

04

El impacto del
cambio climático
en la calidad del
aire de la ZMVM



Los efectos del calentamiento global repercuten en procesos climáticos con consecuencias evidentes en la química atmosférica y la calidad del aire.

04



El contenido de este capítulo aborda el impacto que el cambio climático tiene en la calidad del aire, considerando la relación e influencia que ejerce sobre las concentraciones de contaminantes atmosféricos, en específico el ozono (O_3) troposférico y las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ ¹. Mediante una revisión de bibliografía especializada, se pretende analizar cómo los efectos del calentamiento global repercuten en procesos

climáticos, tanto a escala regional como a nivel local en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con consecuencias evidentes en la química atmosférica y la calidad del aire. En este contexto, el capítulo discute las bases para la adopción de acciones y políticas públicas que consideren al cambio climático como un factor integral y sinérgico en la gestión de la calidad del aire, que se traduzcan en beneficios

¹ Las partículas $PM_{2.5}$ son partículas finas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros. Se componen principalmente de iones inorgánicos como sulfato, nitrato y amonio, carbono elemental y compuestos orgánicos, metales pesados, agua y agentes patógenos como bacterias y virus. Los vehículos a diésel son una de las principales fuentes de emisión de este contaminante. Otras emisiones primarias provienen de fuentes industriales y la quema de otros combustibles fósiles. La contaminación por partículas $PM_{2.5}$ provoca efectos graves en la salud, tales como enfermedades cardiovasculares y pulmonares, especialmente en niñas y niños, personas adultas mayores y personas con enfermedades crónicas (OEHA, 2020).

ambientales, sociales y económicos. Para un mayor entendimiento del presente capítulo, se recomienda consultar la descripción de las condiciones climáticas de la ZMVM en el Capítulo

1, así como el Capítulo 3, en donde se expone cómo el comportamiento y formación de los contaminantes atmosféricos se relaciona con distintas variables meteorológicas.

4.1 El cambio climático y sus efectos

4.1.1 Calentamiento global y sus efectos en el medio ambiente

La quema de combustibles fósiles y los cambios de uso de suelo, entre muchas otras actividades humanas, producen cambios en el sistema climático. Las emisiones antropogénicas de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero (CyGEI) y el subsecuente incremento en su concentración en la atmósfera, intensifican el efecto invernadero y contribuyen al aumento de la temperatura en la superficie terrestre y los océanos. Los últimos informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) señalan que, debido a la actividad humana, la temperatura global ha aumentado en aproximadamente 1°C en comparación con niveles preindustriales (1861–1880), aunque a nivel regional las variaciones pueden ser más importantes (Ritchie & Roser, 2019); asimismo,

el calentamiento global actualmente está aumentando a un ritmo de 0.2°C cada 10 años (IPCC, 2019). En la Figura 4.1 se observa cómo ha sido la variación de la temperatura media global desde el año 1960 y su proyección hacia el año 2100 con tres escenarios distintos, marcando como límite un aumento de 1.5°C (línea horizontal). La figura muestra que, derivado de actividades antropogénicas, en el año 2017 la variación de la temperatura media global se encontraba en un rango probable de 0.8 a 1.2°C. A su vez, las proyecciones muestran cómo una reducción más rápida del CO₂ en la atmósfera permitiría limitar el calentamiento a 1.5°C con mayor probabilidad de éxito; en cambio, respuestas más lentas reducen la probabilidad de mantener la temperatura global por debajo de dicho límite.

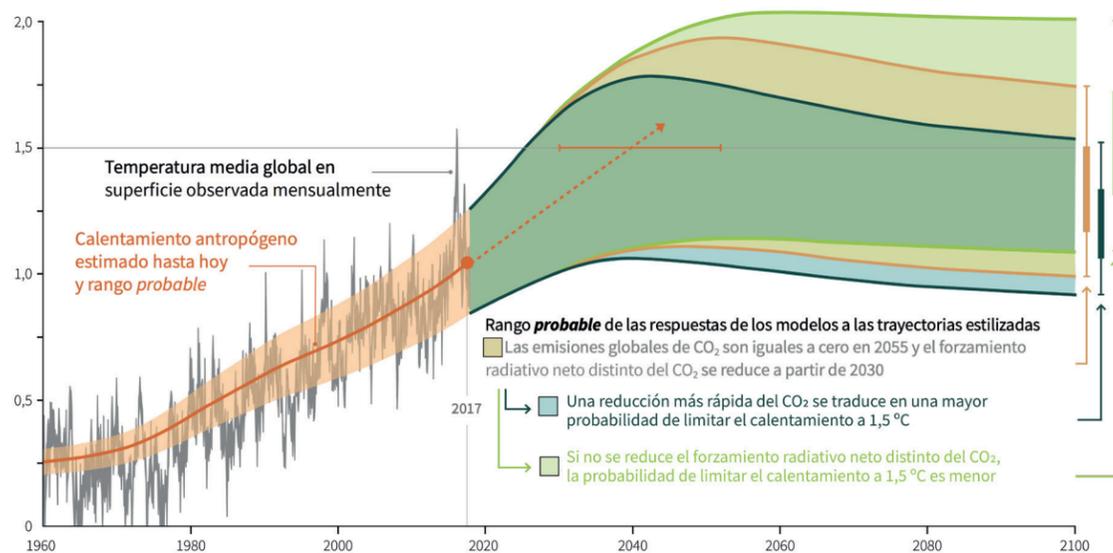


Figura 4.1 Cambio en la temperatura global observada y respuestas de modelos a trayectorias de emisiones antropogénicas

Fuente: IPCC (2019).

De acuerdo con la comunidad científica internacional, un aumento de la temperatura de 2°C o más, comparado con niveles preindustriales, conllevaría repercusiones climáticas catastróficas e irreversibles en los próximos siglos y milenios. En este sentido, la implementación del Acuerdo de París, firmado en el año 2015, tiene por objeto mantener el aumento de la temperatura media global “muy por debajo de los 2°C”, y apremia a tomar acciones que permitan limitar el incremento a 1.5°C (UNFCCC, 2015). En México, el Acuerdo de París fue ratificado por el Senado de la República en septiembre de 2016 y entró en vigor en noviembre del mismo año.

Si bien el calentamiento global es la manifestación más evidente del cambio climático, el número y la magnitud de los impactos ambientales ocasionados por este fenómeno son extensos y se prevé

que continúen aumentando en intensidad y frecuencia. Entre estos impactos destacan el aumento del nivel del mar, la disminución del hielo en los polos y glaciares, el incremento de los incendios forestales y la pérdida de sistemas biológicos como bosques y ecosistemas marinos. Según un análisis reciente de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA, por su sigla en inglés), el aumento global de la temperatura ha sido y seguirá siendo responsable de cambios en patrones de precipitación, así como un incremento en la intensidad y frecuencia de sequías, olas de calor, inundaciones, huracanes, entre otros peligros climáticos (NASA, 2020). En el contexto de este Capítulo, es importante destacar que el cambio climático también influye en el comportamiento y formación de contaminantes en la atmósfera y, por ende, en la calidad del aire.

4.1.2 Impacto del cambio climático en la calidad del aire

A pesar de que el cambio climático y el deterioro de calidad del aire son temas que tradicionalmente se abordan por separado, es importante reconocer que están estrechamente relacionados. La calidad del aire es altamente sensible a la meteorología, razón por la cual el cambio en los patrones del clima, como el aumento de la temperatura, variaciones en los patrones de precipitación, la humedad, la nubosidad y la radiación solar, entre otras variables, pueden originar modificaciones relevantes en la química atmosférica e impactar en la calidad del aire (Nolte *et al.*, 2018). Además, la necesidad de abordar los dos temas de manera integral y sinérgica es muy relevante, dado que los contaminantes atmosféricos y los CyGEI comparten fuentes comunes de emisión. En específico, la quema de combustibles fósiles es una de las principales actividades antropogénicas que contribuye a incrementar el forzamiento radiativo² de la Tierra y deteriorar la calidad del aire (INECC, 2019). En este sentido, los esfuerzos para mitigar las emisiones de contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂)

conllevan beneficios muy importantes, tanto para limitar el aumento de la temperatura global a largo plazo, como para mejorar la calidad del aire local en el corto y mediano plazo. Lo anterior se debe a que las estrategias de reducción de CyGEI en algunas fuentes, también permiten disminuir emisiones de contaminantes locales como los óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y partículas suspendidas (West *et al.*, 2013), así como de carbono negro, metano (CH₄) y otros compuestos orgánicos volátiles (COV).

