

FOTOQUÍMICA ATMOSFÉRICA, OZONO Y CIGARRILLOS ¿EXISTE UNA CORRELACIÓN?

Carmen Durán de Bazúa*

RESUMEN

En este trabajo se presenta el fenómeno que tiene lugar en la troposfera cuando un contaminante es emitido y, debido a la acción de la radiación solar, es convertido en otras especies contaminantes tanto o más reactivas que el primer contaminante. El ejemplo específico es el de la formación de óxidos de nitrógeno por la combustión en presencia de aire y su papel en la formación del ozono y otros compuestos fotoquímicos que contaminan la troposfera. Hay tres factores que afectan la formación del ozono en la troposfera: las condiciones meteorológicas, las emisiones de óxidos de nitrógeno y otras especies gaseosas, y las reacciones químicas propiamente dichas. El cigarrillo es un producto combustible cuyo único propósito es crear volutas de humo que sean introducidas al sistema respiratorio, tanto del fumador activo (llamada corriente principal de humo) como de los pasivos (que inhalan la llamada corriente colateral), que se encuentren en su radio de acción. Como durante su combustión se generan óxidos de nitrógeno uno de los factores que influyen en la formación del ozono así como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como el pireno, el antraceno y el 3,4 benzopireno, y alquitranes, nicotina, CO y CO₂, se presenta un resumen de sus posibles efectos en la formación de compuestos mutágenos y de su incidencia en la formación del ozono. Se dan algunas pautas a considerar para lograr la minimización de la formación del ozono en la troposfera de la ciudad de México.

INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre conscientemente se estableció de manera socializada en nuestro planeta, inició su contacto con fenómenos y sustancias que alteraban sus condiciones de vida y a los que ha dado en llamarse contaminación ambiental. La contaminación atmosférica, tema de este trabajo, en esos primeros tiempos era de origen

natural (antes de que los humanos usaran el fuego) y provocada por incendios, vulcanismo, etcétera.

La atmósfera se divide en zonas o regiones, basando las diferencias en perfiles de altitud-temperatura (troposfera, tropausa, estratosfera, estratopausa, mesosfera, mesopausa y termosfera) (figura 1).

A continuación se presentan dos párrafos tomados del libro clásico de química atmosférica de los profesores Pitts, que darán la pauta para este artículo:

“El decremento de temperatura al incrementarse la altitud en la troposfera se debe al fuerte efecto de calentamiento de la su-

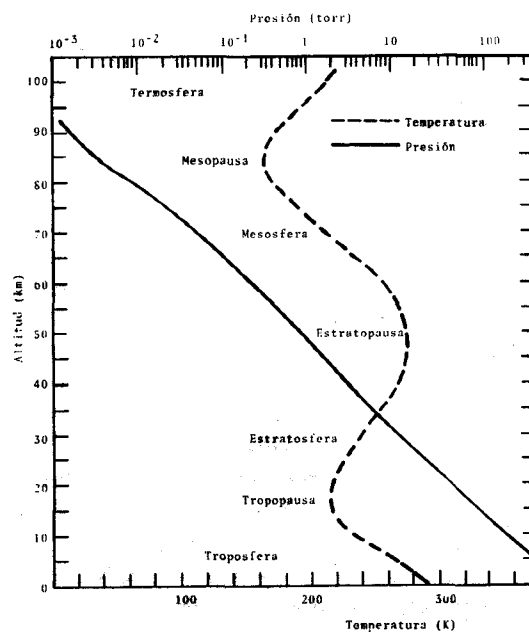


Figura 1. Regiones de la atmósfera basadas en la variación altitud-temperatura y efecto de la altitud sobre la presión total (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

Programa de
Ingeniería
Química
Ambiental y
Química
Ambiental de la
Facultad de
Química y el
Instituto de
Geografía,
Universidad
Nacional
Autónoma de
México, Ciudad
Universitaria,
04510, México,

perficie de la Tierra debido a la absorción de la radiación solar (visible y cercana al ultravioleta), principalmente. Existe, además, un fuerte mezclado vertical que hace que las partículas y otros compuestos gaseosos (generalmente contaminantes) se muevan de la superficie de la Tierra hacia la parte superior de la troposfera en unas cuantas horas o días, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Casi toda el agua en fase vapor presente en la atmósfera se encuentra en esa región y, como resultado, la remoción de contaminantes por precipitación pluvial o fenómenos similares puede ser un proceso importante" (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

"En la estratosfera, por otro lado, hay poco mezclado vertical y, consecuentemente, cuando hay una inyección masiva de contaminantes (por ejemplo partículas provenientes de erupciones volcánicas), éstas permanecen por tiempos muy largos (hasta un año o más) ya que no hay precipitación como en el caso de la troposfera. También allí ocurren una serie de reacciones fotoquímicas que involucran al oxígeno molecular y al ozono (Molina y Rowland, 1974). Este último absorbe fuertemente la radiación solar (entre 210 y 290 nm), mientras que el oxígeno molecular absorbe la radiación de menos de 200 nm. Por esa razón, hay un aumento en la temperatura con respecto a la altitud en la estratosfera (figura 1). Las reacciones químicas que mantienen la relación de concentración de ozono y oxígeno molecular en la estratosfera en un régimen estable son esenciales para la vida en la Tierra ya que como resultado de esa absorción de radiación solar por parte de ellos solamente una parte de luz solar, llamada radiación actínica (con longitudes de onda mayores de 290 nm y que justamente recibe ese nombre por su reactividad fotoquímica), llega a la troposfera. Si esta absorción fuera interrumpida por la presencia de clorofluorocarbonos y óxidos de nitrógeno como se ha propuesto, se tendría una radiación mayor sobre la superficie de la Tierra con longitudes de onda menores a 290 nm, que aumentaría los riesgos de cáncer en la piel para los seres humanos, así como otros efectos sobre plantas, animales y el clima, en general (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986)".

