



Revista Cubana de Química

ISSN: 0258-5995

revcubanaquimica@cnt.uo.edu.cu

Universidad de Oriente

Cuba

Ortiz, Elba; González, Carolina; Noreña, Luis
SIMULACIÓN DE LA REACTIVIDAD FOTOQUÍMICA DE LAS EMISIONES A LA
ATMÓSFERA DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR EL USO DE LA MEZCLA ETANOL-
GASOLINA

Revista Cubana de Química, vol. XX, núm. 2, -, 2008, pp. 23-31

Universidad de Oriente

Santiago de Cuba, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543714004>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

SIMULACIÓN DE LA REACTIVIDAD FOTOQUÍMICA DE LAS EMISIONES A LA ATMÓSFERA DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR EL USO DE LA MEZCLA ETANOL-GASOLINA

Elba Ortiz, Carolina González, Luis Noreña 

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México

•Resumen

La producción de biocombustible a partir de cultivos agrícolas no sólo trae consigo una reducción en la disponibilidad de los alimentos, sino que podría causar una disminución de la calidad del aire afectando a la salud de la población expuesta. El propósito de este trabajo es el evaluar el efecto que tendría la sustitución de gasolina Magna por la mezcla gasolina-etanol en la flota vehicular mediante la simulación de la reactividad fotoquímica de la calidad del aire en la Ciudad de México. Adicionalmente, se analizará el efecto de esta sustitución sobre la producción de tóxicos como acetaldehído, peroxyacetil nitratos (PAN) y benceno, así como de otros contaminantes tales como hidrocarburos totales y óxido de nitrógeno. La evaluación de esta estrategia se llevará a cabo mediante la aplicación de modelos de calidad del aire CIT en su versión trayectoria, en donde se relacionan las emisiones del parque vehicular con las concentraciones del biocombustible. La información generada en diversos estudios de campo como IMADA-AVER /1-3/ se empleará como bases de datos que alimenten a los modelos fotoquímicos. Así también, se empleará el inventario de emisiones de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM) del año 2006 para generar la proyección a futuro a al 2020.

Palabras clave: etanol, modelación de la calidad del aire, ozono, acetaldehído.

•Abstract

Biofuels production from agricultural products not only might causes a decrease of food availability but also it might cause a reduction in air quality, affecting the health of exposed population. The goal of this work is to evaluate the effect that might occur if ethanol blend were to be used instead of the methyl tert-butyl ether, MTBE, in the gasoline Magna (o regular gasoline) for the Mexico City vehicular fleet; by using a simulation of the photochemical reactivity of the air quality in Mexico City. Additionally, the effect of this substitution over the production of toxics as acetaldehyde, and peroxy-acetyl nitrate (PAN), as well as other pollutants such as total hydrocarbons and nitrogen oxide will be analyzed. The evaluation of this strategy will be held by using CIT air quality models in their trajectory version, where the emissions of the vehicular fleet are related to the biofuel concentration. Information taken from different projects such as IMADA-AVER /1-3/ will be used as data bases to feed the photochemical models. The 2006 Mexico's City Metropolitan Area inventory will be also use to generate a future projection till 2020.

Key words: air quality models, ethanol fuels, ozone, acetaldehyde.

● Introducción

La primera máquina de combustión interna patentada en el siglo XVIII utilizó etanol y disolventes como combustible. En la actualidad, el etanol es promovido, a nivel mundial, como un combustible limpio y renovable que reduce el calentamiento global, la contaminación atmosférica y el consumo de gasolina /4-7/.

En años recientes, diversos países han orientado esfuerzos y políticas públicas para desarrollar un mercado de biocombustibles, explorando alternativas para la generación de energía para autoconsumo o exportación /8/. Se ha observado, que ciertos cultivos tropicales y subtropicales ostentan un excelente balance energético y ambiental.

En México, la calidad de los combustibles se regula a través de la norma NOM-086-ECOL-1994 /9/ "contaminación atmosférica –especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles", publicada el 2 de diciembre de 1994 y modificada en noviembre de 1997, incluye las especificaciones de gasolinas, diesel, turbosina, gas natural, gas licuado y combustibles industriales líquidos, con el objeto de minimizar la emisión de contaminantes a la atmósfera que se origina en los procesos de combustión. El fin último es proteger la calidad del aire y, por lo tanto, de los ecosistemas y de la salud de la población. Esta norma es modular en el establecimiento de niveles permisibles de emisiones vehiculares por la relación intrínseca entre las especificaciones de los combustibles y las tecnologías para el control de las emisiones contaminantes.

