

Excmo. Sr. Director,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras y señores.

Constituye para mí un alto honor y me produce una íntima satisfacción haber sido designado para pronunciar el discurso de apertura de esta Real Academia de Farmacia, para el que he escogido un Tema, la contaminación ambiental, que conozco no solo por la información bibliográfica, sino además por el ejercicio práctico del mismo al encargarme el Ayuntamiento de Madrid, en el año 1968, del montaje y dirección de un Servicio contra la Contaminación atmosférica. El tema me viene de antiguo y hace cerca de treinta años pronunciaba una conferencia en el Paraninfo de la entonces Universidad Central que se titulaba: "*el control de la contaminación atmosférica*". En ella se hacía hincapié en los efectos biológicos perjudiciales que los polulantes atmosféricos ejercen en los seres vivos, especialmente su incidencia en el cáncer de pulmón del ser humano, y en los deterioros que ocasiona y sobre todo en la vegetación, la denominada lluvia ácida.

A pesar de los tintes sombríos que ponía en mis palabras sólo conseguí arrancar del público unas sonrisas escépticas o indulgentes. Todavía no era en Madrid un problema acuciante el de la contaminación y con el habitual egoísmo humano no nos sentíamos afectados por los graves incidentes que citaba en la conferencia ocasionados por el *smog* londinense o por los humos sulfurosos de Donora, lugares que nos parecían muy distantes y con una problemática diferente a la de nuestro país.

Pero la contaminación atmosférica no tiene fronteras y no se pueden delimitar sus efectos en una zona más o menos restringida. Existen riesgos planetarios, a nivel mundial, en el tema de la contaminación que en la época de aquella conferencia, década de los sesenta, eran los isótopos radiactivos lanzados a la atmósfera en las pruebas nucleares.

Aunque el riesgo de contaminación por isótopos radiactivos subsiste y buen ejemplo de ello son los recientes accidentes en las centrales nucleares propias y ajenas, en especial la de Chernobyl, el final aparente de la guerra fría, y el desmantelamiento del material nuclear que conlleva, elimina en buena medida estos temores. Sin embargo, surgen otros nuevos, signo fatídico de la condición humana, y entre ellos los cambios climatológicos que hemos

sufrido este mismo año. Parecía como si hubiésemos invertido el mapa de España. Sequía en el Norte con severas restricciones de agua, hasta entonces inconcebibles, y por el contrario, inundaciones en el Sur. Fenómenos climatológicos anormales se han producido también este año en diversos lugares del mundo, tales como huracanes tropicales en Centroeuropa y calores por encima de los valores habituales.

El temor que estos fenómenos provocan, ante la imposibilidad física de poder dominarlos, ha tomado conciencia en la sociedad y como consecuencia de ello también en los poderes públicos, especialmente de los países más desarrollados, ante la presión de sociedades sensibilizadas y atemorizadas por el problema de la contaminación. De alguna manera estamos reviviendo al finalizar este milenio los temores experimentados por la humanidad al finalizar el primero. La diferencia estriba en que los actuales se basan en causas racionales, en datos objetivos logrados, tras muchos esfuerzos, por los numerosos científicos de distintos países que alzan su voz acusando los riesgos de la contaminación y, confiamos no sea la voz que clama en el desierto.

Es verdad que los poderes públicos de casi todos los países, al menos los occidentales, han reaccionado de acuerdo con sus posibilidades ante el reto de la contaminación, patrocinando investigaciones y dictando disposiciones legales, en algunos países muy rigurosas, tendentes a reducir los riesgos, pero el problema es muy complejo. Esa misma sociedad atemorizada y exigente no quiere prescindir de las ventajas y comodidades que proporcionan las actividades contaminantes. Evitar el riesgo de destrucción de la capa de ozono exigiría la supresión radical en la fabricación de freones y halones, lo que significa en el momento actual y hasta que se encuentren sustitutos adecuados, el fin de los frigoríficos caseros, último eslabón de la cadena alimentaria del frío, de el aire acondicionado, de extintores de incendios, y de otras comodidades de menor cuantía como los sprays. Peor es aún evitar el efecto invernadero provocado por el dióxido de carbono que exigiría una reducción drástica de todas las combustiones, coches y calefacciones incluidos. El impacto social que originaría el cierre de muchas industrias o las dificultades de índole económica para reducir el efecto contaminante de otras, es otro factor importante a considerar. No se puede atribuir el problema de la contaminación por lo menos en el momento actual a un desarrollismo salvaje, sin limitaciones de ninguna índole, como demagógicamente se ha querido hacer ver, pues entre otras causas surge de la propia actividad humana y, del simple crecimiento demográfico.

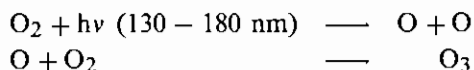
Afortunadamente, la situación en estos momentos presenta unos tintes más optimistas, al tomar conciencia las naciones que el problema es global y las soluciones también, al mismo tiempo que se produce un acercamiento de posiciones, colaborando conjuntamente poderes públicos, grupos ecologistas, científicos puros y aplicados, con asociaciones de industriales y fabricantes de productos que contaminan fuertemente, como los freones. Un buen ejemplo de lo que acabamos de decir, lo veremos al describir las acciones emprendidas para evitar la destrucción de la capa de ozono.

El tema verdaderamente preocupante de la contaminación, es la respuesta a estas dos preguntas: ¿Hemos contaminado la atmósfera a un nivel tal que sus efectos climatológicos y biológicos sean irreversibles y se vayan manifestando paulatinamente en los próximos años?. ¿Tiene aún posibilidades la Naturaleza de contrarrestar la contaminación generada mediante sus mecanismos de autodepuración?.

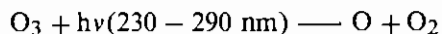
En estos momentos no se puede dar respuestas contundentes a ambas preguntas apoyándose en datos científicos irrefutables, lo que puede originar un pesimismo y temor infundado o por el contrario, una indiferencia irresponsable. Por ello y para evitar las especulaciones, que se desarrollan en torno a estos temas paso a describir la situación actual de algunos de los efectos creados por la contaminación y de los estudios que se realizan para su mejor conocimiento, escogiendo los cuatro temas en mi opinión más importantes: la destrucción de la capa de ozono, el efecto invernadero, las lluvias ácidas, y el aire urbano.

I. LA CAPA DE OZONO ATMOSFERICA

Situada en la estratosfera entre 11-25 Km, con máximo a los 20 Km de altitud, existe una capa de ozono formada por acción de la radiación ultravioleta de 130-180nm, la cual provoca la fotodisociación de las moléculas de oxígeno a átomos de oxígeno, especie inestable que se combina con otra molécula de dióxigeno produciendo la especie triatómica, O₃:



Esta capa de ozono que permanece estratificada por no existir en la estratosfera movimientos ascensionales de aire, al aumentar su temperatura con la altitud, evita que penetre en la troposfera radiación muy energética, ya que absorbe los rayos ultravioleta de longitud 230-290 nm. Estos a su vez, provocan la fotodisociación de la molécula de O₃ por un proceso inverso al anterior:



Se establece, por tanto, un equilibrio dinámico entre formación y disociación de la molécula de O₃, fenómenos ambos provocados por la luz ultravioleta que llega a la estratosfera. La disminución del espesor de la capa protectora de ozono, atribuible a ciertos contaminantes gaseosos, daría lugar a una mayor penetración de radiación ultravioleta a la biosfera con efectos biológicos y climáticos perjudiciales. Estos últimos, serían un aumento de la temperatura terrestre con la consiguiente fusión de los casquetes polares y ascenso de las aguas marinas. Sin necesidad de acudir a esta imagen catastrófica, es un hecho indudable que la radiación ultravioleta a 230-300 nm

puede producir cáncer de piel y daños en la vista, al igual que sucede con las exposiciones solares excesivamente prolongadas, a lo que se añade sus efectos nocivos sobre la vegetación y el plancton.

Por otra parte, el ozono se origina en la troposfera como consecuencia de las actividades humanas y especialmente con la circulación rodada si va acompañada de fuerte insolación, constituyendo el denominado "smog oxidante" o fotoquímico, típico de la ciudad de Los Angeles, que además de contribuir al efecto invernadero provoca daños muy ostensibles en la vegetación y en algunos materiales, como por ejemplo el caucho. En el ser humano y a partir de un umbral de 0.3 ppm produce irritación en la nariz, garganta y cataratas en los ojos.

La contaminación atmosférica puede producir dos efectos contrarios y perjudiciales ambos: la destrucción de la capa protectora de ozono estratosférico, permitiendo con ello el paso de radiación ultravioleta y, producción de ozono en la troposfera que origina lesiones cutáneas y oculares, además de efecto invernadero.

La preocupación por la capa de ozono estratosférica no es un hecho reciente, aunque se haya exacerbado dramáticamente a partir de 1984, cuando se anunció la formación del agujero de ozono en La Antártida. Ya en el año 1924, Dobson ideó un espectrofotómetro que permite la medida desde tierra del ozono estratosférico, expresando los resultados en unidades Dobson (una unidad Dobson corresponde a una capa de espesor de 0.01mm de ozono a presión y temperatura normales). Los primeros datos fueron desalentadores. No se conseguían resultados concordantes ni siquiera de un día para otro. Como es lógico, se pensó que el espectrofotómetro era defectuoso y siguió un tiempo prolongado de rectificaciones en el aparato, al mismo tiempo que se ampliaban las estaciones de medida. Instalada la primera en Oxford, residencia de Dobson, en el momento actual se han montado 67 estaciones dotadas de espectrofotómetros Dobson repartidos por todo el planeta, aunque con distribución desigual predominando los del Hemisferio Norte.

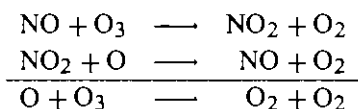
Los resultados obtenidos ya no dejan lugar a dudas. El contenido en ozono estratosférico experimenta variaciones, que pueden llegar hasta un 30% de un día al siguiente, de diversa índole. En primer lugar estacionales, con un máximo en primavera y mínimo en otoño. Se atribuye esta oscilación al régimen de vientos estratosféricos que se hacen más intensos al finalizar el invierno y comenzar la primavera. Sucede lo mismo al comparar latitudes diferentes, ya que estos vientos transportan el ozono producido en las zonas tropicales, en los que alcanza su máximo valor, por ser más intensa la radiación solar, hacia las regiones de latitudes medias y altas. Al final de la primavera, disminuyen la intensidad de los vientos y en consecuencia también el contenido de ozono. La fluctuación es muy importante en el hemisferio norte, llegando a obtenerse valores de ozono en primavera que son prácticamente el doble de las del otoño. Finalmente, la altitud es otro factor importante a considerar. El total de ozono terrestre se distribuye por altitudes, aproximadamente de la siguiente manera: 10% con altitudes de 0

a 12 Km, 80% entre 10 y 35% Km y otro 10% al sobrepasar los 30 Km de altitud. El máximo contenido en ozono corresponde a la capa situada a 22 Km de altitud.