En este trabajo se presentará solamente el fenómeno que tiene lugar en la troposfera cuando un contaminante es emitido y, debido a la acción de la radiación solar, es convertido en

otras especies contaminantes tanto o más reactivas que el primer contaminante. El ejemplo específico es el de la formación de óxidos de nitrógeno por la combustión en presencia de aire y su papel en la formación del ozono que contamina la troposfera.

Hay tres factores que afectan la formación del ozono en la troposfera: las condiciones meteorológicas, las emisiones de óxidos de nitrógeno y otras especies gaseosas, y las reacciones químicas propiamente dichas.

Como puede observarse del título de este artículo, el cigarrillo ha sido involucrado también en esta temática. La razón es que es un producto combustible cuyo único propósito es crear volutas de humo que sean introducidas al sistema respiratorio, tanto del fumador activo (llamada corriente principal de humo) como de los pasivos (que inhalan la llamada corriente colateral), que se encuentren en su radio de acción. Naturalmente, durante su combustión genera óxidos de nitrógeno —uno de los factores que influyen en la formación del ozono—, así como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como el pireno, el antraceno y el 3,4 benzopireno, y alquitranes, nicotina, CO y CO₂.

A continuación se presentan estos tres factores y, posteriormente, se dan algunas pautas a considerar para inhibir o radicalmente minimizar la formación del ozono en la troposfera.

EL SOL Y LA METEOROLOGÍA

El Sol se encuentra a 150 millones de kilómetros de la superficie de la Tierra. Fuera de la atmósfera terráquea, la intensidad de radiación que el Sol emite está caracterizada por la llamada constante solar, que está definida por la cantidad total de luz recibida por unidad de área normal a la dirección de la propagación de la luz, y su valor medio es de 1368 Wm^{-2} , de acuerdo a la Organización Mundial Meteorológica (en Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

El efecto de la dispersión de la luz y su absorción por los constituyentes atmosféricos sobre la intensidad y distribución de longitudes de onda de la luz solar depende de la naturaleza y concentración de los gases y partículas que la forman y, naturalmente, de las distancias (siguiendo la ley de Beer y Lambert). Esto significa que es una función del ángulo del Sol (tiempo del día, latitud y estación del año). Además, la reflexión de la luz sobre la superficie de la Tierra altera también la intensidad de la luz solar en cualquier punto de la atmósfera, así como lo hace la presencia de las nubes. El ángulo θ se define como el ángulo del cenit solar (figura 2), por lo que su valor cero corresponde-

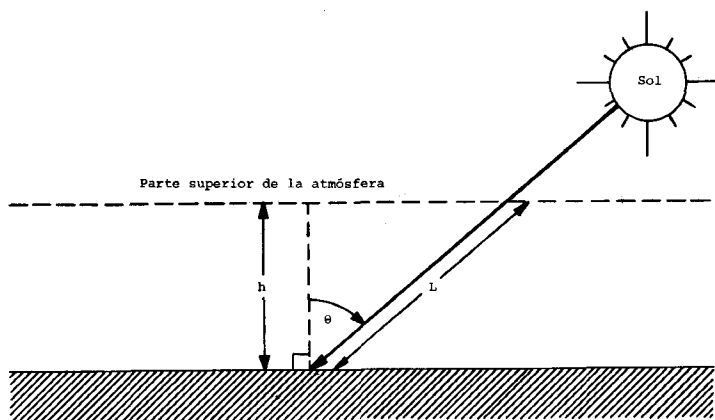


Figura 2. Ángulo del cenit solar θ en cualquier punto de la Tierra dado por la altitud h y la distancia L (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

ría a un Sol de mediodía en pleno verano y uno de aproximadamente 90° correspondería al amanecer o a la puesta del Sol. Mientras más grande es el ángulo del cenit solar mayor es el

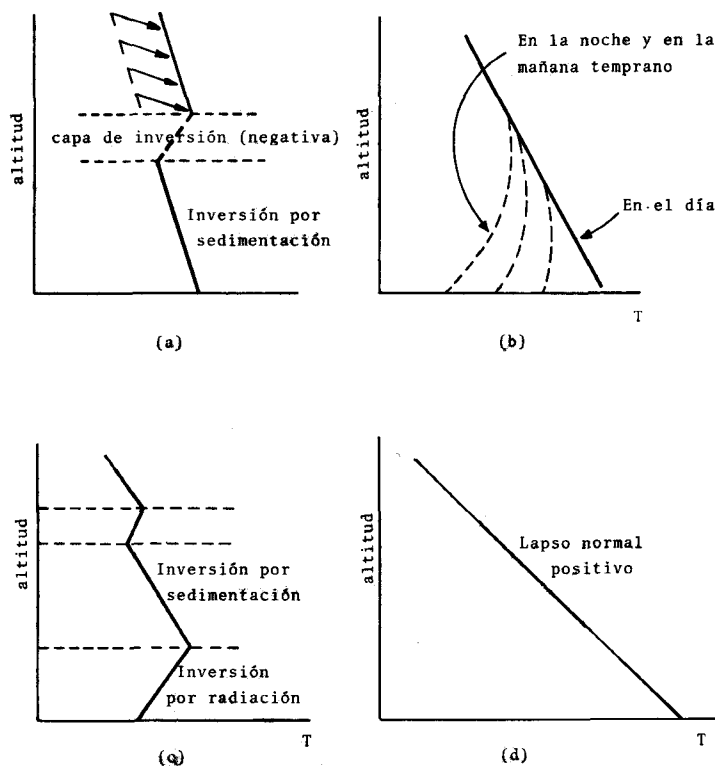


Figura 3. Variación de la temperatura con la altitud dentro de la troposfera: (a) Cambio de la tasa de lapso positivo a negativo y nuevamente a positivo (inversión térmica de verano); (b) Cambio de la tasa de lapso negativo a positivo dependiendo de la hora del día (inversión por radiación o invernal); (c) Combinación de inversiones por asentamiento y radiación, y (d) Tasa de lapso positivo (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986; Wark y Warner, 1990).

paso de la radiación a través de la atmósfera y, consecuentemente, la intensidad solar es menor, debido a los procesos de dispersión y absorción (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

En la década de los cuarenta se observaron efectos deletéreos en plantas en los alrededores de Los Angeles, California (EUA). Los fitopatólogos Middleton y colaboradores (1950) determinaron que los daños eran causados por gases que no eran del tipo del dióxido de azufre ni de compuesto fluorados y que su efecto se agudizaba cuando la contaminación atmosférica estaba acompañada de partículas de neblina. Al año siguiente, Haagen-Smit y colaboradores (1951) reprodujeron daños similares en plantas sujetas a atmósferas sintéticas que contenían mezclas de olefinas y ozono, o a mezclas iluminadas de NO_2 y olefinas.