La expedición de esta norma en 1994 contribuyó a atenuar los grandes problemas de contaminación de aire en las zonas urbanas del país, en especial de la ciudad de México, en donde se lograron mejoras sustanciales en la calidad del aire, fundamentalmente por la eliminación del plomo en las gasolinas y en el control de algunos compuestos. Con esta norma se inició el control del contenido de aromáticos, olefinas, benceno y presión de vapor entre otras especificaciones. Para cumplir con las directivas ambientales, actualmente las gasolinas

consumidas en México son oxigenadas, mediante mezclas con metil terbutil éter, MTBE, y teramil-butil éter, TAME. La capacidad de producción en las plantas de PEMEX de esos éteres oxigenantes cubre el 45 % de consumo, complementándose las necesidades con MTBE importado. El uso del etanol contribuye al desarrollo sustentable, ya que provee acceso a la energía renovable, es por ello, que actualmente, se realiza el análisis de un programa de introducción de etanol como combustible que considera, como un primer escenario, la sustitución de los oxigenantes por etanol.

Los modelos de simulación fotoquímica de la calidad del aire tratan la dinámica y química de los contaminantes atmosféricos. Con ellos se estiman concentraciones ambientales mediante el proceso sistemático de las emisiones, meteorología y química atmosférica. En los últimos treinta años, estos modelos evolucionaron desde representaciones físicas y químicas crudas, hasta el estado actual con un alto nivel de detalle. Generalmente, los modelos fotoquímicos se diferencian por el número de procesos atmosféricos considerados en éstos, por el nivel de sofisticación en el tratamiento de tales procesos, así como por los métodos numéricos usados para resolver los sistemas de ecuaciones /10/. Operan con grupos de datos que caracterizan las emisiones, la topografía y la meteorología de una región, produciendo como salida, información que describe la calidad del aire de dicha región. Respondiendo a la pregunta ¿qué pasaría si ...? dichos modelos se emplean, frecuentemente, en la explicación de episodios pasados, en la evaluación de los efectos potenciales de estrategias de reducción de emisiones, o en pronósticos de calidad del aire.

El objetivo principal de este trabajo es el simular el efecto que tendría la sustitución de gasolina Magna por la mezcla gasolina-etanol en la flota vehicular mediante la simulación de la reactividad fotoquímica de la calidad del aire en la Ciudad de México, utilizando el modelo de calidad del aire CIT. Adicionalmente, se discute la química atmosférica ante el posible incremento de las emisiones de acetaldehído originado por la reformulación de la gasolina con etanol.

● Metodología

Entre las herramientas más importantes para el control del ozono y otros contaminantes secundarios sobresalen los modelos fotoquímicos, los cuales son utilizados para describir las relaciones entre las emisiones de los contaminantes primarios y las concentraciones de contaminantes producidos por reacciones químicas en el aire durante el transporte, la dispersión y la acumulación de los contaminantes primarios. Estos modelos, también denominados modelos de simulación de calidad del aire, son descripciones del transporte atmosférico, dispersión y reacciones químicas de los contaminantes. En este trabajo se emplea el modelo fotoquímico CIT en fase gaseosa lagrangiano, que trata la química atmosférica con el mecanismo SAPRC99 empleado en una escala urbana: la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Amplia descripción del modelo puede ser encontrada en /11-15/. Este modelo es una herramienta matemática que resuelve las ecuaciones de difusión y transporte de los contaminantes atmosféricos, permite el análisis de alternativas de mejoras en la calidad del aire en zonas urbanas mediante el modelado del efecto de medidas de mitigación (sustitución de combustibles, medidas restrictivas de uso, etcetera). Una vez formulado el modelo se incorpora la información sobre emisiones, meteorología, química, etcetera, el modelo puede utilizarse para estimar las concentraciones de los contaminantes secundarios como el ozono (en el dominio del modelo) para diferentes sitios y tiempos.