Los efectos del cambio climático alteran la concentración de contaminantes en el aire, ya que los cambios en la meteorología local, regional y sinóptica inciden en su formación, reactividad, transporte y remoción en la atmósfera (Fu & Tian, 2019). En específico, el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación y niveles de humedad, y la alteración de la circulación de los vientos, pueden impactar significativamente sobre la calidad del aire. La evidencia científica muestra

² Es la variación, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m²) del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de la concentración de CO₂ o de la radiación solar. En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, el forzamiento radiativo se define como la variación respecto de 1750 y denota un promedio global anual. Un forzamiento radiativo positivo contribuye al calentamiento de la Tierra, mientras que un forzamiento radiativo negativo enfría al planeta.

que el aumento de la temperatura incide en la formación O₃ y partículas PM_{2.5} (Fiore *et al.*, 2015), dos de los contaminantes que frecuentemente rebasan los límites permisibles normados en la ZMVM. Al incremento en la concentración de contaminantes atmosféricos debido a los efectos del cambio climático se le conoce como **penalización climática** (en inglés *climate change penalty*).

En otras palabras, los cambios en el clima provocados por las emisiones de CyGEI conllevan un impacto específico en las concentraciones de contaminantes a escala local. La literatura muestra que, entre 1860 y el año 2000, los niveles de O₃ troposférico aumentaron en 30 ± 0.16 ppb³, en tanto que la concentración promedio de partículas PM_{2.5} incrementó en 8 ± 0.16 µg/m³ (Fang *et al.*, 2013). Las emisiones primarias de contaminantes de vida corta y precursores son responsables de la mayor parte de los incrementos observados, con un aporte del 94% para el aumento en los niveles de O₃ y 83% para PM_{2.5}. Por su parte, al cambio climático se le atribuye 5% del aumento observado en la concentración de PM_{2.5} (0.4 ± 0.17 µg/m³) y 2% del incremento en O₃ (0.5 ± 0.28 ppb). Se destaca también el papel de las emisiones de CH₄ en el aumento en la concentración de O₃ en ese mismo periodo, igual al 15% del cambio observado (4.3 ± 0.33 ppb). Cabe recordar que, en ese mismo periodo (1860-2000), la temperatura global promedio se elevó en aproximadamente 1°C. Algunos autores señalan que la magnitud de la penalización climática en los niveles de PM_{2.5} necesita mayor investigación debido a la falta de consistencia en los resultados obtenidos al calcular el impacto del cambio climático en los niveles de este contaminante (García-Menéndez *et al.*, 2015).

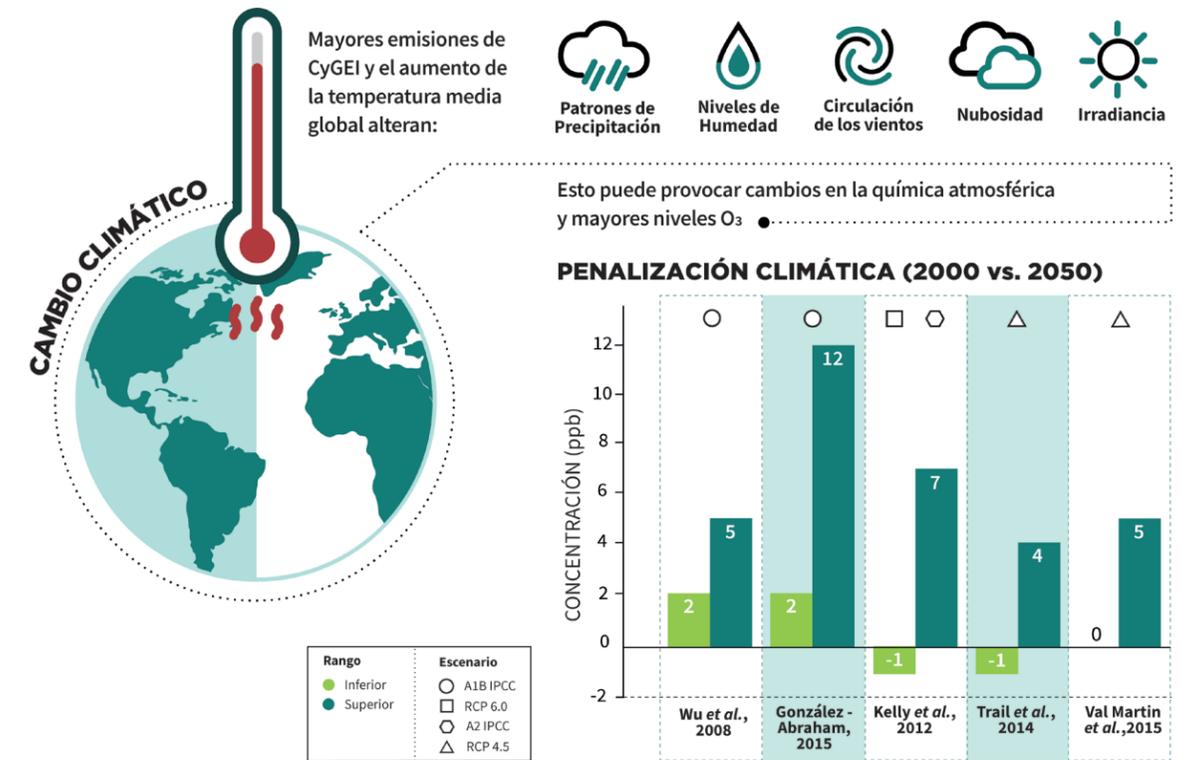
Shi *et al.* (2016, 2019) analizaron los efectos del aumento de la temperatura sobre los niveles de O₃ y de partículas PM_{2.5} en el sureste de Estados Unidos. Se identificó que un incremento de 1°C en la temperatura durante el verano incide en un aumento de 1.05 µg/m³ en la concentración de PM_{2.5} y un aumento de 2.9 ppb en los niveles de O₃, lo cual

también se traduce en aumentos en la mortalidad prematura de la población por estar expuesta a una mayor concentración de estos contaminantes.

Wu *et al.* (2008) pronostican un aumento relevante en los niveles de O₃ en diferentes áreas de Estados Unidos, como resultado del cambio climático. Utilizando un modelo global de transporte químico (GEOS-Chem), se estimó una penalización climática de entre 2 y 5 ppb para 2050, expresado como el máximo diario de los promedios móviles de 8 horas, en los estados del medio-oeste y el noreste de Estados Unidos, principalmente debido a variaciones en los patrones de viento. Se destaca que los episodios de contaminación severa por O₃ se ven más influenciados por el cambio climático que los valores promedio, con penalizaciones que superan las 10 ppb.

Otros estudios presentan pronósticos similares bajo distintos escenarios de cambio climático. Fiore *et al.* (2015) revisaron múltiples estudios de modelación que evalúan la respuesta en la calidad del aire ante los efectos del cambio climático en Estados Unidos. Si bien los resultados varían en función de los parámetros de simulación y la región analizada, de forma general se observa que, de mantenerse los niveles actuales de emisión de contaminantes, el cambio climático impactaría en la calidad del aire al aumentar los niveles de O₃, particularmente en zonas con niveles elevados de NO_x. Por ejemplo, bajo un escenario de forzamiento radiativo RCP⁴ 8.5 y un horizonte temporal hacia 2050, la penalización climática en los Estados Unidos durante el verano podría alcanzar niveles de hasta 12 ppb, expresada como el máximo diario de los promedios de 8 horas (Gonzalez-Abraham *et al.*, 2015). La Figura 4.2 resume la penalización climática sobre la concentración de O₃, según diferentes investigaciones que comparten un horizonte temporal común (2000 vs. 2050), la misma área de estudio (Estados Unidos) y escenarios climáticos consistentes entre sí. Se indica el rango probable de la penalización climática sobre el máximo diario de los promedios de 8 horas para cada estudio, así como el escenario de referencia del IPCC.

