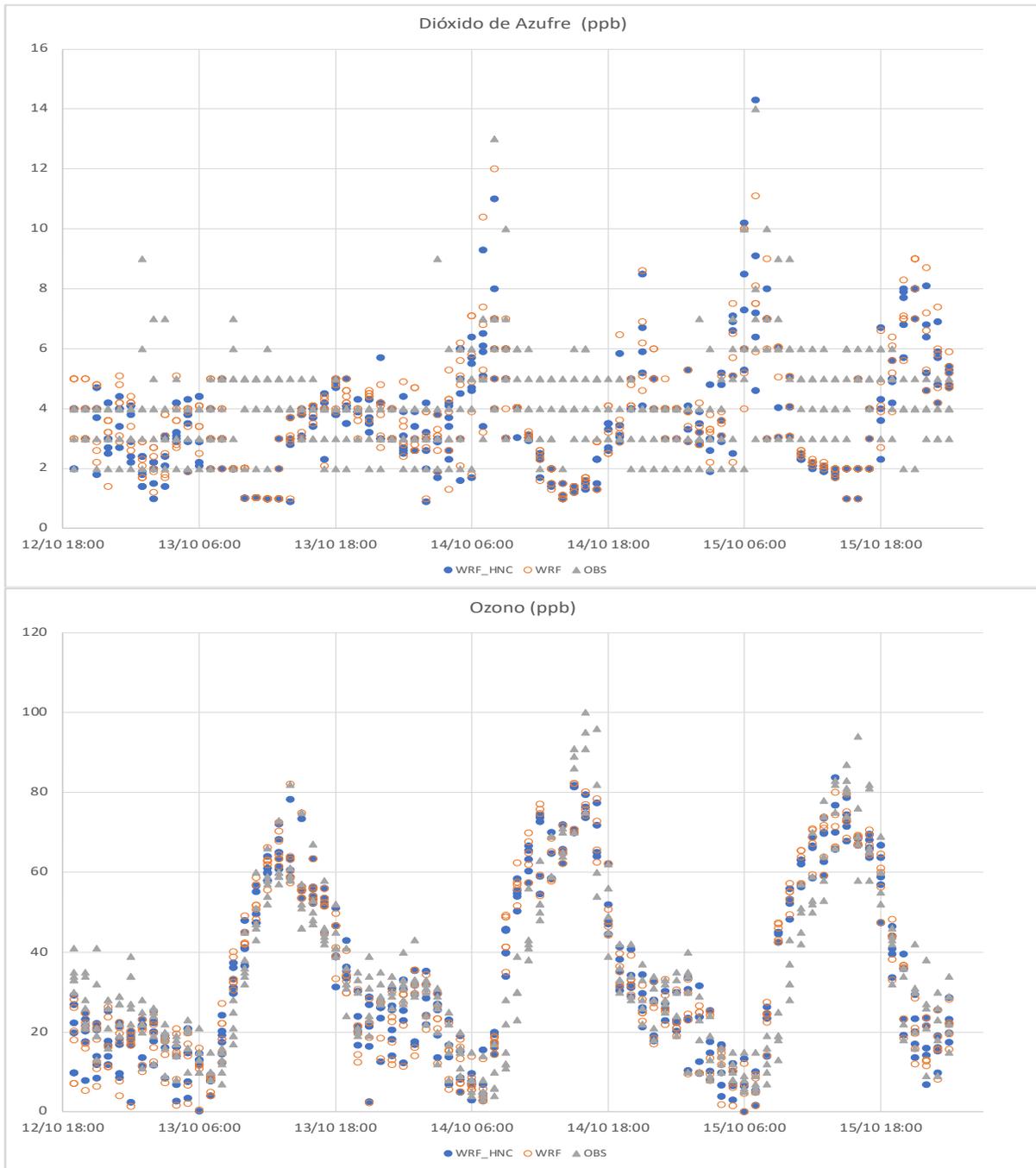
En las concentraciones de contaminantes primarios, como se puede observar, se tiene una reducción en la concentración ambiental cuando se aplica el HNC, en el caso del O₃ ocurre en una menor proporción durante las horas de luz y en la noche se observa un ligero incremento.

Los resultados de O₃ muestran una subestimación en las horas donde se presentan las concentraciones mayores entre las 10 y 15 horas, en el caso del día 7 de mayo se observa un segundo pico durante la tarde lo que muestra que es O₃ producido fuera de la ZMVT y llega a medirse durante la tarde.

Figura 29. Perfil temporal de CO, NO₂, SO₂ y O₃: observado, Escenario base y Escenario HNC. Periodo 13-15 de octubre de 2019.



ESTUDIO PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA "HOY NO CIRCULA".

