

05

Inventario de
Emisiones de la
Zona Metropoli-
tana del Valle
de México



Un inventario de emisiones detecta las principales fuentes contaminantes que afectan la calidad del aire y orienta el diseño de políticas públicas para reducir las emisiones que afectan a la salud.

05



El presente capítulo se elaboró a partir del inventario de emisiones de contaminantes criterio, compuestos tóxicos y compuestos y gases de efecto invernadero de la Zona Metropolitana del Valle de México, año 2018, elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México.

Un inventario de emisiones es un registro de la cantidad de contaminantes generados por las distintas actividades y fuentes de emisión dentro de un espacio geográfico y durante un periodo de tiempo determinados. Los inventarios de emisiones son

instrumentos útiles para la gestión de la calidad del aire; permiten caracterizar las principales fuentes contaminantes que afectan la calidad del aire, detectar actividades que tienen una contribución significativa en el volumen total de emisiones y orientar el diseño de políticas públicas de reducción de emisiones hacia las prioridades identificadas. Todo esto con el objetivo de disminuir los impactos de la contaminación atmosférica en la salud de la población y del ambiente. Además, los inventarios de emisiones se utilizan para evaluar y dar seguimiento a los ProAire, en relación con su efectividad para li-

mitar las emisiones contaminantes, y hacen posible el cumplimiento del derecho de la población a estar informada, coadyuvando en la búsqueda de lograr una buena calidad del aire a lo largo de todo el año.

El presente Capítulo resume la información de los resultados del inventario de emisiones de contaminantes criterio, compuestos tóxicos y compuestos y gases de efecto invernadero (CyGEI) para la ZMVM en el año 2018. Asimismo, se contextualiza la magnitud de las emisiones provenientes de fuentes externas a la zona de estudio, pero que juegan un papel importante en la calidad del aire local; estas

son el corredor industrial Tula-Vito-Aspasco y el volcán Popocatepetl.

El lector debe considerar que el Capítulo no es una descripción exhaustiva de los resultados del Inventario de Emisiones 2018, su objetivo es puntualizar los hallazgos que sustentan la selección de medidas y acciones de reducción de emisiones del ProAire ZMVM 2021-2030. Para más información sobre las emisiones por entidad federativa, jurisdicción y categoría emisora, así como memorias de cálculo, se sugiere revisar el documento completo del inventario (SEDEMA, 2021).

5.1 Alcance del Inventario de Emisiones 2018

En la ZMVM, la composición química del aire se ve modificada por compuestos que son emitidos por diversas actividades realizadas en la industria, los establecimientos comerciales y de servicios, los hogares y los automotores; así como por la producción de estos contaminantes asociada a procesos desarrollados en la naturaleza. Estos compuestos son las partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), estos dos últimos son conocidos por ser los principales contaminantes generadores de ozono; además, también se generan gases y compuestos de efecto invernadero (CyGEI) y compuestos tóxicos.

En el sector doméstico, comercial e industrial, así como en los automotores, la quema de combustibles es responsable de la formación de CO, NO_x,

PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y de CyGEI, en tanto que el uso de productos químicos para limpieza, desengrasantes, lacas y pinturas, entre otros, contribuyen notablemente a la emisión de COV, los cuales participan en la formación secundaria de O₃ y pueden ser tóxicos al ser humano. Asimismo, la gestión de residuos sólidos y aguas residuales, las vialidades, las actividades agropecuarias, los incendios forestales, la vegetación y los suelos, entre otras fuentes, tienen una contribución significativa en la emisión de contaminantes criterio, tóxicos y CyGEI. El inventario reporta las emisiones que son producidas por las actividades que se realizan dentro de la ZMVM, la cual está integrada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo. Estas actividades se agrupan en cuatro tipos de fuentes de emisión:



Fuentes móviles: cualquier vehículo automotor que circula por vialidades. Las fuentes no carreteras, como aeronaves y maquinaria agrícola o de construcción, se incluyen en las fuentes de área.



Fuentes puntuales o fijas: instalaciones de ubicación fija, como procesos industriales, comerciales o de servicios, que generen emisiones contaminantes y están sujetas a regulación ambiental a nivel federal o local.



Fuentes de área: instalaciones o fuentes de contaminantes que, si bien son pequeñas, numerosas y dispersas, en conjunto pueden generar emisiones considerables. Incluyen fuentes domésticas, comercios y servicios no regulados, la distribución y almacenamiento de combustibles, el uso de solventes, la gestión de residuos, actividades agrícolas y ganaderas, fuentes móviles no carreteras, vialidades e incendios, entre otras.



Fuentes naturales: procesos naturales que generan emisiones contaminantes.

Estas fuentes de emisión se subdividen en 94 categorías, las cuales se enlistan en el Anexo 5.1. Los contaminantes evaluados en el Inventario de Emisiones 2018 se presentan en la Figura 5.1. En el presente capítulo se abordan las emisiones por fuente para los contaminantes regulados y

atendidos a partir de la gestión de la calidad del aire local: NO_x y COV, por ser precursores de O₃, y partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}, CO y SO₂. No obstante, se destacan categorías emisoras relevantes cuando estas tienen una contribución significativa en las emisiones totales.



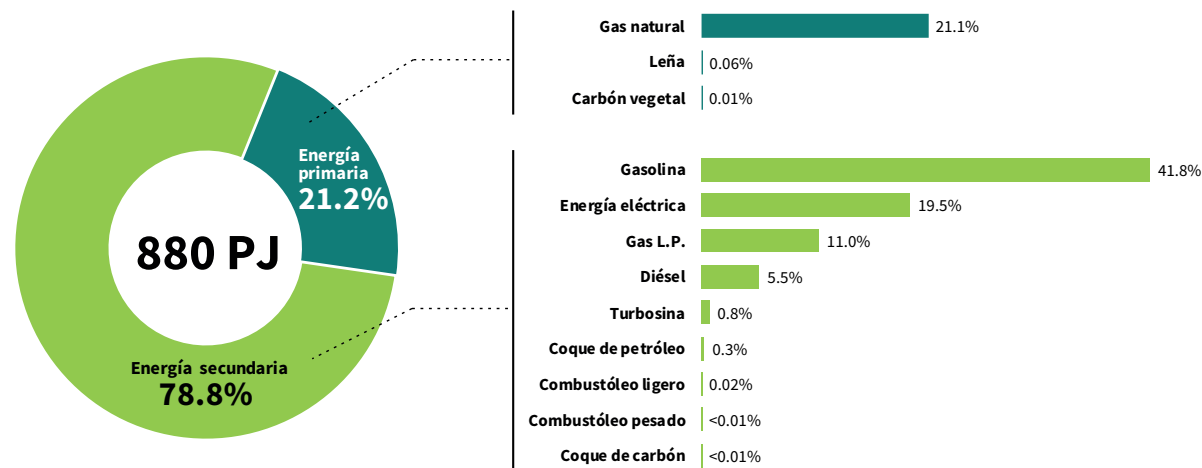
Figura 5.1 Contaminantes estimados en el Inventario de Emisiones 2018

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Matriz energética

De acuerdo con la matriz energética de la ZMVM, se consume principalmente energía secundaria que se obtiene mediante algún proceso de transformación, como la gasolina, el diésel y la energía eléctrica. En el año 2018 se tuvo un gasto total de 880 petajoules (PJ), del cual 59.3% provi-

no del procesamiento de petrolíferos, 19.5% de energía eléctrica y 21.2% de fuentes primarias (ver Figura 5.2). Este consumo equivale a 40.6 gigajoules (GJ) per cápita, lo que es igual a que cada persona utilice anualmente aproximadamente 1051 litros equivalentes de gasolina.



Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Figura 5.2 Matriz energética de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2018

Fuente: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).

El transporte es el sector de mayor demanda, con un gasto de casi la mitad de la energía total (438 PJ), seguido de la industria (275 PJ) y el sector habitacional (105 PJ). En cambio, los comercios y servicios tuvieron un consumo de 61 PJ, mientras que

el aporte del sector agropecuario es mínimo (1 PJ). El consumo de combustibles fósiles está directamente relacionado con la generación de contaminantes atmosféricos y de CyGEI, pues cuando este aumenta, también lo hacen las emisiones.

5.2 Emisiones de contaminantes criterio y precursores de ozono

En esta sección se presentan las emisiones de contaminantes criterio y precursores en la ZMVM. La Tabla 5.1 resume las toneladas emitidas en 2018 para partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, SO₂, CO,

NO_x, COV y amoníaco (NH₃), así como la contribución porcentual que cada tipo de fuente tiene en las emisiones totales por contaminante.

Tabla 5.1 Emisiones anuales de contaminantes criterio y precursores por tipo de fuente, 2018

Tipo de fuente	Emisiones (t/año)						
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV	NH ₃
Fuentes puntuales	4184 12.0%	3174 19.2%	1019 33.2%	5739 0.8%	9506 6.6%	19 003 4.6%	140 0.3%
Fuentes de área	15 385 44.2%	5906 35.8%	991 32.3%	33 898 4.6%	10 624 7.4%	271 133 65.5%	44 219 94.2%
Fuentes móviles	13 763 39.6%	7098 43.0%	1059 34.5%	689 254 94.6%	124 115 85.8%	91 771 22.2%	2572 5.5%
Fuentes naturales	1447 4.2%	322 2.0%	N/A	N/A	353 0.2%	31 914 7.7%	N/A
Total	34 779	16 500	3068	728 891	144 598	413 821	46 931

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).

Como se expuso en el Capítulo 3, la problemática de la contaminación atmosférica en la ZMVM se asocia principalmente a las partículas suspendidas y O₃. Por esta razón, en las siguientes secciones se especifican las categorías de mayor emisión de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, así como NO_x y COV como principales precursores de O₃ en la ZMVM. En específico, se reportan las categorías clave que tienen

una contribución individual superior al 3% o que en conjunto contribuyen con más del 80% de las emisiones totales. Es en estas actividades en donde deberán enfocarse las acciones e instrumentos regulatorios y de mercado para prevenir, controlar y reducir las emisiones, para así impactar positivamente en la mejora de la calidad del aire y, por consiguiente, en la salud de la población.

5.2.1 Partículas suspendidas

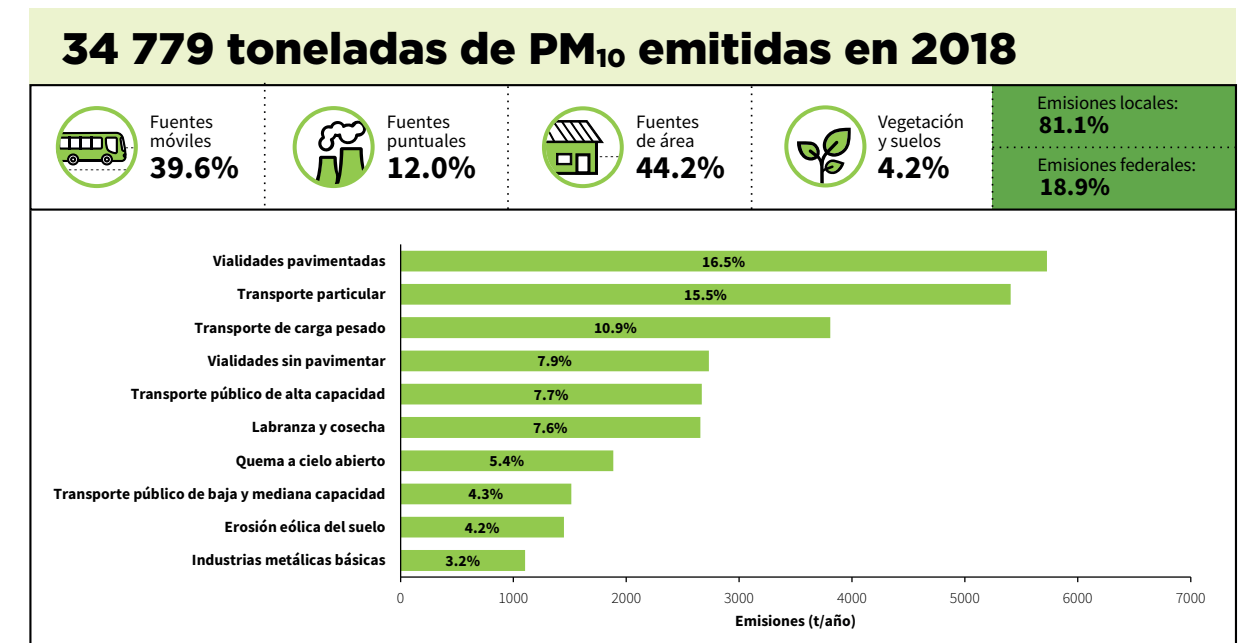
Además de los impactos ambientales, la cuantificación y caracterización de las partículas suspendidas es importante por las repercusiones que pueden tener en la salud de los habitantes de la ZMVM. Debido a sus pequeñas dimensiones, las partículas

entran fácilmente al sistema respiratorio, provocando afecciones en los sistemas cardiovascular y pulmonar, entre otros. A continuación, se describen los resultados para las categorías que más contribuyen a las emisiones de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}.

Partículas PM₁₀

La Figura 5.3 muestra las emisiones de PM₁₀ por fuente contaminante y jurisdicción. Se observa que las fuentes de área son las fuentes de emisión predominantes de PM₁₀, aportando el 44.2% de las emisiones totales. Las vialidades pavimentadas se colocan como la categoría principal de emisión de

PM₁₀ con un 16.5%, debido a la suspensión de polvo causada por el intenso recorrido de los vehículos sobre las vialidades de la zona. Otras categorías que destacan son las vialidades sin pavimentar, la labranza y la cosecha, así como la quema a cielo abierto de desechos.



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.3 Emisiones de PM₁₀ por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

Fuente: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).



