

Química de los contaminantes atmosféricos

Violeta Mugica Álvarez
Editora





SOCIEDAD QUÍMICA
DE MÉXICO, A.C.
"La química nos une"

SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO

Presidente Nacional

Dr. Gabriel Eduardo Cuevas González-Bravo

Secretaria

Dra. Annia Galano Jiménez

Tesorero

Dr. Alfonso Ramón García Márquez

Vocal Académica

M. en C. Rosa María Catalá Rodes

Vocal Industrial

I.Q.I. José Antonio Valencia Bravo

Química de los contaminantes atmosféricos

Libro Número 1

Sociedad Química de México, A.C.

Violeta Mugica Álvarez
Editora

Universidad Autónoma
Metropolitana-Azcapotzalco



Temas Contemporáneos de Química

Los derechos exclusivos de la presente edición quedan reservados para todos los países de habla hispana. Queda prohibida su reproducción, parcial o total, por cualquier medio conocido o por conocerse sin el consentimiento por escrito de los legítimos poseedores de derechos.

Sello editorial: Sociedad Química de México, A.C.

(978-607-69750)

Primera edición: diciembre 2023

D. R. © 2023 Violeta Mugica Álvarez

D. R. © 2023 Sociedad Química de México, A.C.

Barranca del Muerto 26, Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940 Ciudad de México, CDMX

Imágenes de capítulos:

Un día con aire limpio en la Ciudad de México Fotografía Denis Figueroa Mugica

Hora pico matutina en el la Zona Metropolitana del Valle de México. Fotografía Oscar Hernández Castillo

Fuentes de emisión de dióxido de azufre. Fotografía Alma Angélica Neria Hernández

La eterna primavera del Valle de Cuernavaca. Fotografía Marcos Fernández Cruz

Día de contingencia por ozono en la Ciudad de México. Fotografía Claudia Adriana Martínez Reyes

Emisiones de cenizas del volcán Popocatepetl. Fotografía Brenda Liz Valle Hernández

Quema agrícola. Fuente de hidrocarburos aromáticos policíclicos. Fotografía Violeta Mugica Álvarez

La cerámica vidriada, un factor de riesgo de exposición al plomo. Fotografía Angelica Neria Hernández

Monitoreo de lluvia ácida en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Fotografía Rodolfo Sosa Echeverría

Convertidor catalítico para vehículos a gasolina. Fotografía Miguel Torres Rodríguez

Lavador húmedo para el control de dióxido de azufre. Fotografía Griselda González Cardoso

Al calor de la fogata y la emisión de NOx. Fotografía Violeta Mugica Álvarez

Cristales de dióxido de carbono. Fotografía Miguel Torres Rodríguez

Emisiones por la quema de combustibles fósiles y de biomasa. Fotografía Naxieli Santiago de la Rosa

Diseño editorial e impresión: TINTA NEGRA EDITORES

Formación: Héctor Astorga

Corrección: Dalia Santa Cruz Navarro

Supervisión de producción: Ernesto Iván Mendoza

Avenida del taller 96-28 Col. Tránsito, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06820 Ciudad de México
tneditores@gmail.com

ISBN: 978-607-69750-0-8

Impreso y encuadernado

Hecho en México

ÍNDICE

Capítulo 1. Monóxido de carbono	17
<i>José de Jesús Figueroa Lara</i>	
<i>Karina Landeros Mugica</i>	
Capítulo 2. Dióxido de azufre	45
<i>Angélica Neria Hernández</i>	
<i>Araceli Amaya Chávez</i>	
<i>Rodrigo Castañeda Sandoval</i>	
<i>Carlos Aguirre Campuzano</i>	
Capítulo 3. Óxidos de nitrógeno	73
<i>Mario Alfonso Murillo Tovar</i>	
<i>José de Jesús Díaz Torres</i>	
<i>Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña</i>	
Capítulo 4. Ozono	99
<i>Claudia Adriana Martínez Reyes</i>	
Capítulo 5. Partículas atmosféricas	117
<i>Brenda Liz Valle Hernández</i>	
<i>Fernando Millán Vázquez</i>	
<i>Yatziry Montes Gorgua</i>	
Capítulo 6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos ..	139
<i>Brenda Liz Valle Hernández</i>	
<i>Yatziry Montes Gorgua</i>	
Capítulo 7. Metales en partículas atmosféricas: el plomo un caso de estudio	161
<i>Juan Carlos Sánchez Meza</i>	
Capítulo 8. Lluvia ácida	187
<i>Rodolfo Sosa Echeverría</i>	
<i>Ana Luisa Alarcón Jiménez</i>	
<i>Pablo Sánchez Álvarez</i>	
<i>Mónica Jaimes Palomera</i>	

Capítulo 9. Control químico de contaminantes de fuentes móviles	203
<i>Miguel Torres Rodríguez</i>	
<i>Mirella Gutiérrez Arzaluz</i>	
Capítulo 10. Control de dióxido de azufre en fuentes fijas	223
<i>Griselda González Cardoso</i>	
<i>Alfonso Espitia Cabrera</i>	
Capítulo 11. Control de óxidos de nitrógeno en fuentes fijas	245
<i>Alfonso Espitia Cabrera</i>	
<i>Griselda González Cardoso</i>	
Capítulo 12. Dióxido de carbono	261
<i>Dalia Santa Cruz Navarro</i>	
<i>Miguel Torres Rodríguez</i>	
Capítulo 13. Contaminantes climáticos distintos al CO ₂	289
<i>Violeta Mugica Álvarez</i>	
<i>Víctor Daniel Domínguez Soria</i>	



CAPÍTULO 1

MONÓXIDO DE CARBONO

José de Jesús Figueroa Lara

Departamento de Energía.
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Karina Landeros Mugica

Facultad de Psicología.
Universidad Nacional Autónoma de México

1.1 Introducción

En México, al igual que en otras partes del mundo, las instituciones de salud han expedido normas de protección para varios contaminantes a los que se les denomina "criterio", en las que se establecen límites máximos permisibles que tienen el fin de proteger la salud de los habitantes. El monóxido de carbono es el contaminante criterio más abundante y más ampliamente distribuido en la atmósfera; sus emisiones generalmente exceden la de todos los demás contaminantes criterio en conjunto, sobre todo en las zonas urbanas. Al ser un gas que no puede detectarse por la vista o el olor se le ha denominado "el asesino silencioso" porque es difícil advertir el peligro que representa al poder envenenar y matar en cuestión de minutos cuando se inhala en sitios cerrados.

Su fórmula química es CO y consta de un átomo de carbono unido mediante enlace triple covalente a un átomo de oxígeno (Figura 1.1).



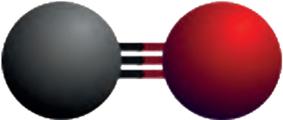
Figura 1.1 Estructura electrónica del monóxido de carbono.

1.2 Propiedades fisicoquímicas

El monóxido de carbono es un gas a temperatura y presión estándar. Es inodoro, incoloro, insípido y no es irritante. Es menos denso que el aire y su energía de enlace es mayor a la del nitrógeno, por ello, es una molécula relativamente estable (Casas-Castillo *et al.*, 1999).

En la Tabla 1.1 se presenta las principales propiedades fisicoquímicas del monóxido de carbono.

Tabla 1.1 *Propiedades fisicoquímicas del monóxido de carbono.*

Molécula	Propiedad	Valor
	Fórmula molecular	CO
	Peso molecular	28.01 g/mol
	Punto de fusión	-205.02 °C
	Punto de ebullición	-191.5 °C
	Energía de enlace	1,080 kJ/mol
	Longitud de enlace	1.13 Å
	Densidad	1.25 kg/m ³ a condiciones estándar
	Solubilidad	Parcialmente soluble en agua, alcohol y benceno
	Inflamabilidad	Altamente inflamable
	Propiedades redox	Agente reductor potente
	Reactividad	Reacciona con metales y con óxidos metálicos y forma complejos con metales de transición

La energía de enlace del monóxido de carbono es relativamente alta, contribuyendo a la estabilidad de la molécula, por lo que no se oxida a temperatura ambiente; sin embargo, debido a su polaridad, el CO puede formar complejos coordinados con metales de transición por su capacidad para donar un par de electrones al metal; esto tiene implicaciones significativas en su comportamiento químico y en sus efectos biológicos y ambientales, como se explicará posteriormente.