A la vista de estos resultados, se comprende las grandes dificultades con que se tropiezan cuando se quiere valorar el efecto de la contaminación atmosférica sobre la capa planetaria de ozono. Esto ha exigido un esfuerzo intenso en las mediciones, ampliando el campo de acción de la primitiva determinación del contenido de ozono desde tierra, mediante el espectrofotómetro Dobson, con el inconveniente de requerir días de cielo despejado, hasta la determinación "*in situ*" atravesando la capa de ozono mediante globos provistos del aparato que pueden alcanzar altitudes de 30-40 Km. En la actualidad se transmiten los datos desde el globo por señales de radio, en lugar de la clásica placa fotográfica usada en un comienzo. Para el estudio del agujero de ozono antártico se han usado aviones supersónicos y un satélite, el NIMBUS-7 provisto de un espectrómetro diferente.

I.1. Gases contaminantes que destruyen el ozono.

La historia de la destrucción del ozono por gases contaminantes, comienza con el avión supersónico Concorde de fabricación anglo-francesa. Diversos investigadores, norteamericanos, por supuesto (1), elevaban su voz insistiendo en los peligros que para la capa de ozono podían resultar del recorrido a través de ella de un avión que lanzaba óxidos de nitrógeno, producidos en el motor de explosión por reacción entre el nitrógeno y oxígeno atmosféricos. Se pueden formular reacciones catalíticas en las que interviene cíclicamente el monóxido de nitrógeno, molécula paramagnética muy reactiva, que al reaccionar con el ozono lo destruye transformándolo en la molécula de dióxígeno, mientras él pasa a NO₂. La reacción de este último con el oxígeno atómico regenera el monóxido de nitrógeno, que puede volver a iniciar el ciclo destructor:



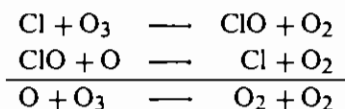
Para estudiar el efecto de los vapores nitrosos sobre la capa de ozono, se creó un Programa de valoración del impacto climático (CIAP) en Norteamérica y, comités en Inglaterra y Francia. Los resultados fueron concluyentes. No se puede achacar a los vapores nitrosos una acción destructora del ozono en la estratosfera y menos aún a la altitud que volaban los Concorde.

Es más, los trabajos de Liu (2) demostraron, al utilizar modelos de previsión en determinadas condiciones de altitud, que los óxidos de nitrógeno pueden incluso contribuir a la formación de ozono. Posteriormente, se ha comprobado de una manera incuestionable la no participación de los óxidos

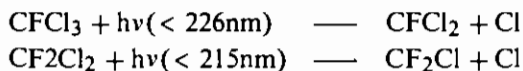
de nitrógeno en la destrucción de la capa de ozono. En el agujero de ozono de la Antártida se han determinado las concentraciones en óxidos de nitrógeno y resultan valores inferiores a los de cualquier otra región del planeta.

Desechados los temores a los aviones supersónicos, al quedar el Concorde reducido a muy pocas unidades, y dejar de fabricar el Tupolev 144 ruso y el Boeing 707 norteamericano y desechada también la hipótesis de la acción destructora de los óxidos de nitrógeno, se inicia la búsqueda de otros posibles gases contaminantes a los que se pudiera atribuir la disminución de la capa de ozono que se apreciaba en las medidas de los espectrofotómetros Dobson.

En un primer trabajo de Stolarsky y Cicerone(3), en el año 1974, se demuestra la acción destructora que ejerce el cloro sobre la capa de ozono, pero como solo se consideraba el cloro generado en la combustión de cohetes espaciales no se le dio excesiva importancia. Pero ya en el mismo año Molina y col. (4), de la Universidad de California, publican un trabajo en la revista Nature que causa un dramático revuelo. Los freones, de múltiples aplicaciones y entre ellas frigoríficos, acondicionadores de aire, y cuya producción en aquellos años era de casi mil millones de toneladas, no eran tan inertes como se había pensado en principio. Su supuesta inocuidad se basaba en que pueden permanecer inalterados en la atmósfera durante mucho tiempo, que para algún tipo de freón, supera los cien años y, en su nula acción biológica. En el trabajo de Molina, se demuestra que al incidir sobre los freones radiación ultravioleta, se fotolizan, desprendiendo cloro atómico, el cual puede participar en un ciclo catalítico de destrucción del ozono, pues al reaccionar ambos, se produce el radical monóxido de cloro, que a su vez reacciona con oxígeno atómico, generando átomos de cloro que vuelven a comenzar el ciclo:



Para que su produzca este efecto destructor, es necesario que los freones asciendan a la estratosfera, en la cual pueden recibir la radiación ultravioleta de corta longitud de onda, necesaria para su fotodisociación. Considerando los dos freones más usados, el freón 11, triclorofluorometano y el 12 diclorodifluorometano, el primero requiere radiación de longitud de onda inferior a 226 nm y el segundo menor que 215 nm, sólo posibles a elevadas altitudes por encima de la capa de ozono:



El interés que suscita este trabajo es extraordinario, habida cuenta el volumen de la producción industrial de los freones y sus importantes aplicaciones, lo que ocasiona el lanzamiento a la atmósfera de cantidades muy importantes de estos productos, supuestamente destructores del ozono. El

aspecto más visible de la contaminación atmosférica de los freones lo constituyen los spray. Y cuatro años más tarde, en 1978, se prohibían en Estados Unidos su uso como propelentes. Con ello no se soluciona el problema, pues se sigue lanzando a la atmósfera cantidades muy elevadas de freones en su uso como refrigerantes, no sólo por fugas sino además porque no se reciclan, y para este caso no se puede hacer lo mismo que con los sprays, mientras no se encuentren sustitutos adecuados. El propio Molina calculaba, que de seguir la emisión de freones a la atmósfera al mismo ritmo, se produciría un descenso del contenido en ozono estratosférico del 7 al 13% en un período de 100 años. La realidad es que el ritmo de emisión de clorofluorocarbonos no ha disminuido, sino que, por el contrario, ha aumentado.

La teoría de Molina, exigía un ascenso a la estratosfera de los freones, lo que al principio no parecía muy posible, pero que ya ha sido confirmado aunque su mecanismo no está exactamente esclarecido. A este respecto, hay que tener en cuenta en primer lugar, que los freones no son arrastrados por el agua de lluvia y, que podían ascender a la estratosfera aprovechando los movimientos ascendentes de aire que se producen en la tropopausa ecuatorial. El ascenso es muy lento y se ha calculado en aproximadamente 12 años.

Otros gases a los que se responsabiliza como destructores de la capa de ozono son los halones, compuestos semejantes a los freones pero con bromo en vez de cloro, de los cuales destaca el halon 1301, monobromotrifluorometano CF_3Br , cuya vida media en la troposfera es de 101 años y, tiene una capacidad de destrucción del O_3 , diez veces superior a la del CFC11 ó CFC12 .

Estos compuestos, se usan en extintores de incendios y análogamente a los freones se fotodisocian por acción de la luz ultravioleta, liberando bromo atómico, que interviene en un ciclo catalítico de reacción con el ozono.

1.2. El agujero de ozono de la Antártida.(3)

En el año 1956, se había instalado en la base inglesa de Halley Bay en la Antártida un espectrofotómetro Dobson, y poco después, en 1961, otro en la base norteamericana Admunsen Scott, al que siguió el tercero en la base japonesa de Syowa (1961).

Las medidas del contenido de ozono resultaban, desconcertantes apreciándose unas variaciones estacionales muy elevadas, con mínimos en septiembre-octubre, y máximos en noviembre. Otra vez se piensa en el mal funcionamiento de los aparatos, pero como sistemáticamente se produce el mismo efecto todos los años, se acabó por aceptarlos, aunque sin consecuencias publicitarias. Años más tarde, en un Congreso sobre el ozono celebrado en Salónica en 1984, el japonés Sigeru Chubachi da cuenta de las mediciones de ozono efectuadas en la base de Syowa con los resultados indicados, es decir, con valores de ozono muy bajos en los meses de septiembre-octubre al finalizar el invierno polar y comenzar la primavera. También esta noticia, co-

mo las anteriores queda circunscrita al ámbito de científicos especializados. Pero al publicar un año más tarde (1985), Farman y colaboradores las mediciones de ozono efectuadas desde 1956 en la base inglesa de Halley-Bay, con unas pérdidas considerables de ozono en la primavera polar, la noticia llega al gran público creando revuelo y temor. La causa puede ser debida a que el trabajo se publicó en una revista (*Nature*), de gran prestigio y difusión o al término desafortunado de "*agujero de ozono*", con que ha sido designado y que causó mucho impacto, ya que fuera de los ámbitos científicos se asocia a una ventana abierta en la capa de ozono, por la que puede salir la radiación ultravioleta y penetrar en la biosfera. En realidad, la palabra agujero procede de que los mapas de distribución del ozono antártico se representan en colores, correspondiendo a los valores mínimos un color muy oscuro y a los máximos claros. Como las zonas de máximo contenido en ozono (color claro), forman una especie de anillo rodeando a la zona de mínima concentración en ozono (color oscuro), esta da efectivamente la impresión de un agujero, lo cual no significa que no exista ozono en esa zona. El valor más bajo registrado en el agujero fue en 1987, con una pérdida del 60% del valor normal, descendiendo desde 300 unidades Dobson a 120.

A partir del año 1984 los acontecimientos se desarrollan con velocidad vertiginosa y, con un despliegue de medios materiales fabulosos. Liderados por Estados Unidos, con la colaboración de la mayor parte de los países occidentales fabricantes de freones, que aceptan su responsabilidad en el posible desastre ecológico, se promueven estudios que se llevan por dos caminos: uno de ellos las investigaciones en centros públicos, especialmente universidades, por grupos de investigadores pertenecientes a la línea modelista o experimentalista. El otro, las determinaciones "*in situ*" del contenido en ozono y de los gases que intervienen en sus reacciones de degradación, mediante expediciones a la Antártida, que se realizan partiendo de Punta Arenas en Chile o de la base de Mc Murdo en el propio continente antártico.

Para las expediciones antárticas, patrocinadas por la NASA, se utilizan un avión ER-2, antiguo avión espía U-2, debidamente equipado, que puede ascender a 20 Km de altitud en pleno centro de la capa de ozono estratosférico, un DC-8 el cual sólo podía ascender a 10 Km quedándose por debajo de la capa de ozono, y un satélite, el NIMBUS-7, que gira en su órbita muy por encima de la capa de ozono, equipado, entre otros instrumentos, con un espectrofotómetro TOMS (Total Ozone Mapping System). Con este espectrofotómetro de características muy distintas al de Dobson, se establecieron mapas de concentración del ozono antártico, en el que se aprecia una gran zona de color oscuro, de superficie casi igual a la de los Estados Unidos, que se ha popularizado con el nombre de agujero de ozono, y en la que el contenido en ozono adquiere valores muy bajos (120-150 unidades Dobson) en septiembre y recupera su valor normal en noviembre. La cuantía en la que se produce este proceso varía anualmente, correspondiendo el mínimo al año 1987, y aunque en el año 1989 se esperaba un buen resultado, también ha sido muy importante el descenso de ozono en la primavera antártica.