Por otro lado, las fuentes móviles se colocan como la segunda fuente con mayor emisión de PM₁₀, con un 39.6% de las emisiones totales. Los vehículos particulares (que incluyen autos particulares, camionetas SUV y motocicletas), vehículos de carga (mayores de 3.8 toneladas y tractocamiones) y el transporte público de alta capacidad (autobuses, Metrobús y Mexibús) y el de baja y mediana capaci-

dad (taxis, vagonetas y microbuses) son las categorías que más contribución tienen en esta fuente de emisión. También se observa un aporte importante por parte de la erosión eólica del suelo y de las industrias metálicas básicas. Otra actividad importante generadora de PM₁₀ es la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, con un aporte individual del 2.6%.

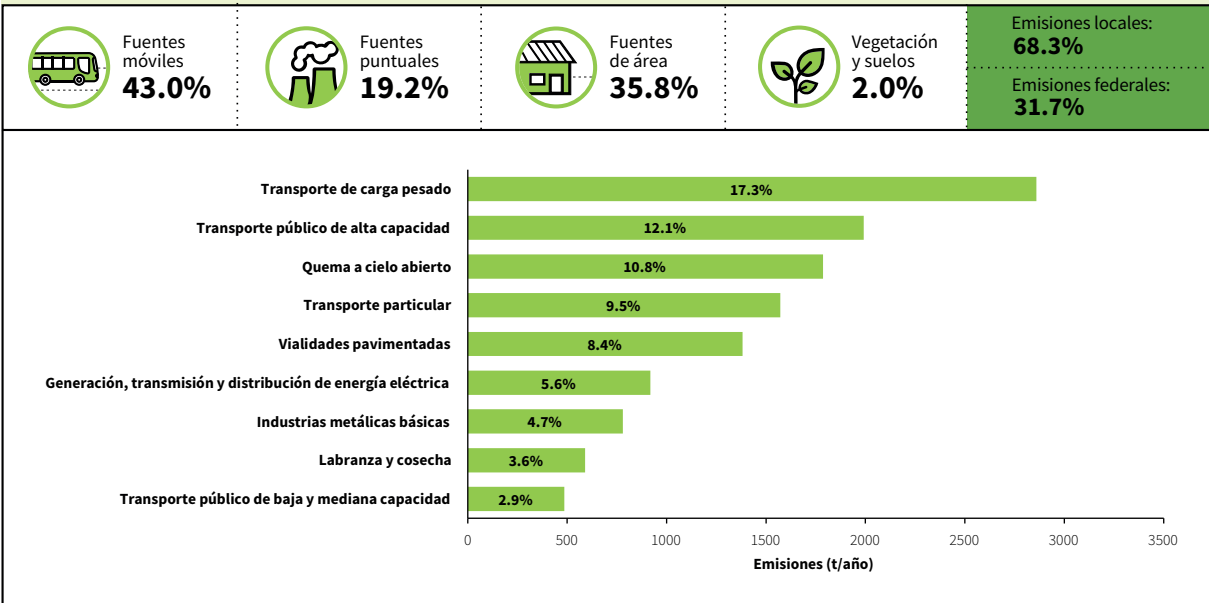
Partículas PM_{2.5}

Las partículas PM_{2.5} son de gran importancia por los impactos que generan en la salud de la población, ya que por sus pequeñas dimensiones pueden penetrar al sistema respiratorio e incluso al torrente sanguíneo, y generar daños significativos. La Figura 5.4 muestra las emisiones de PM_{2.5} por fuente contaminante y jurisdicción. Se observa que en el 2018 se emitieron más de 16 mil toneladas de partículas PM_{2.5} en la ZMVM.

El sector transporte destaca como el mayor emisor de PM_{2.5} en la ZMVM, representando un 43.0% de las emisiones totales. Dentro de este tipo de fuentes de emisión, los vehículos de carga pesados, el transporte público de alta capacidad y los vehículos particulares se identifican como los mayores contri-

buidores de partículas PM_{2.5}. Estos resultados se deben al uso de diésel como principal combustible en la flota pesada (autobuses, vehículos de carga mayores a 3.8 toneladas y tractocamiones) y a la alta cantidad de automóviles particulares que circulan en la zona. También es importante destacar que las emisiones de PM_{2.5} causadas por la quema de diésel son más tóxicas en comparación con aquellas emitidas por la quema de gasolina (Benbrahim-Tallaa et al., 2012; California Air Resources Board, 2020; Robinson, 2017), y son consideradas carcinogénicas por la Organización Mundial de Salud (OMS). Por lo anterior, existe un área de oportunidad en la transición hacia tecnologías más limpias y eficientes como autos eléctricos y vehículos con trampas de partículas de última generación.

16 500 toneladas de PM_{2.5} emitidas en 2018



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

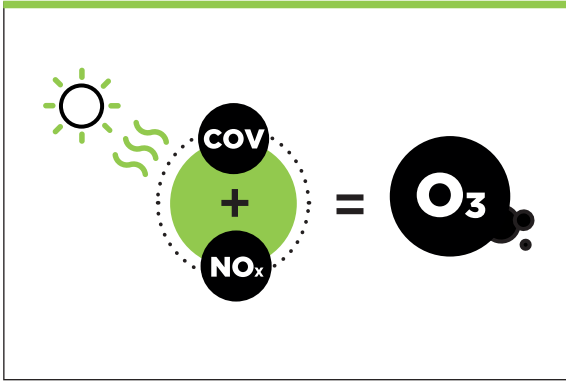
Figura 5.4 Emisiones de PM_{2.5} por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).

Por otro lado, las fuentes de área se colocan como la segunda fuente de mayor contribución con un 35.8% de las emisiones totales del contaminante. La quema a cielo abierto, las vialidades pavimentadas, la labranza y la cosecha destacan como categorías

con una fuerte incidencia en el nivel de partículas PM_{2.5} emitidas. También se observa una ligera contribución de fuentes puntuales, especialmente por parte del proceso de generación y distribución de energía eléctrica y la industria metálica básica.

5.2.2 Precursores de ozono

El O₃ es uno de los contaminantes que supera constantemente los límites normados tanto en la Ciudad de México como en su zona metropolitana. Los COV y los NO_x son los principales contaminantes primarios que participan en la formación del O₃ troposférico, por lo que son denominados precursores. Las reacciones atmosféricas de formación de O₃ dependen de la proporción entre las concentraciones de estos contaminantes, por lo que resulta pertinente caracterizar las emisiones tanto de COV como de NO_x.