1.3 Fuentes de emisión

El CO se produce por la oxidación incompleta de compuestos carbonados durante la combustión, principalmente cuando se tiene deficiencia estequiométrica de oxígeno y/o poco mezclado; por ello, este gas está presente en las emisiones de todos los combustibles que contienen carbono, es decir, la gasolina, diésel, papel, gas natural, gas LP, carbón vegetal, leña, basura, entre otros. La combustión puede llevarse a cabo en dos etapas (Ecuación 1.1 y 1.2); en la primera, se produce CO y tiene una velocidad muy superior a la de la segunda, y aunque hay una importante disminución de energía libre cuando el CO reacciona con el oxígeno del aire, la velocidad de reacción a temperatura ambiente es muy lenta para transformar el CO en CO₂ y es casi despreciable cuando no hay un catalizador presente (Merril, 1921; De Nevers, 1998):



En exteriores, el CO se emite del escape de vehículos, por lo cual, las concentraciones más altas de CO en el exterior se encuentran cerca de las intersecciones de tráfico o en calles congestionadas a la altura del escape de los vehículos, asimismo, el CO se emite en procesos industriales y en sitios mal ventilados como estacionamientos y túneles; mientras que en interiores se emiten altas concentraciones de CO en chimeneas, en calefactores, estufas, anafres o fogones defectuosos o sin salida de venteo, que producen humo ocasionando que se alcancen concentraciones de hasta 100 ppm después de 6 u 8 horas (Raub *et al.*, 2000).

En los motores de combustión interna de los vehículos, se presentan zonas con deficiencia de oxígeno que ocasionan que la oxidación del combustible sea incompleta, por lo que habrá formación de hidrocarburos no quemados y de CO. Suponiendo que todo el déficit de oxígeno de z moles por mol de combustible produce CO, la ecuación de la reacción estequiométrica sería:



Las moles de nitrógeno por cada mol de oxígeno son $0.79/0.21 = 3.76$ por lo que las moles totales de gases de combustión serían (De Nevers, 1998):

$$n_{\text{totales emitidas}} = 3.76 \left[x + \frac{y}{4} - z \right] + (x - 2z) + \frac{y}{2} + 2z \quad (1.4)$$

y la fracción mol del CO puede estimarse de la siguiente forma:

$$y_{CO} = \frac{2z}{3.76(x + (y/4) - z) + x + y/2} \quad (1.5)$$

Con la ecuación anterior (1.5) es posible conocer la fracción mol de las emisiones de CO asociadas a la combustión incompleta, que dependerán del tipo de combustible y de la cantidad de oxígeno utilizado.

Sin embargo, la concentración de los contaminantes atmosféricos gaseosos se mide y se reporta en partes por millón en volumen (ppm), o en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). La conversión entre ambas unidades se realiza con la siguiente ecuación:

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} = \frac{\text{ppm} \times PM \times 1000}{24.5} \quad (1.6)$$

Donde: PM es el peso molecular del gas contaminante, 24.5 es un factor de conversión en condiciones de referencia de 25°C (298 K) y 1 atm de presión (101.3 kPa).

Por lo tanto, 1 ppm de CO es igual a $1145 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

1.3.1 Fuentes de emisión en México y el mundo

A nivel global, cada año se emiten a la atmósfera entre 745 y 1,113 Tg (teragramos) de CO por fuentes antropogénicas y naturales (Zhong *et al.*, 2017). Alrededor del 60% de estas emisiones se producen por la combustión incompleta de combustibles fósiles y de biomasa, mientras que el restante 40% se debe principalmente a procesos naturales como la oxidación fotoquímica y en menor proporción contribuyen los incendios forestales y algunas transformaciones en los océanos (Khalil y Rasmussen, 1990).

1.3.1.1 Emisiones antropogénicas

Las principales fuentes de emisión de CO en el mundo son los vehículos automotores de las ciudades y el transporte terrestre en general, con alrededor del 33.6%; cerca del 39% se debe a las emisiones residenciales, transporte no carretero, residuos sólidos, entre otras fuentes; la industria aporta el 18.3% y la quema de biomasa agrícola representa el 8.8%, aunque estos porcentajes tienen una alta variación dependiendo de la región del planeta; por ejemplo, la quema de biomasa llega a representar más del 30% en las emisiones de CO en países en desarrollo en Sudamérica, Sudeste de Asia y África Central (Pommier *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2019; Joshi *et al.*, 2023).

Las concentraciones de CO a nivel global han disminuido en las últimas tres décadas. Las reducciones se deben a la introducción de tecnología para el mejoramiento de los diferentes sistemas de combustión tanto en fuentes fijas como en fuentes móviles y por el reemplazo de carbón y combustibles sólidos por diésel o gas en algunos países, se ha incrementado el transporte público eléctrico y los vehículos eléctricos e híbridos aumentan cada día; asimismo, se han implementado políticas y normas de emisión más estrictas (Buchholtz *et al.*, 2021; Joshi *et al.*, 2023).

Con la finalidad de que las instituciones diseñen estrategias de calidad del aire, se construyen inventarios de emisión para conocer la cantidad de contaminantes que emiten las distintas fuentes en determinadas zonas geográficas por un período de actividad, usualmente de un año (Proaire 2012-2020).

En la Figura 1.2 se muestra la contribución de los distintos sectores en las emisiones de CO de algunos países y regiones del mundo. El transporte incluye todas las emisiones de vehículos automotores, principalmente los de gasolina; las fuentes puntuales incluyen las emisiones industriales y las de las plantas de energía; las fuentes de área incluyen la calefacción residencial y comercial y las emisiones de motores no carreteras. Los incendios forestales no se incluyen, aunque tienen un alto impacto; por ejemplo, en los Estados Unidos de América, si se sumaran a las emisiones totales, representarían el 17% del total.

Los inventarios de emisiones deben actualizarse con frecuencia, pues con las estrategias de reducción que se llevan a cabo, pueden existir variaciones importantes al paso de los años. En los Estados Unidos en el año 2022, las emisiones vehiculares de CO representaron el 34%, mientras que para los años de 2017 y 2010 contribuían con el 38% y 47% respectivamente, lo cual indica una reducción de emisiones de CO por esta fuente de más del 10% en una década.

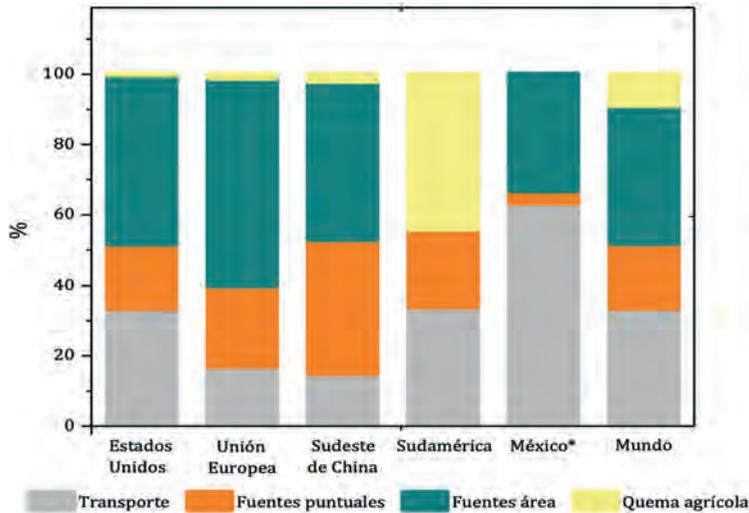


Figura 1.2 Fuentes de emisión de CO en el mundo (adaptado de Joshi et al., 2023; EPA, 2023; SEMARNAT, 2018).

En las ciudades mexicanas, como la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), se ha encontrado que más del 93% de las emisiones de CO se deben a las fuentes móviles, sin embargo este porcentaje es menor cuando se trata de todas las emisiones de CO del país, ya que en otras ciudades medianas y pequeñas las emisiones de la quema de biomasa, consideradas como fuente de área aportan una mayor proporción de CO (Tabla 1.2). En el Inventario Nacional de Emisiones de México realizado en el 2016 se reportó que el 63% de las emisiones de CO provienen del transporte terrestre.

Tabla 1.2 Emisiones de CO a la atmósfera en México (T/año) (1. SEMARNAT, 2019; 2. SEDEMA, 2021; 3. SEDEMA, 2023; 4. SEMARNAT, 2016).

	Total	Fuentes móviles	Fuentes fijas	Fuentes de área
Inventario Nacional de Emisiones México 2016 ⁽¹⁾	8,242,497.4	63.40%	3.51%	33.09%
Inventario de la ZMVM 2018 ⁽²⁾	728,891	94.6%	0.8 %	4.6%
Inventario de la ZMVM 2020 ⁽³⁾	974,037	95.32%	0.4%	4.24%
Inventario de la ZMM 2013 ⁽⁴⁾	305,589.2	93%	3%	4%

El CO, se utiliza como insumo en las actividades de investigación y desarrollo, y en la última década se ha utilizado en la industria de alimentos en los paquetes de carne para minimizar la oxidación del alimento y el crecimiento de microorganismos; asimismo, el CO le imparte a la carne una coloración rosada o rojiza que la hace parecer más fresca y perdura por semanas; por esta razón y porque el uso del CO implica un riesgo para quienes lo manipulan, en la Unión Europea no está autorizado, pero en los Estados Unidos y en Noruega sí se utiliza. En México, la NOM-242-SSA1-2009, no especifica ni la aprobación ni la prohibición del uso de CO en pescado crudo congelado.