Los instrumentos instalados en los aviones y satélites, han permitido realizar determinaciones de monóxidos de cloro y bromo, óxidos de nitrógeno, nitratos de cloro, dióxido de cloro, ácidos nítrico y clorhídrico, vapor de agua y aerosoles, compuestos que pueden intervenir en las reacciones de destrucción del ozono, de acuerdo con las hipótesis formuladas. Además llevaban incorporados instrumentos para medidas físicas que afectan a la climatología como temperaturas, vientos, etc. Datos que son necesarios para la realización de los modelos.

Dentro de estas expediciones, resalta por la importancia de los resultados obtenidos la NOZE (US National Ozone Expedition) que partió de la base de Mc Murdo, patrocinada por la NASA, la National Science Foundation, NOAA (Natural Oceanic and Atmospheric Administration) y la Chemical Manufacturers Association.

Otra expedición muy importante, que proporcionó datos decisivos para comprender el mecanismo de la degradación del ozono, partió en 1987 de Punta Arenas (Chile), penetrando el avión ER-2 en pleno agujero del ozono entre 12 y 20 Km de altitud, precisamente en el año que éste acusó el valor mínimo de los últimos años. Al atravesar la capa en septiembre, se detectó un descenso de ozono de hasta el 50%, mientras se acusaba un aumento de trece veces en el contenido de monóxido de cloro, con aumento muy apreciable de aerosoles. Por el contrario, en las zonas con máximo contenido en ozono que rodean el agujero, disminuye el contenido en monóxido de cloro. Estos resultados confirman la teoría de Molina, según la cual la fotólisis por la luz ultravioleta de los freones libera Cloro atómico que al reaccionar con el ozono forma monóxido de cloro y oxígeno molecular.

Pero nada hay sencillo en esta vida y menos aún en un tema como el del ozono, en el que gravitan a su alrededor intereses económicos y sociales formidables, presión de los grupos ecologistas de indudable peso político en algunos países occidentales industrializados, la tenacidad defensiva de los fabricantes y, entre medias los científicos tratando de poner orden en esa barahunda de intereses contrapuestos, lo que no consiguen del todo, porque la complejidad química y física del problema dificulta el poder obtener datos irrefutables.

No es de extrañar, por lo tanto, que surjan varias teorías para explicar el agujero de ozono en la Antártida. Una de ellas, el ciclo de actividad solar se atribuye a causas naturales, postura muy favorable para los fabricantes de freones, otra por el contrario, la teoría química defendida por Molina, señala implacablemente a los freones como responsables del desastre ecológico y, como no podía ser menos la denominada teoría dinámica, ocupa el centro de ambas teorías y atribuye el agujero de ozono a causas químicas y naturales a la vez.

La teoría del ciclo solar se formula en 1986 y, atribuye la pérdida de ozono a un aumento de la actividad solar durante el ciclo que suele ser de once años. Esta teoría parece en principio razonable, puesto que desde hace muchos años se vienen vertiendo freones a la atmósfera y, los espectrofotómetros

de Dobson instalados, también desde hace al menos 50 años no acusaban el agujero de ozono, que se hace público en 1984. Es más, desde 1978 estaba situado en órbita antártica el satélite NIMBUS-7 con un espectrofotómetro TOMS y este nunca dio aviso de la formación del agujero de ozono. Al revisar las causas de este hecho, se han encontrado con que los ordenadores instalados en tierra que recogían los datos del contenido en ozono, emitidos por el satélite, estaban preparados para rechazar valores considerados anómalos por ser excesivamente altos o bajos. Por otra parte, el denominado Centro Mundial de datos del ozono, que recoge los datos procedentes de los distintos observatorios, había registrado efectivamente valores muy bajos de ozono, pero no se les había dado excesiva importancia o al menos, no se les daba publicidad, quedando la información en el ámbito restringido de los especialistas.

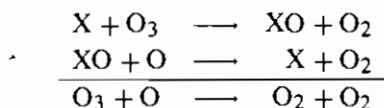
Según la teoría del ciclo solar, la estratosfera antártica recibe radiaciones solares muy activas durante el período de duración del mismo, lo que provoca la formación de óxido de nitrógeno activo (NO) que inicia el ciclo de degradación del ozono. Se argumenta que el último ciclo solar, desde 1975 a 1986 que ha sido uno de los más intensos de los últimos 18 ciclos, coincide con el descubrimiento del agujero de ozono.

En el momento actual, la teoría del ciclo solar parece definitivamente descartada, ya que todos los datos recogidos demuestran que en el agujero de ozono antártico, la concentración de óxido de nitrógeno es menor que la registrada en cualquier otra zona de la atmósfera.

La teoría dinámica es la que actualmente cuenta con más aceptación (7). Se admite en ella la validez de la teoría química de Molina(9), pero al mismo tiempo se considera que por sí no puede explicar satisfactoriamente los hechos observados y formula por ello, la hipótesis de la intervención simultánea de factores climáticos, junto a los químicos y, entre ellos muy especialmente los cambios en la circulación atmosférica. Los mapas espectrofotométricos del agujero de ozono hacen ver que este, presenta una forma variable y experimenta desplazamientos en períodos breves de tiempo. Se observa también que el agujero gira alrededor del Polo Sur separándose de él para volver a su posición original, en el espacio de una semana.

I.3. Reacciones químicas que provocan la destrucción del ozono.

Las primeras reacciones formuladas para explicar la destrucción del ozono se pueden discutir de una manera simple mediante un ciclo en el que un radical X reacciona con la molécula de O_3 dando lugar a la molécula de dióxigeno y a un compuesto XO, el cual al reaccionar posteriormente con oxígeno atómico forma O_2 y regenera el radical X que vuelve a iniciar el ciclo.

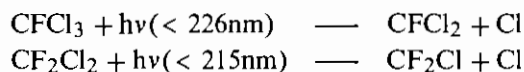


El radical X, puede ser Cloro o Bromo atómico, procedentes de la fotodisociación de freones o halones, radical OH formado por fotodisociación del vapor de agua o del metano, y NO.

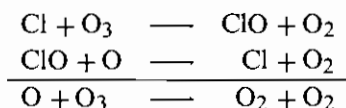
Se han formulado muchas hipótesis acerca de las reacciones de destrucción del ozono, que se aceptan o desechan de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en la detección de los reactantes o productos de la reacción. En caso afirmativo, las supuestas reacciones se comprueban en el laboratorio, estudiando su mecanismo y características cinéticas. Al mismo tiempo se estudian modelos, introduciendo todas las variables que permiten predecir la importancia relativa de cada reacción en la destrucción del ozono, observada y cuantificada en el agujero antártico.

El trabajo ha sido exhaustivo, y ha permitido obtener un conocimiento bastante completo de la físico química estratosférica, de la que hasta hace pocos años se desconocía casi todo. Sin embargo, los resultados no son aún concluyentes, pues, no es fácil repetir en el laboratorio las condiciones que reinan en la estratosfera de la Antártida, ni introducir en el ordenador todas las variables a tener en cuenta en el modelo. En cualquier caso, hay datos suficientes como para acusar a los freones de su participación en el deterioro del ozono y limitar su fabricación y uso, como ya se está haciendo en la mayor parte de los países occidentales.

La primitiva teoría química de Molina, comienza con el proceso de fotodisociación de los freones por acción de la luz ultravioleta de corta longitud de onda, liberando cloro atómico:



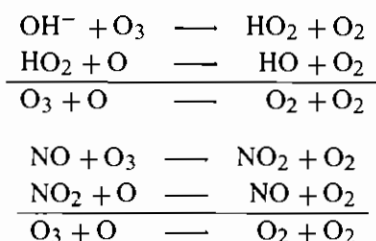
El cloro atómico reaccionaría directamente con el ozono, produciendo monóxido de cloro, el cual a su vez reacciona con oxígeno atómico, dando lugar a O₂ y cloro atómico que vuelve a iniciar el proceso, estableciéndose de esta manera un ciclo catalítico:



Como comprobación experimental de esta hipótesis, se han podido detectar cantidades muy significativas de monóxido de cloro en el agujero antártico. A 18 Km de altitud, se han encontrado concentraciones de ClO de 1ppb, cantidad que es unas dos veces superior al nivel que existe en otras zonas templadas. Contra esta teoría, se encuentra los resultados de algunos

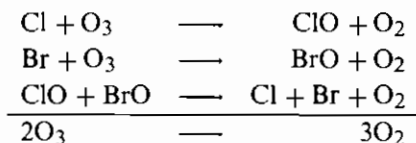
modelistas que atribuyen a esta reacción una capacidad de destrucción del ozono inferior a la observada, especialmente en no muy altas altitudes (15-20 km), en los cuales la actividad fotoquímica es menor y la concentración en oxígeno atómico es escasa. Pero además, cuando se produce el agujero de ozono en la Antártida (Septiembre-Octubre), la luz solar no es suficiente para provocar estos fenómenos de fotólisis. Sin embargo, no puede descartarse del todo esta reacción, ya que puede intervenir en la destrucción de la capa de ozono a altas latitudes.

Se han propuesto otras dos reacciones semejantes, con radicales hidroxilo e hidropéroxido, o con especies activas de nitrógeno:

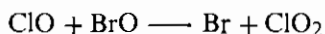


En ambos casos, el problema es análogo al anterior, ya que se requiere la presencia de oxígeno atómico, y no se consideran por ello muy significativas en la formación del agujero antártico.

Se han formulado otras posibles reacciones, en las cuales no intervienen el oxígeno atómico y entre ellas una en la que participan átomos de cloro y bromo(6), procedentes de fotodisociación de freones y halones respectivamente, con formación de monóxido de cloro y de bromo, que reaccionan entre sí regenerando cloro y bromo atómicos, que vuelven a iniciar el ciclo.



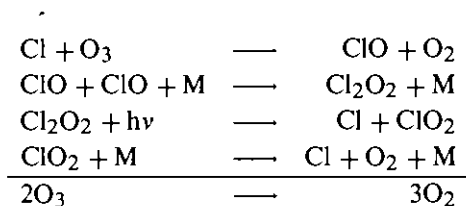
La reacción entre los monóxidos de cloro y bromo puede dar lugar por un camino alternativo, a la formación de dióxido de cloro:



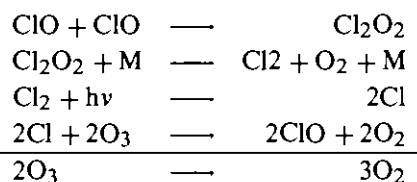
Tanto el monóxido de bromo como el de cloro han sido detectados en las expediciones antárticas, si bien la cantidad de BrO encontrado es demasiado baja como para pensar que esta reacción pueda ser importante en la formación del agujero de ozono.