Es claro que el impacto de las concentraciones de contaminantes en el aire no está determinado solamente por sus tasas de emisión y por sus transformaciones químicas, sino en gran medida por la meteorología (que estudia los fenómenos atmosféricos como lluvia, nieve, vientos, arcoiris, rayos, fuegos de Santelmo, etcétera). Por ejemplo, en los primeros diez kilómetros de la atmósfera de la Tierra, la temperatura decrece aproximadamente 7°C por cada kilómetro —fenómeno conocido como tasa de lapso positivo. Esto provoca fenómenos de mezclado ya que el aire más caliente cercano a la superficie de la Tierra tiende a subir y es reemplazado por aire más frío de la parte superior de la troposfera. Existen, sin embargo, situaciones en las que la temperatura del aire a cierta altura puede empezar a aumentar al incrementarse la altitud antes de volver a la "situación normal". A estas regiones se les conoce como "capas de inversión" y las tasas de lapso positivo cambian a negativo y nuevamente a positivo (figura 3).

Este fenómeno meteorológico provoca que esa masa de aire caliente actúe como una tapa que impide que el aire frío abajo de ella se mueva (ya que como es más denso no tiende a subir). Esto causa un atrapamiento de los contaminantes que se encuentran abajo de la capa de inversión e impide que se difundan por toda la troposfera, haciendo que su concentración en un volumen dado cercano al nivel del suelo sea mayor.

Hay dos tipos de inversiones térmicas, las invernales (tipo Londres) y las veraniegas (tipo Los Angeles). En las primeras, la superficie de la Tierra y la capa de aire inmediatamente arriba de ella se enfrían rápidamente por la emisión de radiación infrarroja después de la puesta del Sol. Esto ocurre sobre todo en noches sin viento

en las que el enfriamiento puede ser lo suficientemente veloz para que la capa de aire adyacente a la superficie del suelo se enfríe más rápido que el aire justo arriba de esa capa de aire, dando como resultado la capa de inversión. El segundo caso está asociado a la contaminación fotoquímica del aire provocada por el movimiento descendente/ascendente de masas de aire conforme pasan por superficies calientes que dan como resultado la formación de capas de inversión y, curiosamente, a diferencia de la inversión térmica invernal, los contaminantes no permanecen abajo de la capa de inversión solamente sino que están también dentro de ella, a veces en concentraciones incluso mayores que las existentes abajo de la capa de inversión térmica (Edinger, 1973; Edinger y colaboradores, 1972).

El viento es un factor meteorológico importante ya que su velocidad depende de los efectos de fricción causados por edificios, árboles, colinas, etcétera. Dado que el viento transporta a los contaminantes y los difunde a través de la troposfera, su velocidad es una variable de gran relevancia. Por ejemplo, Eliassen y colaboradores (1982) informan que el ozono observado en Escandinavia debe venir de otros países europeos, incluyendo a la Unión Soviética y Polonia.

Una combinación de estos factores meteorológicos puede crear problemas como el de la llamada "isla calórica" o "isla térmica urbana" (figura 4). Por un lado, el aire no fluye a gran velocidad por la presencia de los edificios. Por otro, debido a los ángulos rectos formados por las calles y las paredes de los edificios y a su limitada área de flujo (calles relativamente estrechas rodeadas de edificios), absorben mayor radiación solar durante el día y la conservan por periodos más largos durante la noche si se comparara con zonas al aire libre (rurales). Esto genera capas de inversión muy localizadas que impiden la dispersión de los contaminantes, formándose un sistema circulatorio cerrado que puede romperse solamente si hay fuertes vientos o lluvias.

Estos párrafos dan una idea clara del efecto que tienen los fenómenos meteorológicos que ocurren en la ciudad de México a lo largo del día ya que, para todos es conocido, que en esta ciudad "se tienen las estaciones del año a lo largo del día" (primavera en las primeras horas de la mañana, verano al mediodía, otoño al atardecer e invierno en la madrugada) acompañadas en ocasiones por lluvias que no corresponden a la temporada tradicional de lluvias en el verano.

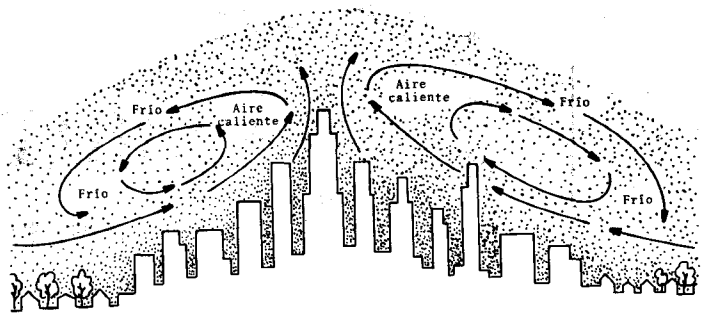
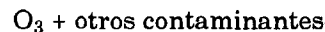
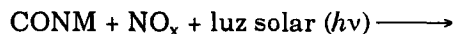


Figura 4. Efecto de las islas calóricas o térmicas en zonas urbanas (Wark y Warner, 1990).

EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y OTRAS ESPECIES GASEOSAS

Como se mencionaba al inicio de este artículo, el mal llamado *smog* o neblumo fotoquímico (o de Los Angeles o veraniego) ya que sus componentes clave no son el humo o la neblina, tiene connotaciones históricas interesantes, como mencionan los Pitts (1986). Haagen-Smit y colaboradores (1951 a 1959) establecieron que el contaminante más importante de este tipo de contaminación —más adecuadamente llamada fotoquímica—, aunque no era el único, era el ozono, y que se formaba durante la reacción de los óxidos de nitrógeno presentes en el aire con otros compuestos orgánicos en presencia de luz solar. La reacción, como fue presentada al principio de la década de los cincuenta fue:



donde CONM se refería a los compuestos orgánicos presentes, con excepción del metano (que no se "fotoliza" o reacciona significativamente con otras especies atmosféricas como el propio ozono o los óxidos de nitrógeno), NO_x representaba a la mezcla de óxido nítrico (NO) con dióxido de nitrógeno (NO_2), siendo el primero, sin embargo, la fracción más importante. Actualmente NO_x es el símbolo de todos los contaminantes nitrogenados gaseosos contaminantes que incluyen no solamente al NO y al NO_2 , sino al HNO_3 , NPA (nitrato de peroxiacetilo), HONO (ácido nitroso), etcétera, que están en concentraciones bastante menores pero que son los responsables de la irritación de los ojos y otros malestares.

Este fenómeno evidentemente no es privativo de la ciudad de Los Angeles y, ahora, la ciudad de México tiene los mismos problemas que ya se

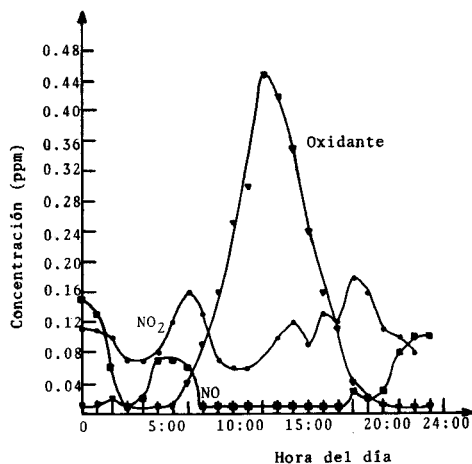


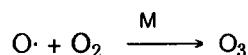
Figura 5. Variación diurna del NO, NO₂ y oxidantes totales en Pasadena, California, EUA, el 25 de julio de 1973 (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

observaban allá desde los cincuentas y todavía hasta los setentas (figura 5). En esta figura, la curva de oxidantes incluye, además del ozono que se usa como un compuesto específico para medir la calidad del aire, a los contaminantes que no son medidos específicamente para determinar la calidad del aire pero que son igualmente importantes como NPA, HNO₃, HCHO y HCOOH.

En ese momento, según Finlayson-Pitts y Pitts (1986), varias preguntas fueron formuladas desde el punto de vista químico:

1. ¿Cómo se oxida el NO a NO₂?
2. ¿Qué papel juegan los compuestos orgánicos?
3. ¿Cuáles son las reacciones responsables de la disminución de los compuestos orgánicos?

Las respuestas a estas preguntas han llevado a numerosos investigadores a postular hipótesis basadas en la formación de átomos reactivos de oxígeno (Blacet, 1952):

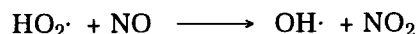
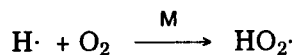
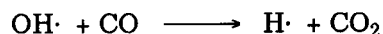


(como las que ocurren en la estratosfera), en la oxidación térmica del NO por el oxígeno del aire:

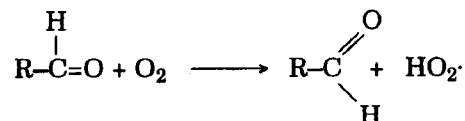


pero esta reacción, que es de segundo orden para el NO, sólo ocurre cuando se tienen altas concentraciones de NO (del orden de miles de ppm), que se forman cuando se tienen en la vecindad plantas generadoras de corriente eléctrica no controladas. Claro que las plumas generadas por estas termoeléctricas generalmente son dispersadas por el viento. Por ello, es que esta hipótesis no fue aceptada.

Respecto de las otras dos preguntas, Leighton (1961) propuso que la formación de radicales libres a partir de los compuestos orgánicos gaseosos presentes era la responsable de la desaparición de estos compuestos orgánicos y que, además, también estaba involucrada en la oxidación del NO. A fines de los sesenta, sin embargo, se determinó que había reacciones relativamente rápidas entre radicales hidroxilo, hidrocarburos y CO, y se propusieron las siguientes reacciones en cadena (Heicklen y col., 1969; Weinstock, 1969; Stedman y col., 1970; Levy, 1971):



en las que, para atmósferas contaminadas con compuestos orgánicos gaseosos, éstos juegan un papel similar al del CO (figura 6):



En este caso, el ácido nitroso (HONO) sería la mayor fuente de HO· en las primeras horas de la mañana, HCHO a media mañana y ozono más tarde (al mediodía y después) una vez que sus concentraciones se han incrementado significativamente.

Consecuentemente, el radical hidroxilo es el paso controlante de las reacciones que se llevan a cabo en presencia de la radiación solar, tanto en atmósferas limpias como en las contamina-

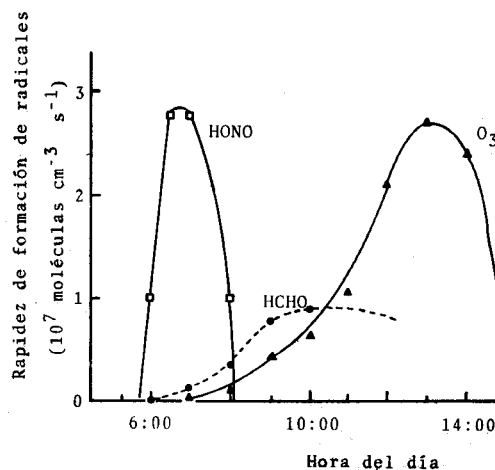


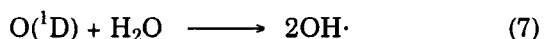
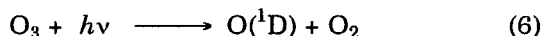
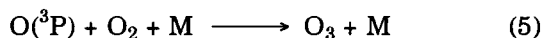
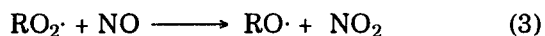
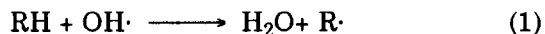
Figura 6. Fuentes de radicales HO· en atmósferas urbanas contaminadas en función de la hora del día (Winer, 1985).