1.3.1.2 Producción fotoquímica del CO en la tropósfera y la estratósfera

Aunque no hay una certeza total, un estudio de modelado global tridimensional reporta que la producción fotoquímica del CO podría aportar más del 40% del total del CO troposférico. La oxidación del metano (CH₄) por el radical OH• para producir formaldehído (Ecuación 1.7), seguido por la producción de CO, es la fuente principal de CO en la tropósfera (Ecuación 1.8 y 1.9). Estas reacciones tienen una implicación importante en el clima, ya que el metano es un gas invernadero que absorbe la radiación infrarroja contribuyendo al calentamiento global. De hecho, diversos estudios consideran que si se redujeran las concentraciones globales de CO, podría modificarse la capacidad oxidante de la tropósfera en la que también interviene el ozono (O₃), ya que habría un incremento de radicales OH• y se disminuiría la eliminación del CH₄ (Kanakidou y Crutzen, 1999; Sobieraj *et al.*, 2022). Por ello, aunque el CO no es un gas invernadero, se le relaciona directa e indirectamente con otros gases invernadero como el metano y el ozono y se ha estimado que a nivel global es responsable de una fuerza radiativa positiva de 0.23±0.07 Wm⁻² (IPCC, 2013).



El CO también puede producirse en la tropósfera por la reacción del radical OH• con hidrocarburos, así como por la reacción de alquenos con ozono o la reacción del isopreno y otros terpenos con el OH• y el O₃ (Pitts y Pitts, 2000); la reducción de CO que se experimenta en el planeta ha ocasionado el incremento del radical OH• en la atmósfera, por lo que se ha sugerido que esto podría ser importante en la remoción del metano en la atmósfera (Zhao *et al.*, 2020).

1.3.1.3 Producción de CO en océanos y suelos

En el océano se lleva a cabo un ciclo de formación y destrucción de CO que involucra la producción fotoquímica, intercambio aire-agua, mezclado físico y consumo por microorganismos, teniendo como resultado una aportación muy baja, entre el 0.4 y 9% del CO a la atmósfera (Bates *et al.*, 1995; Sobieraj *et al.*, 2022). Este ciclo es tan complejo que se han realizado cientos de experimentos simulando las condiciones de los océa-

nos y se han utilizado diversos modelos para comprenderlo (Conte *et al.*, 2019), sin que se tenga un conocimiento preciso del mismo. La producción y consumo de CO en los océanos pueden representarse en general en la Figura 1.3, donde las emisiones de CO de las aguas marinas, aunque también de las superficies de cuerpos de agua dulce, se relacionan principalmente con la fotólisis de materia orgánica disuelta que contiene carbonilos y fenoles, entre otros, que son capaces de absorber fotones por una molécula o un grupo funcional (cromóforo) y generan CO. La materia orgánica disuelta proviene de biomasa muerta, desechos de organismos vivos, partículas de materia orgánica fragmentada que contienen carbonilos y fenoles, además, se ha reportado que estos procesos de fotodegradación se aceleran con la presencia de iones de hierro trivalente disueltos, que forman complejos organometálicos muy fotoreactivos (Zuo *et al.*, 1998; Stubbins *et al.*, 2006). Las mediciones en el mar muestran que hay una producción directa de CO a partir del fitoplancton, de algunas especies de medusas y de algas marrones marinas porque en este compuesto se ha encontrado en muchos de sus tejidos (Raud *et al.*, 2000; Conte *et al.*, 2019). Por último, los sumideros de CO son las bacterias que oxidan hasta el 86% del CO oceánico, siguiendo preferentemente una cinética de primer orden para producir energía, así como la disolución de pequeñas cantidades del CO en el agua (Conte *et al.*, 2019; Sobieraj *et al.*, 2022).

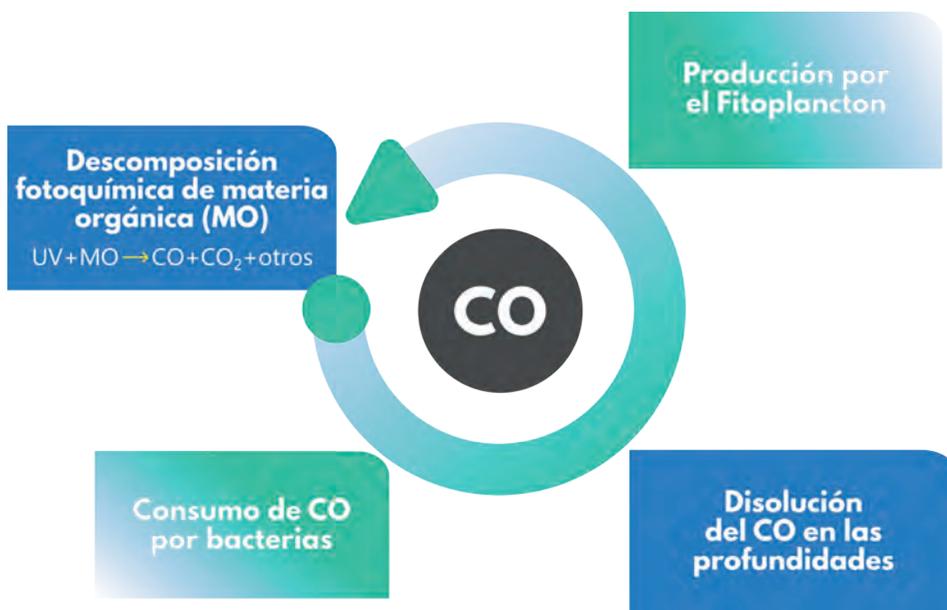


Figura 1.3 Ciclo de producción y destrucción del CO en los océanos.

En el suelo también existe un ciclo de captura y emisión de CO. La producción de CO en el suelo sigue un proceso cinético de orden-cero. La producción de CO en suelos es principalmente abiótica y se basa en múltiples reacciones químicas y bioquímica al descomponerse la materia orgánica, y por la desintegración y oxidación de microbios muertos (Conrad y Seiler, 1980). El calor en el suelo seco estimula la eficiencia de la producción de CO, que es causado por la descomposición de sustancias orgánicas complejas en partículas más simples, incluidos los residuos de plantas (Conrad y Seiler, 1982). También, hay oxidación de ácidos húmicos y otras sustancias fenólicas en atmósferas de oxígeno. La producción de CO de suelos húmicos se estimula con el calor. Se forman pequeñas cantidades de CO en la germinación y crecimiento de las plantas o cuando las plantas se cortan, se secan o son lastimadas.

Se cree que en la estratósfera, puede haber un proceso de producción de CO y oxígeno monoatómico como consecuencia de la fotodisociación del dióxido de carbono (CO₂) provocada por la radiación de onda corta a 1700 Å en alturas mayores a los 70 km (Ecuación 1.10), lo cual no tendría implicaciones en la tropósfera (Jaffe, 1968).



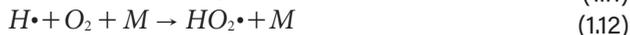
1.4 Comportamiento químico en la atmósfera

No se sabe con certeza el tiempo de residencia media del CO en la tropósfera, pero su duración se ha estimado entre 0.3 y 5 años; sin embargo, se sabe que si no hubiera un proceso de eliminación de este contaminante, las múltiples emisiones en el mundo llevarían a un aumento de 0.03 ppm por año a nivel global, lo cual no se ha observado (Jaffe, 1998; Zheng *et al.*, 2019).

Desde fines de la década de 1980 se ha reportado que a pesar de la gran cantidad de emisiones anuales de este contaminante, las concentraciones en la atmósfera no parecen aumentar, debido a los procesos naturales que utilizan el CO en un corto tiempo después de su liberación y que son sumideros naturales de este contaminante mayormente en el hemisferio sur, así como a la disminución de emisiones de CO a nivel global, principalmente en el hemisferio norte, por las distintas estrategias y las tecnología utilizada para disminuirlas (Kallil y Rasmussen, 1994; Zheng *et al.*, 2019). El CO tiene su principal sumidero en la atmósfera, y son de menor importancia el depósito seco en suelo y la absorción en el océano.

1.4.1 Reacciones en la tropósfera

La eliminación más importante del CO atmosférico es a través de su oxidación con el radical hidroxilo (Ecuación 1.11) para producir el radical hidroxiperoxilo (Ecuación 1.12) (Khalil y Rasmussen, 1994; Sobieraj *et al.*, 2022), de hecho se ha denominado al radical OH• como el “limpiador atmosférico” del CO, ya que contribuye con su remoción hasta un 40% (Lelieveld *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2019).



La reacción con el radical hidroxilo (1.11) es independiente de la temperatura y en conjunto con la reacción (1.12), representan la principal causa de consumo del OH• troposférico. Diversos estudios consideran que, si se redujeran las concentraciones globales de CO, podría modificarse la capacidad oxidante de la tropósfera, ya que habría un incremento de radicales OH• y se disminuiría la eliminación del CH₄ (Rozante *et al.*, 2017). La eliminación de CO por este mecanismo tiene un comportamiento estacional, ya que la radiación UV en el invierno y principios de la primavera reduce la cantidad de OH• en el aire, lo que implica que el CO se incrementa en la atmósfera en los meses correspondientes.