La reacción, que en estos momentos parece más significativa para explicar la destrucción del ozono, se inicia como en las anteriores por reacción directa de un átomo de Cl con la molécula de ozono, y el monóxido de cloro formado da lugar a la formación de un dímero, que por fotólisis regenera

cloro atómico para iniciar un nuevo ciclo y, al mismo tiempo dióxido de cloro:

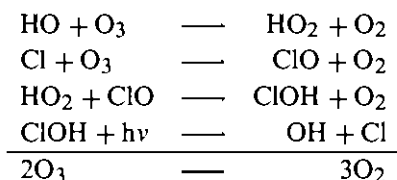


El dímero de monóxido de cloro puede actuar en la destrucción del ozono por un camino alternativo, en el que también interacciona la molécula de O_3 con el cloro atómico, pero presenta la novedad de proceder éste de la fotodisociación de la molécula de cloro, que se forma en el curso de la reacción:



En todas las reacciones reseñadas se requiere la presencia de cloro atómico, que reacciona directamente con la molécula de O_3 , y el tema preocupante es que este cloro actúa como catalizador en una reacción en cadena, lo que significa que pequeñas cantidades de él pueden ejercer un gran efecto destructor de la capa de ozono. Se calcula que un átomo de cloro puede destruir cien mil moléculas de ozono. Si a su vez, se tiene en cuenta las grandes cantidades de freones que se siguen lanzando a la atmósfera y la vida media de éstos, calculada para algunos en más de cien años, la alarma de los grupos ecologistas está totalmente justificada así como las medidas restrictivas impuestas en varios países al uso de los freones.

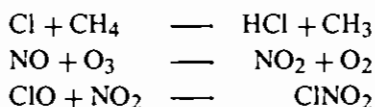
Como alternativa a las reacciones químicas que requieren la presencia de cloro o bromo atómicos, se han formulado otras que exculparían a los freones. Una con óxidos de nitrógeno ya comentada y, otra con radicales OH, procedentes de la fotodisociación del agua o del metano:



Al no haberse podido detectar la presencia de radicales hidroxilo o hidroperóxidos en el agujero de ozono, se han desechado, igual que la de los óxidos

de nitrógeno y, queda como único culpable el cloro atómico procedente de freones y halones fundamentalmente.

Sin embargo, se presenta algún problema para aceptar totalmente, sin reticencias, las teorías basadas en la interacción del cloro atómico con la molécula de ozono, por la simple razón de que el cloro atómico liberado en la fotodisociación de los freones se estabiliza en la atmósfera, formando ácido clorhídrico o nitrato de cloro, por reacción con metano o con el dióxido de nitrógeno en virtud de las siguientes reacciones:



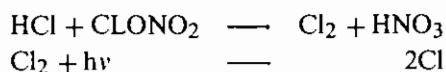
El ácido clorhídrico y el nitrato de cloro constituyen los reservorios de cloro en la estratosfera y, no reaccionan directamente con la molécula de ozono. Es necesario un proceso previo, que transforme estas formas inactivas de cloro en la forma activa. Por ello, hay que tener en cuenta otros factores que expliquen lo que sucede en el agujero antártico, que se ha utilizado como un laboratorio natural en el que se estudia "in situ" la acción destructora del ozono, pero en las condiciones especiales que reinan en aquel continente, que son muy peculiares. La físico química estratosférica antártica tiene una limitada extrapolación a otras zonas del planeta.

1.4. Factores que influyen en la formación del agujero de ozono.

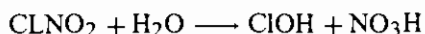
El agujero de ozono de la Antártida es único, como también son únicas las condiciones climatológicas que reinan en aquel continente. La peculiaridad climatológica de la Antártida reside en el denominado "vórtice polar". Consiste éste en una corriente circulante de aire, con velocidades de los vientos de hasta 400 km/h, que rodea prácticamente a todo el continente, encerrando en su interior una inmensa masa de aire frío. El vórtice polar, forma una muralla infranqueable que impide la entrada de aire caliente procedente de la zona ecuatorial y, durante el invierno polar, se produce en su interior descensos de temperatura de hasta -90°C . A estas bajas temperaturas, y aunque la estratosfera antártica es muy seca, se forman nubes polares, constituidas por cristales de hielo y ácido nítrico trihidratado, con tamaños de 10 y 1 micra respectivamente. Estos aerosoles, van a permitir que se produzcan en su superficie reacciones de catálisis heterogénea. Ni siquiera en el círculo polar ártico, se produce una situación semejante, pues al ser un inmenso mar helado rodeado de montañas, al revés que en la Antártida que es un continente rodeado de mares helados, el vórtice polar no forma una muralla infranqueable, pues se rompe al chocar con las montañas permitiendo que pueda penetrar aire más caliente y, en consecuencia no se forman las nubes estratosféricas.

Muchas de las hipotéticas reacciones que se formulan para explicar el agujero de ozono, no se pueden producir en fase homogénea o en el caso que se verifiquen, sus constantes cinéticas no permiten justificar la pérdida de ozono detectada. Se requiere una catálisis heterogénea, posible con la ayuda de los aerosoles de las nubes polares (7).

La catálisis heterogénea permite explicar la primera dificultad que se plantea a la teoría química de destrucción del ozono(10). Las especies de cloro activo, producidas fotoquímicamente, se encuentran en la estratosfera como especies estables, en forma de HCl y nitrato de cloro. En los cristales de hielo y ácido nítrico, se produce una reacción de ambos que los transforma, con ayuda de rayos ultravioleta, en cloro atómico, que puede iniciar su ciclo destructor:



o bien una hidrólisis del nitrato de cloro, formándose ácido hipocloroso que posteriormente puede fotolizarse:



Ambas reacciones exigen para que se produzcan en fase heterogénea.

El agujero de ozono puede ser debido a causas climatológicas y químicas, de acuerdo con la teoría dinámica, pero con una gran participación de la segunda, ya que se ha demostrado la existencia en él de zonas de elevada concentración de monóxido de cloro, que pueden llegar a 2 ppb, cuando en otras regiones lo normal es 0,01 ppb, detectándose en él dióxido de cloro, indicativo de catálisis heterogénea. A estas zonas en las que indudablemente se producen las reacciones destructoras del ozono se las denomina "*regiones químicamente perturbadas*".

Por tanto, puede afirmarse definitivamente que la formación del agujero de ozono se debe, al menos parcialmente a reacciones químicas del ozono con especies activas de cloro, de origen fotoquímico.

1.5. Destrucción de la capa de ozono planetaria.

En el agujero de ozono antártico, se han estudiado todas las causas que pueden favorecer la destrucción del ozono, pero la climatología única de la Antártida y, especialmente la formación de aerosoles de hielo y nítrico, impiden que se puedan extrapolar sus resultados a otros lugares del planeta, ni siquiera al Polo Norte, en el que la destrucción de la capa de ozono es mucho menor. Mientras que en la primavera de 1987 se reducía el ozono en el agujero antártico, en un 50%, en el Polo Norte solo era de un 5% aproximadamente.

Desde el año 1979, en el que se inicia la recogida de datos en el satélite Nimbus-7, viene apreciándose una disminución de la capa de ozono que

recubre la Tierra, en proporción aproximadamente del 1% anual. Las medidas desde la Tierra con los espectrofotómetros Dobson acusan, desde hace aún más tiempo esa disminución, aunque en mayor cuantía. Con el fin de unificar los datos, el Comité de tendencias del ozono, en el que participan 12 países, ha realizado desde 1986 una labor exhaustiva, calibrando los aparatos de todas las estaciones y verificando los datos que acumulaban desde su instalación, transmitidos al Centro Mundial de datos del ozono.

El Comité de expertos del ozono, ha tenido en cuenta las numerosas variables que intervienen, para el dictamen de la tendencia mundial de degradación del ozono y, entre ellas la oscilación cada 26 meses de los vientos estratosféricos, el ciclo de actividad solar que dura 11 años, las erupciones volcánicas, pruebas nucleares, etc. El resultado final es que desde 1969 a 1986, se había producido un descenso de la capa de ozono entre el 1,7 y el 3%. En época invernal, y en altas latitudes, la destrucción del ozono puede llegar al 7%. No pudieron emitir dictamen tan riguroso del hemisferio Sur, por existir muy pocas estaciones en tierra de medida de ozono en esta región, pero con datos del satélite se ha calculado que oscila entre el 1,1 y el 3,7%. Al mismo tiempo, se establecieron modelos teóricos de las tendencias del ozono, introduciendo en el ordenador la innumerable cantidad de variables que intervienen. Los resultados son bastante concluyentes y acusan a los clorofluorocarbonos, como los principales responsables de la destrucción de la capa de ozono, aunque reconocen que también pueden intervenir causas naturales, como la actividad solar, la cual tiene escaso significado, como ya hemos dicho, en la formación del agujero de ozono de la Antártida. A este respecto, es interesante consignar que los gases contaminantes y la actividad solar pueden actuar en el mismo sentido, destrucción de la capa de ozono, o en el opuesto, en cuyo caso los gases contaminantes destruyen el ozono, mientras que la actividad solar lo regenera.

Ante las pruebas irrefutables que se presentan contra los freones, se han celebrado reuniones a nivel mundial de científicos, políticos y ecologistas a fin de controlar su producción y consumo. En marzo de 1985, se reúnen en Viena representantes de 21 países firmándose un convenio de protección de la capa de ozono. Dado que en este acuerdo no se daban normas de actuación ni plazos de reducción del consumo, solo fue en realidad, una declaración bienintencionada, sin consecuencias prácticas.

Como el consumo de freones sigue aumentando, a pesar de la Declaración de Viena, y de que en algunos países, como Norteamérica, se había prohibido su uso como propelente en spray, al mismo tiempo que los científicos seguían aportando datos indicativos de una progresiva destrucción de la capa de ozono, se celebra otra reunión internacional en Montreal el 16 de Septiembre de 1987, en la que intervienen la CEE en pleno y otros 36 países más. En esta reunión, se llega a un acuerdo conocido como el *Protocolo de Montreal*, para la reducción de producción y consumo de cinco freones, entre ellos el CFC-11 y el CFC-12 y tres halones, estableciéndose plazos. El objetivo final, es reducir al 50% el consumo de freones en el año 2000. El Protocolo de Montreal,

crea además comisiones para la evaluación periódica de la destrucción de la capa de ozono.

Los datos alarmantes que seguían produciéndose sobre la destrucción del ozono, genera una presión de grupos sociales, sobre todo ecologistas, como consecuencia de la cual, a los 20 meses de la reunión de Monreal, se celebra otra el 2 de mayo de 1989, en Helsinki, con participación de casi 80 países, en la que se toma un acuerdo, que dice textualmente: "se acuerda eliminar por fases la producción y consumo de los clorofluorocarbonos controlados por el Protocolo de Monreal lo antes posible, pero a lo más tardar para el año 2000". Es decir, en lugar de reducir un 50% el uso de determinados freones y halones, en el año 2000, se prescribe totalmente su empleo en esa fecha, que coincide curiosamente con el fin del segundo milenio.

