

LA CONTAMINACIÓN POR OZONO EN LA CIUDAD DE MÉXICO: ¿CÓMO PODEMOS CONTROLARLA?

José Agustín García-Reynoso^{1*}, Víctor Almanza-Veloz¹ y Ricardo Torres-Jardón¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Circuito de la Investigación s/n, Ciudad Universitaria CP 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

*agustin@atmosfera.unam.mx (autor para correspondencia)

RESUMEN

El ozono en el ambiente es un contaminante secundario que afecta a la salud y a los ecosistemas, lo que hace que su estudio y control sean importantes. El control de las emisiones de ozono está influenciado por la reducción de sus precursores, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV). No obstante, la relación que posee el ozono con sus precursores no es lineal, por lo que disminuir las emisiones de alguno de ellos no asegura la reducción de la concentración de ozono presente en el aire.

En este trabajo se revisa la relación no lineal que existe entre los precursores del ozono y su concentración ambiental, así como la implicación de las estrategias de control de las emisiones como el programa "Hoy No Circula" y su influencia en las concentraciones máximas de ozono. También se presentan algunas estrategias que se sugiere emplear a futuro para abatir precursores y con ello mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

Palabras clave: Hoy no circula, NO_x, COV, ozono.

ABSTRACT

Ozone in the environment is a secondary pollutant that affects health and ecosystems, what makes its study and control important. Control of ozone emission is influenced by the reduction of its precursors, nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOCs). However, the relationship between ozone and its precursors is not linear, so reducing the emissions of any of them does not mean that the reduction in ozone concentration at the environment is guaranteed.

In this work, the non-linear relationship between ozone precursors and their environmental concentration is reviewed, as well as the implication of control strategies in emissions such as "Hoy No Circula" and their influence on maximum ozone concentrations. Some strategies that are suggested to be used in the future to abate precursors and, thereby improve air quality in the Mexico City Metropolitan Area (ZMCM) are also presented.

Keywords: No-driving day, NO_x, VOC, ozone.

DESCRIPCIÓN Y VENTAJAS DEL MATERIAL DE DIVULGACIÓN

Comprender la relevancia del ozono en nuestro entorno aporta múltiples beneficios para el público en general. El ozono no sólo se encuentra en la capa protectora de la atmósfera superior, también se encuentra en niveles más bajos en donde se convierte en un contaminante secundario que incide directamente en la salud humana y en los ecosistemas.

En este trabajo se describe el control de las emisiones de ozono que está relacionado con la reducción de sus precursores, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV). No obstante, el nexo entre el ozono y sus precursores es complejo y no se rige por una relación lineal. El reducir simplemente las emisiones de uno de éstos precursores no garantiza automáticamente una disminución de la concentración de ozono en el ambiente. El analizar la relación no lineal entre los precursores y la concentración de ozono ayuda a discernir cómo las estrategias de control, como el programa "Hoy No Circula", influyen en las emisiones y en las concentraciones máximas de ozono ambiental. Además, este conocimiento es fundamental en la búsqueda de soluciones a largo plazo para mejorar la calidad del aire en áreas críticas como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Identificar estrategias adecuadas para reducir los precursores del ozono requiere una comprensión profunda de su relación compleja y no lineal. Esto allana el camino para medidas futuras que puedan abatir los precursores y, en consecuencia, mejorar la calidad del aire en la ZMCM.

En última instancia, la divulgación de esta información empodera al público para tomar decisiones más conscientes y ejercer un papel activo en la protección de su salud y su entorno. Conocer la complejidad de las relaciones entre los precursores del ozono y su concentración en el ambiente nos permite avanzar hacia soluciones más efectivas y sostenibles, encaminadas a tener un aire más limpio y una atmósfera más saludable para todos.

INTRODUCCIÓN

En este documento se describe, de forma general, la evaluación de una estrategia de control de emisiones de precursores de ozono mediante la utilización del diagrama *Empirical Kinetic Modelling Approach* (EKMA) (Bouley, 1992). En los antecedentes se presentan los aspectos generales de la contaminación atmosférica, posteriormente se describe la formación de este ozono troposférico, para después explicar el diagrama EKMA. Con éste diagrama se ilustra la relación del ozono con sus precursores; se explica qué es una atmósfera sensible a NOx y sensible a COVs; se aplican las mediciones de la red automática de monitoreo ambiental para mostrar el comportamiento no lineal de la producción de ozono con sus precursores; se ilustra cómo identificar si la atmósfera en la Ciudad de México es sensible a NOx o a COV. Posteriormente, se emplean estos conceptos para evaluar la implementación del programa "Hoy no Circula" en situaciones de altos registros de ozono y se identifica si la reducción de emisiones por esta medida en la Ciudad de México (CdMx) es eficiente para disminuir el ozono. Finalmente, se exponen algunas alternativas de control de emisiones para disminuir las concentraciones de ozono.