1.4.2 Reacciones del CO en la estratósfera

El CO experimenta procesos de convección, turbulencia y mezclado independientes de la temperatura, que provocan que llegue a la estratósfera donde se oxida a CO₂ en presencia de luz y de radicales hidroxilo al igual que en la tropósfera (Reacción 1.11); a diferencia de la tropósfera, el factor limitante para la eliminación del CO en la estratósfera, es su transporte a esta capa atmosférica, dada la alta proporción de radicales hidroxilo presentes (Seiler y Warneck, 1972).

1.4.3 Captura del CO en el océano

Los océanos también participan en la eliminación del CO atmosférico a través de su conversión por microorganismos y por la captura de plantas y algas. En el agua, el consumo de CO por microorganismos sigue la cinética de Michaelis-Menten y es el mecanismo dominante de la oxidación del CO a CO₂, principalmente durante la noche, puesto que la actividad de los microorganismos en la superficie acuática se ve reducida durante el día por la radiación solar (Zuo *et al.*, 1998). Por otra parte, aunque en comparación con el CO₂ la solubilidad es pequeña, una pequeña cantidad de CO se solubiliza en los océanos, entre el 1.7 y 3.2% en volumen en condiciones estándares de temperatura y presión (Jaffe, 1968).

1.4.4 Captura en la superficie del suelo

Los primeros 10 cm del suelo comprenden uno de los principales sumideros del CO atmosférico, capturando hasta el 40% especialmente en zonas desérticas y de sabanas con carácter ácido, oxidándolo a CO₂, debido a que en las tierras de cultivo u otras más húmedas, el CO de los poros es desplazado por el agua; el consumo del CO se debe a los microorganismos anaeróbicos que siguen una cinética de primer orden (Seiler, 1978; Conrad y Seiler, 1985a).

1.5 Daños a la salud

1.5.1 Mecanismo químico de acción del CO en el organismo

Los seres humanos y un gran número de especies animales que tienen un sistema respiratorio basado en la unión de la hemoglobina de la sangre con el oxígeno para formar oxihemoglobina (O_2Hb) (Ecuación 1.13) pueden envenenarse al inhalar CO, debido a que este compuesto tiene una afinidad con la hemoglobina entre 200 y 250 veces mayor a la del oxígeno, por lo que lo desplaza formando carboxihemoglobina ($COHb$) (Ecuación 1.14); esto provoca la deficiencia de oxígeno (hipoxia) en las células y tejidos del organismo, comprometiendo su funcionamiento (Piantadosi, 2002; Tian *et al.*, 2015; Bolaños y Chacón, 2017).



Aunque la hemoglobina cuenta con cuatro grupos hemo capaces de unirse cada uno a una molécula de oxígeno, cuando una molécula de CO se une a uno de estos grupos hemo (Figura 1.4), la molécula de hemoglobina se altera y ya no es posible que se una el oxígeno a los tres sitios vacantes, lo cual incrementa la hipoxia celular (Plantadosi, 2002; Téllez *et al.*, 2006; Fajardo *et al.*, 2012). Con una presión parcial de 0.4 mmHg de CO es posible saturar el 100% de la hemoglobina como $COHb$ (Oliú *et al.*, 2010). El CO se une fuertemente a los átomos de hierro de las proteínas que contienen el grupo hemo, como son la hemoglobina, la mioglobina y los citocromos. Entre el 80 y el 85% del CO se liga a la hemoglobina de la sangre disminuyendo el transporte de oxígeno a las células de los diferentes tejidos y órganos. Asimismo, el CO puede unirse al citocromo C oxidasa alterando la cadena de transporte electrónico que llevan a cabo las mitocondrias para producir la energía que requieren las células, al inhibir la síntesis del trifosfato de adenosina (ATP); adicionalmente, el CO se une al citocromo P450 generando especies reactivas de oxígeno y radicales libres que producen estrés oxidativo y dañan a las biomoléculas de proteínas, ácidos nucleicos y lípidos (Raud *et al.*, 2000; Goldstein, 2008; Oliú *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2017).

La mioglobina es una proteína que contiene al grupo hemo y tiene la capacidad de transportar oxígeno; entre el 15 y 20% del CO se une a la mioglobina, con una afinidad 40 veces mayor que el oxígeno, produciendo la alteración del funcionamiento del músculo esquelético y el músculo cardíaco (Piantadosi *et al.*, 2002; Téllez, 2006), por lo que se ha reportado que se triplica el riesgo de sufrir eventos cardiovasculares, así como el incremento de mortalidad por dichas causas (Tian *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018).

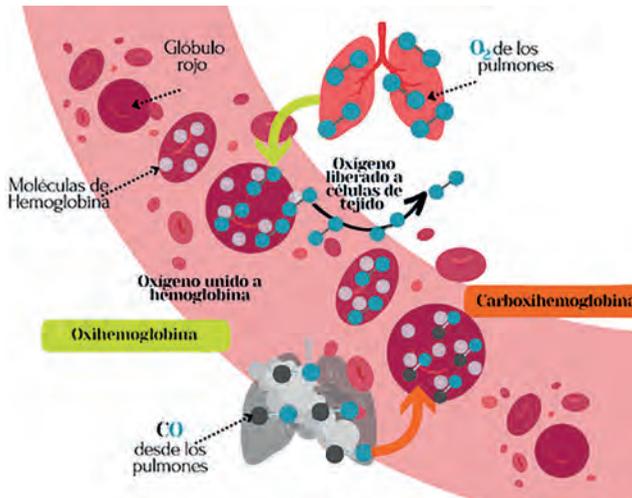


Figura 1.4 Desplazamiento del oxígeno en la hemoglobina por el monóxido de carbono.

Usualmente los individuos no fumadores tienen entre 1-2% de COHb en la sangre, mientras que los fumadores presentan entre 7-8% de COHb. Los riesgos por la exposición al CO, dependen de la concentración del contaminante y de las características del individuo. Cuando la concentración de COHb en la sangre excede del 2% en individuos no fumadores (o el 10% en fumadores), el organismo comienza a presentar distintos efectos que pueden ir de efectos leves como mareos y cansancio, hasta asfixia al inhalar en espacios cerrados altas concentraciones de CO (Fajardo *et al.*, 2012; Ramírez *et al.*, 2014).

El oxígeno se combina con la mioglobina para formar la oximioglobina pigmento rojo, que es esencial para la función del músculo, sin embargo, este pigmento se desvanece y oscurece progresivamente a tonos de marrón cuando el músculo se oxida durante el envejecimiento, después de la muerte y durante la congelación. Por ello, al aplicar humo o gases que contienen CO se puede mantener el color rojo en el tejido muscular.

1.5.2 Efectos de la exposición al CO en el organismo

La Tabla 1.3 muestra los efectos en la salud por la exposición al aumentar los niveles de CO en la atmósfera y los porcentajes de COHb en la sangre en individuos no fumadores (Liu *et al.*, 2018). Cabe mencionar que, para los grupos vulnerables como niños pequeños, mujeres embarazadas, personas mayores a 60 años e individuos con deficiencias respiratorias o circulatorias, se recomienda que no se expongan a concentraciones mayores al 2.5% (OMS, 2016). El tiempo de vida media del CO dentro del cuerpo humano es aproximadamente de 5 horas; alrededor del 1% se biotransforma en el hígado a CO_2 . La eliminación se realiza por vía respiratoria (Fajardo *et al.*, 2012).

Tabla 1.3 Efectos en la salud por exposición al CO
(adaptado de Struttmann et al., 1998; Bolaños y Chacón, 2017).

Concentración de CO en la atmósfera	Concentración de COHb en sangre	Efectos en la salud
	< 2%	Ninguno
	2.5 - 5%	Desorientación, alteraciones cardiovasculares
35 ppm	< 10%	Dolor de cabeza leve y mareos en exposición de 6 h
200 ppm	20%	Dolor de cabeza moderado, fatiga, somnolencia, trastorno visual, mareos, dolor abdominal y náuseas con 2-3 h de exposición
400 ppm	25%	Dolor de cabeza moderado, falta de aire (disnea), dolor de pecho (angina al esfuerzo), confusión mental, en 2 h
800 ppm	30%	Disnea, arritmia, dolor de cabeza intenso, alteraciones visuales, confusión mental, debilidad en extremidades inferiores, vómitos, síncope, en 2 h
1,600 ppm	40%	Dolor de cabeza intenso, náuseas, posible síncope, taquicardia, aumento en la frecuencia respiratoria, en 20 min; muerte en menos de 2 h
3,200 ppm	50%	Dolor de cabeza intenso, náusea, piel rojiza, depresión respiratoria en 5-10 min; muerte en 30 min
6,400 ppm	60%	Dolor de cabeza intenso, piel rojiza, mareo y convulsiones en 1-2 min; síncope, convulsiones, paro respiratorio y/o cardíaco y muerte en menos de 20 min
12,800 ppm	>70%	Muerte en menos de 3 min

En resumen, la exposición aguda a CO produce las siguientes alteraciones en los procesos químicos del organismo (Zhang *et al.*, 1992; Oliú *et al.*, 2010; Fajardo *et al.*, 2012; Ramírez *et al.*, 2014; Reboul *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2019).