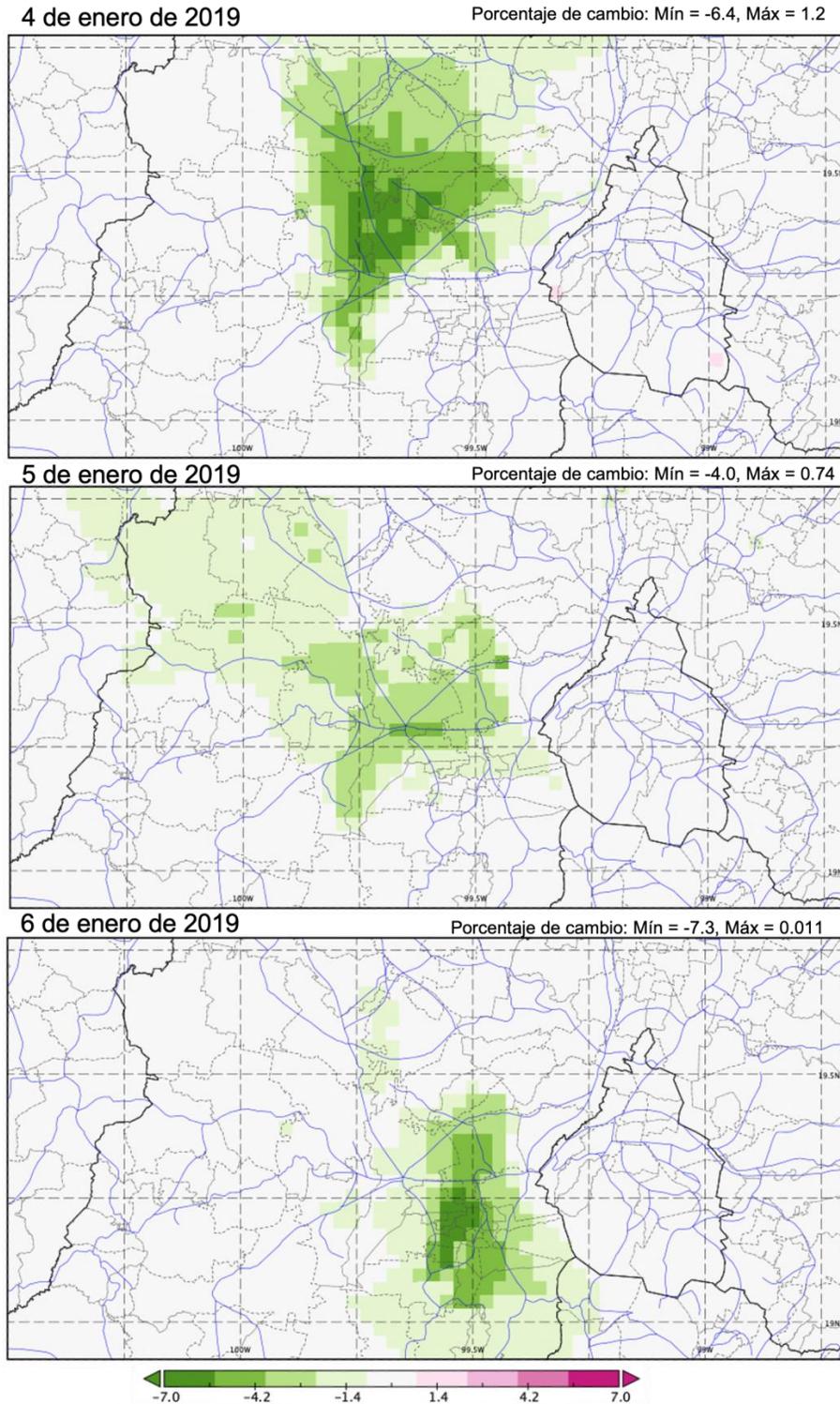


7.1.2.2. Distribución espacial en las concentraciones de contaminantes por la aplicación del programa “Hoy No Circula”.

En las siguientes ilustraciones se muestran las zonas donde se tiene influencia por el cambio en las emisiones debido a la aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula (HNC) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

En la Figura 30 se presenta el porcentaje de cambio de ozono (O_3) para el periodo del 4 al 6 de enero de 2019, se aprecia que las zonas donde se observa cambio en las concentraciones están cercanas a la zona urbana. En el caso de enero se advierte que las reducciones de O_3 van del 4 hasta 7.3%.

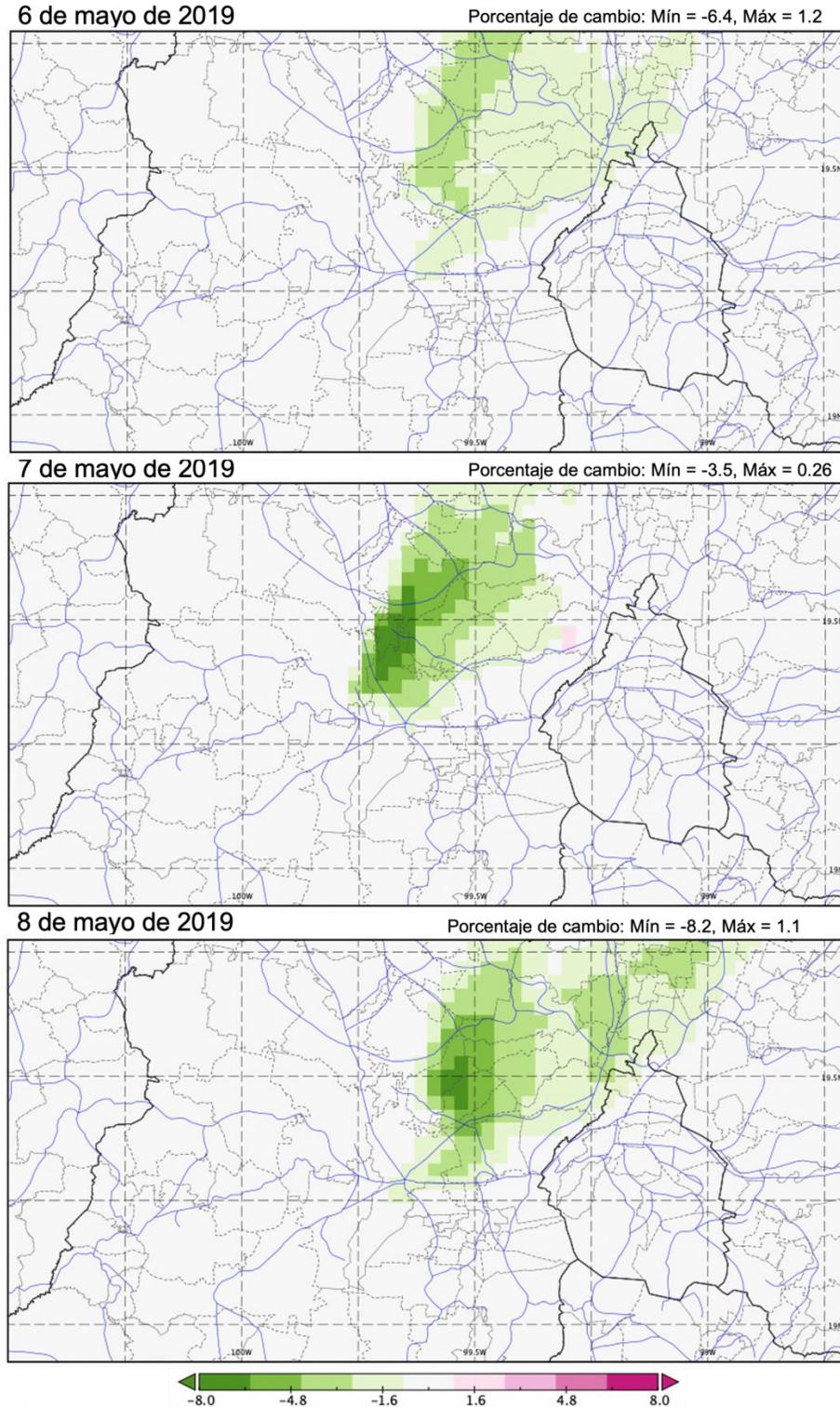
Figura 30. Porcentaje de cambio de Ozono, para los días 4, 5 y 6 de enero de 2019 de 10 a 15 horas.