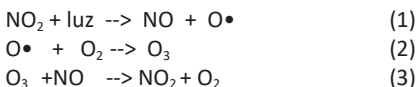
Antecedentes

Un contaminante es una sustancia presente en el ambiente en concentraciones mayores que las detectadas en ambientes naturales y que por su magnitud y persistencia afecta de forma negativa a la salud y al entorno (LGEEPA, 2014). La contaminación atmosférica en una región depende de factores como las condiciones meteorológicas prevalecientes, las características orográficas y las emisiones antrópicas que ocurran en la zona. De los tres factores anteriores, en las emisiones antrópicas se puede ejercer algún control para mejorar la calidad del aire, mediante la reducción de las cantidades liberadas a la atmósfera aplicando las políticas adecuadas (SEMA, 2017).

Entre las sustancias presentes en la atmósfera se encuentran aquellas utilizadas para evaluar el estado de la calidad del aire, denominadas contaminantes criterio: monóxido de carbono, dióxido de azufre, plomo, partículas, dióxido de nitrógeno y ozono (SSA, 2014). Los contaminantes inicialmente liberados y en presencia de luz interactúan entre sí mediante una serie de reacciones que dan origen a nuevos contaminantes denominados secundarios, siendo el ozono uno de ellos (García-Reynoso et al., 2009). El ozono es una sustancia altamente reactiva que puede desencadenar problemas respiratorios, exacerbando condiciones como el asma y afectando la función pulmonar (Molina y Molina, 2002). Además, este contaminante contribuye al smog, afectando la calidad del aire. Adicionalmente, puede dañar los tejidos de las plantas, afectando negativamente los cultivos y a los ecosistemas. (Ruiz-Suárez et al., 2018).

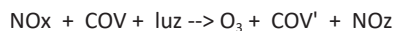
Formación de ozono troposférico

El ozono es un alótropo inestable del oxígeno, el cual se forma y se descompone en la atmósfera por tres reacciones básicas (Jacobson, 1999):



El dióxido de nitrógeno (NO₂) experimenta una descomposición inducida por la luz, donde se desprende un átomo de oxígeno (O•, reacción 1), que reacciona inmediatamente con una molécula de oxígeno (O₂) para producir ozono (O₃, reacción 2). A continuación, el O₃ reacciona con el monóxido de nitrógeno (NO, generado en la reacción 1) para regenerar tanto la molécula de oxígeno como la de dióxido de nitrógeno (reacción 3). Este ciclo de formación-remoción conduce a niveles bajos de la concentración de ozono y ocurre generalmente en ambientes limpios donde las emisiones de NO₂ y NO son producidas naturalmente (Wallace y Hobbs, 2006; Leighton, 2012).

Las reacciones anteriores también ocurren en áreas urbanas; sin embargo, la interacción de compuestos orgánicos volátiles (COV) con los óxidos de nitrógeno (NOx) rompe el ciclo nulo antes mencionado, provocando que el ozono se acumule (Haagen-Smit y Fox, 1956; Chameides et al., 1992). En estas áreas, los COV de origen antrópico y biogénico sufren una serie de reacciones de oxidación que resultan en la formación de especies llamadas radicales orgánicos que, a su vez, reaccionan mucho más rápido con el NO generado en la reacción 1 y ofreciendo una ruta alterna más eficiente de formación NO₂ que la reacción 3. Esto rompe el ciclo y la concentración de O₃ se ve incrementada al no consumirse esta especie. En resumen, estas reacciones con radicales orgánicos ofrecen una ruta alterna para regenerar el NO₂ que nuevamente produce ozono (reacciones 1 y 2), a lo largo de varios ciclos antes de que el dióxido de nitrógeno sea removido por otras reacciones de acuerdo a la reacción general:



donde COV' representa compuestos orgánicos fragmentados que previamente reaccionaron para formar radicales y otros COV de cadena más corta, y NO_z representan a otras especies de nitrógeno oxidado diferentes a los NOx resultantes de los procesos de remoción del NO₂. Por lo anterior, para controlar la formación de ozono se deben reducir tanto los NOx como los COV, aunque no en forma indiscriminada, sino que se debe considerar tanto la abundancia inicial de ambos como el potencial de formación de ozono de la mezcla de los COV (Haagen-Smit, 1972).