- Impide la unión del oxígeno a la hemoglobina de la sangre y su transporte al cuerpo.
- El incremento de 0.244 ppm aumenta las consultas por causas respiratorias, asma, bronquitis y neumonía entre el 5 y 9%.
- Genera hipoxia tisular alterando la actividad oxidativa de la cadena respiratoria mitocondrial que puede durar hasta dos semanas después de la exposición.
- Inhibe de manera profunda y sostenida el complejo IV de la cadena de transporte electrónica mitocondrial, ocasionando un efecto negativo en el metabolismo aerobio de las mitocondrias.
- Se produce acidosis metabólica y se eleva el lactato cuando la respiración mitocondrial se vuelve anaeróbica.

- Produce estrés oxidativo aumentando la fracción de radicales hidroxilo que causan daño en la pared endotelial de los vasos sanguíneos, en las neuronas y la barrera protectora hematoencefálica.
- Inhibe la síntesis del trifosfato de adenosina.
- Se facilita la formación de grupos sulfatidos en el cerebro que son neurotóxicos porque disminuyen la actividad de la enzima arilsulfatasa A.
- Se producen superóxidos que al interactuar con enzimas forman compuestos peroxinitrados que interactúan con los ácidos grasos insaturados que llevan a la desmielinización continua de las neuronas del sistema nervioso.
- Se favorece la peroxidación lipídica cerebral.

Peterson y Stewart (1970) realizaron un estudio exponiendo a individuos a concentraciones de 1 a 1,000 ppm y concluyeron que el mejor ajuste a los datos experimentales considerando todas las variables fisiológicas relacionadas con la asociación del CO en el organismo, la proporcionaba la ecuación de Coburn *et al.* (1969); en un segundo estudio (Peterson y Stewart, 1975), se concluyó que la ecuación CFK predice las concentraciones de COHb igualmente bien para sujetos sedentarios y personas que hacen ejercicio. La ecuación posteriormente evolucionó al modelo matemático con la ecuación exponencial de Coburn-Foster-Kane (CFK) que se utiliza a la fecha.

1.5.3 Monitoreo de intoxicaciones por CO en México

Más de 400 personas mueren cada año en los Estados Unidos por intoxicaciones involuntarias por monóxido de carbono que no están relacionadas con incendios, más de 100,000 personas visitan la sala de emergencias y más de 14,000 son hospitalizadas (NCEH, 2023), en tanto que en España se ha reportado una media de 125 muertes anuales y entre 5,000 y 10,000 personas intoxicadas con este gas (Ramírez *et al.*, 2014). En México se han reportado entre 221 y 272 muertes anuales por esta causa entre 2015 y 2019 (SINAVE/DGE/SALUD, 2016-2020).

La intoxicación por CO comenzó a reportarse en México a partir de 2015 entre las primeras diez causas de mortalidad sujetas a vigilancia epidemiológica (Tabla 1.4); anteriormente, esta causa de muerte se reportaba dentro del rubro de "Envenenamiento accidental por y exposición a otros gases y vapores en vivienda".

Tabla 1.4 Ocurrencia de Intoxicaciones por CO en México, como Causa de Mortalidad Sujeta a Vigilancia Epidemiológica (adaptado de SINAVE/DGE/SALUD 2016-2021)

Año	Número de muertes	Sitio en el CMSVE	Tasa por 100,000 habitantes	Grupo edad 1 ^{er} lugar	Grupo edad 2 ^o lugar	Grupo edad 3 ^{er} lugar	Género %	
							M	F
2015	250	5	0.21	25-44 (72)	65 y + (53)	45-64 (49)	68	32
2016	221	6	0.18	25-44 (63)	65 y + (48)	45-64 (39)	70	30
2017	231	5	0.19	25-44 (60)	65 y + (47)	45-64 (46)	62	38
2018	219	6	0.17	25-44 (63)	65 y + (55)	45-64 (39)	65	35
2019	272	7	0.22	25-44 (77)	45-64 (63)	65 y + (57)	67	33
2020	352	9	0.28	65 y + (103)	45-64 (101)	25-44 (71)	70	30
2021	245	7	0.19	25-44 (90)	45-64 (55)	60 y + (46)	67	33

CMSVE: Causas de muerte sujetas a vigilancia epidemiológica.

En los años 2015 a 2019, la intoxicación por CO ocupó entre el quinto y séptimo lugar como causa de mortalidad sujeta a vigilancia epidemiológica después del VIH, tuberculosis, infecciones respiratorias agudas (IRAs), influenza, enfermedades diarreicas agudas (EDAs) y enfermedades transmitidas por vectores (ETVs), con una tasa de mortalidad entre 0.18 y 0.22 por cada 100,000 habitantes; el promedio de dichos años fue de 239 ± 21 muertes por año y la entidad con más muertes por esa causa fue Chihuahua (reportando entre 29 a 47 decesos por año), siendo el rango de edad con más intoxicaciones el de 25 a 44 años (Tabla 1.4) (SINAVE/DGE/SALUD, 2016-2020).

El año 2020 fue atípico debido a la pandemia y al confinamiento, el COVID-19 por virus identificado y no identificado, se incluyeron en el grupo de enfermedades sujetas a vigilancia epidemiológica ocupando el primero y segundo lugar en decesos, respectivamente. La intoxicación por CO pasó a ocupar el noveno lugar como causa de muerte entre estas enfermedades, aunque también la tasa se incrementó a 0.28 por cada 100,000 habitantes y el número de muertes a 352; asimismo, la Ciudad de México pasó a ocupar el primer lugar con 72 decesos superando a Chihuahua que registró 47, asimismo, el grupo de edad también se modificó, siendo el más afectado el de 65 años y más, lo que muestra que el confinamiento ocasionó, comparado con el promedio de los demás años, un incremento del 32% en la mortalidad por esta causa, principalmente en personas mayores (SINAVE/DGE/SALUD, 2022-2023). En 2021, ya se incluyen las afecciones del COVID-19 que representaron la mortalidad más alta y el CO ocupó el séptimo lugar, con un número de fallecimientos dentro del rango de los años anteriores a pandemia (2015-2019), (Tabla 1.5).

Tabla 1.5 Mortalidad por inhalación de CO en causas sujetas a enfermedades epidemiológicas

	2018	2019	2020	2021
Enfermedades por VIH	1° 4,995 ^a 4.0 ^b	1° 5,281 ^a 4.2 ^b	3° 4,557 ^a 3.6 ^b	3° 4,636 ^a 3.6 ^b
Tuberculosis	2° 1,795 ^a 1.4 ^b	2° 1,956 ^a 1.5 ^b	4° 1,886 ^a 1.5 ^b	4° 1,961 ^a 1.5 ^b
IRAS en menores de 5 años	3° 1,305 ^a 1.0 ^b	3° 1,601 ^a 1.3 ^b	5° 1,055 ^a 0.8 ^b	5° 830 ^a 0.6 ^b
EDAS en menores de 5 años	4° 493 ^a 0.4 ^b	5° 583 ^a 0.5 ^b	6° 502 ^a 0.4 ^b	6° 549 ^a 0.4 ^b
Influenza	5° 392 ^a 0.3 ^b	4° 747 ^a 0.6 ^b	7° 480 ^a 0.4 ^b	
Intoxicación por CO	6° 219^a 0.2^b	7° 272^a 0.2^b	9° 352^a 0.3^b	7° 245^a 0.2^b
Muerte materna	7° 160 ^a 0.1 ^b			
Rickettsiosis	8° 99 ^a 0.1 ^b			10° 125 ^a 0.1 ^b
Muerte por temperaturas extremas	9° 90 ^a 0.1 ^b	8° 105 ^a 0.1 ^b		8° 137 ^a 0.1 ^b
Enfermedades transmitidas por vector	10° 90 ^a 0.1 ^b	6° 424 ^a 0.3 ^b	8° 449 ^a 0.4 ^b	9° 128 ^a 0.1 ^b
Intoxicación por plaguicidas		9° 96 ^a 0.1 ^b	10° 180 ^a 0.1 ^b	
Contacto traumático por abejas		10° 87 ^a 0.1 ^b		
COVID-19 Virus identificado			1° 146,848 ^a 115 ^b	1° 178,180 ^a 138 ^b
COVID-19 Virus no identificado			2° 53,415 ^a 42 ^b	2° 59,572 ^a 46 ^b

0 = Orden de incidencia, a = defunciones, b = tasa por 100,000 habitantes.