Para mayo se observa en la Figura 31, que el O₃ disminuye sotavento (hacia donde se dirige el viento) de la región donde se tiene la reducción en las emisiones, esto ocurre durante las horas donde se tiene concentraciones mayores que comprende de las 10 a 15, para cada día siendo que en este episodio las concentraciones poseen reducciones de entre 3.5% a un 8.2%. En contraste en la zona donde ocurren las reducciones de emisiones se observan porcentajes de disminución marginales y en algunos casos incrementos hasta del 1%.

Debido a que el viento transporta los contaminantes generados en la ZMVT hacia el noreste implica que la mala calidad del aire observada por la red de monitoreo proviene de otras regiones y no es generada localmente. Así para mejorar la calidad del aire en la temporada de incendios se ha de requerir de emplear otras técnicas de limpieza de los terrenos agrícolas, las cuales reduzcan la emisión de contaminantes por incendio. Así la estrategia que se podría sugerir es la de picar en vez de quemar el material vegetal en las áreas agrícolas.

Figura 31. Porcentaje de cambio de Ozono, para los días 6, 7 y 8 de mayo de 2019, 10 a 15 horas.



En el caso del mes de mayo se tiene un conjunto de incendios a barlovento (dirección de donde viene el viento), emisiones que inciden en el registro de concentraciones en las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la ZMVT, las cuales registraron un incremento en las concentraciones de ozono como se puede apreciar en la imagen de satélite.

Figura 32. Incendios durante el 9 de mayo de 2019.

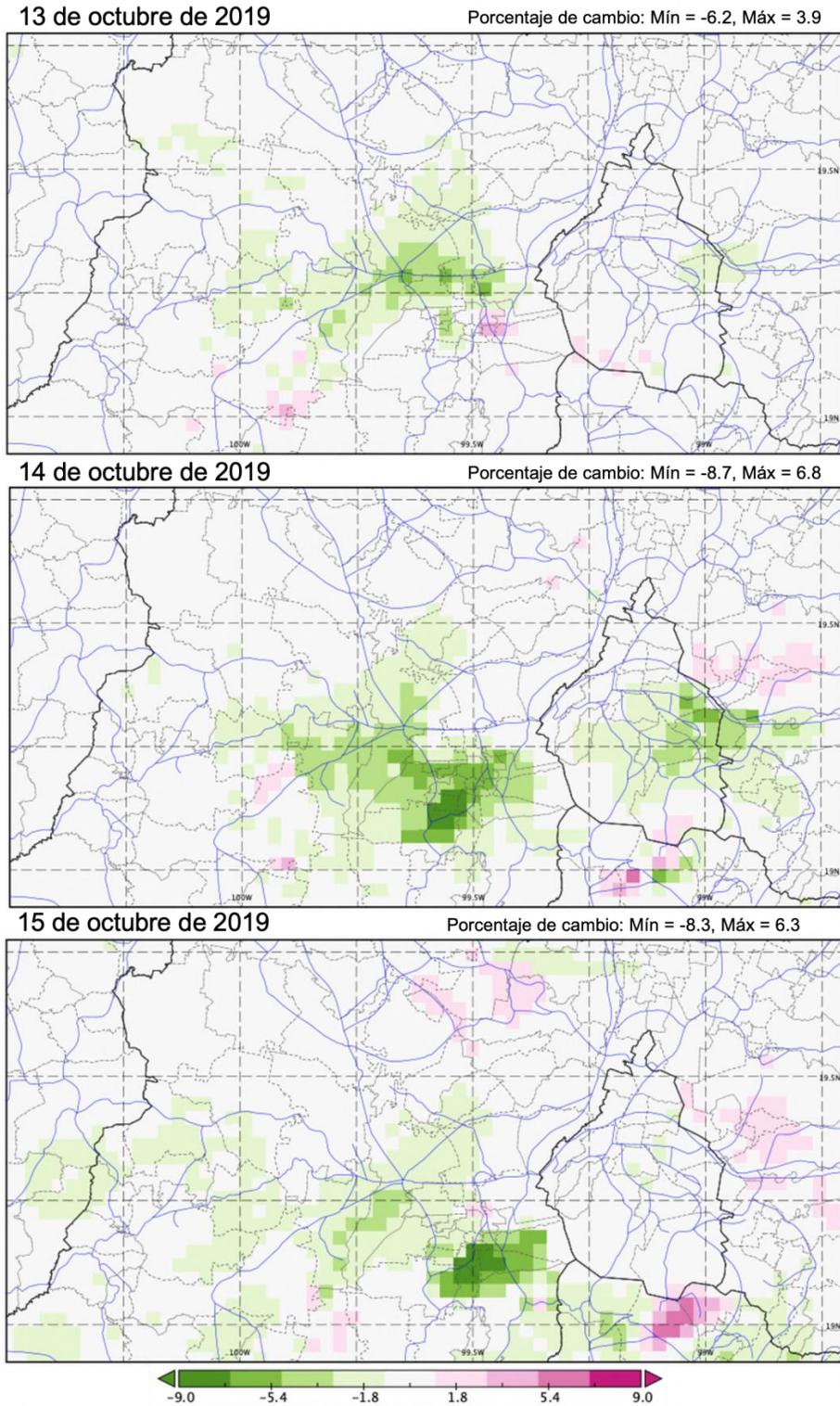


Fuente: Imagen a partir de Earth Observatory, NASA, 9 mayo 2019.¹⁶

Durante el período de octubre (Figura 33), se observa que las concentraciones de ozono sobre la ZMVT se pueden ver influenciadas por los cambios de emisiones y poseen los valores más altos de reducción desde 6.2 hasta 8.3%.

