

LOS FREONES Y LA ATMOSFERA

Carlos Gay

En este trabajo se tratarán de aclarar algunas dudas que han surgido con motivo de las informaciones aparecidas en los diarios y algunas revistas no especializadas sobre el problema del ozono estratosférico, los clorofluorocarbones (freones) y el efecto invernadero.

Sobre el problema del ozono y su posible destrucción por los productos de la fotólisis de los freones, en particular el cloro libre, ya nos hemos ocupado anteriormente¹. Sin embargo, y para tener presente lo que pasa resumiremos:

Los freones son sustancias que se utilizan en diversos procesos industriales y que tienen una gran importancia económica para los países que los producen. Entre sus usos encontramos la fabricación de latas atomizadoras en las que se usa como gas impulsor (desodorantes, latas de pintura, fijadores de pelo, etc.), también en la producción de espumas plásticas, en refrigeración y en la industria electrónica donde se emplea como solvente en la producción de semiconductores.

Ahora bien, cuando se desechan viejos refrigeradores o aparatos de refrigeración o se tiran a la basura los vasos de espumas plásticas, o se emplean las latas de spray; estos fluorocarbones son liberados en la atmósfera donde interaccionan tanto química como radiativamente.

Los freones vinieron a sustituir al amoníaco en los sistemas de refrigeración por ser este último mucho más peligroso para los humanos, y porque se suponía que estos gases eran inertes en la atmósfera, esto es, no reaccionarían con nada. Sin embargo, se ha encontrado que los freones liberados en la atmósfera baja (tropósfera, donde son inertes) son transportados a la atmósfera superior (estratósfera) debido al constante proceso de mezclado que ocurre por debajo de los 100 Km. de altura. El recorrido de los freones a la estratósfera puede tomar varios años, lo que significa que los freones que ahora se encuentran en la estratósfera fueron liberados hace muchos años.

Pues bien, cuando estas sustancias llegan a la estratósfera, la radiación solar rompe sus moléculas liberando átomos de cloro (Cl), que actúan sobre el

ozono a través de una serie de reacciones catalíticas en las que un solo átomo de cloro puede destruir hasta 100,000 moléculas de ozono. Es precisamente esta acción destructora del ozono la que convierte a los freones en sustancias de suma importancia para el hombre, pues como ya se ha dicho, el afectar la capa de ozono representa poner en peligro a la humanidad, ya que al disminuir su espesor, una mayor cantidad de radiación ultravioleta solar puede alcanzar la superficie y dañar al hombre y a los seres vivos. Es necesario repetir aquí que aunque la acción destructora del ozono por parte de los freones es un hecho real, no deja de ser un tema muy controvertido en el que los investigadores no se ponen de acuerdo con respecto a la inminencia del peligro que representa su presencia en la atmósfera.

Sin embargo, la aparición del agujero de la capa de ozono en la estratósfera de la Antártida, que se ha repetido año con año en octubre, desde 1980, ha causado gran preocupación, pues aparece como una indicación de que los procesos de destrucción del ozono son más eficientes de lo que se esperaba. Este hecho impulsó a las naciones del mundo a llegar a un acuerdo, en 1987, en el que se comprometen a controlar y eventualmente reducir la cantidad de clorofluorocarbones que se producen en el mundo.

La otra amenaza de los clorofluorocarbones.

A partir de la revolución industrial, a mediados del siglo pasado, el uso de combustibles fósiles ha ido en aumento constantemente, y como consecuencia de esto, la concentración de bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera ha aumentado. Asociado con este aumento se ha determinado que debido al efecto invernadero se ha producido un aumento global de temperatura del orden de 0.5 °C en el último siglo.^{2,3,4} Por su parte, el bióxido de carbono en la atmósfera, en el periodo 1880-1980 se ha incrementado de 280-300 ppm a 335-340 ppm (ppm = partes por millón).³