Diagrama EKMA y la producción de ozono

El EKMA es un modelo cinético empírico usado en fotoquímica de la calidad del aire que calcula las concentraciones de ozono resultantes de las reacciones entre sus precursores. El EKMA es el resultado de la realización de infinidad de experimentos en cámaras de smog donde se determinó precisamente la producción máxima de ozono a partir de concentraciones iniciales de NOx y COV irradiadas con radiación ultravioleta (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986). Los valores de este modelo se pueden representar en un diagrama conocido como EKMA. En este diagrama (Figura 1) las abscisas muestran las concentraciones iniciales (o matutinas) de COV, y en las ordenadas se representan las concentraciones iniciales (matutinas) de NOx. Las líneas curvas representan líneas de isoconcentración del ozono máxima pronosticada por el modelo cuya magnitud se incrementa de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba.

En el diagrama EKMA se destacan tres regiones que se definen según la relación constante COV/NOx (líneas punteadas): la región sensible a COV donde COV/NOx ≤ 4, la transición donde 4 < COV/NOx < 15 y la región sensible a NOx con COV/NOx ≥ 15.

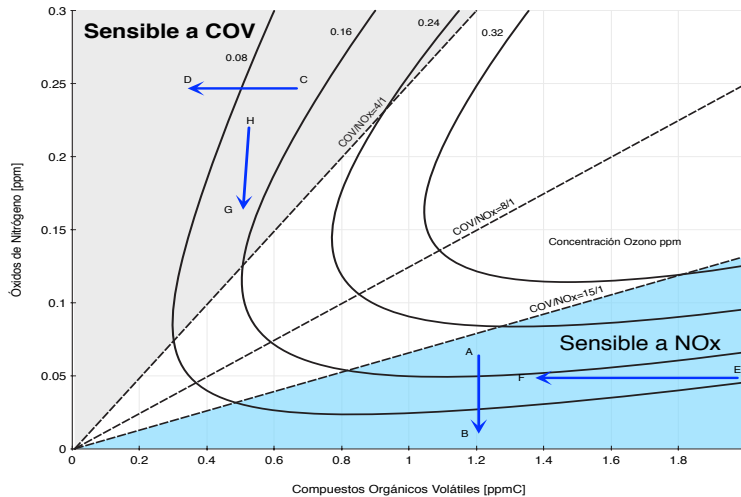


Figura 1. Isoconcentraciones máximas esperadas de ozono (en ppm) dependiendo de las concentraciones iniciales de NOx y COV de acuerdo al con el modelo *Empirical Kinetic Modeling Approach* (EKMA). La concentración de la mezcla de COV no incluye al metano (ppmC: partes por millón de carbono)(Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

Si la condición química de la atmósfera se ubica en la región sensible a NOx, la reducción de NOx hace que se reduzca el ozono (reducción de NOx de A a B en la Figura 1); si la condición se ubica en la región sensible a COV, la reducción de COV también induce que se reduzca el ozono (reducción de COV de C a D en la Figura 1, Lin *et al.*, 1988). En la región sensible a COV, la reducción de NOx no induce una disminución de ozono, incluso, puede provocar su incremento (reducción de NOx de G a H en la Figura 1); El área sensible a NOx la reducción de los COV puede incrementar la concentración de ozono (reducción COV de E a F en la Figura 1). Generalmente, la concentración de ozono se incrementa en regiones cercanas a donde se dan los cambios de emisiones, pero disminuye conforme es transportado por el viento a escala regional (Song *et al.*, 2010). Estudios realizados al inicio de la década de los años 2000 indican que la atmósfera de la Ciudad de México tenía una condición sensible a los COV (Torres-Jardón *et al.*, 2009).

Para identificar en qué región del diagrama EKMA se encuentra actualmente la atmósfera de la Ciudad de México, se presenta en la Figura 2 el perfil de las concentraciones de los contaminantes O₃ y NO por hora y días de la semana (SEDEMA, 2021). En este caso se utiliza NO como un sustituto razonable de las emisiones primarias de los NOx.

