

# PERTURBACIONES CLIMÁTICAS Y ESPORÁDICAS CAUSADAS POR LOS AVIONES

Juan María Cisneros Sanchiz  
Meteorólogo  
[cisneross@gmail.com](mailto:cisneross@gmail.com)

NOTA PRELIMINAR: Este artículo es la transcripción íntegra de una conferencia impartida por el autor en la localidad valenciana de Manuel, el 6 de mayo de 2008. El trabajo fue presentado también, en forma de comunicación, en las XXX Jornadas científicas de la AME, celebradas en Zaragoza entre los días 5 y 7 de mayo de 2008.

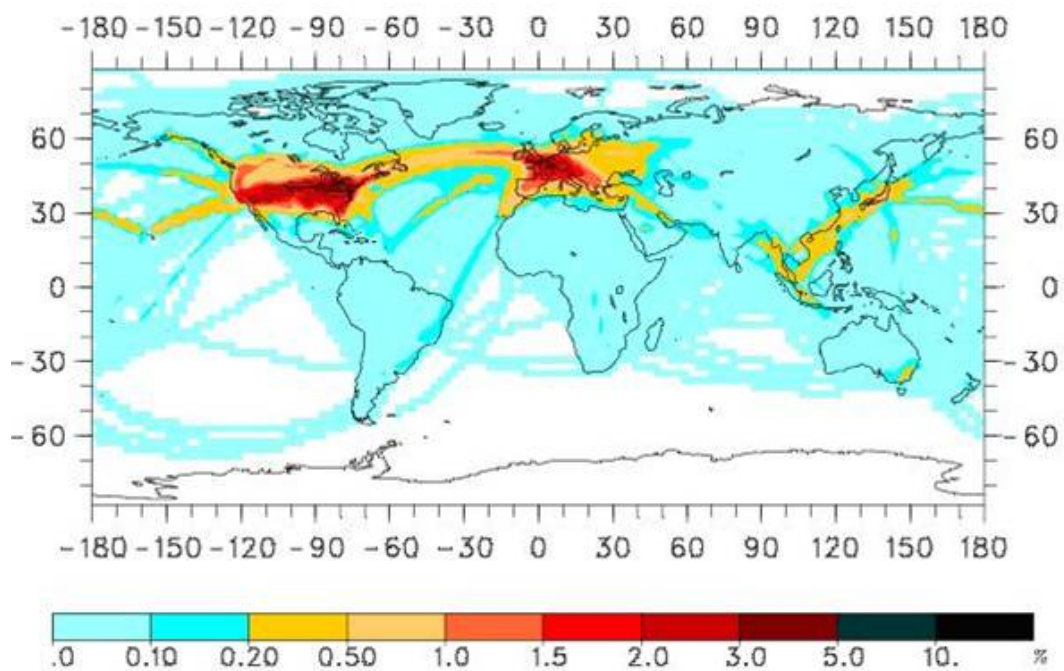


*“A veces pienso que el asunto no tiene remedio, que la especie humana no tiene posibilidad de librarse del determinismo biológico que la condena a extinguirse ahogada en sus propias basuras.”*



Algunas estelas perduran en el tiempo y terminan convertidas en cirros. Crédito de la fotografía: Universidad de Nevada.

persistent contrail coverage (1992)



La cobertura de estelas (*contrails*) y todos los demás efectos de la aviación están fuertemente concentrados sobre EEUU y Europa Occidental. En el mapa global de la figura aparece representada la cobertura media de estelas, en tantos por ciento, y ha sido elaborado por DLR, Oberpfaffenhofen. Todos los observatorios astronómicos están predispuestos a la contaminación del cielo por estelas.



*Miércoles, 26 de julio de 2006*

***Aumentan las emisiones de gases contaminantes de Air France-KLM***

*El grupo aéreo franco-holandés Air France-KLM aumentó sus emisiones de bióxido de carbono y de óxido de nitrógeno en un 4% y un 7% durante el ejercicio 2005-2006, respectivamente, con respecto al anterior, de acuerdo al nuevo Informe Anual de Desarrollo Sostenible.*

**1.- INTRODUCCION**

El transporte aéreo emplea el 11 % del total del combustible usado por el total del transporte, pero se emite en niveles atmosféricos de especial fragilidad medioambiental. Los aviones constituyen la única fuente permanente de contaminación atmosférica situada entre los 6.000 y los 20.000 m.

En los últimos 35 años se ha producido un **CRECIMIENTO ESPECTACULAR** de:

- Pasajeros	(1970)	535.000	mill. de pasaj. x km
	(1978)	940.000	” ” ”
	(1988)	1.900.000	” ” ”
	(1993)	2.500.000	” ” ”
	(2000)	4.200.000	” ” ”
	(2005)	6.100.000	” ” ”
- Carga	(1970)	12.500	mill. Tm x km
	(1978)	32.400	” ” ”
	(1988)	160.000	” ” ”
	(2000)	500.000	” ” ”
	(2005)	700.000	” ” ”

- Combustible (1977)	117	mill. Tm
(1990)	176	„ „
(2000)	210	„ „
(2005)	260	„ „

## CONSECUENCIAS

El acelerado crecimiento de la aviación en los últimos 35 años está introduciendo graves perturbaciones en la atmósfera cuyas consecuencias climáticas y contaminantes pueden ser calculadas.

En este breve trabajo, se pretende estimar la responsabilidad que pudiera atribuirse a la aviación en algunas de las tendencias climáticas observadas, así como en otras perturbaciones de carácter más esporádico. No se tratará aquí la perturbación sonora producida por los aviones, a pesar de considerar la propagación de los sonidos en la atmósfera como un tema de competencia para la meteorología.

## 2.- LAS EMISIONES DE LOS AVIONES

Muchos estudios sobre las emisiones de los motores de los aviones se llevaron a cabo durante los años 70 del siglo pasado, cuando los vuelos comerciales empezaron a alcanzar velocidades supersónicas y alturas de crucero estratosféricas en muchas ocasiones. Estos estudios incluyeron estimaciones del crecimiento esperado en el transporte aéreo hasta mediados del siglo XXI. Se puede asegurar que estas estimaciones se van cumpliendo de forma bastante aproximada en lo que se refiere a los vuelos subsónicos, que son aquellos cuyos niveles de vuelo suelen situarse en alturas inferiores a los 12 km, y cuya gran mayoría corresponde a aviones comerciales a reacción con alturas de vuelo de crucero comprendidas entre 8 y 12 km.

En el año 1970 el movimiento de pasajeros fue de 535.000 millones de pasajeros x km (mpxkm), en 1978 fue de 940.000 mpxkm y casi de 1.900.000 mpxkm en 1988, de los que el 45 % correspondió a vuelos internacionales que, en general, pueden considerarse de larga duración. Estas cifras se ajustan bastante bien a las previsiones (*High Altitude Pollution Program, Final Report, Marzo 1977*). Con un crecimiento del 5% anual, en 1994 se habían alcanzado los 2.500.000 mpxkm, superándose los 4.200.000 mpxkm antes de terminar el siglo pasado. El año pasado, 2007, se habrá aproximado a los 7.000.000 mpxkm.