Efecto invernadero Modelo simple

Con el fin de comprender de qué se trata el efecto invernadero, es preciso señalar algunas característi-

cas que se observan en nuestro planeta. Por un lado observamos que aunque existen variaciones en la temperatura, cuando esta se promedia durante períodos de muchos años y sobre el planeta esta se mantiene prácticamente constante, en otras palabras, la temperatura no aumenta ni disminuye. Esto nos hace pensar que existe un balance entre la energía que se recibe y la energía que la Tierra emite al espacio. La Tierra, tal y como el resto de los planetas, recibe la inmensa mayoría de su energía del Sol y por lo tanto debe radiar al espacio una cantidad igual a la energía solar absorbida. El sol constantemente emite energía luminosa que se propaga por el medio interplanetario; esta energía medida por unidad de área y de tiempo representa el flujo de radiación que a su vez depende fuertemente de la distancia al Sol; así que la energía que la Tierra absorbe depende del cuadrado del inverso de la distancia Sol-Tierra.

Esto se puede comprobar fácilmente, A la distancia de la Tierra al Sol se le puede considerar como una fuente puntual, que emite su energía radialmente y hacia afuera. Consideremos la radiación que atraviesa una área L^2 a una cierta distancia r

Podemos suponer que los cuatro vértices del cuadrado L^2 pertenecen a una esfera de radio r , por lo tanto, si E es la energía que atraviesa L^2 , el flujo a la distancia r vendrá dado por:

$$F = \frac{E}{t \times L^2}$$

donde t es el tiempo en el que la energía, E , atraviesa un área L^2 .

Supongamos que los rayos que unen a S con los vértices del cuadrado L^2 se prolongan a una longitud de r' , donde determinan una nueva superficie de área L'^2 (nuevamente los vértices pertenecen a una esfera de radio r'). La energía que atraviesa esta superficie en la unidad de tiempo es la misma que atravesó la superficie L^2 pues la emisión de la fuente S es radial. Conociendo entonces la energía que atraviesa L'^2 en el tiempo t , podemos escribir para el flujo a la distancia r' lo siguiente:

$$F(r') = \frac{E}{t \times L'^2}$$

Observando la figura, es claro que los triángulos $sa'b$ y $sa'b'$ son semejantes por lo que podemos escribir:

$$\frac{L}{r} = \frac{L'}{r'}$$

$$L' = L(r/r');$$

sustituyendo esto último en la fórmula para el flujo a la distancia r' tenemos que:

$$F(r') = \frac{E}{t \times L^2} (r/r')^2$$

donde $\frac{E}{t \times L^2}$ es el flujo a la distancia r . Finalmente

$$F(r') = F(r) (r/r')^2$$

donde se muestra la dependencia del flujo, del inverso del cuadrado de la distancia, medida en unidades (r). Si consideramos que el flujo solar a la distancia media Sol-Tierra (r_0) es (F_0) entonces podemos escribir para el flujo que incide sobre la Tierra la siguiente fórmula:

$$F = F_0 (r_0/r)^2$$

donde r es la distancia verdadera Sol-Tierra, a esta distancia los rayos solares son aproximadamente paralelos y la Tierra ofrece un obstáculo a su propagación de un área igual a πa^2 donde a es el radio terrestre (el área πa^2 es la proyección de la esfera en el plano normal a la dirección de los rayos solares).

Por lo tanto la Tierra intercepta, por unidad de tiempo, una cantidad de energía dada por:

$$\pi a^2 F$$

o bien:

$$\pi a^2 F_0 (r_0/r)^2,$$

No toda la energía interceptada es absorbida por nuestro planeta, pues las nubes fundamentalmente, son capaces de reflejar parte de esta energía. A la cantidad que mide esta capacidad reflectora se le conoce como albedo planetario (A) que representa la fracción energía reflejada/energía incidente. Tomando en cuenta el albedo podemos entonces escribir para la energía absorbida por la Tierra la siguiente expresión:

$$(1 - A)\pi a^2 F$$

o:

$$(1 - A)\pi a^2 F_0 (r_0/r)^2,$$

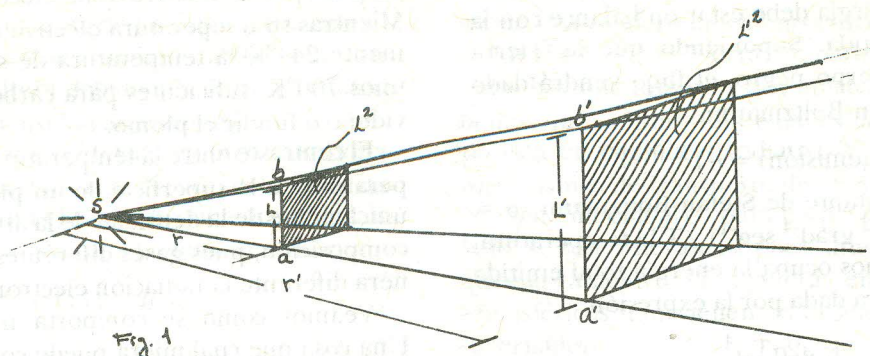


Fig. 1

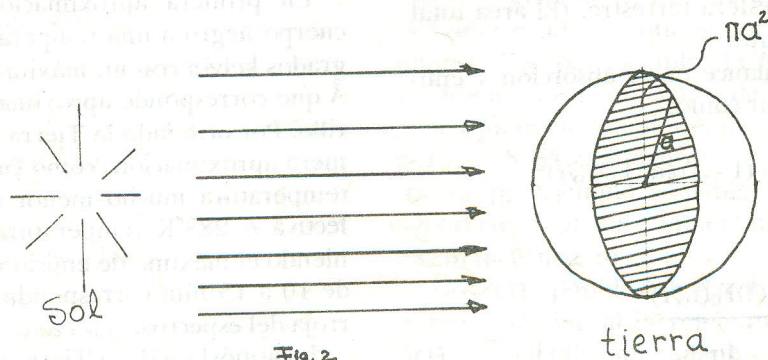


Fig. 2

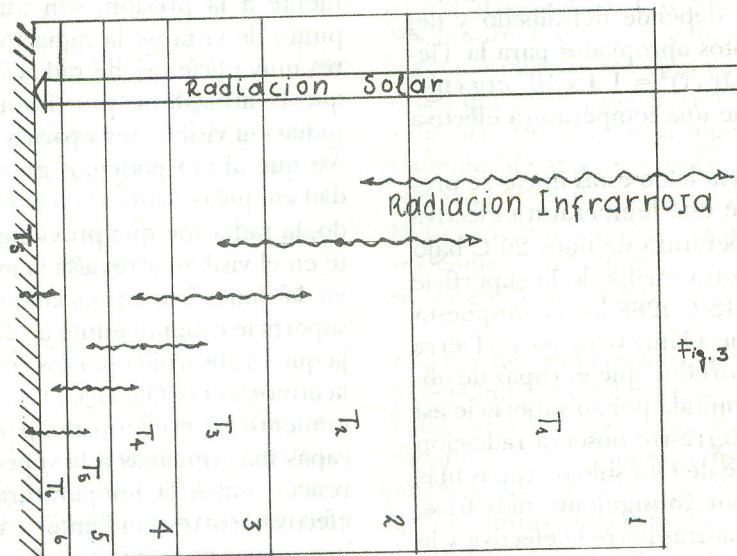


Fig. 3

que es simplemente la energía total incidente menos la energía reflejada. Como ya mencionamos anteriormente esta energía debe estar en balance con la energía total emitida. Suponiendo que la Tierra emite como un cuerpo negro, el flujo vendrá dado por la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$F(\text{emisión}) = \sigma T^4$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ grad}^{-4} \text{ seg}^{-1}$) y T la temperatura.

En el caso que nos ocupa la energía total emitida por la Tierra vendrá dada por la expresión:

$$4\pi a^2 \sigma T_{\text{ef}}^4$$

donde:

$$4\pi a^2$$

es la superficie de la esfera terrestre. (El área total de emisión es una esfera).