La Figura 2 revela la presencia del conocido "efecto de fin de semana" en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMCM), donde, a pesar de la notable reducción de emisiones de origen vehicular durante los fines de semana (especialmente los domingos en donde se registra 50 % menos NO) las concentraciones de ozono no disminuyen. Este fenómeno sugiere que la atmósfera de la Ciudad de México se mantiene sensible a los compuestos orgánicos volátiles (región sensible a COV), ya que la reducción en NOx no genera la disminución en las concentraciones de ozono y, en ciertos momentos, pueden incluso ocasionar aumento en sus concentraciones ambientales (García-Reynoso *et al.*, 2009; Torres-Jardón *et al.*, 2009).

De acuerdo con el inventario de emisiones de la CdMx para el 2018 (SEDEMA, 2021), las fuentes móviles aportan el 85.8 % de los NOx, por lo cual disminuciones en las concentraciones ambientales de este compuesto se pueden relacionar directamente con la disminución de la actividad vehicular. En el caso de disminuir la actividad vehicular, esto no presenta una reducción significativa de

compuestos orgánicos volátiles.

Por lo tanto, una reducción en la actividad vehicular en una atmósfera sensible a COV puede mantener constante el nivel máximo de ozono e incluso inducir su incremento.

La implementación del programa "Hoy No Circula", que teóricamente resulta en una disminución del 20 % en la flota vehicular en circulación, contribuye a reducir las concentraciones ambientales de contaminantes primarios como NOx, CO y SO₂. Sin embargo, debido a la condición de sensibilidad química de la atmósfera de la Ciudad de México a los compuestos orgánicos volátiles, la reducción puede tener como consecuencia un incremento o una nula disminución de este tipo de contaminantes a nivel local en la ciudad, sin embargo, si se observa una reducción a nivel regional.

Para reducir eficazmente las concentraciones de ozono en la Ciudad de México, es necesario dar prioridad a la disminución de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Las fuentes de área, que representan el 65.5 % de las emisiones totales, son las principales generadoras de estos compuestos. Entre las medidas a tomar se incluyen la reducción de las emisiones de COV provenientes del uso de solventes, carga de combustibles, combustión incompleta de gas LP, fugas de tanques portátiles, y el uso de productos de cuidado personal y limpieza en hogares, entre otras.

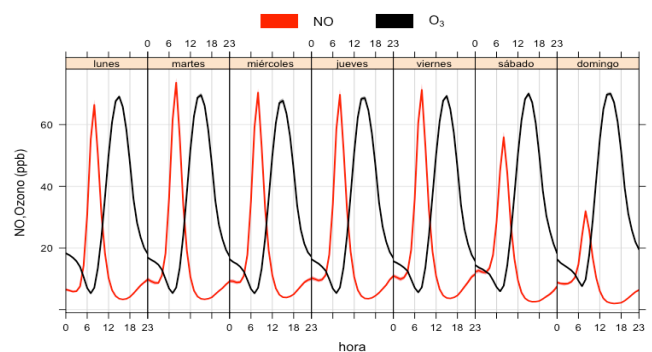


Figura 2. Concentraciones promedio por día de la semana del 2016 a 2019 para NO y ozono (O₃) en ppb en la ZMCM con datos de SEDEMA (2021).

CONCLUSIONES

De este texto se verifica que en la Ciudad de México se ha mantenido a lo largo de los años una atmósfera química de formación de ozono sensible a COV, por lo que disminuir NOx puede producir un incremento en el ozono o a una nula disminución de este contaminante secundario, tal y como lo demuestra el “experimento natural” del efecto de fin de semana de la reducción de emisiones de NOx. La disminución de las emisiones de los vehículos conlleva a una reducción significativa de NOx pero no de COV, lo cual no es suficiente para abatir la concentración de ozono en la CdMx, aunque sí tiene algunos efectos regionales benéficos. Por lo anterior, se deben considerar medidas de control que induzcan reducciones de emisiones de COV en la CdMx. Entre estas medidas se encuentra el reducir el uso de solventes, disminuir las emisiones fugitivas de COV durante la carga y almacenamiento de combustible, reducir el uso de productos de cuidado personal que contengan COV, como los de cuidado personal y de limpieza en los hogares. Una acción con la que podemos contribuir significativamente para reducir las emisiones de COV, es el dar mantenimiento a los equipos de quema de gas LP, principalmente a los calentadores de agua que se usan en los hogares.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Unidad de Cómputo y supercómputo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por el apoyo en la instalación y operación de la infraestructura empleada para el desarrollo de este trabajo. También se agradece a Mónica Ramírez Calderón y a Jorge García Franco por sus arbitrajes y revisiones.