En la tabla 1 se describen las características de los datos de entrada al modelo.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE ENTRADA AL MODELO CIT

Datos	Descripción
Condiciones iniciales y de frontera	Concentraciones ambientales en el dominio del área de modelación de las especies a considerar al inicio de la simulación. Estas incluyen concentraciones ambientales de SO ₂ , NO _x , CO, H ₂ O, O ₃ y también el desglose de los hidrocarburos de acuerdo con el mecanismo químico implantado en el modelo (estas concentraciones representan la acumulación de contaminantes al inicio de la simulación). En cuanto a las condiciones de frontera, éstas definen los límites del área de simulación e incluyen las condiciones de emisión al tiempo inicial en la región que se va a estudiar.
Inventario de emisiones	El inventario de emisiones es una compilación de datos que contiene la distribución temporal y espacial de las emisiones provenientes de las fuentes antropogénicas y naturales.
Meteorología	Campos escalares de temperatura, humedad y campos vectoriales de viento (dirección y velocidad) en la región por modelar.
Altura de capa de mezcla	Define el volumen de aire en el cual las emisiones se diluyen, se dispersan (transportan), y donde también reaccionan las especies químicas que constituyen las emisiones.

Selección del caso base

El caso base representa un día, cuyas condiciones son conocidas, y que se reproducen con certidumbre mediante la modelación. Los datos de entrada para el modelo, así como los empleados para la validación de los resultados proceden de resultados experimentales. Se alimentó el modelo con información del inventario de emisiones de la

Zona Metropolitana de la Ciudad de México para 2006/16/ (tabla 2). La información incluida en esta tabla corresponde a los siguientes contaminantes: monóxido de carbono, CO, óxidos de nitrógeno, NO_x, Compuestos Orgánicos Totales COT, Compuestos Orgánicos Volátiles, COV, Material Particulado con diámetro aerodinámico de 10 y 2,5 micrómetros, PM10 y PM2.5.

TABLA 2. INVENTARIO DE EMISIONES ANUALES DE LA ZMVM, 2006 /16/ (ton/año)

Sector	PM10	PM2.5	SO2	CO	NOx	COT	COV	NH ₃
Fuentes puntuales	4,869	826	3,555	6,637	21,255	112,209	106,992	204
Fuentes de área	12,031	1,264	34	6,900	9,218	545,670	246,851	15,381
Fuentes móviles	5,248	3,835	3,324	1,976,799	159,541	208,843	193,294	4,351
Vegetación y suelos	803	164	N/A	N/A	1,248	27,481	27,481	N/A
Total	22,951	6,089	6,913	1,990,336	191,262	894,203	574,618	19,936

Escenarios para el año 2020

Para calcular las emisiones de la medida propuesta, se elaboraron distintos escenarios según se muestra en la tabla 3, donde, en la segunda columna se representa el tipo de combustible empleado en cada uno de los escenarios gasolina Magna (regular) o gasolina con el 15 % en volumen

de etanol como oxigenante. La tercera columna incluye la posibilidad de que adicionalmente al cambio de combustible pudieran incorporarse nuevas tecnologías de control de emisiones vehiculares, por ejemplo, mejores convertidores catalíticos, que permitan la reducción de emisiones en un 50 % con respecto a las emisiones en 2006.

TABLA 3. ESCENARIOS CONSIDERADOS

Escenario	Tipo de combustible ^{&}	Tecnología de control de emisiones vehiculares
A	Magna	No
B	Magna	Si
C	E85	No
D	E85	Si

[&]Magna, gasolina regular; E85, gasolina regular con el 15 % en volumen de etanol como oxigenante.

Proyección del inventario de emisiones a 2020

Los modelos de proyección de la flota vehicular son análisis estadísticos con base en datos históricos del crecimiento vehicular tratando de predecir el comportamiento de la flota dentro de un periodo de tiempo determinado. Para obtener mayor precisión, es menester incorporar información económica del sector y del país, información social y estudios de mercado, entre otros.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el efecto sobre el ozono que tendría la adición de etanol a la gasolina regular. Por lo anterior, se realizan proyecciones de la evolución de los contaminantes para el año 2020, tomando como base 2006. Para el caso del transporte, se realiza una predicción del

crecimiento automotriz a 2020. Los diferentes escenarios se construyeron proyectando la flota vehicular con las estimaciones reportadas por Gasca y Bauer/17/. Posteriormente se proyectó el inventario de las emisiones aplicando los factores de emisión obtenidos de vehículos que emplean gasolina con el quince por ciento en volumen de etanol. Los factores de emisión considerados para las emisiones vehiculares con etanol como oxigenante de la gasolina se tomaron del trabajo de Jacobson/18/.