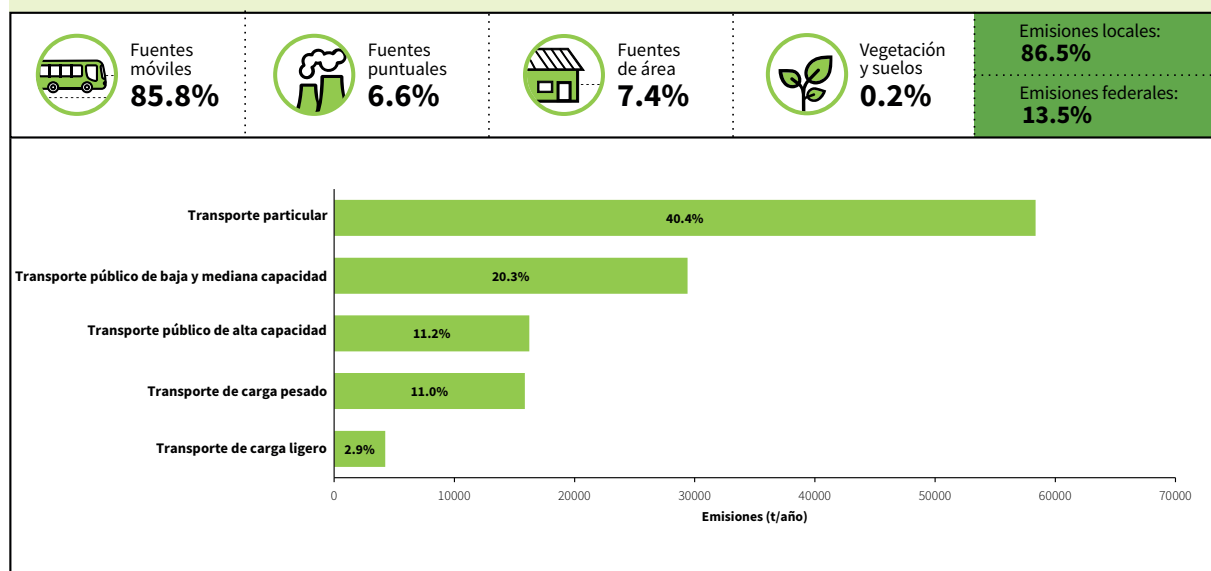


Óxidos de nitrógeno

La Figura 5.5 muestra que se emitieron más de 144 mil toneladas de NO_x en la ZMVM en 2018. Se observa claramente que las fuentes móviles son aquellas que aportan la gran mayoría de las emisiones, contribuyendo con un 85.8% del total para este contaminante. Dentro de esta fuente de

emisión se aprecia una contribución igualmente importante del transporte público, privado, automóviles particulares y transporte de carga. Estos resultados se deben principalmente a los procesos de combustión a alta temperatura en todos los vehículos.

144 598 toneladas de NO_x emitidas en 2018



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte de carga ligero corresponde a unidades de hasta 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

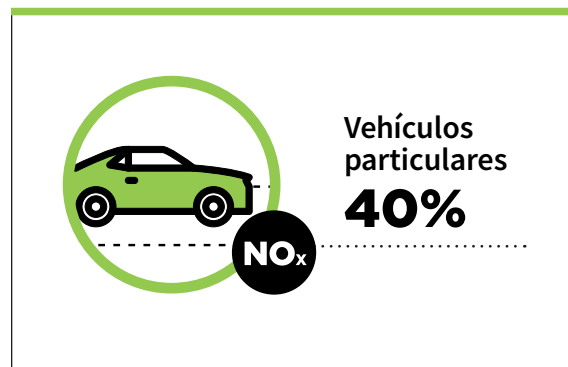
Figura 5.5 Emisiones de NO_x por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

Fuente: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).

Dentro de los resultados resalta la contribución de los vehículos particulares a la emisión de NO_x, los cuales representan poco más de 40% de las emisiones.

Las cifras apuntan a que las posibles soluciones para la regulación de los NO_x son la inclusión de nuevas tecnologías en los vehículos para regular la emisión de este tipo de compuestos, regulaciones más estrictas en cuanto a los límites de emisión y medidas para lograr un mantenimiento constante y renovación de los vehículos con tecnologías menos contaminantes. Por ejemplo, los convertidores catalíticos son una tecnología que transforma

estos contaminantes en compuestos menos dañinos antes de su emisión completa, en tanto que los vehículos eléctricos evitan la emisión en sí.

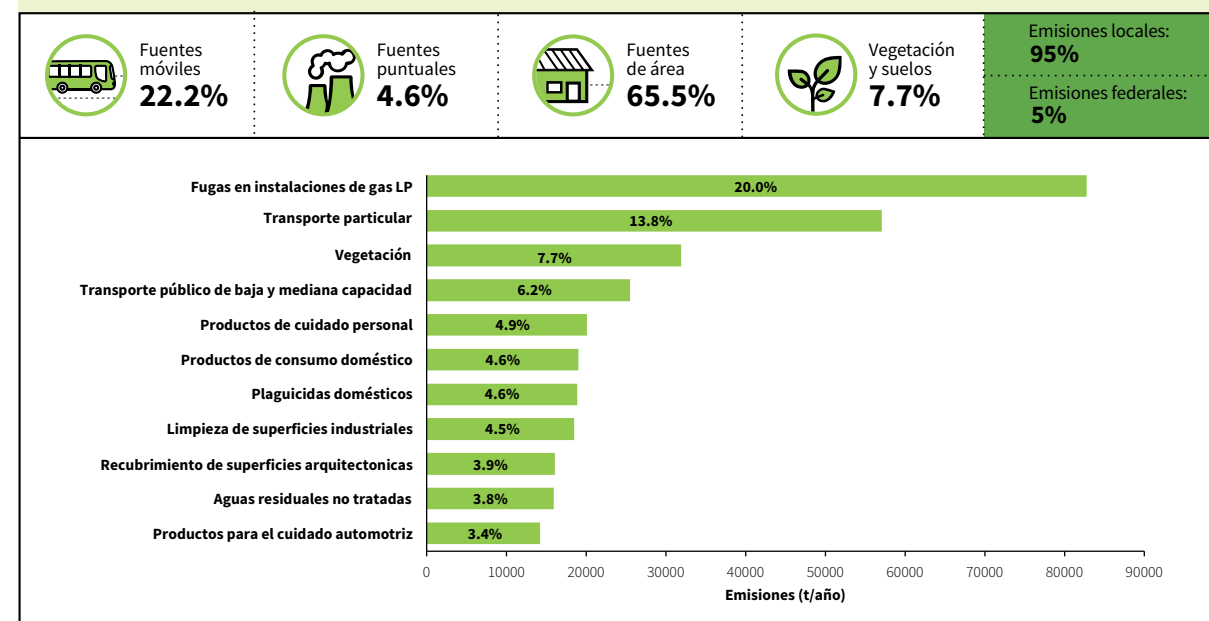


Compuestos Orgánicos Volátiles

La Figura 5.6 muestra las emisiones de COV por fuente contaminante y jurisdicción, señalando que en el 2018 se emitieron más de 413 mil toneladas en la ZMVM. Se observa que las fuentes de área representan alrededor de dos tercios de las emisiones totales con un 65.5%. Las fugas en instalaciones de gas L.P. es la categoría con mayor contribución, representando el 20.0% de las emisiones totales; esta actividad engloba todas las

posibles fugas del gas en instalaciones fijas como comercios y viviendas. Dichos resultados indican que se deben implementar políticas para el control de fugas, tanto en el sector residencial como en los establecimientos que utilizan el combustible, al igual que incentivos para promover la transición hacia el uso de combustibles más limpios como el gas natural, o tecnologías como calentadores solares o estufas eléctricas.

413 821 toneladas de COV emitidas en 2018



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.6 Emisiones de COV por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

Fuente: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).