³ Definido como el promedio de las concentraciones diarias horarias máximas en el semestre con niveles más elevados de O₃.
⁴ Para más información consultar la sección 4.1.3.



Nota: La penalización climática se expresa como el cambio en el promedio de los máximos diarios de los promedios de 8 horas.

Figura 4.2 Penalización climática en la concentración de O₃

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Gonzalez-Abraham *et al.* (2015); Kelly *et al.* (2012); Trail *et al.* (2014); Val Martín *et al.* (2015); Wu *et al.* (2008).

Para partículas PM_{2.5}, la respuesta de la concentración a los efectos del cambio climático es más variable. Los cambios en la temperatura, precipitación, humedad y vientos tienen diferentes efectos sobre los distintos componentes de las partículas suspendidas, lo que genera influencias opuestas sobre la penalización climática total. Por ejemplo, un aumento en la intensidad y frecuencia de incendios forestales generaría más emisiones de partículas, COV y carbono negro, en tanto que el aumento en la temperatura podría favorecer la oxidación de contaminantes atmosféricos primarios y contribuir a la formación de aerosoles secundarios. Por otro lado, el aumento en la temperatura favorece que compuestos orgánicos y nitratos de amonio se en-

cuentren en fase gaseosa y no como partículas (Fiore *et al.*, 2015).

A pesar de la evidencia sobre los impactos del cambio climático en la calidad del aire, alrededor del mundo existe una brecha de investigación en la predicción sobre los impactos de la penalización climática a futuro (West *et al.*, 2013). No obstante, los datos presentados anteriormente cobran mayor relevancia si se comparan con la información obtenida durante la evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020⁵. Este estudio estimó que la aplicación de las medidas del ProAire entre 2017 y 2020 resultaría en una disminución en los niveles de O₃ de alrededor de 2.2 ppb en la ZMVM y 1.5 ppb⁶ en la Ciudad de México. Si bien las estrategias implementadas en

⁵ Para más información consultar la sección 3.6.3 del ProAire.
⁶ Durante las horas de máxima concentración (14:00 a 16:00 horas).

la ZMVM han permitido reducir las concentraciones de algunos precursores de O₃, es posible que a futuro estos resultados sean insuficientes para cubrir la penalización por O₃ que determina la literatura. Con base en los resultados expuestos, es

posible asumir que la penalización climática es suficientemente significativa como para realizar una investigación local que arroje la evidencia científica necesaria para fortalecer las decisiones de política pública en materia de calidad del aire.

4.1.3 Proyecciones del cambio climático a futuro

El IPCC proyecta en su Quinto Informe de Evaluación que la temperatura media global aumentará entre 1.5°C y 4.8°C en comparación con niveles preindustriales; la magnitud del cambio dependerá de los niveles de emisiones que se observen durante los próximos 60 a 80 años (IPCC, 2013). Para modelar las proyecciones del cambio climático a futuro, el IPCC determinó una serie de escenarios temporales al 2100, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2014). Las RCP comprenden cuatro trayectorias que modelan diferentes esfuerzos de mitigación de concentraciones de CyGEI en la atmósfera y se asocian a cuatro niveles específicos de forzamiento radiativo positivo: 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m². Es importante subrayar que las RCP son escenarios de concentración de CyGEI en la atmósfera, y no de emisiones, aunque estas dos variables están estrechamente relacionadas.

temperatura media global y un amplio margen de variación, debido a la incertidumbre sobre la política climática a futuro y el desarrollo socioeconómico (IPCC, 2014). En todo caso, si para el 2100 la concentración de CO₂ no supera las 421 ppm (RCP 2.6), lo cual es altamente improbable considerando la concentración actual⁷, se prevé un aumento de la temperatura global de aproximadamente 1°C en comparación con niveles preindustriales. Bajo este mismo escenario, se prevé que el forzamiento radiativo empezará una trayectoria decreciente alrededor del año 2100. En el segundo escenario, denominado RCP 4.5, se considera que los esfuerzos de mitigación lograrían mantener la concentración de CO₂ por debajo de 538 ppm. En este caso, el forzamiento radiativo se estabilizaría en 2100 y se estima que la temperatura global alcanzaría un aumento promedio de 1.8°C, lo cual representa un valor superior al objetivo ideal de mitigación estipulado en el Acuerdo de París del año 2015.

Como se puede ver en la Tabla 4.1, a cada RCP le corresponden cambios específicos en la tem-

Tabla 4.1 Proyecciones del cambio en la temperatura media global bajo diferentes escenarios climáticos

Escenario	Cambio en la temperatura media global en la superficie terrestre (°C) respecto del periodo de referencia (1986-2005)			
	2046-2065		2081-2100	
	Media	Rango probable	Media	Rango probable
RCP 2.6	1.0	0.4 a 1.6	1.0	0.3 a 1.7
RCP 4.5	1.4	0.9 a 2.0	1.8	1.1 a 2.6
RCP 6.0	1.3	0.8 a 1.8	2.2	1.4 a 3.1
RCP 8.5	2.0	1.4 a 2.6	3.7	2.6 a 4.8

Fuente: IPCC (2013).

⁷ En abril 2020, la concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzó 416 ppm, el valor más alto desde que se empezó a medir de forma continua en 1958 (UNEP, 2020).

El tercer escenario (RCP 6.0) estima que los niveles de CO₂ aumentarán hasta 670 ppm, lo cual ocasionaría un incremento de la temperatura media global de aproximadamente 2.2°C. Bajo este modelo, el forzamiento radiativo seguiría en una trayectoria creciente hacia el 2100. El último escenario, denominado RCP 8.5, modela concentraciones de hasta 936 ppm de CO₂ en la atmósfera y prevé un aumento promedio de la temperatura de 3.7°C con respecto a niveles preindustriales, lo cual conllevaría impactos catastróficos e irreversibles.

Respecto a los riesgos futuros asociados con el cambio climático, es importante distinguir entre los diferentes sistemas que podrían verse afectados. Estos incluyen sistemas físicos, como los glaciares, los ríos, lagos y el nivel del mar; sistemas biológicos, como ecosistemas terrestres y marinos; y sistemas humanos y gestionados, como la producción de alimentos, medios de subsistencia, la salud pública y la economía. De forma general, cualquier tipo de escenario que modele cambios en la temperatura media global superiores a 2°C ocasionaría impactos muy graves sobre todos los sistemas, tales como la extinción de un alto número de especies y riesgos importantes para la seguridad alimentaria y las actividades humanas, incluidos el cultivo de alimentos y el trabajo al aire libre durante ciertas

épocas del año, por la combinación de altas temperaturas y humedad (IPCC, 2014). Por ejemplo, en un escenario en el que se alcanzan los 2°C para el año 2100, la probabilidad de que el Océano Ártico esté libre de hielo marino sería, como mínimo, de una vez cada 10 años, comparada con una frecuencia de una vez cada 100 años bajo un escenario con un aumento promedio de 1.5°C. Asimismo, la duración promedio de las sequías anuales bajo el escenario de 1.5°C sería superior a 2 meses, mientras que al alcanzar los 2°C se llegaría a más de 4 meses al año. Además, si el aumento de las temperaturas llegara a exceder los 3°C, la duración promedio de las sequías sería de 10 meses al año. En este contexto, aunque los compromisos climáticos estipulados a través de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) fueran cumplidos, se estima que las temperaturas globales podrían aumentar en un rango de entre 2.5 y 3.2°C a 2100 (Climate Action Tracker, 2020).