● Resultados y discusión

Los resultados de los cálculos del inventario de emisiones para cada uno de los escenarios propuestos y el caso base se presentan en la tabla 4. Las emisiones así obtenidas se alimentaron al modelo CIT de calidad del aire, y

se calcularon las concentraciones de ozono para cada escenario, obteniendo un comportamiento a lo largo del día. Las concentraciones de ozono se reportan en la tabla 5. Como ya se ha mencionado, los escenarios C y D incluyen el efecto del uso de etanol como oxigenante de la gasolina.

En la tabla 4, los escenarios A, B, C y D representan condiciones vehiculares para el año 2020, mientras que el caso base representa las condiciones para el año 2006. La comparación del escenario A con el caso base muestra que si no se llevaran a cabo estrategias de control de

la contaminación en el sector transporte, la contaminación de la ciudad de México se agravaría, presentando incrementos cercanos al 50 % en estos tres contaminantes. Por otra parte, la comparación del escenario A con el B indica la importancia de los «vehículos limpios», es decir vehículos equipados con sistemas de control de emisiones. El mayor efecto en las emisiones por incluir etanol como oxigenante en la gasolina se observa al confrontar los escenarios C y D con A, mostrando una reducción de hasta treinta por ciento en los NOx.

TABLA 4. RESULTADO DEL CÁLCULO DE LAS EMISIONES VEHICULARES EN LOS CUATRO ESCENARIOS (ton/año)

	CO	NOx	COV
Caso Base	1,976,799	159,541	193,294
Escenario	A	2,948,694	237,979
	B	2,358,955	190,384
	C	3,096,128	166,586
	D	2,476,903	133,268
			281,407

En la tabla 5 se puede observar que todos los escenarios modelados, incluyendo el caso base, presentan valores arriba de lo estipulado por la norma mexicana de 0,11 ppm, entre las 13 y 19 h, es decir, cuando la radiación solar es más alta.

Asimismo, la tabla 5 muestra que la simulación del escenario A es el que reporta mayores concentraciones de Ozono. Aunque, de acuerdo con la tabla 4 es en el escenario C donde se presenta el mayor incremento en emisiones de compuestos orgánicos, COV, esta diferencia de comportamiento se debe a que en la Ciudad de México se observa un régimen de control de NOx, por lo que la producción de ozono es más sensible a los cambios de este último contaminante que al de los COV.

Los resultados obtenidos con estas simulaciones de reactividad fotoquímica muestran, que si en un futuro cercano no se toman estrictas medidas de mitigación de la contaminación, tanto de disminución de emisiones como de calidad de éstas, la

concentración de contaminantes atmosféricos puede agravarse considerablemente en perjuicio de la salud de los habitantes.

Con la finalidad de remarcar cuáles son las mejoras en la calidad del aire (valores negativos) se presenta la figura 1; en ella se muestra la diferencia de la concentración de ozono entre cada uno de los escenarios propuestos y el caso base. Así, en esta figura se puede observar, que en el horario de mayor intensidad de radiación solar, el escenario A, que representa no llevar a cabo la implementación de estrategias de control de la contaminación, en 2020 se formaría una mayor concentración de ozono que en 2006.

También en esta figura se evidencia la no linealidad de la formación del ozono con respecto a sus precursores, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos. Según la tabla 4, el escenario con menores emisiones de NOx es el D, pero esta figura muestra que el mayor abatimiento de las concentraciones con respecto al caso base corresponde al escenario C.