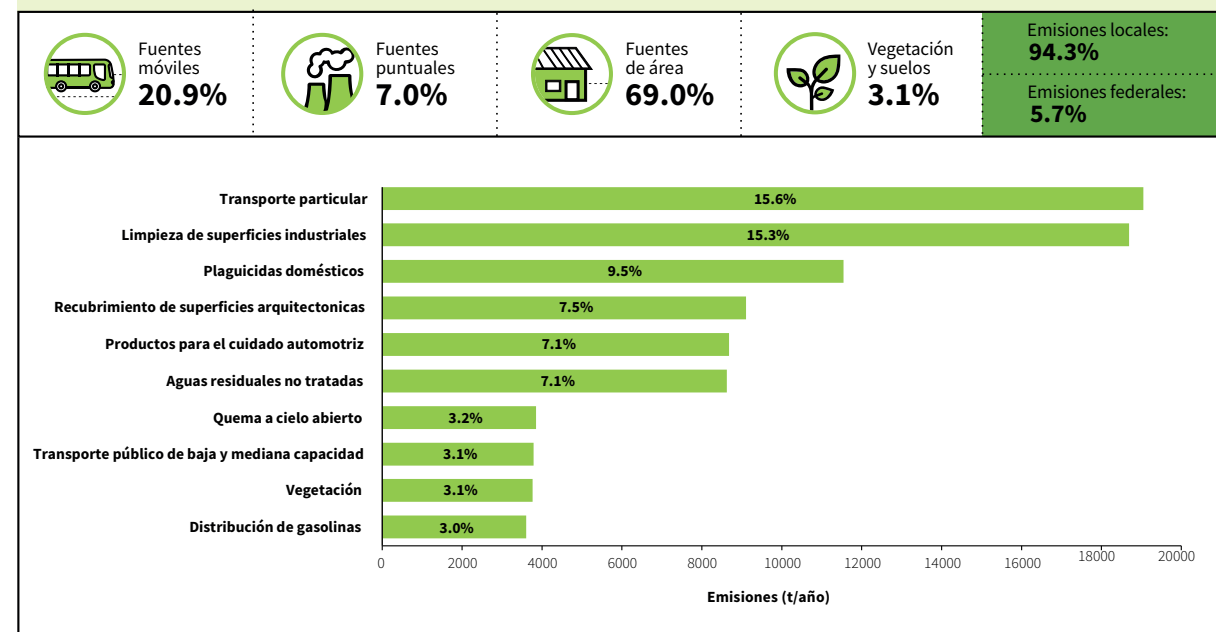
El uso de solventes en productos comerciales y domésticos contribuye significativamente a la emisión de COV hacia la atmósfera, con un aporte del 31.6%. En específico, las categorías que más aportan son el uso de productos de cuidado personal, de consumo doméstico, plaguicidas, productos de limpieza para superficies industriales, recubrimientos arquitectónicos y productos para el cuidado automotriz. Estos resultados indican que es importante la elaboración de normas que regulen la composición de COV en estos productos, el

cambio a solventes de menor impacto ambiental y la adopción de buenas prácticas para la reducción de las emisiones en todos los sectores. Finalmente, el transporte es otra fuente importante de emisión de COV, básicamente por los autos particulares y el transporte público de mediana y baja capacidad, grupos donde predomina el uso de unidades a gasolina. También es importante destacar la emisión natural de COV por la vegetación y otras actividades humanas como el tratamiento y disposición de residuos orgánicos sólidos y líquidos.

5.3 Emisiones de contaminantes tóxicos

Resulta necesario identificar las principales fuentes generadoras de tóxicos y caracterizar sus emisiones, para después diseñar acciones de reducción de emisiones que beneficien a la salud de la población. En el Inventario de Emisiones 2018 se cuantificaron las emisiones de 172 contaminantes tóxicos, que aportaron poco más de 122 mil toneladas. La Figura 5.7 muestra las emisiones por fuente y jurisdicción, así como las categorías que contribuyen de forma individual con 3% o más de las emisiones totales. Las diez categorías mostradas aportan el 74.5% de las emisiones de tóxicos.

122 005 toneladas de compuestos tóxicos emitidas en 2018



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.7 Emisiones de compuestos tóxicos por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021)*.

Se destaca el aporte de las fuentes móviles, en concreto por los vehículos particulares (camionetas SUV, autos particulares y motocicletas), dado que son los más numerosos y las emisiones provienen en su mayoría de la gasolina. Si bien la emisión de estos compuestos puede ser reducida a través de acciones de disminución de COV, es necesario actuar directamente sobre los altos emisores de tóxicos.

Las fuentes de área son las de mayor contribución; estas están asociadas al uso y manejo de productos químicos en industrias, comercios y servicios y viviendas. Resaltan la limpieza de superficies industriales, el uso de plaguicidas domésticos, los recubrimientos arquitectónicos y el uso de productos para el cuidado automotriz.

Los compuestos tóxicos que más se emiten, en orden de magnitud, son:

- El tolueno (16.9%) y los isómeros de xileno (12.5%). Ambos provienen en su mayoría de fuentes de área, al ser insumos en la fabricación de pinturas arquitectónicas y automotrices, diluyentes y otros productos de uso comercial y doméstico, aunque también tienen un aporte importante de fuentes móviles.
- El alcohol metílico o metanol (8.5%), que se evapora durante su uso en el repintado automotriz y se produce naturalmente por procesos biogénicos en la vegetación, entre otras categorías.

El 1,1,1-tricloroetano (7.4%), que se utiliza particularmente en la limpieza de superficies industriales.

El metil ter-butil éter o MTBE (5.0%), cuya principal fuente son los vehículos automotores al ser empleado como aditivo en la gasolina.

En este contexto, resulta apremiante la regulación del contenido de COV en productos de uso industrial, comercial y doméstico, toda vez que la literatura sugiere que, en la mayoría de los inventarios, estas emisiones pueden estar subestimadas entre dos y tres veces.

5.4 Emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero

Los CyGEI tienen la capacidad de absorber la radiación solar y cumplen una función esencial al mantener estable la temperatura del planeta. Sin embargo, las actividades humanas han incrementado considerablemente sus emisiones, provocando el calentamiento global y ocasionando cambios en el sistema climático.

Dentro del Inventario de Emisiones 2018, se contabilizan las emisiones de CyGEI que ocurren físicamente dentro de la ZMVM como resultado de las actividades descritas en la sección 5.1. Es necesario enfatizar que el presente ejercicio se diferencia de otros inventarios de emisiones de CyGEI, ya que cumplen con estándares internacionales como las directrices del IPCC 2006 o el Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria (GPC, por sus siglas en inglés). La estimación es un complemento del inventario de contaminantes criterio, para así identificar sinergias y compensaciones que las medidas y acciones

del ProAire ZMVM 2021-2030 puedan tener tanto en la mitigación del cambio climático como en la reducción de contaminantes de vida corta (por ejemplo, carbono negro y CH₄).