Cuando se quema el combustible en los motores de aviación, los gases expelidos a la atmósfera están constituidos principalmente por bióxido\* de carbono y por agua. Las proporciones de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>O emitidas a la atmósfera, por unidad de masa de combustible completamente quemado, dependen sólo de la composición química del combustible. En el queroseno, usado en los motores de reacción, el contenido de

---

\* El autor emplea en el trabajo el término “bióxido” en vez de “dióxido” (de carbono), de uso extendido en la actualidad, al no aceptar el cambio de nomenclatura que aplicaron en su día los químicos. A lo largo del texto también aparecen acentuadas con tilde, como si fueran esdrújulas, todas las palabras que derivan de atmósfera (tropósfera, estratósfera...), tal y como se expresan en castellano en la mayoría de los países latinoamericanos. Por expreso deseo del autor, mantenemos la transcripción literal del trabajo original.

carbono es de alrededor del 86 % de su masa. El peso molecular medio es 164 (Prather y otros, 1992).

Mucho menos abundantes, pero no menos importantes en cuanto a sus efectos perturbadores de la atmósfera, son las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), bióxido de azufre (SO2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), hollín (constituido principalmente por carbono), lubricantes y otros elementos traza. La mayoría de estas sustancias se emiten en forma gaseosa, pero algunas son expulsadas en forma líquida o sólida. Unas y otras pueden dar lugar a la formación de núcleos de condensación (NC) que, a su vez, dan lugar a la formación del aerosol, y núcleos de condensación de nubes (NCN), que dan lugar a la formación de nubes. Estos últimos se distinguen de los primeros porque originan la formación de nubes con muy pequeñas sobresaturaciones (menores que el 1 %), mientras que los NC necesitan grandes sobresaturaciones para que den lugar a la aparición de nubes.

La estimación de los índices de emisión (cantidad de contaminante generada por kg de combustible quemado) ha ido variando a lo largo del tiempo al compás de la eficiencia de los motores y del refinado de los combustibles. R. C. Oliver y otros (1977) incluían la siguiente Tabla 1:

TABLA 1.- INDICES DE EMISION (g/kg)

<u>Especie emitida</u>	<u>Altitud (km)</u>	<u>Subsónico</u>	<u>Supersónico</u>
Óxidos de nitrógeno	9-12	10	10
	12-15	7	18
	15-21	-	18
Monóxido de carbono		3	3
Hidrocarburos		0,5	0,5
Hollín		0,02	0,02
Agua		1250	1250
Bióxido de carbono		3220	3220
Bióxido de azufre		1	1
Lubricantes		0,1	0,1
Otros elementos traza		0,01	0,01

U. Schumann (1993) consideró la siguiente tabla (Tabla 2). En ella, además de presentar los índices de emisión, están calculadas las cantidades emitidas anualmente de estos contaminantes por los aviones y en todo el mundo, y las cantidades totales emitidas por éstos y por otros sistemas. Se citan además las fuentes de procedencia de estos datos.

Es importante considerar que estos cálculos están basados en una estadística en la que sólo se han considerado los vuelos programados. Pudiera ser que el consumo de combustible por los aviones (en 1993) hubiese sido el doble del que figura en esta tabla 2:

TABLA 2. Emisiones de los aviones comparadas con las de otras procedencias  
 Las mejores estimaciones se señalan junto con rangos de incertidumbre (entre paréntesis).

Especie	Índice (g/kg)	Cantidad (MTm/año)	Cantidad total para comparar (MTm/año)	Ref.
Combustible	1000	176	3140	Consumo total de HC líquido 1
CO <sub>2</sub>	3150	554	20900	Consumo combust. fós. 2
H <sub>2</sub> O	1260	222	45	Oxidación estrat. del CH <sub>4</sub> 3
			525000	Evaporación terrestre 4
NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> )	18(7-20)	3,2	2,9-1,4	Procedencia estratosférica 5
			90-35	Fuentes antrópicas 5
CO	1,5 (1,5-10)	0,26	600-300	Oxidación del CH <sub>4</sub> 6
			1490	Fuentes antrópicas 7
HC	0,6 (0,2-3)	0,1	90	Fuentes antrópicas 8
Hollín(C)	0,015-0,014	0,0025		
SO <sub>2</sub>	1(0,02-6)	0,176	0,0625	Cantidad requerida para mantener el aerosol en la baja estratósfera 9
			134	Fuentes antrópicas 10

#### BIBLIOGRAFÍA:

Agencia Internacional de la Energía (extrapolando los datos a partir de las 3095 MTm/año de 1989). (2) Bundestag alemán (1991). (3) Bundestag alemán (1991). (4) Bundestag alemán (1991). (5) Bundestag alemán (1991). (6) Bundestag alemán (1991). (7) Bundestag alemán (1991). (8) Hough (1991). (9) Hofmann (1991). (10) Hameed y Dignon (1992).

Sobre esta tabla podían hacerse los siguientes comentarios:

La aviación consumía (en 1991) casi el 6 % del total de los hidrocarburos líquidos y producía:

- casi el 3 % del CO<sub>2</sub> generado a partir de los combustibles fósiles.
- casi el 500 % del vapor de agua generado en la estratósfera a partir de la oxidación del metano, y el 0,04 % del total de la evaporación terrestre.
- entre el 230 y el 120 % de los óxidos de nitrógeno de procedencia estratosférica, y entre el 3,5 y el 9,1 % del total de las fuentes antrópicas de estos gases.
- y el 282 % de la cantidad de SO<sub>2</sub> requerida para mantener la concentración del aerosol en la baja estratósfera.

Si aplicamos las correcciones correspondientes al incremento de consumo de combustible (unos 280 millones de Tm en el año pasado) las nuevas proporciones son aún más alarmantes.

### 3.- ALGUNAS PROPIEDADES DE LA ATMÓSFERA RELATIVAS A SU COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA

Todos los componentes de la atmósfera (en un momento dado) son el resultado de la actuación de las radiaciones que reciben (del Sol, de la superficie terrestre, del espacio estelar e interestelar, etc.) y de las interacciones entre ellos. Desde un punto de vista químico, se puede decir que la atmósfera es un medio oxidante. En general, cuando una sustancia alcanza en la atmósfera su grado de oxidación más completo está en condiciones óptimas para retornar a la superficie. Según un esquema muy simplificado, se puede decir que la superficie terrestre suministra las sustancias que se convierten en oxidantes mediante la acción de la radiación exterior (fundamentalmente, radiación solar). Por tanto, gran parte de los procesos químicos atmosféricos pueden explicarse bastante adecuadamente mediante reacciones fotoquímicas y de oxidación-reducción. Evidentemente, la realidad detallada de la química atmosférica es muchísimo más compleja.