das (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

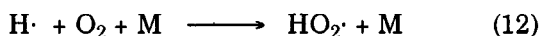
En suma, el NO se convierte en NO₂ durante las horas de mayor insolación en una secuencia de reacciones iniciadas por el ataque del radical HO· sobre los compuestos orgánicos gaseosos involucrando a los radicales libres HO₂· y RO₂·.

Estos radicales peroxi—son las especies que realmente convierten el NO a NO₂ a las concentraciones encontradas en el aire ambiente en el que la oxidación térmica del NO por O₂ es despreciable (figura 6).

La suma de las reacciones es la siguiente (Finlayson-Pitts, 1991):

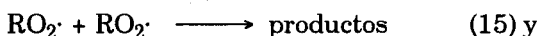
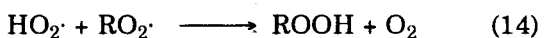
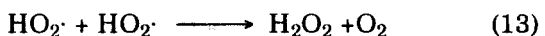


y otras ecuaciones más que involucran la regeneración del OH· a través del radical RO· mediante CH₃O:



en las que M es cualquier cuerpo inerte, O({}^3P) y O({}^1D) son los estados base y electrónicamente excitados del oxígeno atómico y RH representa cualquier compuesto orgánico que pueda ceder un átomo de hidrógeno y en las que las últimas tres reacciones forman ozono siguiendo la fotólisis del NO₂ (reacciones 4 y 5).

La importancia de los procesos de formación o destrucción del ozono o de que no ocurra ninguno de los dos depende, pues, de las concentraciones de NO, HO₂·, RO₂· y ozono, ya que éstos pueden reaccionar entre ellos impidiendo la formación del ozono:



las que no solamente impiden la formación de

ozono sino que lo destruyen.

Usando las constantes de velocidad de reacción para las reacciones 9, 13 y 16 se puede estimar la concentración de NO a la cual resultan competitivas las reacciones 13 y 16 con la 9. De acuerdo con la doctora Finlayson-Pitts (1991), a concentraciones de NO de aproximadamente 27 ppt (10⁻¹²), de HO₂· de 1×10⁹ radicales/cm³ y humedades relativas de 50% (ya que la reacción 13 depende del agua), la remoción de HO₂· en 9 es igual a la de 13. La remoción de HO₂· por medio de 16 con concentraciones de ozono de 40 ppb (10⁻⁹) es igual a la de la reacción con una concentración de NO de 10 ppt. Por tanto, para concentraciones de NO menores de 10 ppt, la producción de peróxidos y la destrucción del ozono se vuelve competitiva con la conversión del NO a NO₂ y, consecuentemente, a la generación de ozono.

CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PROVOCADA POR EL HUMO DE LOS CIGARRILLOS

Como se mencionaba anteriormente, los constituyentes detectados desde hace ya casi 20 años en el humo de los cigarrillos, tanto en la corriente principal —la inhalada por el fumador—, como en la corriente colateral —la inhalada por los humanos que se encuentra en la vecindad del fumador—, son alquitranes, nicotina, CO, CO₂, NO, NO₂ y algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos como pireno, antraceno y 3,4 benzo-pireno (Scassellati-Sforzolini y Savino, 1974).

Los autores, que hicieron experimentos en una máquina que simulaba el proceso de fumar colectando los humos provenientes de ambos extremos del cigarrillo (principal y colateral), usaron cigarrillos con y sin filtro de tres marcas comerciales diferentes (A,B,C) y un control con doble filtro (D). Los resultados obtenidos, con excepción de la muestra C se presentan en las tablas 1 y 2.

Las cantidades de nicotina y alquitranes encontrados en la corriente colateral son mayores que las de la corriente principal con la única excepción de nicotina en cigarrillos sin filtro. En los demás casos, la relación entre la corriente principal y la colateral es de casi 2 para alquitranes en cigarrillos sin filtro y de 2 a 6 para los que tienen filtro; para nicotina es de aproximadamente 2 para los sin filtro y de 2 a 4.5 para los con filtro.

Con respecto a los otros compuestos, éstos se encuentran distribuidos heterogéneamente en las dos porciones de humo. El CO, sin embargo, se encuentra en mayor proporción en la corriente colateral. Los óxidos de nitrógeno también estuvieron del orden de casi 5 veces en

Tabla 1. Distribución de contaminantes encontrados en las corrientes principal y colateral de humo de cigarrillos con y sin filtro, mg/cigarrillo

TIPO DE CIGARRILLO	A				B				C	
	Con filtro		Sin filtro		Con filtro		Sin filtro		Doble filtro	
	Princ.	Col.	Princ.	Col.	Princ.	Col.	Princ.	Col.	Princ.	Col.
Alquitrán	8.37	33.68	17.73	38.49	11.96	35.33	18.82	38.84	4.33	27.10
Nicotina	0.46	1.76	0.79	2.07	0.46	1.76	0.95	0.87	0.15	0.65
CO	22.22	2.97	23.11	4.94	21.8	4.94	23.41	3.29	12.0	2.64
CO ₂	72.53	98.4	55.42	56.99	72.5	56.99	56.01	93.25	49.5	23.25
NO + NO ₂ (detectada como NO ₂)	0.012	0.08	0.013	0.06	0.012	0.08	0.015	0.06	0.008	0.08

Tabla 2. Distribución de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en las corrientes principal y colateral de humo de cigarrillos, µg/100 cigarrillos

	CORRIENTE PRINCIPAL	CORRIENTE COLATERAL
ANTRACENO	4.75	5.40
PIRENO	4.56	1.77
3,4 BENZOPIRENO	2.54	6.51

mayor proporción en la corriente colateral que en la principal (promedio de 0.07 mg/cigarrillo).