Son muchos los problemas que se presentan para cumplir este acuerdo, y el más acuciante es emprender una carrera vertiginosa en busca de sustitutos de los freones, especialmente en su empleo como refrigerantes, pues además de requerir que posean unas características apropiadas, hay que comprobar exhaustivamente su inocuidad para la vida animal o vegetal y, esto requiere su tiempo. Los hidrofluorocarbonos, que no contienen cloro, ofrecen alguna solución alternativa, pero la realidad es que en estos momentos no hay sustitutos que reúnan las características de los freones. Mientras tanto, se están realizando acciones importantes en muchas naciones, como es la reducción o eliminación total de su empleo en spray, que representa para los países occidentales un 50-60% del consumo de freones. Igualmente puede reducirse su utilización en la fabricación de espumas plásticas con un 10-18% del total del consumo, pero la dificultad se encuentra en su sustitución en frigoríficos, aunque bien es verdad que afortunadamente, solo representan un 8-10% del total en países desarrollados. Acciones importantes a emprender que pueden paliar este problema, es la recuperación y reciclaje de estos compuestos.

Aunque el problema de la destrucción de la capa de ozono, no es regional y solo puede resolverse a nivel mundial, con la cooperación de todos los países, no está de más mencionar lo que hace España en este aspecto. Las noticias publicadas en la prensa diaria y en las publicaciones más especializadas del MOPU (10), señalan una plena colaboración de España a los acuerdos citados y una cooperación de los fabricantes de freones. No afirman lo mismo algunos grupos ecologistas y así, en Enero de 1989 la Sociedad ecologista de defensa de la naturaleza, AEDENAT, decía entre otras cosas, lo siguiente: "En España la producción de clorofluorocarbonos aumentó un 15% y el consumo interno en un 30%. Este aumento de producción y consumo indica una falta de voluntad política y sensibilidad para la resolución de este grave problema ambiental".

Como colofón voy a transcribir textualmente, parte de la declaración formulada por la comunidad ambientalista internacional en la reunión de Helsinki: "No cabe duda que los clorofluorocarbonos provocan una agresión nociva a la capa de ozono atmosférica y hacen crecer el efecto invernadero en proporciones ya difícilmente controlables. Para los habitantes del Planeta la

intensificación de las radiaciones ultravioleta, debida a un adelgazamiento de dicha capa, significaría la aparición a medio plazo, de algunos millones de carcinomas de piel, cataratas y deficiencias inmunológicas. El medio ambiente natural será también víctima de males, como la pérdida de parte considerable de las cosechas, y la destrucción potencial de la cadena alimentaria del medio marino.”

Las medidas acordadas el año pasado en la reunión de Helsinki parecen suficientes, si hay voluntad unánime de cumplirlas, pero teniendo en cuenta las miles de toneladas de freones y análogos vertidas en estas dos últimas décadas, incontrolables para el ser humano y, cuya vida media en la atmósfera sobrepasa para alguno más de cien años, termino este apartado de mi discurso formulando la inquietante pregunta. ¿Es ya demasiado tarde?.

BIBLIOGRAFIA

- (1) JOHNSON S. H. y col. (1971) *Science*. 173, 517.
- (2) LIU S. C. y col. (1980) *Geophys. Res.* 85, 7546.
- (3) CACHO J. y SAINZ DE AJA. M. (1989) *La Antártida. El agujero de ozono. Tabapress*.
- (4) STOLARSKY y CICERONES. (1974) *Can y Chem.* 52, 2.
- (5) MOLINA M. ROWLAND. S. (1974) *Nature*. 248, 810.
- (6) SWOLS y colab. (1975) *Geophys. Res. Letter.* 2, 215.
- (7) PAMELA ZUREZ. (1987) *Science*. 30, 11.
- (8) FARMAN J. C. y colab. (1985) *Nature*. 315, 207.
- (9) MOLINA M. y colab. (1987) *Science*. 238, 1253.
- (10) Medio ambiente en España. Monografías de la Dirección General del Medio Ambiente. 1989.

II. EL EFECTO INVERNADERO

Si preocupante es para el porvenir de la humanidad la progresiva destrucción de la capa de ozono estratosférica, no lo es menos, aunque probablemente a plazo más dilatado, el creciente aumento en el contenido de CO_2 de la atmósfera, como consecuencia sobre todo de dos actividades humanas: la combustión de combustibles fósiles, carbón, petróleo, gas natural y la tala de los grandes bosques tropicales (1).

El CO_2 que se encuentra presente en la atmósfera terrestre desde hace millones de años por causas naturales, tales como respiración de las plantas, destrucción de la biomasa y erupciones volcánicas, es transparente para la radiación solar, primordialmente de zona visible que incide sobre la superficie terrestre, pero en cambio absorbe la radiación infrarroja que esta emite y vuelve a remitirla parcialmente, aumentando la temperatura de la biosfera. A este efecto que produce el CO_2 junto con el vapor de agua, el metano, y algunos gases contaminantes como el N_2O y los clorofluorocarbonos, se le denomina "efecto invernadero", por analogía al papel que ejercen las ventanas en estas instalaciones.

El CO_2 atmosférico, se ha venido manteniendo hasta este siglo en un contenido prácticamente constante, aunque con apreciables variaciones estacionales, que corresponden al ciclo vegetativo de las plantas, y otras de acuerdo con la latitud. Ello es debido a haberse establecido un equilibrio, entre el aporte natural del CO_2 a la atmósfera y su eliminación, por los dos procesos más importantes de que dispone la naturaleza: fotosíntesis y disolución en los océanos con formación de inmensos depósitos sedimentarios de carbonatos cálcico o magnésico, o bien de combustibles fósiles.

El efecto invernadero que produce el CO_2 , que podríamos llamar natural, junto con el vapor de agua, resulta beneficioso para la supervivencia de la raza humana, pues gracias a él disfrutamos de una temperatura media de 15°C , mientras que en Marte, con una atmósfera sin CO_2 , la temperatura es de -50°C y en el planeta Venus, con atmósfera cargada de CO_2 , y sin océanos para su eliminación, soporta temperaturas de hasta 400°C .

Pero el problema fundamental del efecto invernadero, que ejerce el CO_2 , es el del creciente aumento de su contenido en la atmósfera, a consecuencia de unas actividades humanas primordiales, muy difíciles de evitar, que se han ido desarrollando como consecuencia de la revolución industrial y de la explosión demográfica.

Este aumento hará subir la temperatura de la superficie terrestre, en la proporción que prevén los modelos teóricos, puesto que la eliminación del exceso de CO_2 por los procesos naturales indicados, se produce con mucha lentitud.

El aumento de temperatura, consecuencia de un efecto invernadero incrementado, va a ocasionar cambios climáticos importantes, como se deduce sin lugar a dudas de los modelos de previsión, sobre los cuales la mano del hombre poco puede hacer una vez desencadenados y, la única solución posi-

ble es tratar de evitarlos cuando aún se está a tiempo y, aún lo estaríamos si hubiese voluntad de hacerlo.

Un problema importante de estos cambios climáticos es que una vez desencadenado el proceso, puede autoalimentarse en una proporción que es desconocida y muy difícil de prever con modelos teóricos. Como ejemplo de ello, se puede poner la fusión de los hielos polares, previsible con un aumento de temperatura, lo que ya ha sucedido en otras edades geológicas, el cual además de dar lugar a una elevación del nivel de las aguas marinas, disminuiría la reflexión de la luz solar incidente, estimada para las zonas polares en un 80%, mientras que el valor medio terrestre es del 30%, con lo que se originaría un recalentamiento suplementario a añadir al provocado por el CO₂.

Al hilo de los razonamientos expuestos, algunos pueden pensar que el miedo al efecto invernadero del CO₂ es desmesurado, pues la naturaleza ha demostrado, durante milenios de años, salvo en el cretácico, poseer un mecanismo eficaz de autodepuración de este gas, sobre todo por disolución en los océanos y transformación en depósitos orgánicos e inorgánicos.

Hace cerca de unos 100 años, el eminente químico sueco Svante Arrhenius pronosticaba un aumento de unos 90 Celsius en la superficie terrestre al duplicarse el contenido del CO₂ atmosférico. La comunidad científica de su época no le hizo caso, a pesar del gran prestigio que gozaba. Se pensaba entonces, y ahora también lo piensan algunos, por conveniencia, que los océanos serían capaces de disolver todo el CO₂ que se emite a la atmósfera, sin contar con el absorbido en la función fotosintética.

La gran duda en el momento actual, respecto al efecto invernadero, es precisamente desconocer la capacidad de saturación de las aguas marinas superficiales, que son las que disuelven el CO₂, contenido en la atmósfera y, la velocidad de difusión del gas disuelto a las capas oceánicas profundas para formar los sedimentos, aunque de esto último si se está seguro de que es un proceso lento. Por ello lo más importante, es la diferencia de ritmo, entre el CO₂ emitido a la atmósfera, con las actividades humanas, que es muy rápido y, su eliminación, por disolución en las aguas marinas y su retención en sedimentos, que por el contrario es muy lento. El otro proceso natural de eliminación del CO₂, la fotosíntesis es muy rápido, pero tiene su contrapartida con la remisión de este gas en el proceso de respiración de la biomasa. Si se tiene en cuenta además, la gran tala de los bosques tropicales, los incendios, en su mayor parte provocados y la deforestación que propicia la lluvia ácida, le dejan bastante cuestionado.

La disolución del CO₂ en los océanos queda como única esperanza, con un gran margen de incertidumbre, pues no podemos actuar en su difusión a las capas profundas, por lo que la solución exclusiva, es una reducción de las combustiones, lo cual plantea problemas políticos de gran envergadura. En primera línea, se encuentra el de los países en vías de desarrollo, que han de consumir más energía y quemar por ello más combustible, si quieren progresar. Entre estos países cabe destacar, por ejemplo a China, por su

excepcional demografía y por ser uno de los tres países, los otros son Rusia y Estados Unidos, con mayor reserva de carbón.

Para el caso del efecto invernadero, es más difícil llegar a un acuerdo internacional, como se ha hecho para los fluorocarbonos, con el Protocolo de Montreal o el Acuerdo de Helsinki. Bien es verdad que desde la crisis del petróleo en 1973, el consumo de combustibles fósiles en países desarrollados ha disminuido, pasando de un aumento anual del 4% en años anteriores al 2,25% a partir de esa fecha.

Sin embargo, el conjunto mundial de emisión del CO₂, sigue aumentando a razón de 1,1 ppm anuales. En estos últimos 25 años se han emitido más de 400.000 millones de toneladas de CO₂.

Los cambios climáticos importantes que prevén los modelos teóricos, se producirán cuando el contenido en CO₂ atmosférico duplique al que existía a finales del siglo pasado antes del pleno desarrollo. Al ritmo actual de emisión, se producirá a mediados del siglo XXI, es decir en el año 2050, por lo que puede afectar a varias de las generaciones actuales.