Los primeros 80 ó 100 km de la atmósfera, contados a partir de la superficie terrestre, forman la que se ha llamado homósfera. En esta región de la atmósfera, la proporción de mezcla de todos sus componentes, cuyo tiempo de permanencia en el aire es suficientemente largo, es aproximadamente constante. Se puede decir, por tanto, que, en esta región el peso molecular del aire varía poco con la altitud.

Las capas atmosféricas, definidas por sus características térmicas, se denominan mediante palabras compuestas de un prefijo, que hace referencia a las características físicas o químicas de la capa, seguido de la palabra *esfera*. En cada esfera, el cambio de temperatura con respecto a la altitud tiene un signo constante. Cada esfera envuelve a las inferiores. La región límite entre dos esferas contiguas se denomina con una palabra compuesta por el prefijo de la esfera más baja seguido de la palabra *pausa*. En las pausas el gradiente de temperatura cambia de signo.

La capa atmosférica más baja es la tropósfera. En ella la temperatura disminuye, en general, con el aumento de altitud. El mínimo de temperatura se llama tropopausa. Este mínimo varía en valor y en altitud continuamente, pero puede detectarse una evolución media que depende de la latitud y la estación del año. Aunque este mínimo de temperatura está sometido a variaciones esporádicas en altura, en el ecuador está situado permanentemente hacia los 18 km y su temperatura es de unos 190 K, mientras que en las regiones polares su altura es de unos 8 km y su temperatura de unos 220 K. En las regiones de latitudes intermedias, la tropopausa, además de sus variaciones esporádicas, presenta una fuerte variación estacional, estando más alta y más fría en verano que en invierno.

Por encima de la tropopausa empieza la estratósfera. Sus temperaturas aumentan con la altitud hasta un máximo de alrededor de 270 K, que define el nivel de la estratopausa, localizado hacia los 50 km de altitud.

La mesósfera es la capa comprendida aproximadamente entre los 50 y los 85 km de altura. En ella la temperatura decrece de nuevo con la altitud.

Por encima de los 100 km de altura la interacción de la radiación solar con muchos de los componentes de la atmósfera es muy intensa, originándose transformaciones que

originan una variabilidad muy grande en la composición. La gravedad también influye en la distribución de estos componentes según su peso molecular, por esto, las capas situadas por encima de los 80 ó 100 km reciben, en conjunto, el nombre de heterósfera, en oposición al de homósfera, en las que el peso molecular medio del aire es aproximadamente constante.

Como consecuencia de la distribución de temperaturas con la altura, la estratósfera es una capa atmosférica mucho más estable que la tropósfera. Consecuencia de esta diferencia de estabilidad es que, mientras los óxidos de nitrógeno tienen un tiempo de residencia entre 6 meses y 1 año a las alturas superiores a la tropopausa, en los niveles troposféricos, donde además se originan formas solubles de éstos óxidos, el tiempo de residencia se reduce a 1 ó 4 días.

El tiempo de residencia depende mucho de la latitud porque la baja estratósfera presenta un movimiento medio ascendente cerca del ecuador y, descendente en las zonas polares, (Plumb y Mahlman, 1987), existiendo además un fuerte intercambio estratósfera-tropósfera en las latitudes intermedias (Vaughan, 1988; Ebel, 1991; Appenzeller y Davies, 1992; Rood y otros, 1992; Hoerling y otros, 1993). Se ha estimado que el flujo másico de la tropósfera a la estratósfera en la banda de latitudes 50°N-70°N es tan intenso como sobre los trópicos, mientras que este flujo es bastante más débil sobre los polos. Esto sugiere que las sustancias que llegan a la estratósfera o cerca de la tropopausa por el lado polar de la corriente en chorro, tendrán un tiempo de residencia más corto que las que se inyectan por el lado ecuatorial del chorro (Schumann, 1993).

La tropopausa, en latitudes más altas que 50°, se sitúa frecuentemente por debajo del nivel de los 250 hPa (unos 10,5 km). Por tanto, la mayoría de los vuelos que se realizan en latitudes superiores a 50° son estratosféricos. Con datos del año 1980, Danielsen y otros (1983) prepararon la Tabla 3, en la que se expresa la proporción de combustible quemado en la estratósfera, para vuelos que se realizan a 10 y 11 km de altura de crucero, según algunas latitudes escogidas del hemisferio Norte.

TABLA 3.- Estimación del porcentaje de combustible quemado en la estratósfera por la flota subsónica

Altura de crucero = 10 km    Altura de crucero = 11 km

Mes	Porción de combustible quemado en la estratósfera	Porción de combustible quemado en la estratósfera
Enero	56 %	72 %
Febrero	41 %	72 %
Marzo	40 %	72 %
Abril	27 %	72 %
Mayo	26 %	56 %
Junio	16 %	40 %
Julio	2 %	16 %
Agosto	2 %	16 %
Septiembre	2 %	26 %



Octubre	8 %	40 %
Noviembre	16 %	40 %
Diciembre	27 %	56 %
Anual	22 %	48 %

Según Ko y otros (1992), el 48 % del combustible empleado en los vuelos realizados durante 1987 en el hemisferio Norte se consumió en la estratósfera, correspondiendo el otro 52 % restante a la tropósfera. Evidentemente, esta estadística presenta fuertes variaciones estacionales.

#### **4.- IMPACTO DE LAS EMISIONES DE LOS AVIONES SOBRE LA ATMÓSFERA**

Las concentraciones de una substancia que ya existe en la atmósfera aumentan cuando existen fuentes emisoras de esta misma substancia. El cambio de la concentración volumétrica de una determinada substancia puede estimarse (Schumann, 1993) por:

$$\text{Cambio de concentración volumétrica} = \frac{R \times T \times M_a}{M \times M_i} \quad (1)$$

donde R es la cantidad de emisión anual, T el tiempo de residencia,  $M_a$  es el peso molecular del aire, M es la masa de la atmósfera donde se difunde la substancia emitida y  $M_i$  el peso molecular de la substancia que se trata. El tiempo de residencia y la masa atmosférica en la que se difunde la substancia dependen mucho de la altura a que se realiza la emisión, y de la manera cómo se mezclan y se eliminan las substancias.

Actualmente, alrededor del 12 % de todos los hidrocarburos líquidos consumidos se emplean en la aviación. Sin embargo, debido a la abundancia de otras fuentes, la aviación sólo genera el 3 % del CO<sub>2</sub> producido por los combustibles fósiles. La emisión de vapor de agua por los aviones es una parte muy pequeña (0,05 %) de la que se evapora desde la superficie. Ahora bien, representa una enorme cantidad en comparación con la que genera la oxidación del metano en la estratósfera.

La contribución de la aviación a todas las emisiones antrópicas de óxidos de nitrógeno es de alrededor del 4 %. El crecimiento de las emisiones de NO<sub>x</sub> por la aviación es más rápido que el de las otras fuentes. Las emisiones de óxidos de nitrógeno por los motores de reacción son muy difíciles de controlar porque el índice de emisión tiende a crecer al compás que se construyen motores de más rendimiento (el rendimiento de un motor de reacción está fuertemente ligado a las temperaturas que se alcanzan en la cámara de combustión: cuanto más alta es la temperatura de combustión, mayor rendimiento y, por tanto, mayor formación de óxidos de nitrógeno). Por otro lado, el propio principio de funcionamiento de un motor de reacción impide la instalación de catalizadores que descompongan estos óxidos de nitrógeno.