Como se expuso anteriormente, además de estos efectos, a nivel local también se registrarán consecuencias en la calidad del aire a causa de mayores emisiones por incendios forestales, incremento de partículas por desertificación y erosión del suelo, así como un mayor volumen de emisiones biogénicas de COV, por mencionar algunas.

4.2 Cambio climático en la Zona Metropolitana del Valle de México

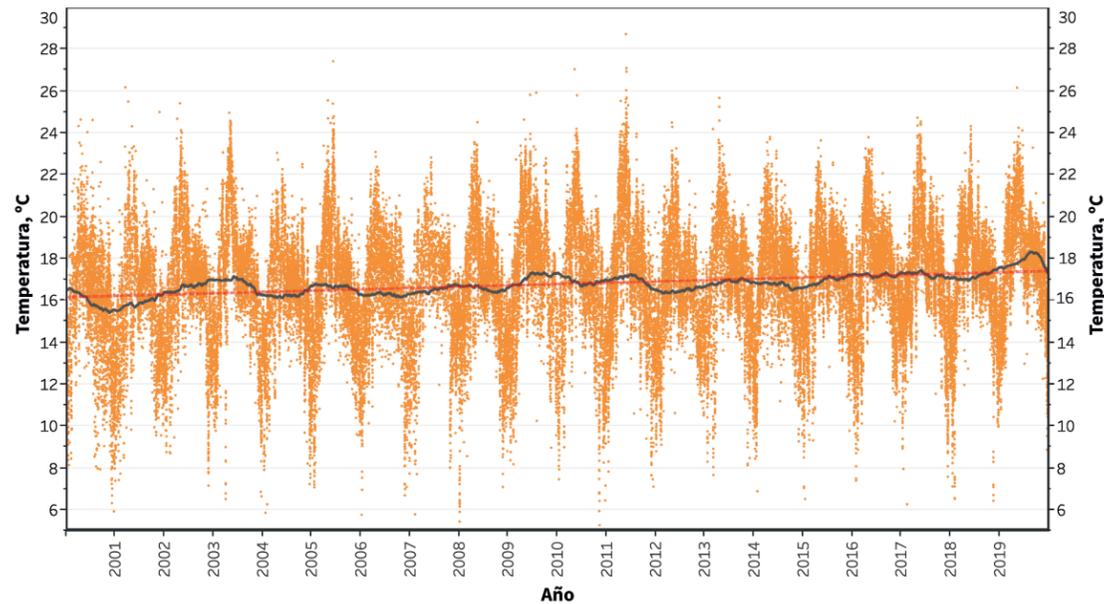
El cambio climático es un problema crítico en la ZMVM. Esto se debe en gran medida a que este fenómeno exacerba problemáticas ya graves, como la calidad del aire, la escasez de agua y las inundaciones (Kimmelman, 2017). En el contexto de este capítulo, se discute cómo se ha modificado la temperatura y los niveles de precipitación en la ZMVM durante los últimos años, y cómo se espera que las normales climatológicas relevantes para la calidad del aire cambien a futuro, como consecuencia del cambio climático y escenarios específicos para la ZMVM.

A pesar de que se carece de información suficiente para determinar cuánto y cómo el cambio climático ha impactado a los patrones de viento en la ZMVM, existen registros que muestran cómo la intensidad de los vientos se ha incrementado en Norte América, Europa y Asia durante la última década (Zeng *et al.*, 2019). Este fenómeno es relevante porque los vientos suelen tener un impacto positivo en la calidad del aire, independientemente de su dirección, permitiendo una mayor dispersión de los contaminantes atmosféricos. Por otro lado, la literatura indica

que el incremento de CO₂ en la atmósfera provoca mayores niveles de humedad, favoreciendo la precipitación de algunos contaminantes.

4.2.1 Aumento de la temperatura

Los registros de la REDMET muestran un aumento constante en la temperatura promedio de la ZMVM entre 2001 y 2019. En específico, esta se ha incrementado en aproximadamente 0.9°C, en tanto que los valores máximos de temperatura aumentaron en ~0.4°C y los valores mínimos en ~1.2°C, tendencia que se puede observar en la Figura 4.3.



Nota: Información generada a partir de las estaciones FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL.

Figura 4.3 Serie de tiempo de la temperatura promedio diaria en la ZMVM entre 2000 y 2019

Fuente: Informe 2018 de Calidad del Aire (SEDEMA, 2020).

En la Ciudad de México, los datos de la REDMET de la SEDEMA muestran que en 2016, 2017 y 2018 se registraron anomalías en la temperatura a lo largo de casi todo el año. Por ejemplo, si bien en 2018 el promedio de la temperatura ambiente registrado por todas las estaciones de monitoreo en la Ciudad de México fue de 16.3°C, 0.5°C menos que en 2017, cuando se comparan los promedios mensuales en 2018 con los valores históricos

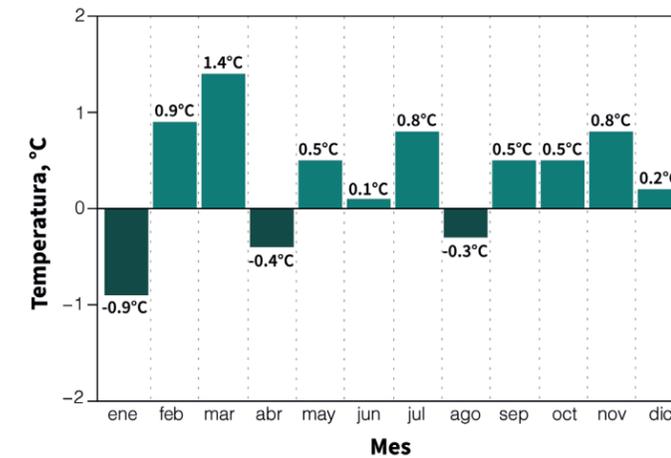
A continuación, se analiza a detalle cómo han cambiado los patrones del clima en la ZMVM y su posible impacto en la calidad del aire.

Cabe resaltar que, a nivel global, 2015, 2016, 2017 y 2018 fueron los 4 años más cálidos desde 1981 en términos de la temperatura promedio (SEDEMA, 2020). A nivel nacional, todos los meses en el 2019 registraron anomalías positivas, y agosto⁸ fue el mes más cálido en la historia de México desde 1953 (CONAGUA, 2019).

de 2000-2017, se observan anomalías positivas (temperaturas más altas) durante nueve meses: febrero, marzo, mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre (ver Figura 4.4). En febrero, marzo, julio y noviembre se presentaron anomalías iguales o mayores a 0.8°C, en tanto que el aumento más importante se observó en marzo, cuando el promedio mensual se elevó en 1.4°C en comparación con los valores de 2000-2017.

La variabilidad observada en la temporalidad de las anomalías de temperatura está estrechamente relacionada con fenómenos globales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)⁹, el cual exhibe dos fases, una cálida (El Niño) y una fría (La Niña). Por ejemplo, la presencia de sistemas anticiclónicos en

el noroeste de México durante 2018 ocasionó que sistemas frontales se desplazaran hacia el Golfo de México, provocando una anomalía negativa de hasta -1°C en la Ciudad de México. Aun así, el análisis de los datos históricos de temperatura evidencia un aumento constante de esta variable meteorológica.



Nota: La gráfica compara los promedios mensuales de 2018 con los valores de 2000 a 2017. Los valores de cada barra corresponden a la diferencia de la temperatura en grados centígrados (°C). Para construir el gráfico se emplearon datos históricos de las siguientes estaciones: FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL.

Figura 4.4 Anomalía de la temperatura ambiente para la Zona Metropolitana del Valle de México en 2018

Fuente: Informe 2018 de Calidad del Aire (SEDEMA, 2020).