¹⁶ <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145043/fires-burn-in-guerrero-mexico>

Figura 33. Porcentaje de cambio de Ozono, para los días 6, 7 y 8 de octubre de 2019, 10 a 15 horas.



7.2. Evaluar la viabilidad de implementar el Programa “Hoy No Circula” en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

En base a los resultados de la reducción de emisiones vehiculares al aplicar el Acuerdo de Hoy No Circula HNC (ver Tabla 22), el impacto que tienen estas reducciones en las concentraciones de ozono es significativa (ver Tabla 23).

Tabla 22. Porcentaje de reducciones de emisiones vehiculares por aplicación del Acuerdo de HNC.

| Compuesto | | Δ de reducción de emisiones en el Escenario 2 | |
|--------------------------------|-------------------|---|----------------|
| | | Porcentaje | Toneladas /año |
| Partículas de 10 mm | PM ₁₀ | 20.8% | 401 |
| Partículas de 2.5 mm | PM _{2.5} | 20.1% | 190 |
| Dióxido de azufre | SO ₂ | 17.9% | 19 |
| Monóxido de carbono | CO | 18.6% | 23,028 |
| Óxidos de nitrógeno | NO _x | 14.9% | 3,673 |
| Compuestos Orgánicos Volátiles | COV | 20.8% | 3,415 |
| Amoníaco | NH ₃ | 19.4% | 62 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 17.5% | 1,078,345 |
| Metano | CH ₄ | 15.6% | 102 |
| Carbono negro | CN | 14.5% | 45 |

Referente a los resultados de la modelación fotoquímica, para los episodios modelados, en los meses de enero y mayo se tiene una reducción directa de ozono en la ZMVT, para el episodio del mes de octubre, se tiene los mayores porcentajes de reducción de O₃, sin embargo, también se presentan el mayor % de incremento de O₃, principalmente en los municipios o territorio fuera del Estado de México.

Por lo anterior y lo presentado en la Tabla 22, la inclusión de los 17 municipios de la ZMVT al Acuerdo de HNC sería factible para la calidad del aire del Valle de Toluca, sin embargo, se tendrá que considerar el efecto adverso que pudiera ocasionar en otros municipios del mismo Estado de México, o en las entidades vecinas.

Tabla 23. Porcentajes de reducción y/o aumento de O₃ por la aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula

| Periodo de modelación | Porcentaje de reducción de O ₃ y zona de mayor incidencia | Porcentaje de aumento de O ₃ y zona de mayor incidencia |
|-----------------------|---|--|
| 4 de enero de 2019 | 6.4% en la ZMVT | 1.2% en Cuajimalpa de Morelos y Milpa alta |
| 5 de enero de 2019 | 4.0% en la Zona urbana de Toluca, Metepec y zona Norte de Lerma | 0.74% valor no significativo por ser puntual |
| 6 de enero de 2019 | 7.3% principalmente en Toluca, Metepec y Calimaya. | 0.011% valor no significativo |
| 6 de mayo de 2019 | 6.4% Municipios al norte de Toluca: Oztolotepec, Temoaya, Jiquipilco, Villa del Carbón | 1.2% valor no significativo por ser puntual |
| 7 de mayo de 2019 | 3.5% Norte de Toluca, y municipios de Temoaya y Jiquipilco | 0.26% aumento en el municipio de Naucalpan de Juárez. |
| 8 de mayo de 2019 | 8.2% en los municipios del norte de Toluca: Temoaya y Oztolotepec | 1.1% valor no significativo, por ser puntual. |
| 13 de octubre de 2019 | 6.2% en los municipios del norte de Toluca: Temoaya y Oztolotepec | 3.9% aumento en Xalatlaco, Capulhuac, Atizapán, Almoloya del Río, en algunas de las alcaldías del sur de Ciudad de México, así como en los municipios de Coatepec Harinas, Texcaltitlán y Temascaltepec. |
| 14 de octubre de 2019 | 8.7% en los municipios de la ZMVT, en gran parte de Ciudad de México y los municipios de Nezahualcóyotl, La Paz y Valle de Chalco Solidaridad | 6.8%, aumentos en el O ₃ en el norte del estado de Morelos, en algunos municipios del Estado de México: Ecatepec de Morelos, Atenco, Texcoco. |
| 15 de octubre de 2019 | 8.3%, principales reducciones en los municipios de Atizapán, Xalatlaco y Almoloya del Río. En general reducción de emisiones en la ZMVT. | 6.3%, aumentos en O ₃ principalmente en la zona norte del estado de Morelos. |

7.3. Actualizar el Acuerdo del Programa “Hoy No Circula”

Como ya se mencionó en la sección anterior “5.2. Evaluar la viabilidad de implementar el Programa “Hoy No Circula” en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)”, para la calidad del aire de la ZMVT resulta benéfico el implementar el Acuerdo de HNC, sin embargo, no hay que descartar, que municipios fuera de esta zona, o incluso territorio de las entidades vecinas al Estado de México puede verse afectado en el incremento de ozono (O₃). En caso de que se tome la decisión de implementar el Acuerdo en la ZMVT, el mismo deberá registrar modificaciones en los apartados que se indican en la Tabla 24, donde los párrafos sombreados en color verde son textos a añadir en la actualización del acuerdo.