Las emisiones de las otras substancias, tales como CO, SO<sub>2</sub> y hollín, son pequeñas en comparación con las procedentes de otras fuentes antrópicas. Ahora bien, debido a la altura a que son emitidas por los aviones, sus específicas repercusiones pueden ser

mucho más graves que las que habría que esperar de sus pequeñas proporciones frente a los vertidos totales a la atmósfera.

En la tabla 4, siguiendo a Fabian (1990), Schumann (1993) calculó el incremento medio de la concentración de diversos componentes estratosféricos usando la ecuación (1). En estos cálculos se despreciaron las transformaciones químicas. Schumann consideró que sólo 1/5 del total del combustible empleado en la aviación mundial (176 MTm en 1990) se quema en la estratósfera del hemisferio Norte. Los tiempos de residencia fueron calculados por Schumann y Reinhardt (1991).

Para la tropósfera, Schumann (1993) hizo un cálculo semejante, considerando que el 80 % de todo el combustible se consume y se distribuye en las 4/5 partes de la masa de la atmósfera (tabla 5).

TABLA 4.- Aumento de las concentraciones en la estratósfera del hemisferio Norte debido a las emisiones de la aviación, según Schumann (1993)

Compuesto	Tiempo de residencia	Emisión	Aumento de concentración	Concentración de fondo a 14 km
	años	MTm/año	ppmv	ppmv
CO2	10	111	1,4	354
H2O	0,5	44	0,07	5-20
NOx	0,5	0,63	0,0004	0,0002-0,0005
SO2	0,5	0,035	0,016	0,03-0,1

TABLA 5.- Aumento de las concentraciones en toda la tropósfera debido a las emisiones de los aviones

Compuesto	Tiempo de residencia	Emisión	Aumento de concentración	Concentración de fondo a 8 km
	días	MTm/año	ppmv	ppmv
CO2	3650	443	0,7	354
H2O	9	177	0,002	20-400
NOx	4	2,5	0,0000041	0,00001-0,00005
SO2	5	0,14	0,00000021	0,00003-0,00015

Yo he calculado unas nuevas tablas, corregidas con los datos de los consumos actuales de combustible (Tablas 4a y 5a).

TABLA 4a.- Aumento de las concentraciones en la estratósfera del hemisferio Norte debido a las emisiones de la aviación, según Schumann (1993)

Compuesto	Tiempo de residencia	Emisión	Aumento de concentración	Concentración de fondo a 14 km
	años	MTm/año	ppmv	ppmv
CO2	10	<b>280</b>	<b>2,24</b>	354
H2O	0,5	<b>70,4</b>	<b>0,112</b>	5-20
NOx	0,5	<b>1,01</b>	<b>0,00064</b>	0,0002-0,0005
SO2	0,5	<b>0,056</b>	<b>0,0256</b>	0,03-0,1

TABLA 5a.- Aumento de las concentraciones en toda la tropósfera debido a las emisiones de los aviones

Compuesto	Tiempo de residencia	Emisión	Aumento de concentración	Concentración de fondo a 8 km
	días	MTm/año	ppmv	ppmv
CO2	3650	<b>709</b>	<b>1,12</b>	354
H2O	9	<b>283</b>	<b>0,0032</b>	20-400
NOx	4	<b>4,0</b>	<b>0,0000067</b>	0,00001-0,00005
SO2	5	<b>0,224</b>	<b>0,00000034</b>	0,00003-0,00015

Esto está en clara contradicción con las estimaciones hechas por Ko y otros (1992), según las cuales (datos de 1987) el 48 % del combustible consumido por la aviación en el hemisferio Norte se quemó en la estratósfera. Considero que puede ser más cercano a la realidad estimar que el combustible empleado por la aviación en el hemisferio Norte es 3/4 del total, y tener en cuenta la estimación del 48 % para la que se quema en la estratósfera. Según esto, la tabla 4a quedaría convertida en la siguiente (Tabla 6):

TABLA 6.- Aumento de las concentraciones en la estratósfera del hemisferio Norte debido a las emisiones de la aviación (año 2007)

Compuesto	Tiempo de residencia	Emisión	Aumento de concentración	Concentración de fondo a 14 km
	años	MTm/año	ppmv	ppmv
CO2	10	320	4,16	354
H2O	0,5	126	0,24	5-20
NOx	0,5	1,82	0,00127	0,0002-0,0005
SO2	0,5	0,10	0,00005	0,00003-0,0001

Se ha aplicado la fórmula (1), considerando que la baja estratósfera (<30 km) tiene una masa total de 850 TTm ( $T=Tiga=1$  billón= $10 \exp.12$ ). Por tanto, la masa de la baja estratósfera del hemisferio Norte es 1/2 de la masa total del total de esta baja estratósfera = 425 TTm.

## **5.- CONSECUENCIAS DEL INCREMENTO DEL VAPOR DE AGUA Y DEL AEROSOL ESTRATOSFÉRICO, ASÍ COMO DE LA MAYOR FRECUENCIA DE LAS NUBES TIPO CIRRUS**

La emisión directa a la atmósfera, en alturas próximas a la tropopausa (en muchas ocasiones por encima de ésta: un 48 % de los casos), de alrededor de 364 MTm de H<sub>2</sub>O, de 5,0 MTm de NO<sub>x</sub>, de 0,280 MTm de SO<sub>2</sub> y de 4000 Tm de hollín, constituye causa de un incremento considerable del aerosol estratosférico y de la densidad de núcleos de condensación que, a su vez, generan las condiciones para un incremento de la capacidad de formación de nubes del tipo cirrus y estratosféricas.

Los motores de combustión de los aviones producen 200-400 millones de partículas de hollín por kilo de combustible quemado (Douglas, 1989). Así, el hollín, emitido en las inmediaciones de la tropopausa, puede contribuir de forma muy significativa al incremento de la concentración de NC en la baja estratósfera (Pitchford y otros, 1991). Estas partículas constituyen núcleos de condensación, junto con el sulfúrico procedente de las emisiones de SO<sub>2</sub>, y alteran las propiedades ópticas de la atmósfera, sobre todo cuando dan lugar a la formación de nubes.

Hofmann (1990) sugirió que el contenido sulfúrico de la estratósfera pudo haber estado creciendo al ritmo de un 5 % por año durante el último decenio. Poco después, Hofmann (1991), señaló que el consumo de combustible por la aviación también ha estado creciendo a este ritmo durante el mismo período. Esto sugiere que son las emisiones de los aviones la causa del crecimiento del contenido sulfúrico señalado. Esto resulta de acuerdo con los índices de emisión de la Tabla 2.