Además, en la ZMVM, debido a los efectos de la isla de calor urbana, las zonas centrales de la ciudad pueden experimentar un mayor impacto en la temperatura, pues esta puede llegar a ser hasta 4.6°C más cálida que en las afueras de la zona urbana (Poma, 2019). Esto se debe a que en las zonas centrales de la metrópoli del Valle de México se encuentran edificaciones y estructuras urbanas con materiales oscuros como el asfalto y el cemento, los cuales absorben calor, además de que se carece de suficiente cobertura vegetal. Este fenómeno se evidencia con los registros de la REDMET, que indican mayores promedios de temperatura en las estaciones ubicadas en el centro de la ciudad (SEDEMA, 2018a).

Las proyecciones a futuro del cambio climático para la ZMVM pronostican picos de temperatura durante la época seca-caliente, así como un aumento generalizado de la temperatura promedio en el resto del año (Lezama & Graizbord, 2012). En este contexto, los escenarios de cambio climático específicos para el país, generados en conjunto por el INECC y la UNAM, funcionan como una guía de los posibles cambios que se podrán observar en la temperatura de la ZMVM (INECC-PNUD & Her-

nández Grajales, 2017). Estos escenarios permiten comparar los resultados que arrojan cuatro Modelos de Circulación General para la anomalía de temperatura en todo el país, bajo tres horizontes temporales (2015-2039, 2045-2069 y 2075-2069) y dos RCP (4.5 y 8.5). La Tabla 4.2 resume las anomalías proyectadas para el promedio mensual de la temperatura máxima bajo distintos escenarios de cambio climático en la ZMVM.

Si se toma como ejemplo el mes de abril bajo el escenario RCP 4.5, se espera que entre 2015 y 2039 el promedio de la temperatura máxima aumente en 1.81°C. Bajo el mismo escenario, pero para el periodo 2045-2069, se estima que la anomalía será de 2.81°C. Para el escenario RCP 8.5 las anomalías se vuelven aún más significativas; por ejemplo, se proyecta que, para 2045-2069, la anomalía en el promedio mensual de la temperatura máxima para la mayoría de los meses se encuentre por encima de 3.0°C respecto de la normal meteorológica entre 1961-2000, determinada a partir de datos del Sistema Meteorológico Nacional. Para mayor detalle sobre los escenarios de cambio climático consultar el Anexo 4.1.

⁸ En este mes se registró un promedio nacional de 27.0°C y una anomalía positiva de 3.3°C.

⁹ En el Capítulo 1 se proporciona más información sobre las condiciones climáticas en la ZMVM.

Tabla 4.2 Anomalía en la temperatura máxima para la ZMVM bajo distintos escenarios de cambio climático

Mes	Anomalía en la temperatura máxima (°C) respecto del período 1961-2000					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2015-2039	2045-2069	2075-2099	2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	1.10	2.18	2.65	1.32	2.85	5.05
Febrero	1.39	2.48	2.80	1.40	3.17	5.01
Marzo	1.80	2.81	3.42	1.50	3.59	5.74
Abril	1.81	2.81	3.59	1.58	3.84	5.95
Mayo	1.49	2.87	3.40	1.68	3.61	5.73
Junio	1.55	2.60	2.90	1.43	3.21	5.18
Julio	1.81	2.77	3.37	1.81	3.48	5.44
Agosto	1.32	2.94	3.36	1.87	3.63	5.86
Septiembre	1.67	2.75	3.23	1.69	3.44	5.75
Octubre	1.36	2.30	2.79	1.34	2.98	4.84
Noviembre	1.40	2.08	2.36	1.22	2.81	4.49
Diciembre	1.36	2.14	2.52	1.27	2.87	4.54

Nota: Los resultados corresponden a los promedios de cuatro Modelos de Circulación General (CNRMCM5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GFDL-CM3). En el Anexo 4.1 pueden consultarse los resultados desagregados por modelo.

Fuente: *Elaboración propia con datos de los escenarios de cambio climático para México (INECC & UNAM, 2015; INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017).*

4.2.2 Variación en los patrones de precipitación

De acuerdo con el IPCC, uno de los tres mayores impactos del cambio climático en América Latina será la menor disponibilidad de agua y el mayor número de inundaciones (IPCC, 2019). Estos fenómenos se ven reflejados en las proyecciones de cambio climático a futuro en la ZMVM, las cuales se resumen en la Tabla 4.3 (INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017). Estos escenarios presentan evidencia sobre la variación a futuro en los patrones de precipitación en la cuenca del Valle de México como consecuencia del cambio climático.

Es importante destacar que el fenómeno ENOS tiene un papel muy importante sobre el comportamiento de la precipitación en la ZMVM. En específico, el calentamiento aportado por la fase de El Niño modula

el inicio e intensidad de la temporada de lluvias, retrasa su comienzo y ocasiona la disminución en la cantidad de lluvia. Si se toma como ejemplo un mes de lluvia importante para la ZMVM, como es el caso de agosto, los escenarios de cambio climático establecen que, en una proyección moderada (RCP 4.5) a corto plazo (2015-2039), la precipitación disminuirá en aproximadamente -11.06 mm. La tendencia general de los modelos es que a largo plazo haya una menor cantidad de precipitación acumulada a lo largo del año, pero con lluvias cuya frecuencia e intensidad será cada vez más errática. En invierno y en primavera se prevén condiciones muy variables, tanto con anomalías positivas como negativas; los escenarios reflejan esta tendencia, ya que diferentes modelos prevén anomalías tanto positivas como

negativas para un mismo mes, RCP y horizonte temporal (los resultados de los escenarios climáticos desagregados por Modelo de Circulación General se presentan en el Anexo 4.1). Dado que los niveles

de variabilidad son muy altos, resulta complicado identificar patrones de disminución o aumento en la precipitación, particularmente durante la época seca-fría, que va de noviembre a febrero.

Tabla 4.3 Anomalía en la precipitación mensual para la ZMVM bajo distintos escenarios de cambio climático

Mes	Anomalía en la precipitación mensual acumulada (mm) respecto del período 1961-2000					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2015-2039	2045-2069	2075-2099	2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	-1.06	-3.25	-5.63	-1.78	-1.55	-8.83
Febrero	-4.79	-4.27	-3.90	-1.25	-7.18	-8.48
Marzo	-7.46	-6.79	-11.07	-4.21	-10.04	-14.25
Abril	-2.07	-3.87	-6.13	-2.55	-10.40	-12.52
Mayo	2.40	1.73	3.40	0.29	-8.72	-8.15
Junio	-3.29	-0.34	-0.38	-2.28	1.88	3.17
Julio	-8.93	-17.48	-19.98	-7.27	-15.78	-26.48
Agosto	-11.06	-21.49	-23.27	-7.38	-21.64	-40.41
Septiembre	-4.29	3.91	-3.20	11.72	4.36	-6.67
Octubre	-7.97	1.58	9.51	8.21	-1.11	5.88
Noviembre	5.64	8.79	11.65	5.02	8.98	26.14
Diciembre	-3.36	1.44	2.72	-0.31	2.64	5.88

Nota: Los resultados corresponden a los promedios de cuatro Modelos de Circulación General (CNRMCM5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GFDL-CM3). En el Anexo 4.1 pueden consultarse los resultados por desagregados por modelo.

Fuente: *Elaboración propia con datos de los escenarios de cambio climático para México (INECC & UNAM, 2015; INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017).*

Finalmente, es importante considerar que las proyecciones de cambio climático predicen que se intensificarán los fenómenos climáticos sinópticos (Wang *et al.*, 2019). En la sección 4.3 se discuten las posibles repercusiones de la intensificación y variabilidad de ENOS sobre la gestión de la calidad del aire. Por ahora es importante recordar que, en un evento intenso de El Niño, la precipitación disminuye en verano y otoño. En cambio, durante la fase contraria -La Niña- los inviernos son aún más secos (Bravo Cabrera *et al.*, 2017, 2018; Magaña *et al.*, 2003; Sheinbaum, 2003).