El cambio más acusado que produciría una subida de la temperatura terrestre, como consecuencia del incremento en el efecto invernadero, sería la fusión de la barrera de hielo de la Antártida occidental, cuyo volumen por encima del mar se estima en unos dos millones de metros cúbicos. En el momento actual esta barrera de hielo es inestable y desprende témpanos de hielo, a razón de un kilómetro por año, aumentando el nivel del mar en 1,4 mm anuales. Se prevé que para el año 2050 el desprendimiento de témpanos pueda acelerarse hasta 20 km/año, con ascenso del nivel del mar de unos 3 cm anuales, cifra que algunos cálculos magnifican multiplicándola por varias unidades, lo que ocasionará inundaciones en amplias zonas costeras.

Otro cambio climatológico importante que se deduce de los modelos teóricos se refiere al régimen de precipitaciones, que disminuiría en bandas centradas a 40° de latitud Norte y 10° latitud Sur, provocando graves sequías en estas zonas, mientras que, por el contrario, aumentaría entre 10°-20° de latitud Norte, dando lugar a grandes inundaciones. Estos cambios tendrían una consecuencia inmediata en los cultivos y recursos hidráulicos.

Un problema importante del efecto invernadero del CO₂, es llegar a conocer cuando se van a producir efectos climáticos perjudiciales para la mayor parte de la humanidad, aunque en zonas restringidas puede incluso beneficiarlas. De momento, no aparecen señales inequívocas de cambios climáticos atribuibles exclusivamente al CO₂, pues pueden justificarse por causas naturales o por una combinación de ambas, pero cuando se produzcan sería un poco tarde, ya que el proceso puede autoalimentarse y, adquirir proporciones catastróficas sin posibilidades de intervención.

Como final de esta introducción, cabe señalar que la única solución realmente eficaz a un efecto invernadero excesivo del CO₂, es encontrar energías renovables que no emitan a la atmósfera las ingentes cantidades de CO₂ producidas en la combustión de combustibles fósiles. Digo encontrar nuevas energías renovables, porque la energía nuclear no ofrece un brillante porvenir

desde un punto de vista ecológico. Hasta que llegue esa solución definitiva, pueden arbitrarse medidas de ahorro de combustiones que producen mucho CO_2 por unidad de energía, como el carbón y, por supuesto reducir hasta su eliminación total otros gases contaminantes de efecto invernadero acusado, como los freones, lo que se producirá en el año 2000, si se cumple el acuerdo de Helsinki.

II.1. Gases atmosféricos con efecto invernadero.

El efecto invernadero del CO_2 , limitado y sin desbordamientos, constituye un factor esencial para la vida humana en la Tierra, pues gracias a él, disfrutamos de una temperatura media muy benigna al retener parte de la radiación que emite el planeta. Este recibe una radiación solar equivalente a 344 w/m^2 , pero de ella una parte, correspondiente a zona ultravioleta del espectro, es absorbida por la capa de ozono planetaria y otra, reflejada por las nubes y aerosoles, por lo que solo llega a la superficie terrestre un 47% de esa radiación, es decir 170 w/m^2 , que es reflejada en parte por la superficie terrestre en forma de radiación infrarroja. El albedo terrestre, relación entre radiación reflejada e incidente, es por término medio un 30%, aunque varía ampliamente con la latitud. En los polos, debido al mayor poder de reflexión del hielo alcanza un valor del 80%, mientras que en las regiones tropicales, de densa vegetación, puede descender hasta el 10%.

El conjunto de la Tierra con su atmósfera, constituye un sistema termodinámico cerrado, que intercambia energía con el resto del Universo mediante flujos radiactivos. La energía de la radiación solar absorbida, se debe compensar con la radiación infrarroja emitida y si esta procediese de un cuerpo negro, la temperatura media de la Tierra debería ser -18°C , demasiado baja para la vida humana. Afortunadamente, la atmósfera terrestre no es transparente para la radiación infrarroja emitida, al existir en ella gases que la retienen y, elevan la temperatura hasta el valor medio de 15°C . Estos gases atmosféricos que absorben la radiación infrarroja son: anhídrido carbónico, vapor de agua, metano, monóxido de nitrógeno y fluorocarbonos, unos de origen natural y otros, emitidos por actividades humanas. Los gases anhídrido carbónico, metano y monóxido de nitrógeno existen en la atmósfera por causas naturales, pero el contenido de los tres gases y, muy especialmente del CO_2 crece continuamente por fuentes antropogénicas, por lo que su acción conjunta a la que se une la de los fluorocarbonos, pueden romper el equilibrio actual y provocar un efecto invernadero excesivo.

Los gases más abundantes en la atmósfera, N_2 , O_2 , Ar son transparentes para la radiación visible e infrarroja, y no interfieren en la radiación solar que recibe la Tierra o en la que esta emite. Estos gases únicamente absorben radiación ultravioleta a elevadas altitudes. El N_2 , radiación de longitud de onda inferior a 100 nm, a unos 100 km de altitud y el O_2 , radiación de unos 200 nm a una altura de 80 km. La capa estratosférica de ozono absorbe entre 200-300 nm. La luz solar que llega a la superficie terrestre corresponde

fundamentalmente a la zona visible del espectro, entre $0,4 - 0,73 \mu\text{m}$, con alguna proporción de radiación infrarroja, mientras que la emitida por reflexión, es íntegramente radiación infrarroja, con un máximo entre 3 y $25 \mu\text{m}$, que es precisamente la que deben absorber los gases con efecto invernadero.

El vapor de agua cuya proporción en la atmósfera oscila de $0,1$ a 1% , absorbe radiación infrarroja de longitud de onda superior a $20 \mu\text{m}$ e inferior a $3 \mu\text{m}$, presentando una ventana transparente para esta radiación entre 6 y $7 \mu\text{m}$.

El CO_2 cuyo contenido en la atmósfera es mucho menor ($3 \cdot 10^{-4}\%$), absorbe radiación infrarroja en la zona de $15-18 \mu\text{m}$, que corresponde a su vez a la región de máxima emisión del cuerpo negro, por lo que en principio, parece tener más importancia el CO_2 que el vapor de agua en el efecto invernadero. Sin embargo, el agua interviene de varias maneras en el balance térmico de la Tierra. Por una parte, absorbe radiación infrarroja aumentando la temperatura, pero al condensarse en forma de nubes, estas reflejan en buena proporción la radiación solar y al precipitar en forma de lluvia, arrastra los aerosoles atmosféricos, los cuales actúan como pantalla, evitando la penetración de la radiación solar. En el distinto papel que ejercen agua líquida y vapor de agua, se debe tener en cuenta que durante el período de un año, se producen 36 ciclos de evaporación y precipitación.

El metano, CH_4 , se produce en la Naturaleza principalmente por descomposición de materia orgánica en ciénagas y arrozales, con intervención de bacterias anaerobias, en las fermentaciones entéricas de rumiantes y, por escapes del gas natural. Su contenido en la atmósfera se venía manteniendo constante en 700 ppb, pero las actividades humanas están dando lugar a un aumento del 1% anual y, ya a principios de este siglo había ascendido a 1000 ppb(2) y, en el momento actual se estima en 1700 ppb.

El monóxido de nitrógeno también se produce por causas naturales, como desnitrificación bacteriana de los suelos o de las aguas superficiales, pero igualmente se aprecia un aumento creciente en su concentración atmosférica, como consecuencia primordial del empleo de abonos nitrogenados, necesarios en los sistemas de agricultura intensiva y, por su presencia en los gases de escape de los motores de explosión. En estos momentos se calcula su contenido en la atmósfera en 310 ppb, con un aumento del $0,3\%$ anual.

A la vista de lo que acabamos de indicar, es indudable que tanto por su más elevada concentración en la atmósfera, como por el ritmo más rápido de su aumento, debido a actividades humanas, junto con su intensa absorción de radiación infrarroja, el CO_2 es el responsable máximo del efecto invernadero y, el único capaz de provocar cambios climáticos importantes. No obstante, deben vigilarse las emisiones de CH_4 y N_2O , y respecto a los fluorocarbonos hacer que se cumplan los acuerdos internacionales, con reducción drástica de su producción y consumo. Obviamente, el vapor de agua no crea el mismo problema que otros gases contaminantes, aunque desempeña un papel importante en el equilibrio radiactivo y, en la autoalimentación del efecto invernadero, pues al elevarse las temperaturas, se produce más vapor

de agua, que por absorber radiación infrarroja ocasiona un recalentamiento.

Reconocido el CO_2 , como principal responsable de un posible efecto invernadero excesivo, que producirá cambios climáticos, el problema importante a resolver es el de relacionar su contenido en la atmósfera, el actual y el previsible en un futuro próximo, con los cambios climatológicos, principalmente temperaturas y precipitaciones. Para ello se han desarrollado una serie de modelos teóricos, que comentaremos en otro apartado, los cuales dan previsiones en función de la concentración de CO_2 (3)(4)(5). La dificultad de estos modelos estriba en la gran complejidad de las variables a tener en cuenta para los cambios climáticos. Por una parte, tienen que ser tridimensionales, considerando longitud, latitud y altitud, y en el equilibrio energético, hay que tener en cuenta no solo el intercambio en energía de la radiación sino además, de los movimientos de convección atmosféricos. Además, el aumento de vapor de agua con efecto invernadero creciente, crea problemas por la doble función que puede realizar el agua, que ya hemos comentado. Pero el verdadero problema es relacionar el cambio climatológico de la atmósfera con los océanos, para lo que se requiere otro modelo oceánico tridimensional, dado el papel decisivo que estos ejercen en la disminución del contenido en CO_2 atmosférico.

El problema de los modelos climáticos, requiere un comentario más minucioso, pero de momento podemos decir que son decisivos para emprender acciones contra las emisiones de CO_2 , pues mientras existan dudas estas no se llevarán a cabo por los elevados costes, y no solo económicos, sino también políticos, que estas acciones ocasionan. La realidad es que en estos momentos no debería haber dudas. Una elevación del contenido de CO_2 , eleva la temperatura atmosférica. El dato que más circula, es $2,2^\circ \text{C}$ entre 0-10 km de altitud al duplicarse el contenido en CO_2 , aún tomando en consideración el efecto atenuante de los océanos.

Con el fin de que no resulte todo negativo ni catastrofista, podemos decir que un aumento en el contenido de CO_2 atmosférico, provoca enfriamiento en la estratosfera, lo cual es favorable para la capa de ozono, pues en estas condiciones disminuyen las reacciones de su destrucción por los fluorocarbonos. Otro aspecto favorable del aumento de la concentración del CO_2 , es una mayor actividad en la función fotosintética, con el correspondiente aumento de la biomasa vegetal y por consiguiente, de los cultivos.

II.2. Ciclo del anhídrido carbónico.