Al vapor de agua se le reconoce un efecto invernadero tres veces más potente que el del CO<sub>2</sub>. Pero el efecto invernadero del vapor de agua (como el de cualquier gas que absorbe en el espectro infrarrojo) puede ser más de 200 veces más efectivo que el del CO<sub>2</sub> si se concentra en una región fría, tal cual es la estratósfera (Grassl y otros, 1991). Si potente es el efecto invernadero del vapor de agua estratosférico, mayor es el de las nubes del tipo cirrus. Grandes cambios termodinámicos se producen cuando el agua se condensa en forma de cristales de hielo, desprendiéndose gran cantidad de energía. Además, estas nubes de cristales de hielo poseen un fuerte efecto invernadero si su albedo es bajo y su emisividad alta. Este es el caso de los cirros tenues formados por grandes partículas (> 0,3  $\mu$ m de radio). Se calcula que un aumento de la fracción de cielo cubierto por estos cirros de alrededor de un 2 %, tiene el mismo efecto invernadero añadido que un incremento de la concentración atmosférica del CO<sub>2</sub> al doble. Esto convierte a las nubes en principales protagonistas en el equilibrio de las temperaturas superficiales de nuestro planeta. Liou y otros (1990) calcularon un aumento de la temperatura superficial de un 1 K para un aumento de un 1 % de la cobertura de nubes altas. Más complicado puede resultar el cálculo de las perturbaciones térmicas a que pueden verse sometidos los niveles atmosféricos próximos al de formación de estas nubes.

Se han realizado observaciones mediante satélites, lidar y climatológicas convencionales, de las nubes formadas a partir de las estelas de condensación de aviones. Estas mediciones indican que la cobertura media por estas nubes, de los cielos de las zonas centrales europeas, era de alrededor del 0,4 % en 1993 (Schumann, 1993) y estimaciones actuales valoran esta cobertura en un 5 %. Esto comportaría que ya se habría producido un incremento de la temperatura media del aire superficial, debido a esta causa, entre 0,05 y 0,6 K en estas regiones. La indeterminación se debe a los diferentes modelos empleados en hacer la estimación.

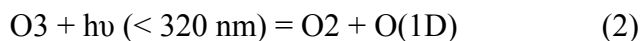
## 6.- REPERCUSIONES SOBRE EL OZONO ATMOSFÉRICO

Los efectos de las emisiones de los aviones sobre el contenido de ozono en la atmósfera son muy variados, tanto como es la química de la atmósfera. Intentaré destacar los más importantes conocidos. Seguiré el orden de las sustancias emitidas, según se presentan en la tabla 2.

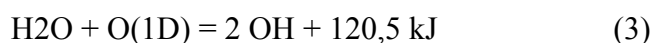
Las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de los aviones apenas alcanzan el 3 % de total producido por el consumo de combustibles fósiles (hidrocarburos, líquidos y gaseosos, y carbones minerales). Como consecuencia de la larga vida que tiene el CO<sub>2</sub> en toda la atmósfera y su gran estabilidad química en todos los niveles, no tiene sentido distinguir entre los efectos sobre el ozono troposférico y sobre el ozono estratosférico. Por otra parte, esta gran estabilidad química del CO<sub>2</sub> conduce a que los efectos directos, del aumento de la concentración de este gas en la atmósfera, sobre el ozono atmosférico sean prácticamente nulos. Sin embargo, debido al fuerte efecto invernadero de este gas, con la consiguiente alteración de la estructura térmica vertical de la atmósfera, podría generar procesos de realimentación sobre la disminución de la concentración del ozono estratosférico producida por otros agentes. De esta forma, se ha calculado el efecto del incremento de la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera sobre la generación de condiciones circulatorias, en la estratósfera invernal ártica, semejantes a las que permiten el desarrollo del fenómeno del "agujero" del ozono en la Antártida. En el modelo resultante, se prevé la aparición de un agujero en el Ártico, semejante al de la Antártida, a partir del año 2025.

Los aviones emiten 280 MTm/año de H<sub>2</sub>O a la atmósfera; esto supone menos de media milésima de lo que pasa de la superficie terrestre a la atmósfera, debido a la evaporación, en el mismo período de tiempo. Pero si consideramos las cantidades de H<sub>2</sub>O que penetran en la estratósfera procedentes de la tropósfera (350 MTm/año; Warneck, 1988) y las procedentes de la emisión directa de los aviones (150 MTm/año), vemos que son del mismo orden de magnitud. La oxidación del metano genera una cantidad de agua estratosférica también considerable (45 MTm/año), que es menos de la tercera parte de la introducida por los aviones.

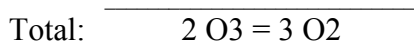
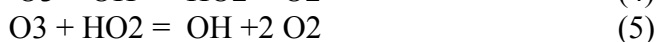
En la baja estratósfera, durante el día, puede ser intenso el proceso de oxidación del vapor de agua mediante el O(1D) porque la reacción de fotodisociación:



es muy frecuente. Entonces, se podrá generar OH según:



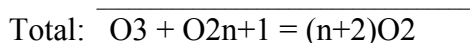
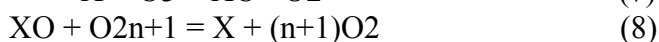
y será importante el siguiente proceso catalítico:



La ecuación (4) es importante por debajo de los 18 km (Warneck, 1988), mientras que la reacción (5) es menos frecuente a estas altitudes. Por esto, para que el proceso catalítico sea más probable, hay que considerar también la reacción



El conjunto de las reacciones (4), (5) y (6) puede ponerse de la forma más general siguiente:



donde: X = H, OH, NO, Cl ó Br, y n=0 ó 1.

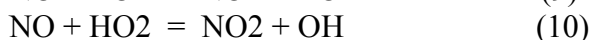
Según Wofsy y Logan (1982), la pérdida de ozono producida en el proceso anterior es de 4,2 millones de moléculas/seg, que constituye el 5,2 % del total de pérdidas por procesos puramente químicos. Se puede estimar que el aumento de la concentración del H<sub>2</sub>O, introducido por los aviones, podría incrementar esta destrucción a 7,5 millones de moléculas/seg, lo que significa casi duplicar las pérdidas producidas por este proceso químico.

Los efectos indirectos del incremento de la concentración de H<sub>2</sub>O en la estratósfera, debido a las emisiones de los aviones, son mucho más difíciles de estimar, a pesar de que pueden resultar ser los más importantes. Todos se refieren al aumento del aerosol y de las nubes, por tanto, se tratarán más adelante.

Según la tabla 6, vemos que el componente estratosférico más afectado por los aviones es el NO<sub>x</sub>. A la aviación le corresponde entre un 4 a un 9 % de todos los vertidos de NO<sub>x</sub> a la atmósfera procedentes de las actividades humanas. De hecho, constituye la única fuente antrópica de óxidos de nitrógeno en la alta tropósfera y baja estratósfera, siendo las fuentes no antrópicas (tales como los rayos y el flujo procedente de zonas más altas de la atmósfera) muy limitadas. Por su causa, el aumento de la concentración supera a la concentración de fondo. Se puede estimar (ver tabla 6) que el cambio de la concentración de fondo a 14 km de altura, en el hemisferio Norte, puede estar comprendido entre un 365 y un 146 %.