La condición de balance entre absorción y emisión la podemos escribir como:

$$4\pi a^2 \sigma T_{\text{ef}}^4 = (1 - A) \pi a^2 F_0 (r_0/r)^2$$

de donde:

$$T_{\text{ef}} = \frac{(1 - A) F_0 (r_0/r)^2}{4\sigma} \quad (1)$$

A la temperatura calculada de esta manera se le conoce como temperatura efectiva del planeta y que como vemos, solamente depende del albedo y del flujo solar. Utilizando datos apropiados para la Tierra: $r = 150 \times 10^6 \text{ km}$; $F_0 (r_0/r)^2 = 1.4 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ seg}^{-1}$ y $A = .33$ se obtiene una temperatura efectiva de 253°K .

Algún terrestre que haya leído estas líneas se preguntará qué sentido tiene esta temperatura efectiva que representa una temperatura de unos 20°C bajo cero, cuando la temperatura media de la superficie de la Tierra es de unos 15°C (288°K). La respuesta radica en el hecho de que planetas como la Tierra posee una atmósfera importante que es capaz de absorber energía radiante emitida por su superficie así que un observador extraterrestre observa radiación que no parte directamente de ésta sino de capas más altas de la atmósfera y por consiguiente más frías. Esta diferencia de temperaturas entre la efectiva y la de la superficie del planeta es una manifestación del efecto invernadero y un modelo matemático de éste (que podríamos considerar de "o" dimensiones) viene dado por la fórmula (1).

Para Venus que tiene una atmósfera mucho más pesada que la nuestra este efecto es más grande. Mientras su temperatura efectiva es de aproximadamente 244°K la temperatura de su superficie es de unos 700°K , suficientes para carbonizar el pavo navideño o fundir el plomo.

El contraste entre la temperatura efectiva y la temperatura de la superficie de un planeta no depende únicamente de la densidad de la atmósfera sino de su composición, pues gases diferentes absorben de manera diferente la radiación electromagnética.

Veamos como se comporta nuestra atmósfera. Una cosa que cualquiera puede comprobar es el hecho de que es prácticamente transparente a la radiación visible. De no ser así, no nos veríamos los unos a los otros.

En primera aproximación el Sol emite como cuerpo negro a una temperatura de unos 5 a 6 mil grados kelvin con un máximo alrededor de los 5000 Å que corresponde aproximadamente al color amarillo. Por otro lado la Tierra emite también (en primera aproximación) como cuerpo negro pero a una temperatura mucho menor (253°K temperatura efectiva ó 288°K temperatura de la superficie), teniendo el máximo de emisión en longitudes de onda de 10 a 15 mm correspondientes a la región infrarroja del espectro.

La atmósfera de la Tierra contiene pequeñas cantidades de CO_2 , bióxido de carbono; H_2O , agua y O_3 , ozono, que aunque contribuyen despreciablemente a la presión, son importantísimos desde el punto de vista de la radiación, pues son absorbedores muy eficientes de radiación infrarroja. Esto hace que la atmósfera, prácticamente transparente a la radiación visible, sea opaca a la radiación infrarroja. Así que ahora podemos entender con mayor facilidad en qué consiste el efecto invernadero. Por un lado, la radiación que proviene del Sol (principalmente en el visible) atraviesa la atmósfera y es absorbida en la superficie propiciando su calentamiento. La superficie caliente emite a su vez radiación infrarroja que es absorbida por los componentes menores de la atmósfera (CO_2 , H_2O , O_3), produciendo un calentamiento de ésta con temperaturas mayores en las capas más cercanas a la superficie. De aquí las diferencias entre la temperatura de la superficie y la efectiva, correspondiente a capas de la atmósfera más altas y por tanto más frías.

Un modelo más complicado para explicar el efecto invernadero

Siguiendo a Goody y Walker⁵ supongamos que dividimos la atmósfera en capas que son lo suficien-

temente gruesas para absorber toda la radiación que incide en ellas proveniente de las capas adyacentes.