REFERENCIAS

- Bouley, M. D. (1992). Guide for using the Empirical Kinetics Modeling Approach Interface (EKMAI) (No. PB-92-196005/XAB; EPA-450/4-92/009). Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC (United States). Office of Air Quality Planning and Standards.
- Chameides, W., Fehsenfeld, F., Rodgers, M., Cardelino, C., Martinez, J., Parrish, D., Lonneman, W., Lawson, D., Rasmussen, R., y Zimmerman, P. (1992). Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D5), 6037-6055.
- Finlayson-Pitts, B. J., y Pitts Jr, J. N. (1986). *Atmospheric chemistry. Fundamentals and experimental techniques*, USA.
- García-Reynoso, A., Jazcilevich, A., Ruiz-Suárez, L. G., Torres-Jardón, R., Suárez Lastra, M., y Reséndiz Juárez, N. A. (2009). Ozone weekend effect analysis in México City [Article]. *Atmosfera*, 22(3), 281-297. <https://www.scielo.org.mx/pdf/atm/v22n3/v22n3a4.pdf>
- Haagen-Smit, A. J. (1972). Abatement strategy for photochemical smog. *Advances in Chemistry Series*, 113, 169-190. <https://doi.org/10.1021/ba-1972-0113.ch005>
- Haagen-Smit, A. J., y Fox, M. M. (1956). Ozone Formation in Photochemical Oxidation of Organic Substances. *Industrial and Engineering Chemistry*, 48(9), 1484-1487. <https://doi.org/10.1021/ie51400a033>
- Jacobson, M. Z. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge university press. USA.
- Leighton, P. (2012). *Photochemistry of air pollution*. Elsevier. USA

- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), (2014). <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgeepa.htm>
- Lin, X., Trainer, M., y Liu, S. (1988). On the nonlinearity of the tropospheric ozone production. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D12), 15879-15888.
- Molina, L., y Molina, M. J. (2002). *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment (Vol. 2)*. Springer Science and Business Media, Cambridge, USA.
- Ruiz-Suárez, L. G., Mar-Morales, B. E., García-Reynoso, J. A., Andraca-Ayala, G. L., Torres-Jardón, R., García-Yee, J. S., Barrera-Huertas, H. A., Gavilán-García, A., y Cruz, R. B. (2018). Estimation of the impact of ozone on four economically important crops in the city belt of Central Mexico [Article]. *Atmosphere*, 9(6), Article 223. <https://doi.org/10.3390/atmos9060223>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2021). Página WEB aire. Retrieved 7/11/2021 from <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) (2021). Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018 (D. n. d. P. d. C. d. A. Dirección General de Calidad del Aire Ed. 1 ed., Vol. 1). Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCA/InventarioDeEmisionesZMVM2018.pdf>
- SEMA. (2017). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Coahuila de Zaragoza 2017-2026 [Report]. https://www.torreon.gob.mx/medioambiente/pdf/Pro_Aire_Coahuila_2017.pdf
- Song, J., Lei, W., Bei, N., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Cardenas, B., Zheng, J., Zhang, R., y Molina, L. T. (2010). Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(8), 3827-3846. <https://doi.org/10.5194/acp-10-3827-2010>
- Secretaría de Salud (SSA), (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-Secretaría de Salud. In *Diario Oficial de la Federación* (2014 ed., Vol. NOM-020-SSA1-2014, pp. 5).
- Torres-Jardón, R., García-Reynoso, J. A., Jazcilevich, A., Ruiz-Suárez, G., y Keener, T. C. (2009). Assessment of the ozone-nitrogen oxide-volatile organic compound sensitivity of Mexico City through an indicator-based approach: Measurements and numerical simulations comparison [Article]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59(10), 1155-1172. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.10.1155>
- Wallace, J. M., y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92)*. Elsevier.

Manuscrito recibido: 11 de agosto de 2023

Manuscrito corregido recibido: 29 de noviembre de 2023

Manuscrito aceptado: 4 de diciembre de 2023