Tabla 24. Porcentajes de reducción y/o aumento de O₃ por la aplicación del Acuerdo de Hoy No Circula

| Sección o cláusula | Párrafo para modificar o complementar | Cambio sugerido |
|--------------------------|---|--|
| Título del Acuerdo | ACUERDO QUE ESTABLECE LAS MEDIDAS PARA LIMITAR LA CIRCULACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AUTOMOTORES EN LOS MUNICIPIOS CONURBADOS DEL ESTADO DE MÉXICO DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO (ZMVM) (HOY NO CIRCULA) PARA CONTROLAR Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS. | ACUERDO QUE ESTABLECE LAS MEDIDAS PARA LIMITAR LA CIRCULACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AUTOMOTORES EN LOS MUNICIPIOS CONURBADOS DEL ESTADO DE MÉXICO DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO (ZMVM) Y DE LOS MUNICIPIOS DEL VALLE DE TOLUCA (HOY NO CIRCULA) PARA CONTROLAR Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS. |
| 1er. párrafo del Acuerdo | Actualizar nombre del Secretario de Medio Ambiente | Ing. Jorge Rescala Pérez, Secretario del Medio Ambiente del Estado de México, con fundamento en los artículos, ... |
| 2do. párrafo del Acuerdo | Que es necesario que el Gobierno del Estado de México en coordinación con la sociedad sumen esfuerzos y sean corresponsables en el propósito de disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera ... que circulen dentro de los municipios conurbados de la Zona Metropolitana de Valle de México (ZMVM). | Que es necesario que el Gobierno del Estado de México en coordinación con la sociedad sumen esfuerzos y sean corresponsables en el propósito de disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera ... que circulen dentro de los municipios conurbados de la Zona Metropolitana de Valle de México (ZMVM), así como de los municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). |
| 4to. párrafo del Acuerdo | Que el presente acuerdo aplica a dieciocho municipios conurbados del Estado de México los cuales se mencionan a continuación: Atizapán de Zaragoza, Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Chalco, Chimalhuacán, Chicoloapan, Ecatepec de Morelos, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, Nicolás | Que el presente acuerdo aplica a dieciocho municipios ... y Valle de Chalco, que se suman 17 municipios del Estado de México al presente acuerdo, los cuales conforman la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y se mencionan a continuación: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, |

| Sección o cláusula | Párrafo para modificar o complementar | Cambio sugerido |
|--------------------------|---|---|
| | Romero, Tecámac, Tlalnepantla de Baz, Tultitlán y Valle de Chalco. | San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec. |
| 6to. párrafo del Acuerdo | Que el Programa para mejorar la calidad el aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (PROAURE) 2011-2020, establece en una de sus medidas, ... | Actualizar con información del ProAire más reciente en la ZMVM y en la ZMVT. |
| 10º párrafo del Acuerdo | Que de acuerdo al inventario de emisiones de la ZMVM, los automotores son responsables de la emisión del 82% de los óxidos de nitrógeno y del 34% de los compuestos orgánicos volátiles, ... | Actualizar el párrafo con la información más actual de los inventarios de emisiones en la ZMVM y en la ZMVT. |
| 11º párrafo del Acuerdo | Que debe fomentarse la introducción ... de mejores combustibles de ultra bajo contenido de azufre en la ZMVM. | Incluir ZMVT en la última línea del párrafo. |
| 14º párrafo del Acuerdo | Que la CAME busca aplicar un enfoque integral en los diagnósticos, análisis y acciones a implementarse.... en la región, que se extiende a Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala. | Actualizar Distrito Federal por Ciudad de México e incluir Querétaro. |
| QUINTO | La aplicación y levantamiento de las limitaciones de circulación en caso de Contingencia Ambiental Atmosférica, ... Municipios Conurbados de la Zona Metropolitana del Valle de México vigente y su manual de aplicación. | Incluir: ... "o en su caso del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca". |
| DÉCIMO | Los conductores de vehículos que circulen en las vialidades de los dieciocho municipios conurbados del Estado de México... | Los conductores de vehículos que circulen en las vialidades de los dieciocho municipios conurbados del Estado de México y de los 17 municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca que infrinjan ... |
| TRANSITORIOS SEGUNDO | El presente Acuerdo entrará en vigor el ... | El presente Acuerdo entrará en vigor el día ___ de ___ de dos mil ___. |
| TRANSITORIOS CUARTO | Entrando en vigor el presente acuerdo se deja sin efectos el acuerdo ... | Entrando en vigor el presente acuerdo se deja sin efectos el acuerdo que establece las medidas ..., publicado en el periódico oficial "Gaceta del Gobierno" el 01 de julio de 2014. |

8. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) existen problemas de calidad del aire, en específico por ozono (O_3) y partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$), esto como resultado de los indicadores de calidad del aire del cumplimiento de la norma. En donde las concentraciones de los contaminantes primarios como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), están relacionados con la actividad vehicular. La categoría vehicular que genera la mayor cantidad de emisiones en la ZMVT son los vehículos de uso particular, y no solo porque son la flota de mayor número, sino también por la antigüedad de la misma, ya que el 30% tiene una antigüedad de más de 20 años.

El análisis de calidad del aire muestra que existe una relación entre los indicadores de NO_x y CO con la actividad vehicular, lo que se demuestra con el comportamiento horario de estos contaminantes, ya que en las horas “pico” o de mayor flujo de vehículos, se incrementa su concentración en la atmósfera. Respecto al ozono (O_3), a lo largo de la semana se mantiene en niveles similares de concentración, esto seguramente porque la atmósfera se encuentra saturada y se requiere una reducción considerable en NO_x y demás precursores para observar una reducción.

Al modelar el escenario para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, bajo el cual se aplica actualmente el Acuerdo de Hoy No Circula (HNC) en el Valle de México, se obtiene una reducción de emisiones del 21% en NO_x y 13% de COV, principales precursores de la formación de ozono. Con este cambio en la emisión de contaminantes, y aplicando modelación fotoquímica, se obtiene una reducción máxima de hasta el 8% en la concentración de ozono para la ZMVT.

Por lo antes expuesto, la inclusión de los 17 municipios que integran la Zona Metropolitana del Valle de Toluca al Acuerdo del programa “Hoy No Circula”, bajo los criterios con que se aplica actualmente en la Zona Metropolitana del Valle de México, mejoraría la calidad del aire de la ZMVT al reducir la concentración ambiental de ozono (O_3).

Recomendaciones

Dado que una de las consideraciones principales para la propuesta de implementación del Acuerdo Hoy No Circula en los municipios del Valle de Toluca, fue que su implementación técnica sea idéntica a la que se utiliza para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM); sin embargo, se ha externado la necesidad de realizar ajustes al Programa HNC de ZMVM, dado que se presume que la cantidad de vehículos que ha dejado de circular en la ZMVM, por la aplicación de este programa, ha disminuido y por lo tanto su impacto en la reducción de emisiones no ha sido el esperado. Por lo anterior es conveniente evaluar y, en su caso, rediseñar el programa HNC para potencializar sus beneficios ambientales, en movilidad y salud pública. Ante esta situación, para la implementación del HNC en ZMVT se sugiere esperar la determinación de un posible rediseño del programa HNC de la ZMVM.