Según la tabla 5, la contribución de los aviones al aumento de la concentración de NO<sub>x</sub> en la tropósfera puede estimarse entre un 40 y un 8 %. Estas estimaciones están de acuerdo con Ehhalt y otros (1992), que concluyen que las emisiones de los aviones contribuyen con alrededor de un 30 % a la concentración de NO<sub>x</sub> en la alta tropósfera.

Existe una fuerte polémica sobre los efectos que este tremendo aumento de la concentración estratosférica del NO<sub>x</sub> está produciendo sobre el ozono atmosférico. El origen de esta polémica se debe al diferente papel que juega el NO<sub>x</sub> sobre el ozono. Así, mientras en las capas altas tiene un fuerte efecto destructor (según reacciones de la forma (7) y (8)), en las capas más bajas de la estratósfera y en toda la tropósfera es un activo precursor de la generación del ozono, tal como puede verse en las reacciones siguientes:



donde RO<sub>2</sub> representa radicales peróxido orgánico. Estas reacciones dan lugar a:



El proceso clave de estas reacciones para generar ozono está en las (9) y (10), según las cuales se oxida el óxido nítrico a bióxido de nitrógeno sin consumir ni ozono ni oxígeno atómico. Según este mecanismo, el aumento del ozono en los niveles próximos a la tropopausa ha de estar fuertemente ligado a las emisiones de los aviones.

Que los aviones vierten ingentes cantidades de vapor de agua en la estratósfera y en los niveles altos de la tropósfera y que contribuyen a la formación de nubes altas y medias en esta capa, y de nubes estratosféricas, es de sobra conocido. Que estas nubes tienen un efecto decisivo sobre el clima ha sido suficientemente probado. Resulta más difícil poner de acuerdo a los diferentes autores en cuanto al sentido de estos efectos, en particular en lo que se refiere a las temperaturas de la superficie terrestre.

Se ha estimado que las nubes, en su conjunto y sin establecer diferencias entre ellas por causa de su altitud, clase y temperatura de sus partículas, contribuyen de la siguiente forma al balance de la energía solar que alcanza la superficie terrestre (en valores medios anuales):

Impiden la llegada de energía procedente del Sol.....	- 44 W/m <sup>2</sup>
Impiden la emisión infrarroja de la tierra.....	31 W/m <sup>2</sup>
Balance neto.....	- 13 W/m <sup>2</sup>

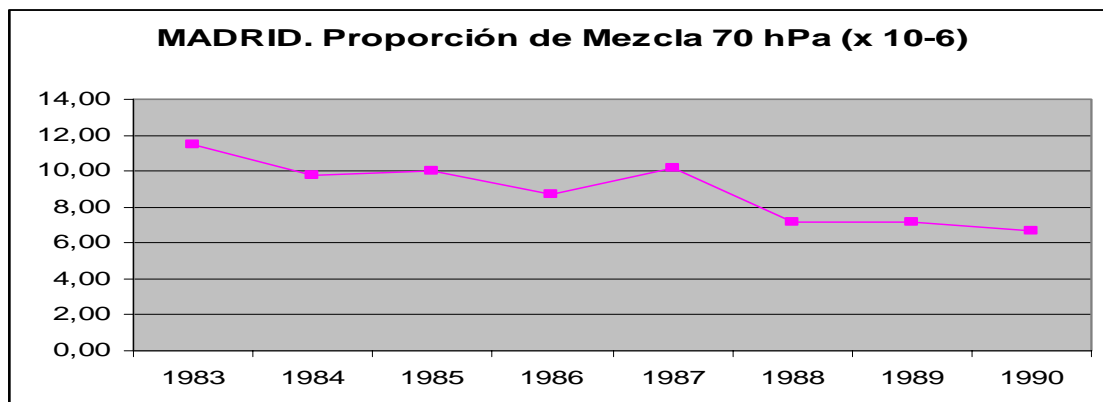
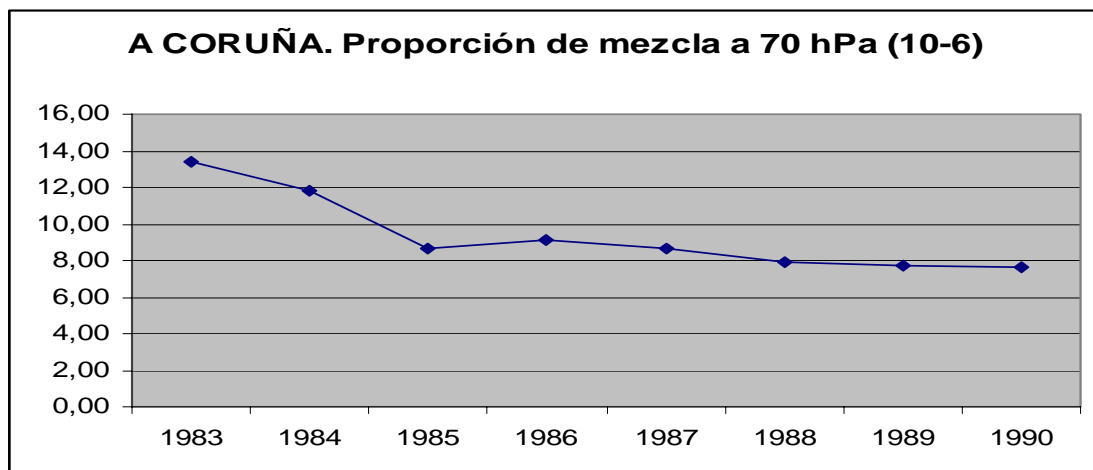
Según estos valores, las nubes contribuyen, en su conjunto, a un enfriamiento de la superficie terrestre. Ahora bien, el comportamiento de las nubes, según su altura, tipo de partículas que las forman y temperaturas de las mismas, ha de establecer profundas diferencias en su comportamiento radiativo. En el caso de las nubes producidas por los aviones, se trata de nubes altas o medias, fundamentalmente del tipo cirrus. Según opinión de la mayoría de los autores, este tipo de nubes frías contribuyen de forma positiva al calentamiento de la superficie terrestre. Este efecto se presenta incrementado en el caso de las nubes estratosféricas.