La Tabla 5.2 presenta las toneladas emitidas en 2018 para cuatro gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e hidrofluorocarbonos (HFC) y un compuesto de efecto invernadero, el carbono negro. Se puede observar que el CO₂ es el GEI de mayor emisión en la ZMVM, seguido del CH₄. Como cada uno de los GEI tiene un impacto distinto en el calentamiento global, en función de su capacidad para absorber el calor y su tiempo de vida en la atmósfera, para poder comparar emisiones entre distintos GEI, se cuantifican las toneladas en CO₂ equivalente (CO₂eq). El reporte de CO₂eq contempla las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O y HFC.

Tabla 5.2 Emisiones anuales de compuestos y gases de efecto invernadero por tipo de fuente, 2018

Tipo de fuente	Emisiones de GEI (t/año)					Emisiones de carbono negro (t/año)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	CO ₂ eq	
Fuentes puntuales	14 122 262 21.4%	332 0.1%	405 15.9%	0.4 0.3%	14 239 552 19.0%	534 20.4%
Fuentes de área	8 692 279 13.2%	290 798 98.3%	880 34.6%	1.2 0.9%	17 069 895 22.7%	555 21.2%
Fuentes móviles	43 217 059 65.4%	4570 1.6%	1260 49.5%	136.3 98.8%	43 856 060 58.3%	1526 58.4%
Fuentes naturales	N/A N/A	N/A N/A	N/A N/A	N/A N/A	N/A N/A	0.3 <0.1%
Total (t GEI/año)	66 031 600	295 700	2544	138		2615
Total (tCO₂eq/año)	66 031 600	8 279 595	674 199	180 113	75 165 507	
	87.8%	11.0%	0.9%	0.3%	100%	

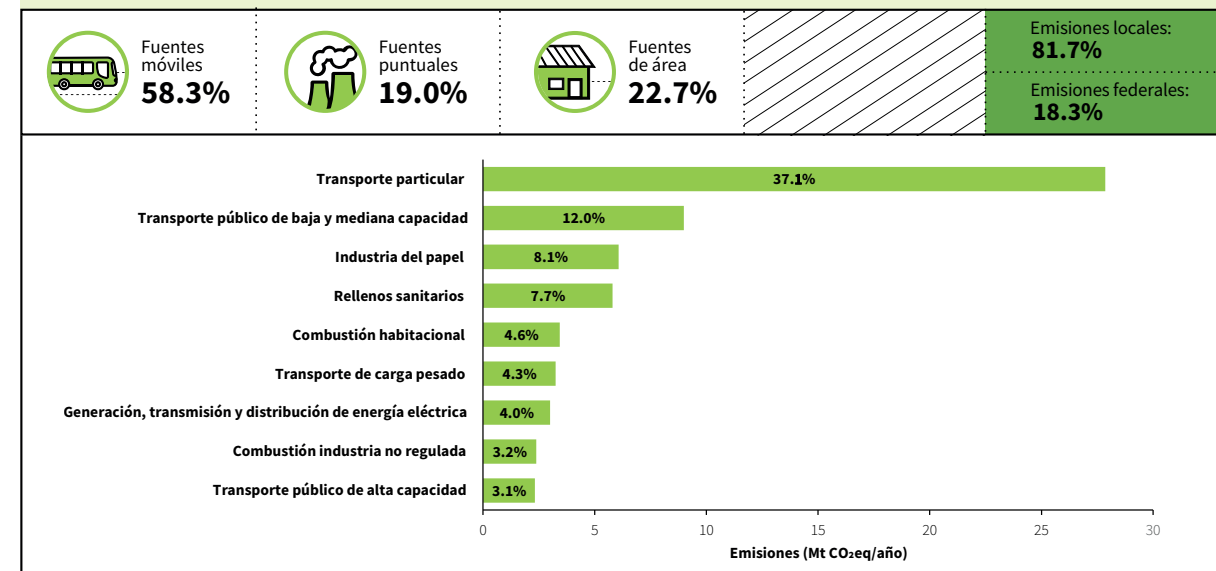
Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras. Para la estimación del CO₂eq se consideran los potenciales de calentamiento global a 100 años del quinto informe de evaluación del IPCC (Myhre *et al.*, 2013): 1 para CO₂, 28 para CH₄ y 265 para N₂O; para los HFC, el potencial varía en función del gas específico, con rangos de 100 a más de 10 000.

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

La Figura 5.8 muestra las emisiones de CO₂eq por fuente contaminante y jurisdicción, además de destacar las nueve categorías principales que aportan de forma individual más del 3.0% de las emisiones y que en conjunto suman el 84% del CO₂eq. La mayoría de las categorías son fuentes móviles, como

vehículos particulares, el transporte público y unidades de carga pesadas. También hay un aporte importante de fuentes puntuales en giros como la industria del papel y la generación de electricidad, así como procesos de combustión en fuentes de área (viviendas e industrias no reguladas).

75 165 507 toneladas de CO₂eq emitidas en 2018



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.8 Emisiones de CO₂eq por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

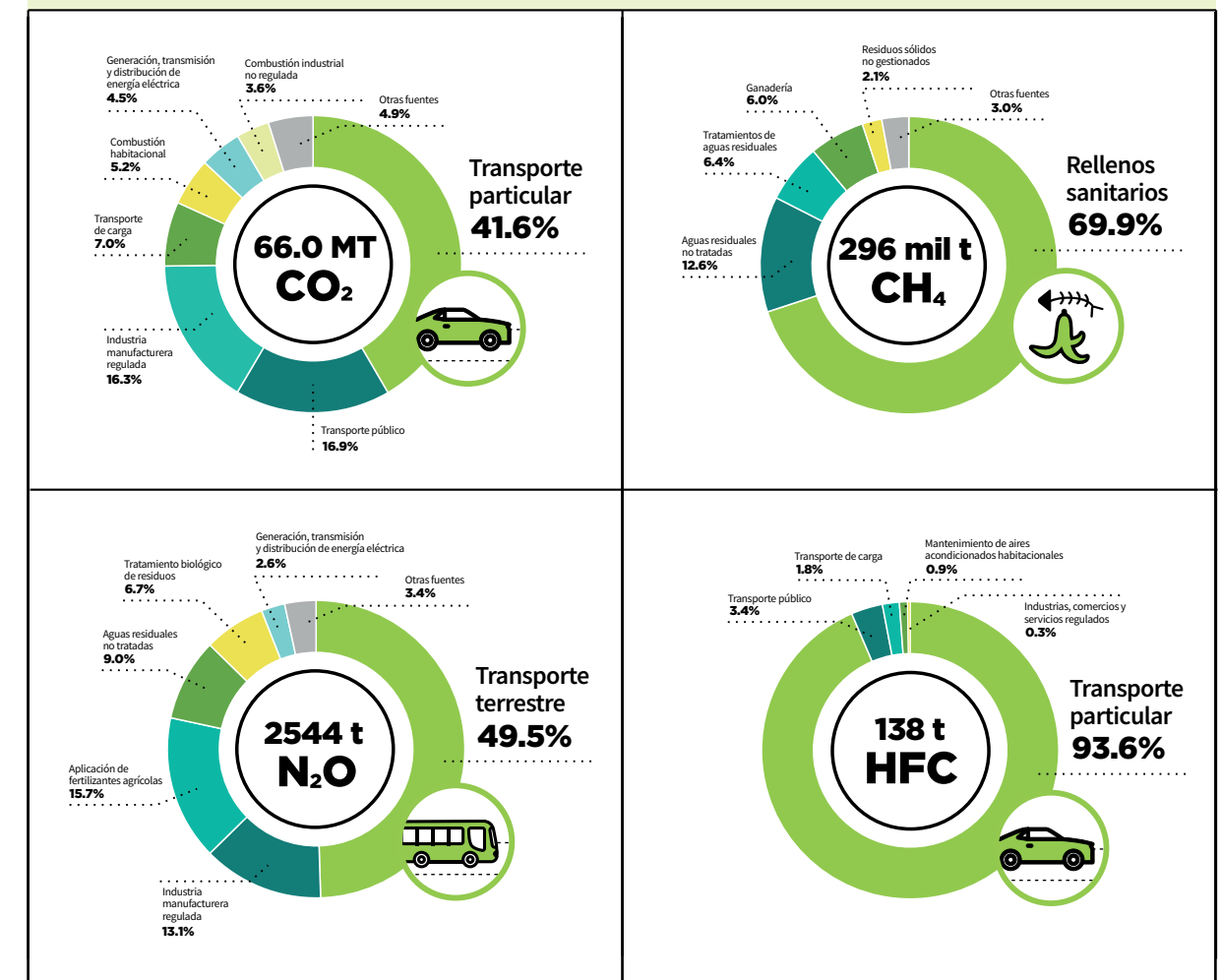
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