Análisis de los datos arrojados por el Programa de Verificación Vehicular (PVV) de la ZMVT, muestran que vehículos año modelo 1996 – 2000 y 2001 – 2005 cuentan con holograma “0”, cuando, de acuerdo con los criterios que aplican para el programa HNC en el Valle de México, no les correspondería. Por otra parte, prácticamente el 99% de los vehículos año modelo 2006- 2015 cuentan con holograma cero “0”; así como el 91.5% de los vehículos del estrato 2016 a 2022, por lo que se interpreta que acceden a ese tipo de holograma prácticamente en forma automática. Ante esta situación es recomendable revisar los criterios de otorgamiento de hologramas.

Si actualmente se implementara el Acuerdo del HNC en la ZMVT, como se ha indicado en los resultados del actual estudio, se tendrían beneficios en reducción de ozono, sin embargo, es recomendable realizar un estudio técnico de la vigencia del Acuerdo de Hoy No Circula, ya que la mayoría de la flota vehicular cuenta con holograma “0”, y si no se hacen ajustes al otorgamiento de hologramas, la reducción de circulación de vehículos sería mínima.

9. Bibliografía

- CMM, 2014. Centro Mario Molina. Estudio del Sistema Integral de Movilidad Sustentable para el Valle de Toluca. D.F. México. Disponible en: <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2015/01/Documento-de-difusi%C3%B3n-Movilidad-Sustentable-Toluca.pdf>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2022. Programa Hoy No Circula que aplica en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- COFEPRIS, 2017. Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. INE, & SEMARNAT, 2008. Manuales para la elaboración y uso de inventarios de emisiones.
- DAT'S WHY, 2022. Información de perfiles de velocidades a través de sistemas de telemetría.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2010). Norma Oficial NOM-022-SSA1-2010. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. México: Secretaría de Salud. Recuperado de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5158348&fecha=08/09/2010
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (1994a). Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994. México: Secretaría de Salud. Recuperado de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/023ssa13.html>
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (1994b). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de diciembre de 1994. México: Secretaría de Salud. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780110&fecha=23/12/1994
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2014a). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de agosto de 2014. México:
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2014b). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de agosto de 2014. México: Secretaría de Salud. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014

- Gaceta del Gobierno del Estado de México, 2014. Acuerdo que establece las medidas para limitar la circulación de los vehículos automotores en los municipios conurbados del Estado de México de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para controlar y reducir la contaminación atmosférica y contingencias ambientales atmosféricas.
- García-Reynoso, J. A., Mar-Morales, B. E., & Ruiz-Suárez, L. G. (2018). Spatial, temporal and speciation model of the Mexico national emissions inventory (base year 2008) for its use in air quality modeling (DiETE) [Article]. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(4), 635-649. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.07>
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957-6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- Gobierno del Estado de México, 2018. Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México (ProAire 2018-2030). Secretaría del Medio Ambiente. Documento disponible en: <https://proaire.edomex.gob.mx/sites/proaire.edomex.gob.mx/files/files/mis%20pdf/ProAire%202018-2030.pdf>
- Gobierno del Estado de México. Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México. Red de monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de Toluca, https://rama.edomex.gob.mx/san_mateo_atenco
- IGCEM, 2020. Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. Estadísticas básicas municipales para el año 2019. Disponible en: https://igcem.edomex.gob.mx/indole_social
- INE, & SEMARNAT, 2008. Manuales para la elaboración y uso de inventarios de emisiones.
- INE, SEMARNAT, & Western, G. A., 2005. Guía de elaboración y uso de inventario de emisiones.
- INECC, 2020. Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 343 pp.
- INECC, 2019. Informe Nacional de Calidad del Aire 2018, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.
- INECC, 2018. Informe Nacional de Calidad del Aire 2017, México. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. Diciembre 2018.

- INECC, SEMARNAT 2010. Estudio de emisiones y actividad vehicular en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, Estado de México. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112406/2010_CGCSA_RSD_Toluca.pdf
- INEGI, 2022. Censos de población y vivienda, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI, 2021. Vehículo de motor registrados en circulación. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>
- INEGI, 2020. Cuéntame Estado de México. Número de habitantes. Información disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/poblacion/>
- ISSNe: 2500-5200, febrero 16 de 2022.
- J. Loreto, Torres González. La Metrópoli del Valle de Toluca y sus Retos hacia la Sustentabilidad
- María Concepción M. R., 2015. Gobernanza Ambiental: Orígenes y estudios de caso. ISBN: 978-607-402-844-7
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce: NCEP North American Mesoscale (NAM) 12 km Analysis, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, <https://doi.org/10.5065/G4RC-1N91>, 2015. Accessed 11 Oct 2022 and 15 Oct 2022.
- OMS, 2022. Información consultada en: <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
- Rachel WelnbeRgeR., et., 2010. Políticas Estadounidenses de Estacionamiento: una visión general de las estrategias de gestión. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo.
- Restricción vehicular en Chile. Información disponible en: <https://www.mtt.gob.cl/restriccion-vehicular-2022>
- Restricción vehicular en Colombia. Información disponible en: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/pico_y_placa_2022
- SCT, 2020. Estadísticas carreteras para el Estado de México, 2019. Disponibles en: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Datos-Viales-2020/15_MEX_DV2020.pdf
- SEDUO, 2021. Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Gobierno del Estado de México. Numeralia básica de las zonas metropolitanas del Estado de México. CE: 224/02/01/21

Seinfeld y Spiros, 1997. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. ISBN 10: 0471178152 ISBN 13: 9780471178156

SEMARNAT (2016, 2013). Inventario Nacional de Emisiones 2016 y 2013. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>

SMAGEM, 2020a. Base de datos de flota vehicular de vehículos registrados al año 2019.