En cuanto al vapor de agua, se ha calculado la retroalimentación del mismo supone una multiplicación por un factor de 1,6. Este factor no parece que vaya a estar sometido a cambios, ya que las recientes medidas sobre vapor de agua indican que el contenido total del mismo en la atmósfera, en promedio, no presenta tendencia a variar de forma

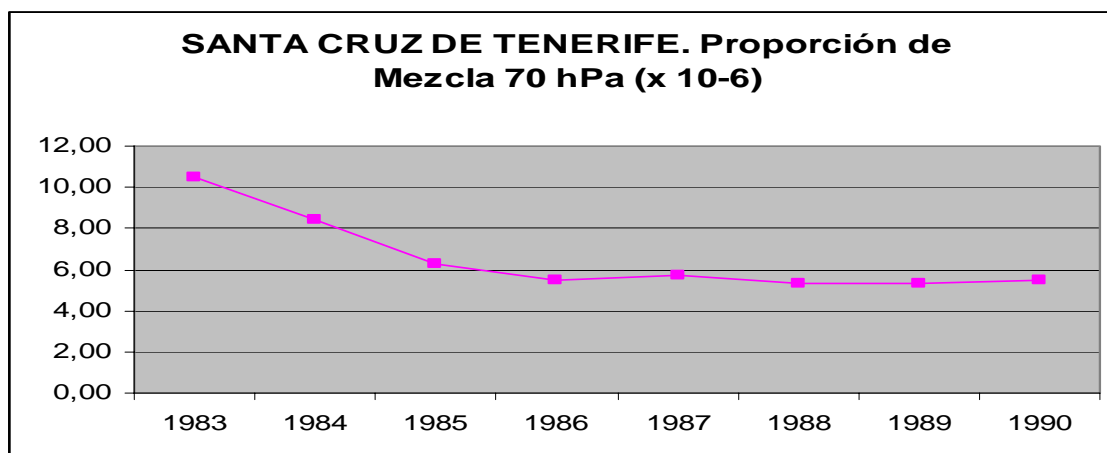
apreciable. Todo parece indicar, por tanto, que el vapor de agua, emitido por los aviones pasa a engrosar, en su práctica totalidad, el contenido de nubes en la atmósfera. No hay que olvidar que la emisión de vapor de agua por los aviones se realiza acompañada de SO<sub>2</sub>, en cantidades suficientes como para la generación de núcleos de condensación suficientes para que se establezca el equilibrio de la tensión del vapor de agua sobre los mismos,

Por esto, muy probablemente, en su conjunto, las emisiones de los aviones no conducen a un incremento de la concentración de vapor de agua en la estratósfera, sino más bien a una disminución de la misma.

El análisis sobre tres estaciones españolas de radiosondeo situadas en diferentes latitudes del hemisferio Norte: La Coruña (43°22'N, 8°25'W), Madrid (40°30'N, 3°25'W) y Santa Cruz de Tenerife (28°28'N, 16°15'W), realizado por J.M. Cisneros y R.A. Hovel (1991), muestra en todas ellas una clara disminución de la proporción de mezcla de vapor agua en la estratósfera inferior. Esta disminución podría ser explicada por el aumento de la concentración de núcleos de condensación sulfúricos emitidos por los aviones. El mecanismo de desecación sería el mismo que el que se produce colocando sustancias altamente higroscópicas en recintos cerrados con el fin de alcanzar en los mismos muy bajas humedades ambientales.







Como consecuencia de la emisión de óxidos de nitrógeno a la atmósfera y de otros contaminantes que actúan como precursores del ozono, aportadas en parte por los aviones, en las latitudes intermedias y altas del hemisferio Norte, el ozono contenido en los diez kilómetros inferiores de la atmósfera está aumentando a un ritmo superior al 1 % anual. Este aumento no compensa nada más que un poco las grandes pérdidas que presenta en la estratósfera. Los estudios recientes con modelos manifiestan que la disminución del espesor de la capa de ozono podría traducirse en un aumento de la radiación solar que alcanza el suelo que, junto con el efecto invernadero del creciente ozono troposférico, podría provocar un aumento de la temperatura superficial comparable a la producida por el efecto invernadero del bióxido de carbono, metano, óxido nítrico y halocarburos reunidos, sobre todo durante el verano de las latitudes altas del hemisferio Sur.

Labitzke y van Loon (1991), han indicado un enfriamiento de 0,4 K por decenio, entre los 20 y 24 km de altura, en octubre-noviembre y entre las latitudes de 20° y 50°N. Sin embargo, han expresado sus dudas sobre estos resultados a causa de la gran variabilidad que presentan los datos de las radiosondas, sobre todo durante el invierno. Por otro lado, estos resultados se ajustan bien a los obtenidos por Miller y otros (1991) que dedujeron un calentamiento del orden de 0,3 K por decenio entre la superficie y 5 km, y un enfriamiento máximo de 0,4 K por decenio entre 16 y 20 km. Oort y Liu (1991) realizaron este trabajo para los dos hemisferios y dedujeron los valores de -0,38 K por decenio para el hemisferio Norte y de -0,43 K para el Sur, entre estos mismo niveles estratosféricos. De forma conservadora, se puede decir que, en los últimos treinta años se ha producido un enfriamiento de 3 K en estos niveles estratosféricos.

Otros estudios relativos a la alta estratósfera y mesósfera (Kokin y otros, 1990; Aikin y otros, 1991; Hauchecorne y otros, 1991) han señalado un claro enfriamiento de 4 K por decenio en la mesósfera y de 1 K por decenio en los niveles alrededor de la estratopausa (35-50 km). En estos estudios se han considerado como causas de igual peso el incremento del CO<sub>2</sub> y la disminución del O<sub>3</sub>.

Por otro lado, los efectos indirectos que pueden provocar en el clima estos cambios de la distribución del ozono atmosférico, a través de los cambios circulatorios provocados por el enfriamiento de la estratopausa y el calentamiento de la tropopausa, pueden ser tan considerables que resulta arriesgado hacer una estimación cuantitativa.

Aunque las previsiones a largo plazo obtenidas de la modelización matemática de la atmósfera no pueden tener altos grados de confianza, se han preparado modelos sobre las consecuencias que tendría respecto a la capa de ozono en las regiones de altas latitudes del hemisferio Norte un aumento de las temperaturas tropopáusicas y una disminución de las estratopáusicas.

Estos modelos prevén una progresiva disminución de la intensidad de la circulación de la baja estratósfera en las latitudes altas del hemisferio Norte, de tal manera que el torbellino polar típico del período invernal en estas regiones nunca alcanzaría las velocidades críticas para su ruptura. En esta situación, podrían desarrollarse todos los procesos físico-químicos semejantes a los que originan la aparición del agujero del ozono sobre la Antártica al final del período invernal. Los modelos prevén la aparición de este fenómeno en el Norte, con intensidades semejantes a las actuales del hemisferio Sur, hacia el año 2020.

## **8.- POSIBLES REPERCUSIONES SOBRE EL CLIMA DE NUESTRO PAÍS**

Las alteraciones climáticas introducidas por los aviones se refieren fundamentalmente a la perturbación del equilibrio de radiación. Las causas de esta perturbación son: El cambio de la cobertura nubosa y las modificaciones introducidas en la distribución vertical del ozono.

No resulta fácil concretar, para una región determinada, qué modificaciones climáticas pueden generar los cambios citados.