4.2.3 Impactos económicos y sociales

Además de los efectos negativos que el cambio climático tiene sobre el medio ambiente, este también implica repercusiones considerables a nivel económico y social. A pesar de que la estimación de este tipo de impactos resulta compleja, es posible comprender los efectos que el cambio climático tiene sobre la actividad económica, a través de estudios regionales y sectoriales que cuantifican dichos efectos. Según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE, por sus siglas en inglés), si el ritmo actual con el que se está elevando la temperatura global continua (+0.2°C por década), para el año 2060 el efecto combinado en el PIB mundial correspondería a pérdidas económicas del 1.0 al 3.3% por año. Si el calentamiento global siguiera una trayectoria RCP 8.5 y se alcanzara un aumento promedio de 4°C en la temperatura global para el año 2100, el impacto sobre el PIB global sería mucho mayor, con pérdidas económicas en un rango probable del 2 al 10% respecto de un escenario teórico donde no se registran impactos negativos por el cambio climático (OCDE, 2015).

Debido a su situación geográfica y contexto socioeconómico, en la Ciudad de México se presentan múltiples riesgos naturales y humanos. En tiempos recientes, la ciudad ha sido afectada por diversos fenómenos como inundaciones y pan-

demias. Durante el periodo de 1980 a 2013, los daños reportados por fenómenos hidrometeorológicos en la ciudad, como lluvias, inundaciones y desbordamiento de aguas negras, resultaron en un impacto económico de \$32.4 millones de dólares (precio promedio anual para el periodo 1980-2014), afectando a más de 49 mil personas; en el mismo periodo, los daños ocasionados por incendios forestales afectaron un total de 17 mil hectáreas en la ciudad, con un costo económico directo de \$2.7 millones de dólares (SEDEMA, 2016).

En la Ciudad de México, para hacer frente a los impactos climáticos, se han puesto en marcha distintos instrumentos que definen las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático a nivel local, tales como el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2014-2020 (PACCM) y la Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México (ELAC), los cuales se encuentran en proceso de actualización. Un estudio desarrollado por C40 estimó que, al ejecutarse todas las políticas climáticas definidas para la Ciudad de México en dichos instrumentos, tales como inversiones en transporte público, movilidad activa y eficiencia energética, los beneficios socioeconómicos acumulados a 2050 ascenderían a más de \$60 mil millones de pesos (M.N.) (SEDEMA & C40, 2017).

Un aumento continuo en la temperatura se traducirá en diferentes impactos en una variedad de sectores dentro de la Ciudad de México. Algunos efectos socioeconómicos particulares serían los siguientes (SEDEMA, 2018b):



Un incremento en el gasto de las familias por el aumento en el consumo eléctrico, como consecuencia del uso de aires acondicionados y equipos para la conservación de alimentos.

Mayor presión sobre los recursos hídricos, producto de un aumento en la demanda de agua para actividades agrícolas y residenciales. Esto es de especial importancia, puesto que la ZMVM ya registra actualmente un grado de presión elevado en términos de la disponibilidad de agua subterránea. Cualquier modificación en la recarga, volumen concesionado y la descarga natural comprometida afectaría negativamente la disponibilidad media anual de este recurso.

Afectaciones sobre actividades agrícolas y pecuarias, sector que si se compara con el PIB generado por el sector secundario o el terciario, no figura entre los sectores económicos predominantes en la ZMVM, representa el sustento de grupos de población con ingresos bajos y además ocupa una parte sustancial del suelo de la ZMVM, particularmente en las periferias de la mancha urbana. Con un aumento en la temperatura media de 1.5°C (RCP 4.5) las pérdidas en la producción por hectárea oscilarían entre el 10 y el 22%, en tanto que para un RCP 8.5 superarían el 30%.

Cambios en la oferta y demanda de actividades turísticas basadas en actividades recreativas al aire libre.

Pérdidas de trabajos e ingresos, reducción del desempeño escolar, efectos negativos en la productividad e ingresos futuros, como consecuencia de ajustes en hogares siniestrados por los efectos del cambio climático.

Impactos sobre la deforestación y la transformación del suelo de conservación, por condiciones climáticas cada vez más extremas y la intensificación de incendios forestales y procesos de desertificación. Asimismo, esto tiene un impacto negativo sobre la captura y almacenamiento de carbono en uno de los sumideros más importante dentro de la ZMVM.

Reducción del ritmo de crecimiento del PIB y retroceso en el combate a la pobreza. El cambio climático intensificaría desigualdades sociales al interior de la zona metropolitana. Por ejemplo, los costos en la agricultura son marginales respecto del PIB total, pero tienen un mayor impacto en alcaldías o municipios rurales con un mayor índice de pobreza. Además, los impactos que el cambio climático tiene sobre la seguridad alimentaria (reducción en la oferta de alimentos y aumento de precios) son más evidentes en poblaciones de bajos recursos socioeconómicos que dedican un mayor porcentaje de su ingreso mensual a la compra de víveres.

Tomando en cuenta lo anterior, resalta la relación que existe entre el cambio climático y la pobreza como un factor importante que se debe de considerar y priorizar para hacer frente a los impactos climáticos y económicos esperados del mismo. Con el cambio climático las áreas pobres de las ciudades se verán severamente afectadas; por ejemplo, incrementará el costo del servicio y abastecimiento de agua si, al mantenerse los mismos niveles de consumo, disminuye la precipitación y aumenta el nivel de evaporación. También, los mayores niveles de humedad y temperatura podrían estimular la propagación de ciertas enfermedades infecciosas y aquellas transmitidas por vectores, como moscos, bacterias y otros mi-

croorganismos, entre la población más vulnerable. Además se debe de considerar el impacto a largo plazo e implicaciones del cambio climático a largo en fenómenos asociados a la pobreza, tales como la seguridad alimentaria, la productividad y la propia viabilidad de los ecosistemas agrícolas mundiales (Sánchez *et al.*, 2011).

Asimismo, es importante resaltar que el cambio climático afecta de manera diferente a las mujeres y a los hombres, por lo cual es fundamental incorporar un enfoque de género. Esto se debe a que el 70% de las personas que viven en pobreza en el mundo son mujeres; además, por las persistentes desigualdades derivadas de los roles de género,

las mujeres siguen teniendo un papel fundamental en actividades económicas, en el cuidado del hogar y en procurar el bienestar de los integrantes de las familias. En un estudio realizado a hombres y mujeres en la Ciudad de México para identificar los impactos del cambio climático en sus actividades diarias y en hábitos de uso y consumo de recursos y servicios, las mujeres participantes aseguraron que cuando se enferman por manifestaciones del

clima difícilmente son cuidadas por sus parejas; por el contrario, reconocieron que el cuidado principal se los brindan otras mujeres (SEDEMA, 2017). La intensificación en las cargas de cuidado tiene un impacto negativo en el desarrollo de las mujeres, ya que puede restarles tiempo disponible para su educación, descanso, generación de ingresos, participación política, así como para contribuir a los procesos comunitarios de toma de decisiones.

4.3 Impacto del cambio climático en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México

En 1992, la ONU clasificó a la Ciudad de México y su zona metropolitana como la ciudad más contaminada en el planeta. Desde entonces, a pesar de los cambios en los patrones climáticos a nivel global, y del crecimiento poblacional y económico, la calidad del aire ha mejorado de manera significativa en la ZMVM. Esto se debe, en gran medida, al despliegue y la ejecución de los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire o ProAire, a la coordinación entre los gobiernos estatales y el gobierno federal, y a la reducción de emisiones en sectores clave, como el transporte urbano (C40, 2013). Sin embargo, en el Capítulo 3 se detalla cómo los niveles de contaminación del aire siguen presentando concentraciones altas; el ritmo de mejora se ha desacelerado, en específi-

co para O₃ y partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}, contaminantes que de manera frecuente superan los límites permisibles de las normas de salud ambiental, por lo que suponen un riesgo a la salud de la población.