De manera general, el uso de combustibles fósiles en fuentes móviles, industrias y viviendas es la principal fuente de CO₂. Para CH₄, la mayoría de las emisiones se deben a la disposición y tratamiento de residuos, junto con actividades ganaderas. La Figura 5.9 destaca las categorías principales para cada uno de los GEI contabilizados en el Inventario de Emisiones 2018.

Estos resultados permiten ver que, en actividades como el transporte, la combustión doméstica, comercial e industrial, y la gestión de residuos, es importante identificar sinergias en-

tre la reducción de emisiones de contaminantes criterio y la mitigación de emisiones de GEI. Esto se puede lograr promoviendo la descarbonización del transporte y la red eléctrica, así como el uso de tecnologías y combustibles más limpios para reducir emisiones por la quema de combustibles fósiles. Además, la prevención y gestión integral de residuos sólidos y líquidos es fundamental, en especial porque reducir emisiones de CH₄ favorece no solo la mitigación del cambio climático, sino que tiene potencial para limitar la formación de O₃ troposférico (West *et al.*, 2006).

Principales fuentes emisoras de gases de efecto invernadero, 2018



Nota: Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras.

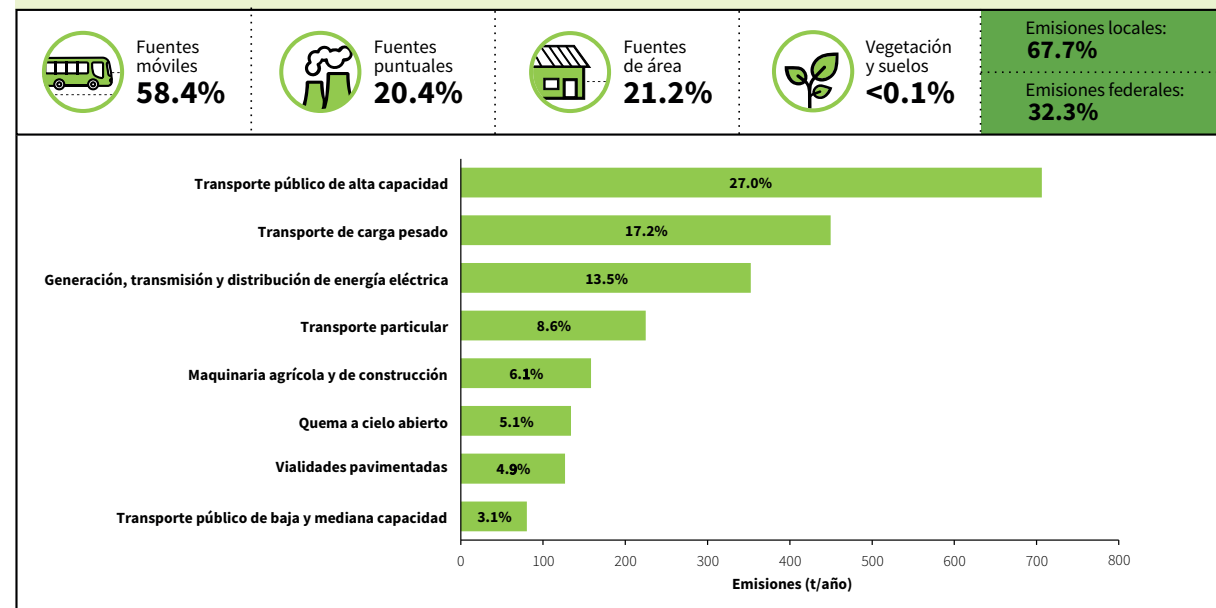
Figura 5.9 Principales fuentes emisoras de gases de efecto invernadero, 2018

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Además de los GEI, en el Inventario de Emisiones 2018 se estiman las emisiones de carbono negro. Este es un contaminante de vida corta que forma parte de las partículas finas, tiene la capacidad de generar efectos en la salud de la población y también contribuye al calentamiento global. Si bien este contaminante no se integra en la estimación de CO₂eq, en la literatura se reportan valores de potencial de calentamiento de 120 y hasta 1800 veces más que el del CO₂ (Bond *et al.*, 2013; Hill, 2009).

Su fuente de emisión es la combustión incompleta de combustibles fósiles. Como se puede observar en la Figura 5.10, existen ocho principales categorías de fuentes emisoras de carbono negro, destacando el aporte de vehículos pesados que utilizan diésel, otras fuentes móviles, la generación de electricidad, así como la quema a cielo abierto de desechos y la maquinaria agrícola y de construcción.

2615 toneladas de carbono negro emitidas en 2018



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.10 Emisiones de carbono negro por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

5.5 Emisiones externas

La interacción entre la cuenca atmosférica del Valle de México y cuencas aledañas es relevante en términos del transporte transfronterizo de contaminantes. El impacto de este fenómeno depende de los niveles de emisiones provenientes de fuentes externas a la ZMVM, por lo que resulta

importante contar con estimaciones de la masa de contaminantes generada por estas actividades. En este sentido, se detectan dos fuentes que, por la magnitud de sus emisiones, pueden incidir significativamente en la calidad del aire local: el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, en el estado

de Hidalgo, y el volcán Popocatepetl en el límite oriental de la ZMVM con el estado de Puebla. En las siguientes secciones se resume la evidencia disponible sobre la emisión de contaminantes criterio provenientes de dichas fuentes.

Finalmente, es importante destacar que las emisiones de incendios forestales en entidades vecinas pueden tener una contribución puntual significativa y provocar eventos de alta contaminación. Esto se ejemplifica en la sección 3.6.1 del Capítulo 3.