La Península Ibérica contiene regiones de características geográficas muy diversas en las que las perturbaciones del equilibrio de radiación señaladas pueden originar consecuencias climáticas muy diversas. En particular, un aumento de la cobertura de nubes cirrosas puede conducir a un debilitamiento de las situaciones anticiclónicas de primavera en el mediterráneo, conduciendo a un aumento de la precipitación en esta época del año. Esto sería también aplicable a las regiones centrales peninsulares. La circulación de las borrascas por latitudes algo más bajas podría originar en las regiones cantábricas una fuerte disminución de la precipitación primaveral.

La pérdida de radiación solar, recibida por la superficie en el Mediterráneo y zonas limítrofes, tenderá a disminuir la intensidad de los fenómenos de "gota fría" de comienzo del otoño en las costas peninsulares de este mar al sur de la desembocadura del Ebro, no siendo así en la región catalana y en las costas cantábricas, donde las invasiones de los activos frentes polares otoñales continuarán produciendo intensas precipitaciones.

Podemos considerar que, mientras en las regiones del Suroeste peninsular, tales como Extremadura y Andalucía, se pueden cumplir bastante bien las previsiones de los modelos climáticos más conocidos, que prevén una intensificación de las sequías, no sucede así en las regiones peninsulares mediterráneas y centrales donde, por no haber tenido en cuenta las alteraciones introducidas por los aviones, estos modelos de tendencia no parecen acertar.

## 9.- CONCLUSIONES

La contaminación atmosférica producida por los aviones es un hecho real que se viene produciendo de forma considerable desde el desarrollo de los motores de reacción, pues han sido estos motores los que han hecho posible la aceptación de la aviación como el medio de transporte más comúnmente utilizado para desplazar viajeros a grandes distancias. No es, por tanto, una previsión de futuro. Es una contaminación que está teniendo consecuencias graves para la vida en nuestro planeta.

Hasta ahora, no se han puesto más límites al desarrollo de la aviación que los que imponía el mercado del transporte. Existen razones medioambientales objetivas para que esta situación no continúe. Estas razones se resumen en dos fundamentales:

- La aviación constituye la principal contaminación antrópica de la estratósfera.
- Las repercusiones de la contaminación de la estratósfera tienen alcance planetario.

Si se quiere limitar la contaminación estratosférica y corregir los graves desequilibrios que, en consecuencia, están produciéndose en nuestro planeta, es necesario limitar la contaminación producida por los aviones.

En tanto aparecen otros tipos de motores, que no generen agua ni otros productos derivados de la combustión de los hidrocarburos y que no se basen en el calentamiento del aire a temperaturas tales que producen óxidos de nitrógeno, o bien utilicen sistemas de descomposición de los óxidos de nitrógeno formados, es necesario limitar el número de vuelos y la altura máxima de éstos, de manera que se garanticen unos niveles máximos de contaminación estratosférica, tal que pueda ser absorbida por los mecanismos naturales de regeneración de la atmósfera. De la misma manera, hay que estimar los máximos vertidos contaminantes que, procedentes de los aviones, puede aceptar la tropósfera sin que se produzcan alteraciones graves locales o planetarias.

En contaminación, es necesario introducir el concepto de límite máximo planetario admisible que pueden aceptar los diversos sistemas, si queremos preservar este tipo de equilibrios extendidos a todo el planeta.

## 10.- Bibliografía

- Aikin y otros, 1991.
- Appenzeller, C. y H.C. Davies: Structure of stratospheric intrusions into troposphere. Nature, 1992, 358, 570-572.
- Cisneros y Hoevel, 1991.
- Cisneros y otros, 1992.
- Danielsen y otros, 1993.
- Ebel, 1991.
- Douglass, 1989.
- Egli, R.A.: Nitrogen oxide emissions from air traffic. Chimie, 1990, 44, 359-371.
- Fabian, P.: Constituents and transport properties of the atmosphere above and below the tropopause. U. Schumann (edit.): Air traffic and the environment. Lect. Notes in Engrg., Vol. 60, Springer-V., Berlin, 1990, p. 84-95.
- Grassl y otros, 1991.

- Hameed, S. y J. Dignon: Global emissions of nitrogen and sulphur oxides in fossil fuel combustion 1970-1986. *J. Air Wastw Manage. Assoc.*, 1992, 42, 159-163.
- Hauchecorne y otros, 1991.
- Hoerling, M.P., T.K. Schaak y A.J. Lenzen: A global Analysis of stratospheric-tropospheric exchange during northern winter. *Mon. Weather Rev.* 1993, 121, 162-172.
- Hofmann, D.J., 1990.
- Hofmann, D.J.: Aircraft sulphur emissions. *Nature*, 1991, 349, 659.
- Kavanaugh, M.: New estimates of NOx from aircraft: 1975-2025. Proc. 81st Annual Meeting of APCA (Air pollution Control Association), Dallas, Texas, June 14-19, 1988, paper 88-66.10, 15 pp.
- Ko, M., Ozone response to aircraft emissions: sensitivity studies with two-dimensional models, in *Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft: A First Program Report*, NASA Ref. Publ. 1272, 1992.
- Liou, K.-N., S.-C. Ou y G. Koenig, 1990. An investigation of the climatic effect of contrail cirrus. In: U. Schumann (ed.) *Air Traffic and the Environment. Lect. Notes in Engrg.*, Vol 60, Springer-V., Berlin, p. 154-169.
- Miller y otros, 1991
- Oort y Liu, 1991
- Pitchford, M., J. Hudson, y J. Hallett (1991), Size and Critical Supersaturation for Condensation of Jet Engine Exhaust Particles, *J. Geophys. Res.*, 96(D11), 20787-20793.
- Prather M.J., H.L. Wesoky, R.C. Miake-Lye, A.R. Douglass, R.P. Turco, D.J. Wuebbles, M.K.M. Jo y A.L. Schmeltekopf, 1992: The atmospheric effects of stratospheric aircraft: A first program report. NASA Ref. Publ. 1272, pp233.
- Rood, R., A. Douglass, y C. Weaver, 1992: Tracer exchange between tropics and middle latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 19(8), 805-808.
- Simon, B., 1988: Umweltaspekte bei der Entwicklung von Flugtriebwerken. Vortragsmanuskript, Luftfahrt-Städtebau-Umwelt, Haus der Technik Essen, 6./7.12.88.
- Vaughan, G., 1988: Stratosphere-troposphere exchange of ozone. In: I.S.A. Isaksen (ed.), *Tropospheric Ozone*, D. Reidel Publ. Co., 125-135.
- Wuebbles, D. J. y D.E. Kinnison, 1990: Sensivity of stratospheric ozone to present and posible future aircraft emissions. In: U. Schumann (ed.): *Air Traffic and the Environment. Lect. Notes in Engrg.*, Vol 60, Spinger-V., Berlin, p. 107-123.

## **CONCLUSIONES FINALES**

- 1.- Las capas altas de la atmósfera tienen una gran influencia en el clima y en la vida de nuestro planeta.**
- 2.- La aviación es la principal fuente de contaminación antrópica de las capas altas de la atmósfera.**
- 3.- Las repercusiones de esta contaminación son cuantificables económicamente.**
- 4.- Los combustibles de aviación no deben estar exentos del pago de impuestos.**