Un nuevo reto en la gestión de la calidad del aire es incorporar nuevos factores, como el cambio climático, en el diseño de políticas públicas, e incluir un enfoque que considere cómo los diferentes cambios en los patrones de clima y sus proyecciones a futuro perjudicarán o beneficiarán el estado de la contaminación atmosférica en la ZMVM. A continuación se describen los principales efectos proyectados en la calidad del aire de la ZMVM, como consecuencia del cambio climático (ver Figura 4.5).

Adelanto en las épocas de calor, aumento de la temperatura promedio y días de calor extremo

En las últimas dos décadas (2000-2017), los promedios mensuales y anuales de la temperatura en la ZMVM han incrementado de manera sostenida y significativa (aproximadamente en 1°C). Además de este fenómeno, se registra un mayor número de días de calor extremo, los cuáles se ven exacerbados en las ciudades por el efecto de la isla de calor urbana (Poma, 2019). De esta manera, en algunas zonas de la Ciudad de México la temperatura se ha incrementado en casi 4°C (SEMARNAT, 2016). A pesar de que la relación entre la variación

de los patrones climáticos y la calidad del aire es compleja, y que las interacciones necesitan investigarse a nivel regional, existen estudios que han demostrado cómo el aumento de la temperatura se relaciona con una concentración más alta de O₃ y aerosoles secundarios.

Como se detalló anteriormente, la formación de O₃ troposférico se ha visto afectada por el aumento de la temperatura promedio a nivel global. A título ilustrativo y con base en las investigaciones expuestas



Figura 4.5 Impactos del cambio climático en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México. Fuente: Elaboración propia.

anteriormente, en la ZMVM se podría estimar que el incremento en la temperatura media anual, igual a 1°C entre 2000 y 2017, ha penalizado las concentraciones máximas horarias de O₃, particularmente durante el verano; en específico, este cambio implicaría un aumento en el nivel de O₃ de 2.9 ppb, mientras que la afectación en los niveles de partículas PM_{2.5} sería de 1.05 µg/m³ (Shi *et al.*, 2019).

Sin embargo, las condiciones fisiográficas y meteorológicas de la cuenca del Valle de México son diferentes que las del sureste de Estados Unidos donde se determinó este valor (Shi *et al.*, 2019). Cabe destacar que en la ZMVM el impacto del aumento de

la temperatura podría ser más relevante que en el sureste de Estados Unidos, debido a la altitud de la ZMVM (2240 m s.n.m.), lo que provoca que la región esté expuesta a un 20% más de radiación solar con respecto al nivel del mar. En este contexto, las altas temperaturas y la mayor radiación solar incrementan la actividad fotoquímica en la atmósfera y favorecen la formación de O₃ troposférico (Bento *et al.*, 2017). Con las proyecciones a futuro del adelanto de las épocas de calor, el aumento de la temperatura promedio y la mayor frecuencia e intensidad de días de calor extremo a causa del cambio climático, es muy probable que la penalización climática también sea cada vez más significativa.



Otro factor por considerar es un posible aumento en la tasa de emisión de COV de origen natural. Está ampliamente documentado que las emisiones biogénicas de COV son altamente sensibles a la temperatura y se espera que aumenten con el cambio climático. Los flujos de COV hacia la atmósfera provenientes de la vegetación son significativos; por ejemplo, el isopreno es el segundo flujo más grande de carbono reactivo hacia la atmósfera, detrás del metano (Heald & Spracklen, 2015). Temperaturas más altas también implican una mayor evaporación de COV de origen antropogénico, una mayor reactividad fotoquímica y un aumento en la tasa de oxidación de los compuestos orgánicos, cuya prevalencia en la atmósfera contribuye a la formación de O₃ y aerosoles secundarios. Asimismo, como se expuso en el Capítulo 3, la formación de O₃ en la

ZMVM está limitada por COV, por lo que mayores emisiones naturales y antropogénicas de este tipo de compuestos representan un obstáculo para la gestión de la calidad del aire.

Finalmente, es importante reconocer que otros factores como la orografía de la región, los fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica, y cambios en la química atmosférica (por ejemplo, por modificaciones en la relación COV/NO_x) pueden tener efectos significativos y no lineales en el comportamiento de los contaminantes en el aire ambiente, con mecanismos que amplifican o amortiguan las perturbaciones iniciales. Por esta razón es que se debe priorizar la modelación de los efectos del cambio climático en la calidad del aire a escala local, para precisar la penalización climática a nivel de cuenca en la ZMVM.

Variabilidad en los patrones de precipitación

Los patrones de precipitación en la ZMVM han cambiado en las últimas décadas; uno de los mayores cambios observados ha sido la mayor variabilidad estacional y la disminución en la cantidad de lluvia en verano. Como se indica en el Capítulo 1, la precipitación suele tener un impacto positivo en la calidad del aire, puesto que tanto la fracción fina (<2.5 μm) como gruesa (2.5-10 μm) de las partículas suspendidas son removidas por acción del agua.

Además, una mayor variabilidad en la precipitación durante la época seca, y una disminución en la precipitación anual acumulada, también podrán incidir en cambios en los niveles de humedad. Si bien resulta complicado identificar patrones de variación de precipitación claros en la época seca, una menor humedad relativa podría propiciar la resuspensión de partículas y favorecer la propagación de incendios forestales. Las características orográficas

de la zona y la presencia de sistemas anticiclónicos durante esta misma época del año contribuyen también a exacerbar la problemática, puesto que

inhiben el movimiento ascendente del aire y la dispersión de contaminantes, lo cual intensifica la contaminación del aire.

Cambios en la intensidad de El Niño – Oscilación del Sur

Las proyecciones de cambio climático predicen que se intensificarán fenómenos como ENOS (Wang *et al.*, 2019). Eventos inusualmente intensos de la fase caliente (El Niño) podrían generar disminuciones significativas en las precipitaciones durante el verano y otoño, por lo que podría ser más probable que se presenten concentraciones elevadas de contaminantes durante esta época del año, la cual históricamente registra los niveles más bajos de contaminación. Durante la fase fría (La Niña), los inviernos son aún más secos, agravando los problemas de contaminación en esta temporada, durante la cual son comunes las inversiones térmicas, condiciones de estabilidad atmosférica y alturas bajas de la capa de mezclado, variables que en conjunto propician la acumulación de contaminantes en el aire.

De manera general, es probable que con la intensificación de ENOS, la gestión de la calidad del aire se complique durante años con fases particularmente intensas o anormales; al presentarse condiciones extremas o fuera del rango de variabilidad anual, se vuelve más difícil determinar si los cambios y variaciones en la calidad del aire se deben a los impactos de las políticas de reducción de emisiones o a los cambios asociados al clima y modificaciones en la química atmosférica. Asimismo, condiciones meteorológicas inusuales podrían favorecer episodios de contaminación severa donde es necesario tomar medidas adicionales para reducir la exposición de la población y proteger su salud.

Afectaciones por incendios forestales y erosión eólica

Con menor precipitación, el aumento de la temperatura anual promedio y un mayor número de días con calor extremo, incrementa también la sequedad de los terrenos y de la vegetación. Este fenómeno incide en la activación, propagación e intensidad de un mayor número de incendios forestales, los cuales son una fuente importante de PM_{2.5}, carbono negro y COV. Cuando las emisiones inusuales se conjugan con condiciones meteorológicas desfavorables, el resultado puede ser un deterioro importante de la calidad del aire.

ron hacia el centro del país por acción de vientos desde la costa del Pacífico. Los contaminantes se acumularon en la región debido a condiciones de estabilidad atmosférica, y el impacto se sumó a las emisiones que se generan de forma cotidiana por actividades antropogénicas. Muestreos al suroeste de la Ciudad de México durante mayo de 2019 corroboraron el impacto de los incendios sobre la calidad del aire de la ZMVM; se observó un claro incremento en la presencia de dos trazadores de la quema de biomasa en PM_{2.5}, el levoglucosan y el retero (SEMARNAT *et al.*, 2019).