1.5.4 Acciones de protección

Tomando en consideración que la imperceptible exposición crónica a concentraciones moderadas de CO ocasiona el deterioro gradual de la salud y que en el caso de exposición aguda puede existir riesgo de muerte, es importante la prevención a través de la información y la educación para reducir la incidencia y prevalencia de la exposición a este gas (CARB, 2023). Entre las acciones que pueden llevarse a cabo para evitar la exposición a concentraciones peligrosas de CO, se tienen:

- Evitar pasar mucho tiempo en zonas con congestión de tránsito y en estacionamientos parcialmente cerrados.
- Dar mantenimiento a los vehículos y llevar a verificación ante cualquier detección de olor de gases de escape dentro de ellos para asegurarse que no haya fugas hacia el interior.

- Inspeccionar y dar mantenimiento de manera frecuente a chimeneas, sistemas de calefacción con gas, parrillas de leña o carbón, calentadores y estufas, verificando que la cantidad de oxígeno o aire sea suficiente para llevar a cabo una combustión eficiente.
- Ventilar los sitios cerrados de manera frecuente.
- De preferencia no encender los automóviles en estacionamientos cerrados o permanecer muy poco tiempo en ellos.
- No fumar en sitios cerrados y considerar el riesgo a la salud, aunque se haga en sitios abiertos.
- Si es posible, instalar alarmas de CO, en oficinas con poca ventilación, cocinas de restaurantes, zona de hornos de panaderías, pizzerías, sitios de comida rápida, estacionamientos localizados en espacios subterráneos, residencias de personas de la tercera edad donde haya dispositivos de calefacción, e incluso en casas habitación o departamentos en pisos altos con poca ventilación.

1.6 Normatividad

Con el objetivo principal de orientar a los distintos gobiernos y a la población mundial para reducir la exposición de los seres humanos a la contaminación atmosférica y a sus efectos adversos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado desde 1987 las "Directrices sobre la calidad del aire relacionadas con la salud de los principales contaminantes del aire, los contaminantes criterio", llevando a cabo revisiones científicas y trabajo riguroso de expertos en distintas disciplinas. La última actualización se publicó en el año 2021, quince años después de su anterior revisión (WHO, 2006). Cabe mencionar que para el CO solamente se incorporó una directriz para 24 h, mientras que las directrices relacionadas con el promedio horario y el promedio móvil de 8 horas, siguen siendo las mismas.

En México, el gobierno federal establece los límites permisibles de concentración de los distintos contaminantes criterio, publicados en las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental con la finalidad de proteger la salud de la población. Estas normas se aplican de manera obligatoria en todo el territorio mexicano y su vigilancia es realizada en conjunto con los gobiernos locales; asimismo, los valores establecidos se revisan periódicamente con base en la información más reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire a nivel nacional e internacional.

En la Tabla 1.6 se presenta el valor permisible para la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente que se aplica en todo el territorio mexicano desde octubre del 2021; anteriormente dicho valor había sido establecido en la NOM-021-SSA1-1993 y equivalía a 11 ppm (12,595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en promedio móvil de 8 h. Dicho límite se revisó, porque era mayor a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS-2000), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA-2014) y la Unión Europea (UE-2014); en esta actualización, la norma de promedio móvil de 8 h se ajustó a los valores de la OMS y de la US EPA, y se incluyó una norma para concentraciones horarias.

Tabla 1.6 Comparación de valores límite, estándares y directrices actuales de concentraciones de CO.

Valores límite de CO	NOM-021-SSA1-2021*	US EPA Desde 1971- 2023	Directrices de la OMS
Máximo del promedio móvil de 8 h	9.0 ppm (10,000 µg/m ³)	9.0 ppm (10,000 µg/m ³)	10,000 µg/m ³ (OMS, 2006)
Máximo de las concentraciones horarias (1 h)	26.0 ppm (30,000 µg/m ³)	35.0 ppm (40,075 µg/m ³)	30,000 µg/m ³ (OMS, 2006)
Promedio anual	Si una vez en el año se excedan los valores límite de las concentraciones de 1 h y 8 h, anteriores, se incumple la norma anual correspondiente	Si una vez en el año se excedan los valores límite de las concentraciones de 1 h y 8 h, anteriores, se incumple la norma anual correspondiente	
Promedio de 24 h			7,000 µg/m ³ ^a (OMS, 2021)

^a Percentil 99 (es decir, 3-4 días de superación por año).

1.7 Monitoreo y detección del CO

Las bajas concentraciones del CO en la atmósfera, al igual que las de otros contaminantes gaseosos, implica utilizar métodos con un límite de detección muy bajo, del orden de ppb (partes por billón).

Usualmente la medición de CO, se lleva a cabo por técnicas de cromatografía de gases, por métodos espectroscópicos y por sensores.

1.7.1 Cromatografía

En general, el método consiste en separar el compuesto de interés y después cuantificarlo. La muestra de aire se introduce en un flujo de gas inerte que no interactúa con el CO y que la transporta a través de una columna que tiene la función de separar los distintos componentes de la mezcla de aire; el detector correspondiente es un transductor que transmite una señal eléctrica proporcional a la concentración. Existen varios métodos cromatográficos, dependiendo del tipo de detector utilizado (Novelli *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2011; Zellweger *et al.*, 2019).

- Cromatografía de gases con detector y óxido de mercurio (HgO)

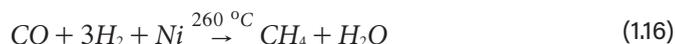
Una vez que la columna separa al CO del CO₂ y algunos COVs presentes. Al entrar el CO al detector, reacciona con el óxido de mercurio para producir la siguiente reacción (1.15):



Posteriormente el mercurio que se genera se ioniza a Hg^{2+} y se cuantifica. Debido a la toxicidad del mercurio y por razones de seguridad prácticamente ya no se usa el HgO; actualmente los detectores FID y TCD son cada vez más sensibles y seguros.

- Cromatografía de gases con detector de ionización de flama

La muestra se quema en una llama de aire e hidrógeno con un catalizador de níquel a $260^{\circ}C$, donde el CO se reduce a metano, el cual se cuantifica con una gran precisión, conforme a la reacción (1.16):



- Cromatografía de gases con detector de conductividad térmica

Este detector mide los cambios en la conductividad térmica que se presentan en el gas acarreador en presencia de CO. Este compuesto al tener menor conductividad térmica que el gas que lo transporta genera una disminución en la señal que cuantifica el detector.

1.7.2 Técnicas espectroscópicas

Estas técnicas se fundamentan en la capacidad de las moléculas de CO de absorber radiación electromagnética en rangos espectrales específicos y con base en la Ley de Beer-Lambert, la radiación absorbida es proporcional a la concentración del gas (Novelli, 1999; Zellweger *et al.*, 2019).

- Absorción infrarroja con fotómetro no dispersivo

Cuando se irradia con una lámpara de radiación infrarroja un gas que contiene CO, éste es capaz de absorber la energía en las longitudes de onda de $4.67 \mu m$ (micrómetros) que corresponde a la vibración de flexión de enlace del C y el O y a $2.34 \mu m$ que corresponde a la vibración de estiramiento del enlace del CO. La absorción de la muestra se compara con la de una celda que contiene una cantidad conocida de CO, el fotómetro es capaz de convertir la diferencia de la cantidad absorbida a una señal eléctrica que proporciona la concentración. Este es el método de referencia en México establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-034-SEMARNAT-1993.

- La fotometría de correlación de filtro de gas

En este caso la absorción de la luz del CO corresponde también a bandas del espectro electromagnético infrarrojo, pero se usa como filtro el mismo gas que se mide o un gas patrón. En México, este es el método equivalente para determinar la concentración de CO en el aire ambiente.

1.7.3 Sensores

En las últimas dos décadas se ha incrementado la medición de contaminantes atmosféricos utilizando sensores que permiten mediciones en tiempo real para tener seguridad en interiores pues pueden detectar altas concentraciones o fugas y generalmente cuentan con una alarma. Son equipos de bajo costo que no requieren el uso de gases, aunque deben calibrarse con frecuencia y pueden variar con cambios de temperatura y humedad. Los sensores comerciales más utilizados para medir CO son los siguientes (Vega-Luna *et al.*, 2017; Nagy *et al.*, 2020):

- Sensores electroquímicos

Están constituidos por una celda en la que se encuentran un electrodo de trabajo, uno de referencia y uno auxiliar en una solución ácida. La muestra penetra a la celda por una membrana capilar que regula la entrada de CO, el cual se oxida en el electrodo de trabajo (que contiene algún metal como Pd, Pt, Rh, u óxidos metálicos como Cu₂O) generando electrones; el electrodo de referencia (comúnmente de Ag/AgCl) tiene un potencial eléctrico constante para medir de manera precisa la corriente generada en el otro electrodo, la cual es proporcional a la concentración del gas. Finalmente, el electrodo auxiliar permite que los electrones generados en el electrodo de trabajo fluyan por el circuito, manteniendo un flujo de corriente.