TABLA 5. CONCENTRACIÓN DE OZONO PARA EL CASO BASE Y LOS CUATRO ESCENARIOS A, B, C Y D (PPM)

Hora	Caso Base	Escenario			
		A	B	C	D
8	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004
9	0,015	0,013	0,014	0,015	0,016
10	0,033	0,031	0,033	0,034	0,035
11	0,053	0,049	0,053	0,055	0,056
12	0,090	0,087	0,090	0,092	0,093
13	0,133	0,134	0,135	0,134	0,133
14	0,154	0,160	0,158	0,154	0,152
15	0,163	0,171	0,168	0,161	0,159
16	0,169	0,178	0,174	0,166	0,164
17	0,161	0,169	0,165	0,159	0,157
18	0,158	0,166	0,162	0,156	0,154
19	0,143	0,149	0,146	0,141	0,139
20	0,081	0,112	0,089	0,091	0,098
21	0,041	0,054	0,044	0,053	0,041

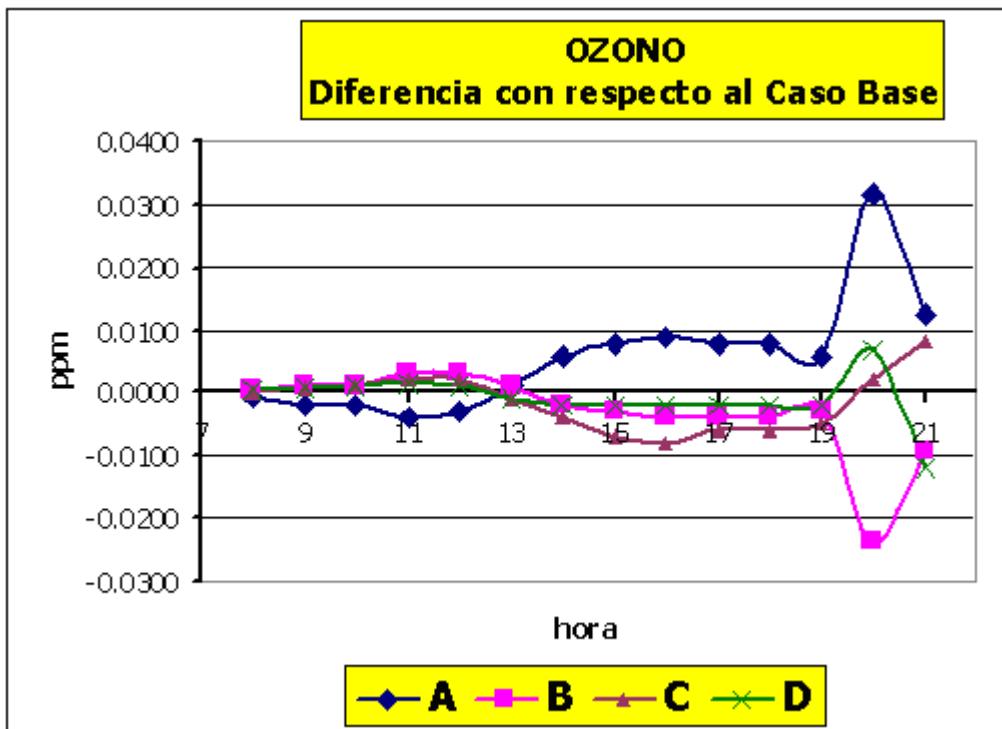
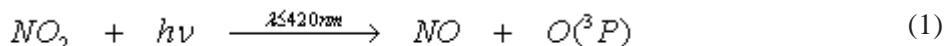


Fig. 1 Diferencia de la concentración de ozono con respecto al caso base, obtenida con la simulación de la calidad del aire para cada escenario.

Química atmosférica del dióxido de nitrógeno y del acetaldehído /19, 20/

El dióxido de nitrógeno se disocia en óxido de nitrógeno y oxígeno atómico bajo radiación de longitud de onda entre 280 y 420 nm (reacción 1). Por arriba

de 430 nm, sólo se forman moléculas excitadas de dióxido de nitrógeno (NO_2^*). Cabe señalar que el NO_2 es una de las especies fotoquímicamente más activas en las atmósferas contaminadas; y tiene, por lo tanto, gran importancia en la formación de esmog fotoquímico.