Por ejemplo, incendios forestales dentro de la ZMVM y fuera de esta han sido responsables de la activación de contingencias ambientales extraordinarias, a causa de la mala calidad del aire por concentraciones elevadas de partículas suspendidas. Por ejemplo, en mayo de 2019, incendios simultáneos en la ZMVM y los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, ocasionados por malas prácticas en el uso de fuego, una temporada intensa de estiaje y temperaturas elevadas, generaron emisiones de contaminantes que se transporta-

Las condiciones de sequedad también favorecen la erosión eólica, la resuspensión de partículas y la formación de polvaredas. Estos fenómenos son una fuente natural de partículas suspendidas gruesas que pueden afectar a la salud de la población y disminuir la visibilidad. En la ZMVM, tres zonas se ven impactadas de forma más recurrente por la erosión eólica, el lago de Texcoco y las zonas agrícolas al norte de la ZMVM y entre Chalco y Tenango del Aire, por lo que requieren especial atención.

Disminución en la nubosidad

Cabe destacar que la ZMVM se ve impactada por sistemas anticiclónicos, localizados tanto en el Golfo de México como en el océano Pacífico. Dichos sistemas inhiben la formación de nubes y propician altos niveles de radiación solar que, combinados con la altitud de la ZMVM, inciden en una mayor tasa de formación de O₃. Del Genio & Wolf (2000), investigadores de la NASA, señalan cómo el aumento de la temperatura puede reducir el espesor de las nubes bajas y, en consecuencia, incrementar también la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie (irradiancia). La mayor intensidad de luz so-

lar favorece la actividad fotoquímica, e incrementa la formación de O₃ a partir de sus precursores (NO_x y COV) y de partículas suspendidas secundarias que se forman por la oxidación fotoquímica de COV y otros compuestos. Asimismo, la altitud de la ZMVM, que se encuentra por encima de los 2000 m s.n.m., es otro factor adicional que también incide en la formación de O₃, ya que es directamente proporcional a la irradiancia. Por ejemplo, a nivel de mar la concentración de fondo de O₃ es de 20 a 40 ppb, en tanto que a altitudes mayores puede alcanzar niveles de hasta 70 ppb (Jacobson, 2012).

4.4 Conclusiones

Mediante una revisión de bibliografía especializada, este capítulo muestra que hay evidencia científica sobre la afectación que el cambio climático puede causar en la calidad del aire. Este concepto, conocido como penalización climática, sugiere que los cambios en el sistema climático, como el aumento de la temperatura media global, la modificación de los patrones de precipitación y la variación en los patrones de los vientos, conllevan un impacto en los niveles de contaminación atmosférica, independientemente de las emisiones locales de contaminantes y precursores. Debido al efecto negativo que tienen en la salud pública, la literatura se ha enfocado en modelos que relacionan al cambio climático con la formación de O₃ troposférico y partículas PM_{2.5}. Se destaca que estos dos contaminantes son las principales preocupaciones en materia de gestión de la calidad del aire en la ZMVM.

En la ZMVM, el incremento de la temperatura media ha sido consistente con los niveles observados a escala global; en tan solo 17 años, la temperatura media anual ha incrementado en aproximadamente 1°C. Diferentes estudios muestran como

un aumento de esta magnitud puede derivar en mayores niveles de concentración de O₃ y PM_{2.5}. Por ejemplo, el estudio de Shi *et al.* (2019) para el sureste de Estados Unidos concluyó que un aumento de 1°C en la temperatura media provoca un incremento de 2.9 ppb en la concentración de O₃ y de 1.05 µg/m³ para PM_{2.5}. Si bien las condiciones de la región estudiada son distintas a las de la ZMVM, se podría suponer que la penalización climática en esta última podría tener una magnitud similar. Es así que el aumento de la temperatura a nivel local puede estar degradando de manera significativa la calidad del aire y contrarrestar los esfuerzos por mejorarla. Se destaca que esta penalización climática es de magnitud comparable con los beneficios ambientales obtenidos por la aplicación del ProAire ZMVM 2011-2020. En la evaluación más reciente se estimó que la aplicación de las medidas del ProAire entre 2017 y 2020 resultarían en una disminución en los niveles¹⁰ de O₃ de 2.2 ppb en la ZMVM y 1.5 ppb en la Ciudad de México, valores que, con sus respectivas limitantes, podrían ser atenuados por la penalización climática para O₃ reportada en la literatura.

Si bien existe evidencia sobre los efectos que el aumento de la temperatura y el cambio climático tienen sobre los niveles de O₃ y PM_{2.5}, es importante que el impacto se analice local y regionalmente, de manera que las políticas públicas a futuro incorporen esta evidencia en el diseño y ejecución de estrategias para mejorar la calidad del aire. En la ZMVM, la afectación en la calidad del aire por el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación, el incremento en la intensidad y frecuencia de ondas de calor, el mayor número e intensidad de incendios forestales, entre otros impactos del cambio climático, necesita investigarse con mayor detalle. Además, es muy probable que, con la intensificación de fenómenos sinópticos como ENOS, la gestión de la calidad del aire se haga más complicada y la percepción sobre la efectividad de las medidas de control de contaminantes se vea afectada. Esto se debe a que, al presentarse condiciones anómalas, se vuelve más difícil determinar si los cambios y variaciones en la calidad del aire se deben a los impactos de las políticas de reducción de emisiones, a los cambios asociados al clima y/o a la modificación de la química atmosférica.

Para estimar los impactos de las políticas públicas y los esfuerzos en la gestión de la calidad del aire, se requiere modelar las interacciones entre los contaminantes locales y el cambio climático, de forma que se puedan estimar los impactos a futuro. Estas simulaciones requieren de distintos insumos que ya se incorporan en el sistema de pronóstico de la calidad del aire de la Ciudad de México (AQFS-Mex); sin embargo, es importante actualizar los insumos del sistema, que incluyen un modelo meteorológico a escala regional, un modelo fotoquímico y un modelo de emisiones, para representar de manera más precisa los posibles impactos que el cambio climático tendrá en la contaminación a nivel local, simular las transformaciones químicas que ocurren en la atmósfera y la influencia de la dinámica meteorológica en estos procesos. De esta forma, será posible con-

siderar fenómenos meteorológicos a escala local y regional, las características orográficas de la ZMVM, los cambios en los patrones de emisiones y las modificaciones en la química atmosférica, para cuantificar una penalización climática específica para la ZMVM.

Es fundamental que el diseño y el despliegue de políticas públicas para la gestión de la calidad del aire estén basados en evidencia científica, y que tomen en cuenta los impactos diferenciados del cambio climático sobre esta. Con base en la revisión bibliográfica de este capítulo, se recomienda investigar y elaborar modelos que incorporen los impactos antes mencionados sobre la formación de O₃ y partículas PM_{2.5}. De esta forma se podrá hacer frente a la incertidumbre sobre las consecuencias del cambio climático a futuro y sus efectos en la calidad del aire, al mismo tiempo que se nutre con mejor información a los funcionarios públicos y demás actores relevantes, para mejorar el diseño de políticas públicas, programas de gobierno y la comunicación del desempeño de los mismos.

Finalmente, se destaca que si bien el cambio climático conlleva una penalización en las concentraciones de ciertos contaminantes locales, el IPCC reconoce que las medidas de mitigación de emisiones tanto de CO₂ como de otros CyGEI, tales como el carbono negro o el CH₄, inciden de manera directa e inmediata en la mejora de la calidad del aire y se traducen en beneficios a la salud de la población. Asimismo, medidas de adaptación como el reverdecimiento de las zonas urbanas y otras soluciones basadas en la naturaleza también pueden contribuir a mejorar la calidad del aire. Es así que la implementación de acciones sinérgicas e integradas de mitigación y adaptación al cambio climático con políticas de gestión de la calidad del aire, es una estrategia lógica para generar beneficios sociales, ambientales y económicos que contribuyan de manera significativa a mejorar la calidad de vida de la población de la ZMVM.

¹⁰ Durante las horas de máximas concentraciones (14:00 a 16:00 horas).