Se forman hidrocarburos aromáticos policíclicos en el periodo de no inhalación y el contenido de 3,4 benzopireno encontrado corresponde a más de 2.5 veces el que se encuentra presente en el humo de la corriente principal.

Como un índice útil para evaluar la contaminación provocada por los cigarrillos los autores emplearon el CO, ya que siempre está presente en cantidades relativamente altas en el aire de ambientes con humo de cigarrillos y puede determinarse rápidamente por el método Draeger. Correlacionando este contaminante con el benzopireno y considerando que un individuo inhala 500 L/h de aire (Bell y col., 1958), la cantidad de benzopireno que inhalaría en una hora un "fumador pasivo" sería de:

$$\begin{aligned} \mu\text{g } 3,4 \text{ benzopireno inhalado/h} &= \\ &= \text{ppmCO} \frac{T_o}{t \times V_o} \times \frac{X}{Y} \times 500 \text{ L/h} \end{aligned}$$

donde T_o es la temperatura base de 273 K, V_o es el volumen base de 22.4 L, X son los microgramos de 3,4 benzopireno en la corriente colateral del humo de un cigarrillo (0.0651), Y son los miligramos de CO en la corriente colateral del humo de un cigarrillo (valor promedio de 3.68)

y t es la temperatura ambiente (293 K).

Esto les permitió calcular los microgramos de 3,4 benzopireno inhalados por hora como 0.0103 veces las ppm de CO. Este dato resulta sumamente útil ya que históricamente se sabe que estos compuestos aromáticos son fuertemente dañinos para la salud. Phillips documentó el estudio de su efecto en el ensayo "Cincuenta años de benzopireno" en el que describe el trabajo pionero de Kennaway y sus colaboradores en el Instituto sobre Investigación del Cáncer en Londres, que culminó con la identificación en 1933 del compuesto responsable de los carcinomas provocados por los alquitranes del carbón, el benzopireno (Cook y col., 1933).

Algo sumamente interesante es la reactividad de este promutágeno, el 3,4 benzopireno y otros HAPs, con el NO₂ y el HNO₃ y con el mismo ozono para formar mutágenos activos como los nitro-HAPs y los OXI-HAPs (Pitts, 1991; Pitts y col., 1978; 1980; 1984). Lo que esto significa, es que los promutágenos requieren de activación metabólica, simbolizada como +S9 por Ames (1973,1975), en su famoso bioensayo usando bacterias, para formar intermediarios activos que ataquen al ADN de las bacterias, mientras que la actividad de los mutágenos directos se expresa sin necesidad de adicionar enzimas mamarías, simbolizadas como -S9. En suma, existen reacciones entre los propios contaminantes del humo de los cigarrillos que forman sustancias cancerígenas activas, además de formarlas con los componentes gaseosos contaminantes del aire ambiente. Estas sustancias son más nocivas para los llamados fumadores pasivos que para los fumadores activos (tabla 2). Está por publicarse un artículo del Profesor Pitts (1991) sobre este tema, por lo que no se abordará.

PAUTAS A SEGUIR PARA REDUCIR LA FORMACIÓN DE OZONO

De los rubros mencionados, es claro que la problemática no es simple ya que existen numerosas fuentes de contaminantes primarios que, con la luz solar y reacciones secundarias, generan compuestos bastante más tóxicos que los contaminantes primarios.

Esto significa que la combustión, independientemente de su origen, debe controlarse mediante medidas coordinadas. Si todos los gases generados en las diferentes combustiones (fábricas, termoeléctricas, vehículos automotores, etcétera), fueran tratados para reconvertir los óxidos de nitrógeno a nitrógeno molecular y para minimizar la presencia de compuestos orgánicos volátiles, la formación de compuestos

como el ozono y los HAPs se reduciría considerablemente. Esto conlleva la idea de modificar la política actual de la prohibición de llevar a cabo las siguientes actividades de combustión:

1. Fuentes móviles

Sustituir programas coercitivos como los de "Hoy no circula", por los de implantación de sistemas de conversión eficientes en todos los sistemas de combustión (diesel, gasolina, gas, alcohol, etcétera), invirtiendo recursos para optimizar la producción de combustibles amigables con los convertidores catalíticos, para producir masivamente convertidores catalíticos de bajo costo para todos los vehículos automotores, para producir motores que funcionen adecuadamente a la altitud de la ciudad de México, para fortalecer el estudio del uso de sistemas eléctricos basados en la energía solar, para construir masivamente líneas de "metro" que intercomunique a toda el área metropolitana ya que transportan de manera más eficiente a la población capitalina y minimizan el uso de los vehículos automotores.

Un punto importante pero que será tema de otro escrito es el estudio de los compuestos que se forman durante la combustión incompleta de las sustancias químicas adicionadas a las gasolinas como sustitutos del tetraetilo de plomo. Como se mencionaba en la segunda de las preguntas postuladas anteriormente, el ácido nítrico (HONO) puede ser la mayor fuente de HO en las primeras horas de la mañana, HCHO a media mañana y ozono más tarde (al mediodía y después) una vez que sus concentraciones se han incrementado significativamente. Dado que el radical hidroxilo es el paso controlante de las reacciones que se llevan a cabo en presencia de la radiación solar —tanto en atmósferas limpias como en las contaminadas— y los compuestos orgánicos actúan como el CO, estos compuestos orgánicos agregados a las gasolinas pueden jugar un papel importante en estas reacciones químicas.