Estas capas serán más grandes a medida que consideramos mayor altura debido a la correspondiente disminución de la densidad atmosférica.

La capa 1 es la más externa, y como mencionamos antes, la emisión hacia el espacio debe estar dada por la temperatura efectiva. Escribiendo el balance de radiación para esta capa podemos escribir:

$$\sigma T_1^4 \uparrow + \sigma T_1^4 \downarrow = \sigma T_2^4 \uparrow$$

de donde:

$$T_2^4 = 2T_1^4 = 2T_{ef}^4$$

y donde las flechas indican la dirección ($\uparrow$ hacia arriba, $\downarrow$ hacia abajo).

Para la capa 2 podemos escribir:

$$\sigma T_2^4 \uparrow + \sigma T_2^4 \downarrow = \sigma T_1^4 \downarrow + \sigma T_3^4 \uparrow$$

entonces:

$$\sigma T_3^4 = 2\sigma T_2^4 - \sigma T_1^4$$

y

$$T_3^4 = 3T_1^4 = 3T_{ef}^4$$

y así sucesivamente.

Para la superficie podemos escribir:

$$\sigma T_s^4 \uparrow = \sigma T_{ef}^4 + \sigma T_6^4$$

donde T_s es la temperatura de la superficie y $T_6^4 = 6T_{ef}^4$ entonces:

$$T_s^4 = (1 + \text{número de capas}) T_{ef}^4 \quad (2)$$

donde, en este caso número de capas es igual a 6.

Al número de capas lo podemos llamar el espesor óptico de la atmósfera. Así que para una atmósfera opaca T_s es mayor que T_{ef} .

Para el caso de la Tierra tenemos los siguientes datos: $T_{ef} = 253^\circ\text{K}$ y $T_s = 288^\circ\text{K}$.

$$\frac{T_s^4}{T_{ef}^4} = 1.7 = (1 + \text{espesor óptico})$$

de aquí vemos que de acuerdo al modelo descrito de equilibrio radiativo, la Tierra tendría un espesor óptico de .7. Para Venus con una temperatura superficial de 700°K y una temperatura efectiva de 244°K tenemos

$$\frac{T_s^4}{T_{ef}^4} = 68 = (1 + \text{espesor óptico})$$

de donde vemos que su espesor óptico es de 67; mu-

cho mayor que el de la Tierra y por lo tanto con un efecto invernadero mucho más pronunciado.

En el caso de la Tierra, en particular, estos resultados hay que tomarlos con mucha cautela; pues sabemos que la atmósfera baja, es decir la tropósfera, no está en equilibrio radiativo y que existen otros mecanismos de transporte de energía, como la convección. Sin embargo para los propósitos de este trabajo sí son relevantes pues muestran, aunque esquemáticamente, la manera en que los gases atmosféricos intervienen en el fenómeno del efecto invernadero.

Ya hemos mencionado que en la Tierra los gases que absorben la radiación infrarroja son el CO_2 , y el H_2O y el O_3 y son estos gases los que contribuyen al espesor óptico de la atmósfera, así que no es difícil imaginarse que un cambio en la concentración de uno de ellos, por ejemplo el CO_2 (o en los tres) que modifique el espesor óptico de la atmósfera pueda a su vez producir cambios en la temperatura de la superficie. Si la cantidad de bióxido de carbono aumenta, por ejemplo, al doble, la temperatura de la superficie también aumentará, magnificando el efecto invernadero.

Parecería posible calcular el aumento de la temperatura debido al incremento del CO_2 por medio de la fórmula (2), sin embargo, un aumento al doble de la concentración de CO_2 en la atmósfera no corresponde a un aumento igual de su espesor óptico y esto se debe, en parte, a que el CO_2 como otros gases, absorben selectivamente, es decir, solamente absorben radiación de cierta longitud de onda. Esto causa que en el caso de la Tierra por ejemplo, haya radiación emitida por la superficie que escape directamente al espacio; y es que existe una "ventana" centrada aproximadamente en las 10 mm en la que la atmósfera no absorbe. Como se vé, éste es un caso no contemplado por nuestro simplificado modelo del efecto invernadero.