- Sensores de semiconductor

También denominados sensores MQ, utilizan una fuente de corriente controlada que circula por un material semiconductor, como el dióxido de estaño (SnO₂), el cual en presencia de CO, provoca que el gas se ionice ocasionando que varíe la conductividad eléctrica, la cual es proporcional a la concentración.

1.7.4 Otros métodos

Otros métodos utilizados o recientemente aplicados, muchos de ellos para fines de investigación y análisis son los siguientes, abreviados con sus siglas en inglés (Novelli *et al.*, 1999; Zellweger *et al.*, 2019):

- Absorción en el rango infrarrojo medio
- Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)
- Espectroscopia de anillo descendente de cavidad en el rango del infrarrojo cercano (CRDS)
- Espectroscopia de láser de diodo sintonizable (TDLS)
- Absorción de láser de cascada cuántica de caminos múltiples (QCL)
- Fluorescencia de resonancia ultravioleta de vacío (VURF)
- Espectroscopia de salida de cavidad integrada (ICOS).

1.8 Niveles de CO en México y el mundo

El Satélite Terra de la NASA ha monitoreado de manera remota las concentraciones de CO en el mundo, aplicando espectrometría infrarroja desde el año 2000, con el instrumento denominado MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) (Buchholtz *et al.*, 2021). Las observaciones han permitido comprobar, sin lugar a dudas, que las concentraciones de CO han decrecido alrededor del 15% desde el inicio de la medición; sin embargo, la tasa de disminución que en la primera década fue aproximadamente de 1% por año, ha disminuido a 0.5% en los últimos años (NASA, 2022).

La reducción del CO a nivel mundial en las últimas décadas, ha sido reportada por varios investigadores, quienes explican dicha disminución por las políticas implementadas para controlar la contaminación del aire, ya que en todas las ciudades del planeta se han adoptado tecnologías más limpias en la industria, se han instalado convertidores catalíticos en los automóviles, se ha promovido la disminución de la quema de carbón y madera y se disminuyó la quema de biomasa en Sudamérica (Drummond *et al.*, 2010; Deeter *et al.*, 2018). La disminución ha sido distinta en diferentes continentes; por ejemplo, en China, las políticas de aire limpio han impactado positivamente la reducción de las emisiones de CO, pero en India y África Central donde está extendida la práctica de quemas agrícolas no ha sucedido así, por lo que se presentan importantes emisiones en dichas zonas; por otra parte, en los últimos años, las constantes olas de calor a nivel mundial han ocasionado un repunte en el número de incendios forestales, por lo que nuevamente se han registrado mayores emisiones de CO a la atmósfera y es una de las razones del decaimiento en la reducción de CO atmosférico (Buchholtz *et al.*, 2021).

La Unión Europea reportó en 2021 la disminución del 62.9% de las concentraciones de CO en comparación del año 2005 (EEA, 2023). La Figura 1.5 muestra la tendencia en los últimos años de los niveles de CO en los Estados Unidos, y la Zona Metropolitana del Valle de México, donde se aprecia la disminución pronunciada en las concentraciones máximas del promedio móvil de 8 h de CO hasta el año 2000. En los Estados Unidos los valores son más bajos porque representan el promedio en todo el país donde la norma de 9 ppm se cumple desde 1984. En la ZMVM que es una mega ciudad puede apreciarse la reducción de más del 200% entre 1990 y 2002; estas reducciones se relacionan con la implementación de convertidores catalíticos en los vehículos automotores, prohibición de uso de combustibles sólidos en la industria y plantas de energía, instalación de tecnologías de control y migración de industrias contaminantes de la zona.

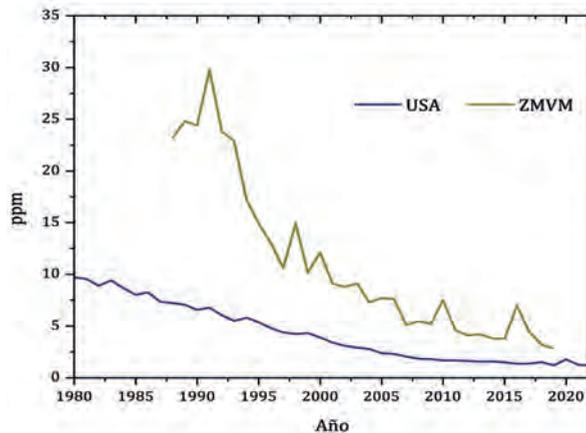


Figura 1.5 Concentración máxima del promedio móvil de 8 h de CO (CARB-EPA, 2023; SEDEMA, 2020).

El informe de 2020 sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas muestra que de las 45 ciudades o zonas metropolitanas que son capaces de medir la calidad del aire, 27 han cumplido la NOM-SSA1-021-1993, y las demás o tienen insuficiencia de datos o tienen problemas de operación. En general, en todas las ciudades mexicanas donde se mide el CO, las concentraciones de este contaminante han disminuido desde el año 2000 y desde el año 2009 se cumple la norma en todas las ciudades (INECC, 2013, 2016, 2019, 2020). En la Zona Metropolitana del Valle de México se ha mantenido desde el año 2001 la concentración de CO por debajo de la norma y los valores máximos de concentración no exceden ni las directrices de la OMS, ni los valores estándares de la US EPA.

1.9 Reflexiones y conclusiones

Aunque las concentraciones del CO en la atmósfera en zonas urbanas son usualmente menores a las recomendadas por la OMS, la exposición crónica de las personas que permanecen mucho tiempo en sitios con mucho tráfico vehicular o cerca de emisiones industriales, puede generar daños a la salud que no son percibidos durante la exposición.

La mayoría de los accidentes debidos a la intoxicación con monóxido de carbono se producen en interiores por: estacionamientos cerrados, autos con fugas en el escape y estufas, chimeneas o anafres vinculados con las actividades relacionadas a la preparación de alimentos y la calefacción, por lo que es importante verificar el funcionamiento de cualquier dispositivo de combustión y mantenerlos de preferencia en zonas ventiladas.

El mecanismo químico de unión preferente del CO con los grupos hemo de la hemoglobina y en citocromos en comparación con el oxígeno, impacta de manera crónica y aguda a todos los seres vivos, dependiendo de la concentración y la duración de la exposición, por lo que es imperativo procurar una buena aereación en donde se realizan las actividades diarias o, en su defecto, tratar de permanecer todos los días al aire libre aunque sea un tiempo breve en zonas con poco tráfico o en terrazas y azoteas si no es posible hacerlo en zonas verdes.

Es preciso que el personal de salud, paramédicos, trabajadores de primer contacto, enfermeras y médicos cuenten con la información y preparación necesarias para entender y reconocer los síntomas leves y agudos de las intoxicaciones por monóxido de carbono, así como para aplicar los tratamientos basados en la aplicación de oxígeno.

Referencias

1. Bolaños Morera, P. y Chacón Araya, C. (2017). Intoxicación por monóxido de carbono. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1), 137-146.
2. Bartholomew, G. W. y Alexander, M. (1979). Microbial metabolism of carbon monoxide in culture and in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 37(5), 932-937.
3. Bartholomew, G. W. y Alexander, M. (1981). Soil as a sink for atmospheric carbon monoxide. *Science*, 212(4501), 1389-1391.
4. Buchholz, R. R., Worden, H. M., Park, M., Francis, G., Deeter, M. N., Edwards, D. P., ... Kulawik, S. S. (2021). Air pollution trends measured from Terra: CO and AOD over industrial, fire-prone, and background regions. *Remote sensing of Environment*, 256, 112275.
5. CARB, California Air Resources Board. (2023). Carbon monoxide and health. Recuperado 27 mayo de 2023 de: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/carbon-monoxide-and-health>
6. Coburn, R.F., Forster R.E. y Kane P.B. (1965). Comparison of the physiological variables that determine the blood carboxyhemoglobin concentration in man. *Journal of Chemistry Investigation* 44(11), 1899-1910.
7. Conrad, R. y Seiler, W. (1980). Role of microorganisms in the consumption and production of atmospheric carbon monoxide by soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 40(3), 437-445.
8. Conrad, R., Seiler, W., Bunse, G., & Giehl, H. (1982). Carbon monoxide in seawater (Atlantic Ocean). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C11), 8839-8852.
9. Conte, L., Szopa, S., Séférian, R., & Bopp, L. (2019). The oceanic cycle of carbon monoxide and its emissions to the atmosphere. *Biogeosciences*, 16(4), 881-902.
10. Daniel, J. S. y Solomon, S. (1998). On the climate forcing of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D11), 13249-13260.
11. De Nevers N. (1998). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. Traducido de la Primera Emisión en inglés. McGraw-Hill. México.