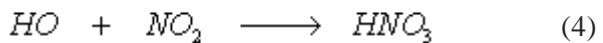


parte del ozono es eliminado por la reformación de NO_2



El ozono producido por el mecanismo anterior, normalmente es el observado en atmósferas no contaminadas. Sin embargo, en atmósferas con contaminación acentuada, el oxígeno atómico reacciona con los hidrocarburos volátiles para formar radicales libres, y esto conduce a una prolongada cadena de reacciones, en gran número de las cuales, se presenta la oxidación del NO a NO_2 . Las reacciones anteriores durante el día producen una concentración de ozono troposférico gobernado por la relación $[O_3] = [NO_2] J/[NO]k$, donde J es la constante de fotodisociación, la cual indica que esta reacción es proporcional a la intensidad de la luz que llega a la troposfera en la longitud de onda, que provoca la disociación del NO_2 (290-430 nm). Por esta razón, la concentración de ozono aumenta conforme se incrementa la intensidad de la luz durante el día, y la razón $[NO_2]/[NO]$ se eleva conforme el NO es convertido a NO_2 . Esta conversión es fomentada a través de reacciones que involucran radicales libres como OH, HO_2 , y RO_2 ; con la intervención de radicales provenientes de los hidrocarburos, el ozono ve alterado su ciclo normal y tiende a acumularse.

La terminación de la propagación de los radicales se presenta al formarse especies estables como se es el caso en la siguiente reacción



La razón de que esta reacción domine la terminación es que la propagación de radicales libres produce NO_2 , con lo cual este dióxido de nitrógeno producido en la propagación está disponible durante el periodo en el cual también están presentes cantidades apreciables de radicales libres. Una importante reacción de terminación es:



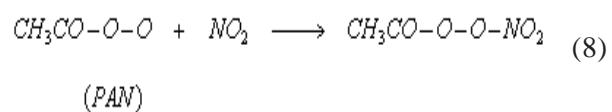
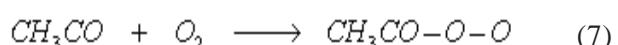
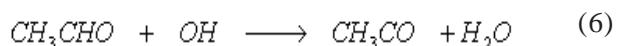
donde $ROONO_2$ es un nitrato peroxiorgánico.

Es importante resaltar, que las reacciones radical-radical se presentan en razones significativas

sólo después de que gran parte de los NOx han sido eliminados, de otro modo los radicales pueden reaccionar con NO en la propagación. Generalmente, el proceso de terminación es dominado por la formación de HNO_3 (reacción 4).

A manera de conclusión, a partir de la descripción antes mencionada, puede observarse que cada compuesto orgánico volátil puede influir, por varios caminos, sobre un sistema en reacción: por producción directa de radicales peróxi y alcoxi, por producción de nuevos radicales OH, por propagación de radicales y por eliminación de NOx. Este último proceso se refiere a la formación de compuestos nitrogenados como los alquilnitratos y el ácido nítrico, productos terminales que sirven como sumideros a los diversos óxidos de nitrógeno. Con esto se puede visualizar que en realidad, los mecanismos que rigen los procesos fotoquímicos generan productos fundamentales en la química que se presenta cuando la tasa de fotólisis decae; y comienza a hacerse presente, una química que es dominada por la presencia de compuestos donde los nitratos van teniendo cada vez más importancia, conforme se pasa a una química en fase oscura.

El incremento de emisiones de acetaldehído y NOx debido al uso de gasolinas con etanol como oxigenante es muy importante en la química atmosférica, sobretodo considerando la ausencia de catalizadores después de la combustión. Brevemente, la producción de PAN a partir de la reacción de acetaldehído con OH en presencia de NO_2 procede de la siguiente manera:



A la temperatura ambiente de la Ciudad de México, el peroxyacetilnitrato (PAN) es razonablemente estable. Su lenta descomposición térmica produce el radical peroxyacetil y CH₃CO-O-O y NO₂, con el cual se encuentra en equilibrio. El dióxido de nitrógeno se fotoliza para producir ozono, mientras que el radical peroxyacetil reacciona con el NO produciendo formaldehído y CO en las mismas cantidades de conversión de moléculas de NO a NO₂ lo cual producirá ozono. Si se forman cantidades importantes de PAN, serán secuestradas, temporalmente, cantidades importantes de NO₂, conduciendo a un decremento del proceso de formación de ozono (es decir, fotolisis de NO₂). Así se debería tener cuidado al evaluar el impacto del uso de combustibles alternos oxigenados para disminuir el ozono.

El PAN es un potente oxidante referido como una sustancia potencialmente peligrosa/20/. Aunque no es un contaminante regulado por las normas ambientales, fue identificado como lacrimógeno y fitotóxico. También es posible que el PAN pueda transportar NO_x a grandes distancias agregando problemas de ozono a nivel regional y problemas de oxidación en la formación de aerosoles secundarios.