Los freones y el efecto invernadero

Volviendo a nuestro tema central, que es el de los clorofluorocarbones y sus efectos sobre el planeta, y teniendo en cuenta nuestra discusión del efecto invernadero, podemos ver que éstos pueden afectar las temperaturas en la superficie por dos mecanismos.

El primero, y ciertamente menos importante, consistiría en lo siguiente: En la primera parte de este trabajo hemos mencionado como los freones son capaces de destruir el ozono estratosférico (produciendo una serie de efectos nocivos principalmente sobre los seres vivos). Esta destrucción causaría

que una mayor cantidad de radiación solar llegara a la superficie (al encontrar menos obstáculos en la atmósfera) y al haber una mayor absorción en ella, la temperatura aumentaría intensificando el efecto invernadero. Se ha demostrado que este mecanismo, aunque posible, causaría efectos despreciables pues los incrementos en la radiación solar incidente en la superficie serían extremadamente pequeños.

El segundo mecanismo y, sin duda el más alarmante involucra a los freones mismos, pues éstos poseen fuertes espectros de absorción en el infrarrojo. La presencia de los clorofluorocarbonos en la atmósfera representa un aumento del espesor óptico de la misma y por lo tanto una intensificación del efecto invernadero con el consiguiente aumento de la temperatura de superficie. Es este segundo mecanismo el que tiene, desde el punto de vista climático, preocupados a los científicos pues representa una grave amenaza para el planeta. El aumento de la temperatura de la superficie puede significar el aumento del deshielo en regiones polares con el consiguiente incremento en el nivel del mar y la posibilidad de inundaciones en islas y en las regiones continentales más bajas. También se pueden presentar intensificación de las áreas desérticas y desertificación de otras con posible disminución de áreas de cultivo, cambios en el régimen de vientos, en suma, un verdadero cataclismo climático de consecuencias desastrosas para los humanos.

Conclusiones

La presencia en la atmósfera de los clorofluorocarbonos producidos por el hombre nos plantea una doble amenaza. Por un lado cuando éstos son transportados a la estratósfera son capaces de destruir la

capa de ozono haciéndonos a los seres vivos más vulnerables a los nocivos efectos de la radiación ultravioleta.

Por otro lado, los freones son capaces de absorber radiación de onda larga "cerrando la ventana" atmosférica, y aumentar el espesor óptico de la atmósfera intensificando el efecto invernadero y por ende, poniéndonos en peligro de una catástrofe climática. Aquí habría que anotar que el aumento del CO₂, en principio, también representa un riesgo climático.

Finalmente habría que aclarar que la visión planteada en este trabajo es una simplificación de problemas en sí muy complejos y que, aunque en esencia es correcta, deja de lado muchos factores importantes (por ejemplo retroalimentaciones, positivas o negativas). Estos temas representan áreas de intensa investigación y gran controversia en la comunidad científica y han despertado el interés general. Espero que este trabajo sirva para dar una visión más precisa a aquellos que hayan sentido inquietud por lo que ha sido publicado en medios más generales de información.

Bibliografía

- 1 Gay C. 1986. El Ozono y sus crisis. *Geos* 6 No. 4 34-38
- 2 Goody R. M. y J. C. G. Walker 1975. *Las Atmósferas* Fundamentos de las Ciencias de la Tierra Omega. Barcelona.
- 3 Hansen J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind, G. Russell 1981. Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*. 213 Number 4571, 957-966.
- 4 Jones, P.d., T.M.L. Wigley and P. B. Wright, 1986. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature* 322,430-434.
- 5 Wigley T.M. L. and M. E. Schlesinger, 1985. Analytical solution for the effect of increasing CO on global mean temperature. *Nature* 314, 649-654.