SMAGEM, 2020b. Base de datos de flota vehicular del Programa de Verificación Vehicular del año 2019.

State of California, 2019. Manual del Automovilista. Department of Motor Vehicles. Información disponible en: www.dmv.ca.gov

The World Bank, 2022. Información consultada en: <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>

USEPA (2014). Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES). User Guide for MOVES2014a. United States Environmental Protection Agency. EPA-420-B-10-036. August 2010.

USEPA, U. (Diciembre de 2018). Moves and Other Mobile Source Emissions Models. Disponible en: <https://www.epa.gov/moves>

Anexo A

Anexo A. Cambios de velocidades por episodios de contingencia en los municipios de Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz, Estado de México

Para conocer el cambio de velocidades de circulación vehicular por el efecto de la aplicación de contingencia, en donde se reduce el número de vehículos en circulación, se obtuvo información de los municipios del Estado de México de Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz referente a las velocidades horarias para un día con contingencia y otro sin contingencia para los años 2021 y 2022, estas velocidades son promedio de toda la zona urbana, y fueron proporcionadas por Dat’s Why que es una empresa dedicada a la obtención y manejo de información de actividad vehicular a través de sistemas de telemetría y uso de modelos de transporte.

Los días seleccionados con contingencia y sin contingencia ambiental para los años 2021 y 2022 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 25. Días SIN y CON contingencia ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México.

| Año | Fecha para velocidades de circulación | | Contaminante | Fase |
|------|---------------------------------------|----------------------------|--------------|------|
| | SIN contingencia | CON contingencia | | |
| 2022 | Martes 26 abril de 2022 | Martes 3 de mayo de 2022 | Ozono | 1 |
| 2021 | Martes 20 de abril de 2021 | Martes 27 de abril de 2021 | Ozono | 1 |

Fuente: Elaboración propia con información de CAME.

Cambios de velocidades horarias en episodios de contingencia ambiental.

Las velocidades horarias para las zonas urbanas de Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz para episodios de contingencia ambiental para los años 2021 y 2022 se muestran en las Tabla 26 y 27. De estas destacan que el promedio del porcentaje de aumento en velocidades para el año 2021 en Naucalpan de Juárez de 1.95%, y para el 2022, 4.44 %; mientras que en Tlalnepantla de Baz fue de 3.53% en el año 2021 y 4.79% para el 2022.

Se observa en estas tablas que en horas pico se alcanzan porcentajes de aumento de velocidad de hasta 9 km/h, mientras que en hora valle son alrededor de 1 km/h. En promedio para las dos zonas en el año 2021, aumentó la velocidad 2.74%, mientras que para el 2022, 4.61% (ver Tabla 28).

Tabla 26. Velocidades horarias para Naucalpan de Juárez en episodios de contingencia ambiental.

| Naucalpan de Juárez | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------------|
| Hora | 2021 | | | | 2022 | | | |
| | Velocidades (km/h) | | | % de aumento de velocidad | Velocidades (km/h) | | | % de aumento de velocidad |
| | Sin contingencia | Con Contingencia | Aumento de velocidad | | Sin contingencia | Con Contingencia | Aumento de velocidad | |
| 6:00 | 26.56 | 27.05 | 0.48 | 1.79 | 22.82 | 23.66 | 0.84 | 3.55 |
| 7:00 | 27.03 | 27.09 | 0.06 | 0.23 | 22.86 | 24.13 | 1.27 | 5.26 |
| 8:00 | 26.48 | 27.00 | 0.52 | 1.92 | 23.14 | 24.43 | 1.28 | 5.25 |
| 9:00 | 26.23 | 27.31 | 1.08 | 3.95 | 23.20 | 23.72 | 0.52 | 2.18 |
| 10:00 | 25.78 | 26.62 | 0.84 | 3.17 | 22.91 | 24.53 | 1.62 | 6.61 |
| 11:00 | 26.81 | 27.24 | 0.43 | 1.57 | 23.41 | 24.16 | 0.75 | 3.11 |
| 12:00 | 26.36 | 27.31 | 0.94 | 3.46 | 22.81 | 24.52 | 1.71 | 6.99 |
| 13:00 | 26.71 | 26.98 | 0.27 | 1.00 | 22.50 | 24.59 | 2.08 | 8.48 |
| 14:00 | 26.23 | 26.98 | 0.75 | 2.76 | 23.32 | 23.71 | 0.38 | 1.62 |
| 15:00 | 26.98 | 27.34 | 0.36 | 1.32 | 22.94 | 23.80 | 0.86 | 3.62 |
| 16:00 | 26.73 | 27.15 | 0.42 | 1.53 | 23.30 | 23.82 | 0.52 | 2.20 |
| 17:00 | 26.91 | 26.83 | -0.08 | -0.31 | 22.52 | 24.16 | 1.63 | 6.77 |
| 18:00 | 26.45 | 27.31 | 0.86 | 3.15 | 23.09 | 23.82 | 0.73 | 3.07 |
| 19:00 | 26.72 | 26.83 | 0.11 | 0.42 | 23.31 | 24.42 | 1.11 | 4.56 |
| 20:00 | 26.60 | 27.06 | 0.46 | 1.68 | 22.85 | 24.11 | 1.26 | 5.24 |
| 21:00 | 26.34 | 27.16 | 0.82 | 3.03 | 23.56 | 24.06 | 0.50 | 2.06 |

| Naucalpan de Juárez | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------------|
| Hora | 2021 | | | | 2022 | | | |
| | Velocidades (km/h) | | | % de aumento de velocidad | Velocidades (km/h) | | | % de aumento de velocidad |
| | Sin contingencia | Con Contingencia | Aumento de velocidad | | Sin contingencia | Con Contingencia | Aumento de velocidad | |
| 22:00 | 26.16 | 26.80 | 0.64 | 2.40 | 23.14 | 24.35 | 1.21 | 4.96 |
| Promedio | 26.53 | 27.06 | 0.53 | 1.95 | 23.04 | 24.12 | 1.08 | 4.44 |
| Valor mínimo | 27.03 | 27.34 | 1.08 | 3.95 | 23.56 | 24.59 | 2.08 | 8.48 |
| Valor máximo | 25.78 | 26.62 | -0.08 | -0.31 | 22.50 | 23.66 | 0.38 | 1.62 |

Fuente: Elaboración propia con información de DAT's Why.