5.5.1 Corredor industrial Tula-Vito-Apasco

En la zona metropolitana de Tula, Hidalgo, al noroeste de la ZMVM, se concentra una importante actividad industrial que resulta en la emisión de cantidades considerables de contaminantes criterio. En específico, se destacan dos fuentes fijas de jurisdicción federal:

capacidad total instalada de 2095 MW y en 2018 aportaron una generación anual bruta de 9874 GWh (SENER, 2018).

- La refinería Miguel Hidalgo de PEMEX, la segunda más grande del país, que en 2016 procesó aproximadamente 202 mil barriles diarios de crudo de petróleo (PEMEX, 2018).
- La planta termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la CFE, la cual cuenta con una central de generación de ciclo combinado y una central de generación termoeléctrica convencional. En conjunto, las dos centrales tienen una

El consumo de combustóleo pesado y gas natural en estas instalaciones, entre otras actividades, resulta en la emisión de contaminantes criterio. La Tabla 5.3 resume las emisiones contaminantes de la termoeléctrica y la refinería, y su contribución porcentual al total de emisiones en el estado de Hidalgo. Se destacan las elevadas emisiones de SO₂, que representan el 93.1% en la entidad, debido al contenido de azufre en el combustóleo pesado; en ese sentido, la NOM-016-CRE-2016 específica que el combustóleo de uso industrial puede contener hasta 2% de azufre en peso¹.

Tabla 5.3 Emisiones anuales de contaminantes criterio en el corredor Tula-Vito-Apasco, 2016

	Emisiones (t/año)					
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COV
Inventario de emisiones del estado de Hidalgo (2016)	44 657	21 579	149 429	174 091	99 834	171 477
Refinería Miguel Hidalgo	1907	1101	29 929	1091	3103	2589
Termoeléctrica F.P.R.	6301	4900	109 237	3190	15 295	233
Total	8208	6001	139 167	4281	18 398	2822
Aporte al inventario 2016	18.4%	27.8%	93.1%	2.5%	18.4%	1.6%

Fuente: *Elaboración propia con datos del Inventario de emisiones del estado de Hidalgo (SEMARNATH, 2016) y la base de datos de fuentes puntuales de jurisdicción federal DATGEN.*

¹ En el Anexo 2 de la NOM-016-CRE-2016 se especifica que en la zona industrial Tula-Vito-Apasco se dispondrá de combustible con un contenido máximo de azufre de 2% en masa. Esta zona está integrada por los municipios de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apaxco, en los estados de Hidalgo y de México.

Al comparar las emisiones con las cifras del presente inventario, la refinería y la termoeléctrica generan 45 veces más SO₂ que toda la ZMVM. Para partículas, las emisiones de estas dos fuentes puntuales en 2016 equivalen a 23.6% de las emisiones de PM₁₀ en la ZMVM y 36.4% de las partículas PM_{2.5} en el año 2018.

En la ZMVM los vientos predominantes soplan del norte hacia el sur durante la mayor parte del año, por lo que la ZMVM se ubica viento abajo del corredor industrial. Es así como la dispersión y transporte de los contaminantes emitidos puede afectar a la población de la ZMVM. Por ejemplo, como se expuso en el Capítulo 3, las estaciones de monitoreo atmosférico localizadas en el noroeste de la ZMVM registran los mayores niveles de SO₂.

Distintos autores han cuantificado la influencia de las emisiones de la refinería y la planta termoeléctrica en la composición atmosférica de la ZMVM. La mayoría de estos resultados se han obtenido de campañas de campo en la zona de estudio. Por ejemplo, de Foy *et al.* (2009) estimó a través de simulaciones numéricas que aproximadamente la mitad de la concentración promedio de SO₂ en la ZMVM durante la campaña MILAGRO se debió a las actividades en el corredor industrial antes referido. El mismo autor sugiere en otro estudio que el complejo industrial de Tula es responsable de los picos de concentración de SO₂ observados en la ZMVM, aunque solo contribuye con 20% de las concentraciones promedio a lo largo del año (de Foy *et al.*, 2007).

Estos resultados son congruentes con otras evaluaciones que reportan un aporte significativo de

5.5.2 Actividad volcánica

El Popocatepetl, con una elevación de 5419 m s.n.m., es el segundo volcán más activo de México y está ubicado entre los límites del Estado de México, Puebla y Morelos. El volcán representa un riesgo considerable a la salud de la población de

las emisiones del corredor de Tula en la concentración de SO₂ en la ZMVM, especialmente cuando las emisiones se combinan con condiciones meteorológicas desfavorables. Por ejemplo, Sosa *et al.* (2013) reporta que las concentraciones más altas de SO₂ en estaciones septentrionales, como Villa de las Flores (VIF), se asocian con vientos del Norte. Por otro lado, Almanza *et al.* (2012) encontró que actividades de quema en antorcha pueden contribuir entre el 10 y el 27% de los niveles totales de SO₂ en sitios urbanos de la ZMVM, con los valores más altos durante episodios de frentes fríos que impiden la dispersión de contaminantes (ver Figura 1.15 en el Capítulo 1).

Por último, otros estudios modelan el impacto a futuro que podría tener la reducción de emisiones en el corredor industrial sobre la calidad del aire de la ZMVM. García-Escalante *et al.* (2014) muestra cómo una reducción del 40% en las emisiones de SO₂ tiene un impacto positivo en la calidad del aire de la ZMVM respecto a un escenario base. En específico, se observa una disminución del 10% en la concentración de SO₂ en la ZMVM.

Con base en esta evidencia, las acciones de gestión de la calidad del aire en la ZMVM se deben ampliar hacia otras cuencas aledañas, con el fin de reducir las emisiones provenientes de actividades industriales en los sectores de generación de electricidad, petróleo y petroquímica. No obstante, se destaca que estos son giros de jurisdicción federal, por lo que la cooperación entre el gobierno nacional y las entidades respectivas es de suma importancia.

los estados mencionados debido a la emisión y dispersión de cenizas y dióxido de azufre (SO₂).

El volcán se caracteriza por ser una fuente de emisión constante de SO₂, generando algunas de

las columnas más grandes de este contaminante registradas a nivel mundial (Khokhar *et al.*, 2005; Loyola *et al.*, 2008). Por efecto de los patrones de viento en la región, estas fumarolas pasivas pueden dispersarse hasta la Ciudad de México y su zona metropolitana, representando un problema de salud pública.

Debido a la naturaleza dinámica del volcán, es complicado cuantificar la cantidad exacta de SO₂ emitido por el Popocatepetl e identificar su con-

tribución a los niveles de contaminación en la ZMVM. A través de modelos numéricos, el estudio MILAGRO realizado por de Foy *et al.* (2009) indicó que alrededor del 10% de los niveles de SO₂ en la ZMVM pueden atribuirse al volcán, pero es variable y dependiente de los patrones de viento y de lluvia. Otro estudio por el mismo autor estima que el volcán emite alrededor de 316 mil toneladas de SO₂ al año (de Foy *et al.*, 2007) pero que este valor puede incrementar hasta 100 veces de acuerdo con las emisiones históricas reportadas para el volcán.