2. FUENTES FIJAS

De la misma forma, en vez de mantener programas prohibitivos como la reducción de las actividades industriales en un 30%, se debe invertir en la instalación de sistemas de control de emanaciones industriales y de optimización de consumos energéticos y minimización de pérdidas de energía, en especial las de las empresas termoeléctricas ya que, en la producción de energía eléctrica para el transporte colectivo (metro, tren ligero, etcétera) es técnicamente más sencillo controlar *in situ* esas emisiones, a través de

la instalación de convertidores catalíticos, que implantar convertidores catalíticos para millones de vehículos. Se debe también invertir en el estudio de "sistemas catalíticos" específicos para cada giro industrial que permitan minimizar la generación de contaminantes primarios.

3. INVENTARIOS DE CONTAMINANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Este rubro reviste especial importancia ya que nada se puede decir si no se conocen con precisión, exactitud y confiabilidad las cantidades de contaminantes que son arrojados a la atmósfera, tanto por las fuentes móviles como por las fijas. Esto significa que las redes monitorias deben ser operadas y sus resultados evaluados por personal calificado y que deben tener un mantenimiento técnico adecuado que garantice su funcionamiento y la confiabilidad de sus resultados. Asimismo, dentro del inventario deben tenerse datos meteorológicos con las mismas características (confiabilidad, exactitud y precisión) que permitan, a futuro, modelar la dispersión de los contaminantes, su reactividad, etcétera. Las redes monitorias deben estar, de preferencia, acopladas a estaciones meteorológicas ubicadas en cada uno de los puntos neurálgicos de la ciudad de México y del área metropolitana de esta gran cuenca con objeto de tener la mayor y mejor cantidad posible de información, que permita proponer estrategias al corto, mediano y largo plazos.

Estas acciones, evidentemente, no pueden tener resultados inmediatos, pero si se realizan de manera sistemática y programada, invitando a empresas a construir esos motores, esos convertidores para motores "viejos" y equipos industriales, esos equipos para producir combustibles amigables y manteniendo la economía de libre empresa y competencia, será posible revertir la actual problemática.

Es claro que los habitantes de esta cuenca tenemos interés en coadyuvar a la resolución de estos problemas, pero es también claro que, hasta el momento los cuadros dirigentes (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, etcétera), han tomado solamente medidas coercitivas pero no propositivas para avanzar hacia una minimización real de la generación de contaminantes primarios.

Recientemente, se mencionaba en una conferencia (Cuadri, 1992), que la cuenca de México tiene una capacidad finita y que, conforme a ella, deben pensarse cuidadosamente las estrategias para evitar su "sobresaturación" de con-

taminantes. Este enfoque debe ser cuidadosamente estudiado por gobernantes y gobernados ya que han sido justamente las políticas globales establecidas desde la época colonial las que han dado una jerarquía especial a esta zona, haciendo que el asiento de los poderes federales y, consecuentemente del poder político, se encuentren ubicados en ella. Esto ha conllevado desequilibrios socioeconómicos que han propiciado un desarrollo desmesurado en esta zona con respecto al resto del país, el cual no podrá ser minimizado o aún reducido a menos que se cambien dichas políticas.

Volviendo al caso de los cigarrillos, se tienen reglamentaciones para minimizar su combustión en sitios públicos que, aunque tibias, han servido únicamente para polarizar las opiniones lanzando a la población fumadora contra la no fumadora y se sigue "años luz" atrás de lo deseable para minimizar los riesgos de salud pública inherentes. Nuevamente, más que realizar campañas prohibitivas con los adultos ya capturados por esta droga, deben llevarse a cabo programas educativos entre los niños y jóvenes que contrarresten la publicidad de los productores de cigarrillos usando, como ellos, los medios masivos de comunicación cuyos costos sean cubiertos justamente con impuestos especiales a dichas empresas cigarreras.

Finalmente, debe crearse una conciencia clara de que las soluciones no son unilaterales sino que deben ser compartidas por todos los sectores de la población, incluidos los gobernantes, quienes deben promover la independencia tecnológica ya que, hasta el momento actual, por las políticas de ahogo a los centros de investigación y educación superior han promovido la adquisición indiscriminada de equipos, motores, etcétera, que no son idóneos para ser usados a 2400 m sobre el nivel del mar, en vez de premiar la productividad y la inventiva que permita resolver esos problemas técnicos.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a Bárbara y Jim Pitts sus valiosísimas conferencias, así como sus artículos y el ejemplar de su libro, que le permitieron elaborar este ensayo y, sobre todo, al doctor Mario Molina, quien hizo posible la realización del Primer Seminario Internacional de Química Ambiental de la Atmósfera en enero de 1991, en el que se tuvo el primer contacto personal con los doctores Pitts. Las figuras fueron elaboradas en la Sección de Diseño de la Facultad de Química de la UNAM, por el grupo que dirige el D.I. Antonio Cerón.