Tabla 27. Velocidades horarias para Tlalnepantla de Baz en episodios de contingencia ambiental.

| Tlalnepantla de Baz | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------------|
| Hora | 2021 | | | | 2022 | | | |
| | Velocidades (km/h) | | | % de aumento de velocidad | Velocidades (km/h) | | | % de aumento de velocidad |
| | Sin contingencia | Con Contingencia | Aumento de velocidad | | Sin contingencia | Con Contingencia | Aumento de velocidad | |
| 6:00 | 25.55 | 25.55 | 0.00 | -0.01 | 22.94 | 24.21 | 1.27 | 5.24 |
| 7:00 | 25.06 | 25.38 | 0.32 | 1.28 | 23.02 | 24.18 | 1.17 | 4.82 |
| 8:00 | 25.03 | 25.38 | 0.35 | 1.39 | 23.51 | 24.38 | 0.88 | 3.59 |
| 9:00 | 25.18 | 25.43 | 0.25 | 1.00 | 23.29 | 24.56 | 1.27 | 5.17 |
| 10:00 | 25.23 | 27.12 | 1.89 | 6.96 | 22.85 | 24.36 | 1.51 | 6.18 |
| 11:00 | 25.30 | 27.35 | 2.05 | 7.49 | 23.27 | 24.19 | 0.92 | 3.79 |
| 12:00 | 25.17 | 27.25 | 2.08 | 7.63 | 23.04 | 24.51 | 1.48 | 6.02 |
| 13:00 | 25.59 | 27.06 | 1.47 | 5.41 | 23.35 | 24.35 | 1.00 | 4.11 |
| 14:00 | 25.34 | 27.84 | 2.50 | 8.99 | 22.80 | 24.44 | 1.64 | 6.72 |
| 15:00 | 25.16 | 26.72 | 1.56 | 5.84 | 23.02 | 24.27 | 1.25 | 5.17 |
| 16:00 | 24.84 | 26.21 | 1.37 | 5.24 | 23.50 | 24.55 | 1.06 | 4.30 |
| 17:00 | 25.76 | 26.33 | 0.57 | 2.18 | 23.03 | 24.34 | 1.31 | 5.38 |
| 18:00 | 25.20 | 25.86 | 0.66 | 2.57 | 23.32 | 24.52 | 1.21 | 4.92 |
| 19:00 | 25.46 | 25.84 | 0.37 | 1.44 | 23.09 | 24.15 | 1.07 | 4.42 |
| 20:00 | 25.30 | 25.32 | 0.02 | 0.07 | 22.78 | 24.14 | 1.36 | 5.64 |
| 21:00 | 25.40 | 25.46 | 0.06 | 0.22 | 23.01 | 23.77 | 0.76 | 3.18 |
| 22:00 | 25.68 | 26.29 | 0.61 | 2.32 | 23.42 | 24.07 | 0.65 | 2.72 |
| Promedio | 25.31 | 26.26 | 0.95 | 3.53 | 23.13 | 24.29 | 1.16 | 4.79 |

| | | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|
| Valor mínimo | 25.76 | 27.84 | 2.50 | 8.99 | 23.51 | 24.56 | 1.64 | 6.72 |
| Valor máximo | 24.84 | 25.32 | 0.00 | -0.01 | 22.78 | 23.77 | 0.65 | 2.72 |

Fuente: Elaboración propia con información de DAT's Why.

Tabla 28. Promedio del porcentaje de aumento de velocidades por episodios en Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla e Baz.

| Año | % de aumento en velocidad | | Promedio en la zona |
|------|---------------------------|---------------------|---------------------|
| | Naucalpan de Juárez | Tlalnepantla de Baz | |
| 2021 | 1.95 | 3.53 | 2.74 |
| 2022 | 4.44 | 4.79 | 4.61 |

Fuente: Elaboración propia con información de DAT's Why.

Cambio de velocidades horarias entre el año 2021 y 2020

El cambio de velocidades entre los años 2021 al 2022 para Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz se muestran en la Tabla 29, se observa que para el año 2022 hubo una reducción en velocidad en promedio en Naucalpan de Juárez de 3.49 km/h, y en Tlalnepantla de Baz de 2.18 km/h, mostrándose en la zona que en horas pico se obtienen reducciones de velocidades de hasta 4.39 km/hora. Lo anterior se justifica porque en el año 2021 aún predominaba el atender varias actividades desde casa, resultando en una reducción de vehículos en circulación.

Tabla 29. Cambio de velocidades entre los años 2021 y 2022 en Naucalpan de Juárez y Tlalnepantla de Baz.

| Hora | Cambio de velocidades entre año 2021 y 2022 (km/h) | |
|-------|--|---------------------|
| | Naucalpan de Juárez | Tlalnepantla de Baz |
| 6:00 | 3.74 | 2.61 |
| 7:00 | 4.16 | 2.04 |
| 8:00 | 3.34 | 1.53 |
| 9:00 | 3.03 | 1.89 |
| 10:00 | 2.87 | 2.38 |
| 11:00 | 3.40 | 2.02 |
| 12:00 | 3.56 | 2.13 |
| 13:00 | 4.21 | 2.24 |
| 14:00 | 2.91 | 2.54 |
| 15:00 | 4.04 | 2.14 |
| 16:00 | 3.43 | 1.34 |
| 17:00 | 4.39 | 2.73 |

| | | |
|--------------|------|------|
| 18:00 | 3.36 | 1.88 |
| 19:00 | 3.41 | 2.38 |
| 20:00 | 3.75 | 2.52 |
| 21:00 | 2.78 | 2.39 |
| 22:00 | 3.02 | 2.27 |
| Promedio | 3.49 | 2.18 |
| Valor mínimo | 2.78 | 1.34 |
| Valor máximo | 4.39 | 2.73 |

Fuente: Elaboración propia con información de DAT's Why.

ATENTAMENTE

Dra. Dzoara Damaris Tejeda Honstein
Representante legal
Directora de ingeniería ambiental
Tejeda Le Blanc & Cía., S.C.
LT Consulting