12. Deeter, M. N., Martínez-Alonso, S., Andreae, M. O., Schlager, H. (2018). Satellite-based analysis of CO seasonal and interannual variability over the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10), 5641-5656. <https://doi.org/10.1029/2018JD028425>.
13. Drummond, J. R., Zou, J., Nichitiu, F., Kar, J., Deschambaut, R. y Hackett, J. (2010). A review of 9-year performance and operation of the MOPITT instrument. *Advances in Space Research*, 45(6), 760-774. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.11.019>.
14. EEA, 2023, Europe's air quality status 2023, EEA Briefing (<https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>).
15. Ernst, A., Zibrak, J. D. (1998). Carbon monoxide poisoning. *New England journal of medicine*, 339(22), 1603-1608.
16. Fajardo A.L., Rodríguez A.I., Téllez J., Prieto E. y Mora G. (2012). Estudio comparativo del comportamiento clínico cardiovascular y electrocardiográfico en dos poblaciones expuestas a monóxido de carbono. *Revista de la Facultad de Medicina*. 60, (4), 303-310.
17. Finlayson-Pitts, B.J. y Pitts, J.N. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere—Theory, Experiments, and Applications*, 1st ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA.
18. Goldstein M. Carbon monoxide poisoning. (2008). *Journal of Emergency Nursing*, 34 (6), 538–542.
19. INECC (2020). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México.343pp.
20. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.
21. Jaffe L. S. (1968). Ambient Carbon Monoxide and Its Fate in the Atmosphere, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 18 (8), 534-540.
22. Joshi, A., Pathak, M., Kuttippurath, J. y Patel, V. K. (2023). Adoption of cleaner technologies and reduction in fire events in the hotspots lead to global decline in carbon monoxide. *Chemosphere*, 139259.
23. Khalil, M. A. K. y Rasmussen, R. A. (1990). The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance. *Chemosphere*, 20(1-2), 227-242.
24. Khalil, M.A.K. y Rasmussen, R.A. (1994). Global decrease in atmospheric carbon monoxide concentration. *Nature*. 370, 639–641.
25. Kim, H., Kim, J., Kim, S., Kang, S. H., Kim, H. J., Kim, H., ... Chae, I. H. (2017). Cardiovascular effects of long-term exposure to air pollution: a population-based study with 900 845 person-years of follow-up. *Journal of the American Heart Association*, 6(11), e007170.

26. Kanakidou, M. y Crutzen, P. J. (1999). The photochemical source of carbon monoxide: Importance, uncertainties and feedbacks. *Chemosphere-Global Change Science*, 1(1-3), 91-109.
27. Lelieveld, J., Gromov, S., Pozzer, A. y Taraborrelli, D. (2016). Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(19), 12477-12493. <https://doi.org/10.5194/acp-16-12477-2016>, 2016.
28. Liu, C., Yin, P., Chen, R., Meng, X., Wang, L., Niu, Y., ... Zhou, M. (2018). Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: a nationwide time-series analysis in 272 cities in China. *The Lancet Planetary Health*, 2(1), e12-e18.
29. Nagy, A. S., Polanco Risquet, A., Martínez de la Coteria, O. L. y Carralero Ibargollen, O. (2020). Medición simultánea de gases con sensores MQ. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(1), 34-43.
30. NCEH, National Center for Environmental Health. (2023). Recuperado el 26 de agosto de 2023 de: <https://www.cdc.gov/nceh/features/copoisoning/index.html>.
31. Novelli, P. C. (1999). CO in the atmosphere: measurement techniques and related issues. *Chemosphere-Global Change Science*, 1(1-3), 115-126.
32. Oliu, G., Nogué, S. y Miró, Ò. (2010). Intoxicación por monóxido de carbono: claves fisiopatológicas para un buen tratamiento. *Emergencias*, 22(6), 451-59.
33. OMS, Organización Mundial de la Salud. (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Ginebra.
34. Peterson, J. E. y Stewart, R. D. (1970). Absorption and elimination of carbon monoxide by inactive young men. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 21(2), 165-171.
35. Peterson, J. E. y Stewart, R. D. (1975). Predicting the carboxyhemoglobin levels resulting from carbon monoxide exposures. *Journal of Applied Physiology*, 39(4), 633-638.
36. Piantadosi, C. A. (2002). Carbon monoxide poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347(14), 1054-1055.
37. Pressman, J. y Warneck, P. (1970). The stratosphere as a chemical sink for carbon monoxide. *Journal of Atmospheric Sciences*, 27(1), 155-163.
38. Ramirez, H. B., Alvarez, R. F., Cuadrado, G. R., Gonzalez, C. M., Jerez, F. R. y Clara, P. C. (2014). Niveles elevados de carboxihemoglobina: fuentes de exposición a monóxido de carbono. *Archivos de bronconeumología*, 50(11), 465-468.
39. Raub, J. A., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N. B. y Thom, S. R. (2000). Carbon monoxide poisoning—a public health perspective. *Toxicology*, 145(1), 1-14.
40. SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). Programa de Gestión para mejorar la Calidad del Aire del Estado de Nuevo León. Proaire 2016-2025.
41. Shilkin, A. V., et al. (2021). Long-Term Tendencies of Carbon Monoxide in the Atmosphere of the Moscow Megapolis. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 57, 116-125.

42. SS, Secretaría de salud. (2023). Panorama Epidemiológico y Estadístico de la Mortalidad por Causas Sujetas a Vigilancia Epidemiológica en México en 2021.
43. Rakitin, V. S., Elansky, N. F., Skorokhod, A. I., Dzhola, A. V., Rakitina, A. V., Shilkin, A. V., ... Kazakov, A. V. (2021). Long-term tendencies of carbon monoxide in the atmosphere of the Moscow Megapolis. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 57, 116-125.
44. SINAVE/DGE/SALUD/Panorama Epidemiológico y Estadístico de la Mortalidad por Causas Sujetas a Vigilancia Epidemiológica en México. (2021). -Dirección General de Epidemiología / Sistema Epidemiológico y Estadístico de las Defunciones 2021. México.
45. SINAVE/DGE/SALUD/Panorama Epidemiológico y Estadístico de la Mortalidad por Causas Sujetas a Vigilancia Epidemiológica en México. (2019).
46. Stubbins, A., Uher, G., Law, C. S., Mopper, K., Robinson, C., y Upstill-Goddard, R. C. (2006). Open-ocean Carbon Monoxide Photoproduction. *Deep Sea Res. Part Topical Stud. Oceanography* 53, 1695–1705. doi:10.1016/j.dsr2.2006.05.011.
47. Struttman, T., Scheerer, A., Prince, T. S. y Goldstein, L. A. (1998). Unintentional carbon monoxide poisoning from an unlikely source. *The Journal of the American Board of Family Practice*, 11(6), 481-484.
48. Sobieraj, K., Stegenta-Dąbrowska, S., Luo, G., Koziel, J. A. y Białowiec, A. (2022). Carbon monoxide fate in the environment as an inspiration for biorefinery industry: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 822463.
49. Téllez, J., Rodríguez, A. y Fajardo, Á. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental. *Revista de salud pública*, 8(1), 108-117.
50. Tian, L., Qiu, H., Pun, V. C., Ho, K. F., Chan, C. S. y Ignatius, T. S. (2015). Carbon monoxide and stroke: a time series study of ambient air pollution and emergency hospitalizations. *International journal of cardiology*, 201, 4-9.
51. US EPA, United States Environmental Protection Agency. (2014). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaq-table>
52. Vega-Luna, J.I.; Lagos-Acosta, M. A.; Salgado-Guzmán G.. Carbon monoxide concentration monitoring using long-rang technology. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 2017, no 18, p. 73-83.
53. WHO, World Health Organization. (2000). Guidelines for Air Quality. Consultado 31 julio 2023]. WHO/SDE/OEH/00.02.World Health Organization, Geneva. http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/66537/WHO_SDE_OEH_00.02-eng.pdf;jsessionid=73996B0E3FEB8ED759552FD96866F1F1?sequence=18
54. WHO, World Health Organization. (2006). Regional Office for Europe. Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization. Regional Office for Europe. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>
55. Zellweger, C., Steinbrecher, R., Laurent, O., Lee, H., Kim, S., Emmenegger, L. y Buchmann, B. (2019). Recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon monoxide and nitrous oxide observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(11), 5863-5878.

56. Zhang, J. y Piantadosi, C. A. (1992). Mitochondrial oxidative stress after carbon monoxide hypoxia in the rat brain. *The Journal of clinical investigation*, 90(4), 1193-1199.
57. Zhao, Y., Hu, J., Tan, Z., Liu, T., Zeng, W., Li, X., ... Ma, W. (2019). Ambient carbon monoxide and increased risk of daily hospital outpatient visits for respiratory diseases in Dongguan, China. *Science of the total environment*, 668, 254-260.
58. Zheng, B., Chevallier, F., Yin, Y., Ciais, P., Fortems-Cheiney, A., Deeter, M. N., ... Zhao, Y. (2019). Global atmospheric carbon monoxide budget 2000–2017 inferred from multi-species atmospheric inversions. *Earth System Science Data*, 11(3), 1411-1436. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1411-2019>
59. Zuo, Y., Guerrero, M. A. y Jones, R. D. (1998). Reassessment of the ocean-to-atmosphere flux of carbon monoxide. *Chemistry and Ecology*, 14(3-4), 241-257.