Conclusiones

La modelación de la calidad del aire aplicada a las proyecciones las emisiones producidas por cuatro escenarios posibles en la Ciudad de México para el año 2020 indica que sustitución de gasolina Magna por la mezcla gasolina-etanol en la flota vehicular disminuye la concentración de ozono.

El uso de la mezcla gasolina-etanol reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno, sin embargo, dada la no linealidad de la relación ozono con sus precursores, esta reducción no se refleja proporcionalmente en las concentraciones de ozono.

El peroxyacetil nitrato, aunque no es un contaminante regulado por las normas ambientales fue identificado como lacrimógeno y fitotóxico, y ante la posibilidad de su incremento por el uso de etanol como oxigénate en la gasolina mexicana, habría que darle un seguimiento cuidadoso.



Bibliografía

1. Edgerton S.A., et al., Particulate Air Pollution in Mexico City: A Collaborative Research Project. Journal of the Air and Waste Management Association, 1999, 49, 1221-1229.
2. Molina L. T., Molina, M. J. Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment; Molina, L.T., Molina, M.J., Eds.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2002.
3. MILAGRO campaña de monitoreo realizada en marzo de 2006 <http://mce2.org/>
4. Farrell, A. E.; Plevin, R. J., Turner, B. T.; Jones, A. D., O' Hare, M.; Kammen, D. M. "Ethanol can Contribute to Energy and Environmental Goals". Science, 311, pág. 506-508, 2006.
5. Hammerschlag, R. "Ethanol's Energy Return on Investment, A Survey of the Literature 1990-present". Environ. Sci. Technol. 40, pág. 1744-1750 2006.
6. CETESB. Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004.
- 7 "Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México" (Proyectos ME-T1007 – ATN/DO-9375-ME y PN 04.2148.7-001.00), 2004.
8. Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático. Revisado 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. London. 1997. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>
9. NOM-086-ECOL-1994 "Contaminación Atmosférica– especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles"
10. Ortiz E., González J., Domínguez N., Gasca J. Simulación de la reactividad fotoquímica de las emisiones por el uso de combustibles fósiles. Leopoldo García-Colín Scherer Juan Rubén Varela Ham (Compiladores) Contaminación Atmosférica VI El Colegio Nacional. 2007 p163-187
11. Molina M., Molina, L., McRae G., Sosa G., et al. "Air Quality Modeling of the MCMA: Research at MIT". Integrated Program on Urban, Regional, and Global Air Pollution, MIT. http://www-eaps.mit.edu/megacities/workshops/workshop200201/html/_breakout_a/models/frame.htm
12. Russell, A.G. (1997), "Regional Air Quality Modeling," Ann. Reviews of Energy and the Environment, Annual Reviews, Inc., 537-588.
13. McNair, L. Harley, R. and Russell, A.G., "Spatial Inhomogeneity in Pollutant Concentrations and Their Implications for Air Quality Model Evaluation," Atmospheric Environment, 30, 4291-4301(1996).
14. McRae, G.J, A.G. Russell "Vertically Resolved Lagrangian Trajectory Model". Environmental Quality Laboratory 206-40. Pasadena, CA, USA(1981)
15. McRae, G. J., Goodin, W. R., and Seinfeld, J. H., "Development of a second generation mathematical model for urban air pollution, I, Model formulation". Atmos. Environ., 16, 679-696 (1982).

-
- 16. Secretaría del Medio Ambiente Gobierno del Distrito Federal, “Inventario de Emisiones a la Atmósfera: Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2006”. México (2008).
 - 17. Gasca J. y Bauer M. “Escenarios de emisiones y medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en sectores clave. Sector Transporte”. INE 2005.
 - 18 . Jacobson M. “Effects of Ethanol (E85) versus Gasoline Vehicles on Cancer and Mortality in the United States”. Environ. Sci. Technol. 41, 4150-4157 (2007).
 - 19. Finlayson, B.; Pitts, J. “Chemistry of the upper and lower atmosphere”. Academic Press, San Diego Cal. USA pp 884-885(2000).
 - 20. Gaffney J. y Marley N Comment on “Environmental Implications on the Oxygenation of Gasoline with Ethanol in the Metropolitan Area of Mexico City” Environmental Science and Technology 35, 4957-4958 (2001)