El anhídrido carbónico presente en la atmósfera por causas naturales, biomasa y erupciones volcánicas, se ha venido acumulando en el transcurrir de las edades geológicas, en inmensos depósitos terrestres de carbonatos y combustibles fósiles y, dada su solubilidad en las aguas marinas, se han formado también cantidades muy elevadas de sedimentos marinos. El total acumulado de CO_2 entre carbonatos y sedimentos orgánicos, se estima en 70.000 millones de gigatoneladas (1 giga tonelada = 1.000 millones de tonela-

das), mientras que el contenido en la atmósfera, es solo de 700.000 millones de toneladas. Este dato, hace ver la elevada proporción en que se ha ido retirando el CO_2 de la atmósfera por los mecanismos naturales de eliminación: biomasa y disolución en océanos. Ello ha sido la causa de que no se tomase en consideración el efecto invernadero de este gas, pensando que la Naturaleza disponía de un mecanismo de autodepuración inagotable. Como ya hemos dicho, el problema radica en la diferencia entre ritmo de emisión y de eliminación.

Entre los cuatro depósitos naturales de CO_2 ; atmósfera, biomasa, aguas marinas y depósitos de carbonatos y combustibles fósiles, se establecen intercambios. Por procesos naturales, los que se refieren a la atmósfera, aguas marinas y biomasa, que producen disminución de CO_2 atmosférico, mientras que el intercambio de depósitos orgánicos e inorgánicos y la atmósfera, se efectúa con intervención humana, produciendo el efecto inverso de aumentar el CO_2 atmosférico, en los procesos de fabricación de cementos y, en las combustiones de combustibles fósiles.

El intercambio entre el CO_2 atmosférico y sus depósitos, da lugar a que solo una parte de la emisión de este gas, permanezca en la atmósfera. La proporción en que lo hace se denomina *fracción atmosférica*. Como ejemplo, podemos indicar que el CO_2 acumulado en la atmósfera desde 1900, es de 55 ppm, lo cual significan 410.000 millones de toneladas de CO_2 o 100.000 millones de toneladas de carbono. El cálculo de las emisiones de este gas lanzadas a la atmósfera, en el mismo período de tiempo, se estiman en 180.000 millones de toneladas, por lo que la fracción atmosférica es de 80.000 millones de toneladas en los 90 años transcurridos.

La fracción atmosférica, factor muy importante a considerar en el efecto invernadero, es una de tantas incógnitas de este tema, pues no se sabe si se puede mantener al nivel actual, o aumentará a consecuencia de una saturación de sus depósitos de intercambio, concretamente de las aguas marinas.

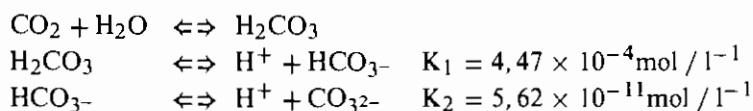
Este intercambio entre CO_2 atmosférico y océano, el más importante para evitar un efecto invernadero en exceso, está sometido a muchos factores, difíciles de cuantificar algunos de ellos. En primer lugar, y según una ley química muy conocida, la disolución del CO_2 en el agua depende de las presiones parciales en las dos fases, líquida y gaseosa, cuya variación en ambos sentidos, provoca un flujo de gas a través de la interfase, hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Entre los factores que a su vez influyen en las presiones parciales, el más importante es la temperatura, que influye en la solubilidad, aumentántola, con una disminución de aquella, por lo que las aguas polares son más ricas en CO_2 que las ecuatoriales. Se calcula que la cantidad de CO_2 disuelto, oscila entre 1% y 4%, por cada grado Celsius de variación de temperatura.

La cinética de intercambio del CO_2 , entre las fases gaseosa y líquida se expresa en función de una constante de cambio k , que depende de las concentraciones del CO_2 en las fases, de la velocidad de intercambio y, del área de la interfase. El significado físico de k , se puede deducir considerando que

entre las fases líquida y gaseosa, existe una película de flujo laminar, mientras que el resto de la masa líquida tiene flujo turbulento. El espesor de esta película en las aguas marinas, junto con las diferencias de las presiones parciales, es lo que va a controlar la velocidad de cambio del CO_2 atmosférico con mares y océanos. La contribución de los ríos en la eliminación del CO_2 puede considerarse despreciable.

El espesor de la película de flujo laminar, se calcula que oscila entre 10 y 200 μm , aunque presenta una gran dependencia de la velocidad de los vientos y del estado de la mar. Sería muy importante, poder deducir cual es el flujo medio global del CO_2 atmosférico en el agua de mar. Se han realizado intentos en túnel aerodinámico (5), sin conseguir resultados aceptables y esta, es una de tantas incógnitas que pululan alrededor del efecto invernadero, que hace se mantenga latente su estado de preocupación.

El comportamiento químico del CO_2 en el agua, resulta favorable para este intercambio atmósfera-océano. Una parte de él, permanece como tal molécula y otra, se hidrata formando ácido carbónico, que por ionización da lugar a los iones bicarbonato y carbonato:



Esta ionización depende del pH del agua de mar. A $\text{pH} = 8$ se han de tener en cuenta las dos especies iónicas, bicarbonato y carbonato, cuya proporción depende de las constantes de equilibrio indicadas. El aspecto importante de este proceso de ionización, es que las especies iónicas, bicarbonato y carbonato, presentan una mayor movilidad en disolución acuosa que el CO_2 y, en consecuencia, la velocidad de intercambio de este gas, entre atmósfera y aguas marinas, aumenta con la ionización, lo cual es muy favorable para la reducción de su contenido en la atmósfera.

El tema del decisivo intercambio del CO_2 entre atmósfera y océanos está plagado de incógnitas y de variables. Una de estas, de bastante importancia es la circulación de las aguas oceánicas, en el curso de la cual se produce una inmersión de las aguas superficiales en las regiones polares y, por el contrario un ascenso de aguas profundas, más ricas en CO_2 al ser más frías, en las regiones tropicales. En este último caso, el océano puede actuar como emisor de CO_2 a la atmósfera, mientras que en el primero lo absorbe. Esto es lo que sucede con una corriente oceánica profunda que se denomina *transportador del Atlántico Norte*, que se hunde en aguas profundas a la altura de Islandia y, reaparece en el Océano Pacífico, en las proximidades de la costa americana. El límite entre aguas calientes y frías, está sujeto a variaciones estacionales y, esta es una nueva variable a considerar.

En definitiva, el flujo del CO_2 atmosférico a las aguas marinas, que evitaría un efecto invernadero excesivo, depende de un gran número de variables

y entre ellas, como más importante, las presiones parciales de CO_2 en las fases gaseosa y líquida, alcalinidad y temperatura de las aguas marinas y además, de una serie de factores dinámicos, como velocidad de los vientos, oleaje, regiones con aguas calientes y frías, ciclo estacional de los organismos vivos marinos, etc, lo cual hace muy difícil una evaluación de la velocidad de intercambio.

Entre estas consideraciones sobre la disolución del CO_2 atmosférico en el agua de mar, no puede dejar de omitirse un hecho de gran importancia. El CO_2 se disuelve en una capa superficial de los océanos, denominada *capa de mezcla*, de un espesor que se calcula entre 50 y 100 m, pero esta disolución viene limitada por el llamado *factor de amortiguación*, en el que intervienen muchas de las variables que hemos indicado. Este factor de amortiguación, se estima en un valor próximo a 10, lo que significa que un aumento en la concentración de CO_2 atmosférico, solo consigue hacer crecer su concentración en el agua de mar en una décima parte de este valor.

Conseguida una disolución parcial del CO_2 , que se emite a la atmósfera en la capa superficial de las aguas marinas, se produce un proceso de difusión a las capas más profundas, donde iría produciendo los correspondientes sedimentos. No se conoce, ni con aproximación, la velocidad de difusión del CO_2 , pero si se sabe que es un proceso muy lento. Aquí es donde radica el punto crucial en el efecto invernadero. Si las capas superficiales de los océanos se saturasen de CO_2 , la lentitud del proceso de difusión a capas profundas, impide una eliminación del CO_2 , que las actividades humanas lanzan a un ritmo muy rápido.

El programa Geoséé, ha permitido obtener alguna información sobre la velocidad de mezcla de aguas superficiales con profundas y, sobre el intercambio aire-mar, pero no se puede dar en estos momentos una respuesta categórica, sobre la capacidad de los océanos para absorber el sobrante de CO_2 atmosférico y de otros gases contaminantes, algunos de los cuales, como los freones, son insolubles en agua.

Con respecto al intercambio con el otro depósito natural, la biomasa continental, está sometido también a un gran número de variables, que dificultan un conocimiento profundo del mismo. Por una parte, se producen variaciones estacionales fáciles de comprender. En primavera y verano, aumenta la absorción de CO_2 para constituir los tejidos vegetales, mientras que en otoño e invierno, aumenta por el contrario, la emisión de CO_2 por acción de las bacterias sobre los tejidos muertos. Puede decirse lo mismo de las variaciones diurnas, durante el día se produce absorción de CO_2 y, por la noche emisión de este gas. Ambas variaciones, ocasionan unas elevadas fluctuaciones en el contenido de CO_2 atmosférico, lo que ha constituido una dificultad para fijar con exactitud el porcentaje en la atmósfera de CO_2 , y la parte que de el corresponde a emisiones antropogénicas.

En definitiva, la absorción de CO_2 por la biomasa vegetal en el proceso fotosintético, depende de la temperatura, humedad, iluminación y presión parcial de CO_2 , pero además no de una manera uniforme, sino que varía con

el tipo de planta. Puede comprenderse que se hayan presentado serias dificultades para conocer el intercambio entre biomasa vegetal y CO_2 atmosférico. Se ha tratado de adquirir un cierto conocimiento, mediante la inspección con satélites, lo que solo se consigue de una manera muy aproximada.

Más recientemente, se ha podido estudiar el intercambio del CO_2 atmosférico con la biomasa y los océanos, mediante una técnica bastante sofisticada de fraccionamiento isotópico, basada en la diferente velocidad de intercambio de los dos isótopos del carbono, ^{12}C (98,9%) y ^{13}C (1,1%), cuyas masas difieren en un 8,3%, presentes en el CO_2 . La vegetación absorbe preferentemente ^{12}C y se va enriqueciendo en él, mientras que en los océanos se va acumulando preferentemente el isótopo más pesado. La composición isotópica de la atmósfera se encuentra intermedia entre ambos casos (6).

El fraccionamiento isotópico, se ha utilizado para diferenciar en la atmósfera el CO_2 natural del que procede de fuente antropogénica. El CO_2 emitido por actividades humanas tiene un mayor contenido en el isótopo más ligero ^{12}C , ya que los combustibles fósiles proceden de antiguos vegetales y, por medidas muy delicadas de la composición isotópica del CO_2 que existe en las burbujas de aire retenidas en los hielos de la Antártida, se ha podido seguir su evolución antes y después de la era industrial.

Se ha realizado un intento de unificar los intercambios aire aguas marinas y biomasa, con un modelo teórico que se debe a Keineman y col (7), en el que intervienen todas las variables que hemos indicado, pero sus resultados son limitados y no absolutamente convincentes.

II.3. Variaciones en el contenido del CO_2 atmosférico.