REFERENCIAS

- Ames, B.N. y McCann, J. 1976. Carcinogens are mutagens: A simple test system. En *Screening Tests in Chemical Carcinogens*. Vol. 12. R. Montesano y col. Eds. Intl. Agency of Research on Cancer. Lyon, Francia. p. 493.
- Ames, B.N., Durston, W.E., Yamasaki, E. y Lee, F.D. 1973. Carcinogens are Mutagens: A simple test system combining liver homogenates for activation and bacteria for detection. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **70**:2281.
- Ames, B.N., McCann, J. y Yamasaki, E. 1975. Methods for detecting carcinogens and mutagens with the *Salmonella*/Mammalian-microsome mutagenicity test. *Mutat. Res.*, **31**:347.
- Bell, G.H., Davidson, J.N. y Scarborough, H. 1958. *Tratatto di fisiologia e chimica fisiologica*. Parte II, p. 19. Ed. Scientifiche Italiane. Nápoles, Italia.
- Blacet, F.E. 1962. Photochemistry in the lower atmosphere. *Indust. Eng. Chem.*, **44**:1339.
- Cook, J.W., Hewett, C.L. y Hieger, I. 1933. The isolation of a cancer-producing hydrocarbon from coal tar. Parts I, II, and III. *J. Chem. Soc.*, 395.
- Cuadri, G. 1992. Comunicación personal. México, D.F. Abril 29.
- Edinger, J.G. 1973. Vertical distribution of photochemical smog in Los Angeles basin. *Environ. Sci. Technol.*, **7**:247.
- Edinger, J.G.; McCutchan, M.H.; Miller, P.R.; Ryan, B.C.; Schroeder, M.J. y Behar, J.B. 1972. Penetration and duration of oxidant air pollution in the South Coast air basin of California. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **22**:882.
- Finlayson-Pitts, B.J. 1991. Tropospheric chemistry on a global scale. Ponencia presentada en el *Primer Seminario Internacional de Química Ambiental de la Atmósfera*. Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Facultad de Química, Instituto de Geografía, UNAM. México D.F. Enero 14-18.
- Finlayson-Pitts, B.J. y Pitts, J.N. Jr. 1986. *Atmospheric chemistry: Fundamentals and experimental techniques*. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York, NY, EUA.
- Haagen-Smit, A.J. 1952. Chemistry and Physiology of Los Angeles smog. *Indust. Eng. Chem.*, **44**:1342.
- Haagen-Smit, A.J. y Fox, M.M. 1954. Photochemical ozone formation with hydrocarbons and automobile exhaust. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **4**:105.

- Haagen-Smit, A.J. y Fox, M.M. 1955. Automobile exhaust and ozone formation. *SAE Trans.*, **63**:575.
- Haagen-Smit, A.J. y Fox, M.M. 1956. Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances. *Indust. Eng. Chem.*, **48**:1484.
- Haagen-Smit, A.J.; Darley, E.F.; Zaitlin, M.; Hull, H. y Noble, W. 1951. Investigation on injury of plants from air pollution in the Los Angeles area. *Plant Physiol.*, **27**:18.
- Haagen-Smit, A.J.; Brunelle, M.F. y J.W. Haagen-Smit. 1959. Ozone cracking in the Los Angeles area. *Rubber Chem. Technol.*, **32**:1134.
- Heicklen, J., Westberg, K. y Cohen, N. 1969. Center for Air Environmental Studies. Report No. 115-69.
- Leighton, P.A. 1961. Photochemistry of Air Pollution. Academic Press, Nueva York, EUA.
- Levy, H. 1971. Normal atmosphere: Large radical and formaldehyde concentrations predicted. *Science*, **173**:141.
- Middleton, J.T.; Kendrick, J.B. Jr. y Schwalm, H.W. 1950. Injury to herbaceous plants by smog or air pollution. *Plants Dis. Rep.*, **34**:245.
- Molina, M.J. y Rowland, F.S. 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature*, **249**:810.
- Pitts, J.N. 1991. Factors influencing the reactivity of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed in model substrates and in ambient particulate organic matter (POM) with ambient levels of ozone. Ponencia presentada en el *Primer Seminario Internacional de Química Ambiental de la Atmósfera*. Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Facultad de Química, Instituto de Geografía, UNAM. México D.F. Enero 16-20.
- Pitts, J.N. 1991. Identification of atmospheric mutagens and carcinogens through bioassay-directed chemical analyses. Ponencia presentada en el *Primer Seminario Internacional de Química Ambiental de la Atmósfera*. Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Facultad de Química, Instituto de Geografía, UNAM. México D.F. Enero 16-20.
- Pitts, J.N., Van Cauwenberghe, K.A., Grosjean, D., Schmid, J.P., Fitz, D.R., Belser, W.L., Knudson, G.B. y Hynds, P.M. 1978. Atmospheric reactions of polycyclic aromatic hydrocarbons: Facile formation of mutagenic nitro derivatives. *Science*, **202**:515.
- Pitts, J.N., Lokensgard, D.M., Ripley, P.S., Van Cauwenberghe, K.A., van Vaecck, L., Shaffer, S.D., Thill, A.J. y Belser, W.L. 1980. Atmospheric epoxidation of benzo(a)pyrene by ozone: Formation of the metabolite benzo(a)pyrene-4,5 oxide. *Science*, **210**:1347.
- Pitts, J.N., Zielinska, B. y Harger, W.P. 1984. Isomeric mononitrobenzo(a)pyrenes: Synthesis, identification and mutagenic activities. *Mutat. Res.*, **140**:81.
- Scassellati-Sforzolini, G. y Savino, A. 1974. Evaluation of a rapid index of environmental pollution by tobacco smoke and study of the composition of the main-stream and side-stream cigarette smoke. En *Proc. Intl. Symp. Recent Advances Assess. Health Effects Environm. Poll.* Paris, Francia. Junio 24-28.
- Stedman, D.H., Morris, E.D., Daby, E.E., Niki, H. y Weinstock, B. 1970. The role of OH radicals in photochemical smog reactions. 160th National Meeting of the American Chemical Society. Chicago, EUA, Sept. 14-18.
- Wark, J. y Warner, J. 1990. *Contaminación atmosférica*. Ed. Limusa-Noriega. México D.F.
- Weinstock, B. 1969. Carbon monoxide: Residence time in the atmosphere. *Science*, **166**:224.

QUIMOTRIVIA-REJECTA

La obligación de completar los programas de los cursos (aun cuando sea "por encimita") lleva a maestros y alumnos a olvidar puntos fundamentales de la formación universitaria.

Las siguientes palabras, dirigidas por Albert Einstein en 1933 (a los 54 años de edad) a los alumnos de nuevo ingreso a la Universidad de Princeton, perfilan claramente algunos de estos puntos básicos:

"Estoy muy contento de vivir entre ustedes, personas jóvenes y felices. Si un viejo estudiante pudiera decirles unas palabras serían éstas: Nunca tomen el estudio como un deber, sino como la envidiable oportunidad de aprender a conocer la influencia liberadora que la belleza ejerce en el espíritu, para alegría personal de ustedes y beneficio de la comunidad a la que pertenecerá su trabajo futuro".

☞ Continúa en la página 234