La verdadera historia del efecto invernadero comienza en el año geofísico Internacional celebrado en 1957, cuando Keeling consigue los fondos suficientes para instalar una base con un medidor continuo de CO_2 , ideado por él, en el monte Mauna Loa en las islas Hawai, situado a 3.397 m de altitud. Posteriormente, instalaría otro aparato de idénticas características en la base Admussen-Scott de la Antártida. Ambos lugares, se encuentran muy alejados de focos importantes de combustiones industriales o domésticas.

Hasta ese año no se tenía la certeza del aumento real de CO_2 en la atmósfera como consecuencia de las actividades humanas, ya que los resultados que se obtenían por los métodos discontinuos que se usaban en aquella época, resultaban muy erráticos y no permitían sacar conclusiones, pues como ya hemos indicado el contenido de CO_2 en la atmósfera, está sometido a variaciones estacionales e incluso diurnas. No se podían dar pruebas acusadoras del aumento real de CO_2 , que estaba provocando una emisión irresponsable de CO_2 .

El aparato ideado por Keeling, basado en la absorción de la radiación infrarroja por el CO_2 , permite determinar de una manera continua, minuto a minuto, su contenido en la atmósfera. Los resultados se contrastan cada hora con patrones de composición conocida de CO_2 que, a su vez, se contrastan

con un patrón internacional. La sensibilidad del aparato, permite detectar diferencias de 0,1 ppm en el contenido de CO₂, para unas concentraciones de 300-350 ppm.

Los primeros resultados, hicieron ver la variación estacional que experimenta el CO₂, en relación con el ciclo de la vegetación, la cual puede oscilar en 6-7 ppmv con un máximo en mayo y un mínimo en septiembre.

Las mediciones practicadas, en el período 1958-1983, acusan un ascenso en el contenido de CO₂ atmosférico desde 315 a 343 ppm en los 25 años de este período, lo que significa algo más de 1 ppm por año. El aumento de 28 ppm que se había producido en el período 1958-1983, equivale a 210.000 millones de toneladas de CO₂.

Las actividades humanas emiten CO₂ en una cantidad estimada en 20.000 millones de toneladas año, por lo que en el período indicado serían 500.000 millones de toneladas, de las cuales han quedado en la atmósfera, en lo que se denomina "*fracción aerotransportada*" algo menos de la mitad (210.000 millones de toneladas) y, el resto ha sido absorbido por la vegetación y disuelto en los océanos.

Los resultados de Keeling se han tomado, por su gran precisión, como prueba concluyente de la acumulación de CO₂ en la atmósfera, a consecuencia de las actividades humanas y sobre todo, han permitido adquirir un conocimiento de la fracción que se mantiene en la atmósfera y, la que puede ser retirada de ella por absorción en la biomasa o disolución en aguas marinas. Si ya de por sí es preocupante, que solo se puede eliminar aproximadamente el 50% del CO₂ emitido (20.000 millones de toneladas año), crece esta preocupación si se piensa que puede llegar un momento, en que las capas superficiales oceánicas se saturen de CO₂, el cual se difunde a las capas profundas en un tiempo que se mide al menos, en centenares de años.

Una vez conocida con certeza la acumulación creciente de CO₂ en la atmósfera, la segunda fase importante es deducir que cambios climatológicos se pueden producir y eso, se consigue mediante modelos teóricos en cierto aspecto semejantes a los utilizados para la previsión del tiempo, que comentaremos en el siguiente apartado.

Como en el terreno científico, cualquier teoría, hipótesis o previsión debe contrastarse con hechos experimentales, para que no resulte una pura especulación, un tema interesante, que ha dado lugar a investigaciones muy sugestivas, ha sido determinar el CO₂ contenido en el aire de tiempos pasados, de los cuales se conoce por examen de fósiles, cual era el clima que disfrutaba o padecía. Para ello, se han escogido los períodos glaciales o el cretáceo, teniendo en cuenta que la última glaciación se produjo hace unos 18.000 años.

Un método ingenioso para conseguir estos datos, ha sido analizar burbujas de lo que pudiéramos llamar aire antiguo, atrapado entre los hielos de la Antártida, algunos de los cuales datan de hace 200.000 años. La medida exige unas operaciones muy delicadas, pues basta decir que las burbujas de aire tienen un diámetro de fracciones de milímetro. Los resultados obtenidos

en hielos de la Antártida o en Groenlandia (9) (10), indican que a finales del último período glacial, hace 20.000 años, el contenido en CO_2 era de 200 ppm, valor muy bajo, por lo que el efecto invernadero de este gas era muy escaso y de aquí, las bajas temperaturas. Las medidas efectuadas en burbujas de aire de hace 150.000 años, en el que se disfrutaba de un período interglacial con temperaturas semejantes a las actuales, daban un valor de 270 ppm, análogo al que corresponde para el aire de la época preindustrial.

Otras técnicas también muy delicadas, se basan en medidas radiactivas de ^{14}C , fechador de edades biológicas. Algunas de estas medidas se han efectuado en los anillos concéntricos del tronco de los árboles (11), cuya edad se puede conocer contando el número de capas desde la corteza. Lo que ofrece más interés es que por el espesor y otras características de los anillos, permite obtener algunas conclusiones del clima que había cuando iban formándose.

Un resultado que parecía sorprendente, es que la radiactividad debida al ^{14}C era menor en los anillos más recientes. Parece como si el CO_2 atmosférico fuese disminuyendo su contenido en ^{14}C con el transcurrir del tiempo, aunque la tasa de producción de ^{14}C por acción de los rayos cósmicos sobre el ^{14}N en la alta atmósfera se mantiene aproximadamente constante, al menos en este siglo.

La explicación era sin embargo muy sencilla, los combustibles fósiles no contienen ^{14}C , pues la vida media de este radioisótopo es de 5.500 años, mientras que carbón y petróleo tienen millones de años de existencia. El lanzamiento a la atmósfera con las combustiones de CO_2 , sin ^{14}C hace que vaya disminuyendo el contenido atmosférico del CO_2 con ^{14}C . Basándose en estas medidas de ^{14}C , Suess y col (10), obtienen una cifra de 290 ppm para el contenido de CO_2 en la atmósfera, a comienzos de este siglo, que comparado con la cifra actual de 345 ppm, significa un aumento de 55 ppm. Esto equivale a una emisión de 420.000 millones de toneladas en ese período.

II.4. Efectos climatológicos del contenido de CO_2 atmosférico. Modelos climáticos.

Constituye este, el punto crucial en el estudio del efecto invernadero del CO_2 . Conocemos con bastante detalle el consumo de combustibles fósiles a nivel mundial, por datos que proporcionan las Naciones Unidas y con ello, la emisión prevista de CO_2 por actividades humanas. Conocemos también minuto a minuto, y con gran precisión la concentración en la atmósfera del CO_2 por los datos que proporciona la estación Mauna Loa. Con menos precisión, se conoce también la fracción del CO_2 atmosférico, que puede ser retirada del aire por disolución en los océanos y, absorción en biomasa. Desconocemos sin embargo, que puede pasar en un futuro próximo con esta tasa de disolución, que puede experimentar disminuciones conforme se vayan saturando las aguas marinas superficiales. Finalmente, conocemos sin ninguna duda, que se está produciendo una acumulación en la atmósfera de CO_2 a razón de

1 ppm año y, que para el año 2050, se habrá duplicado el contenido actual de CO₂ atmosférico, si se continua con el mismo ritmo de emisión.

El punto fundamental ahora, es llegar a conocer los cambios climatológicos, que puede producir esa duplicación del contenido en CO₂ para dentro de 60 años. El aumento del efecto invernadero producido por el CO₂, da lugar a la elevación de temperatura de la superficie terrestre, lo cual como es fácil de prever, tendría consecuencias inmediatas en el régimen de precipitaciones y, en la fusión al menos parcial, de los casquetes polares, con elevación del nivel de los mares.

Todavía no se han producido señales muy alarmantes de cambios climáticos atribuibles al CO₂, pero pueden ser significativos los resultados de Harksen y col (12), según los cuales la temperatura media global de la Tierra, ha ascendido 0,40C entre 1880 y 1890, coincidiendo con un aumento de 43 ppm en el contenido de CO₂ atmosférico.

Pero son necesarios datos fiables de los cambios climatológicos, que se puedan atribuir con certeza al efecto invernadero del CO₂, procedente de actividades humanas y, no sean justificables por causas naturales. No se puede perder de vista que la Tierra ha experimentado en el curso de las edades geológicas, cambios climatológicos importantes, que solo pueden ser atribuidos a causas naturales. Periodos glaciales, separados entre sí por interglaciales de 100.000 años de duración, que según la teoría universalmente aceptada del meteorólogo yugoslavo Milankovich, se debe a la diferente incidencia de la radiación solar sobre la Tierra, al cambiar esta su órbita circular a elíptica, por atracción de otros planetas. La formación de grandes masas de hielo, en los periodos glaciales, aumenta el albedo terrestre y se refuerza el enfriamiento. El bajo contenido en CO₂ (200 ppmv) que se ha encontrado en el aire del último periodo glacial, no significa que sea esta la causa del enfriamiento, aunque indudablemente contribuye a ello al ejercer un escaso efecto invernadero. Posiblemente, la baja proporción de CO₂ atmosférico fuese debida a una mayor solubilidad de este gas en las aguas frías, en cuyo enfriamiento intervinieron factores naturales de ciclos astronómicos.

Los posibles cambios climáticos que puede ejercer un exceso de CO₂ en la atmósfera, se pueden inferir de modelos teóricos climáticos, aunque el tema es bastante complicado por el conjunto de variables que intervienen, de algunas de las cuales no se conoce con suficiente exactitud su incidencia en el clima. En el curso de los estudios, se han ido desarrollando los diferentes tipos de modelos. En un principio, solo se consideraban los cambios atmosféricos que tradicionalmente se tienen en cuenta en la previsión del tiempo, pero al final se llegó al conocimiento que en este caso particular hay que meter en el juego a los océanos, con todas sus variables posibles, por el papel fundamental que ejercen de retirar el CO₂ de la atmósfera.

Se comenzó con modelos climáticos muy sencillos, en los que solo se tenía en cuenta flujos radiactivos de luz solar incidente y radiación infrarroja emitida, con un albedo terrestre de un 30%, según parece deducirse de mediciones con satélites meteorológicos. Los factores que en estos modelos van

a influir en el equilibrio radiactivo y por tanto, en el clima, son sobre todo tres: modificaciones en el flujo de la radiación solar, del albedo terrestre que se modifica mucho por la presencia de hielo, nubes, aerosoles y, finalmente contenido en CO_2 atmosférico.

Las previsiones obtenidas con estos modelos eran muy endebles, pues el equilibrio radiactivo no es el único a considerar en el intercambio de energía de la atmósfera, ya que el intercambio de masa y energía se produce también mediante movimientos de convección. Surgen así, los modelos radiactivosconvectivos propuestos por Manabe y Stackler (13), en los cuales se puede precisar el cambio en el papel térmico de la atmósfera con una variación del contenido de CO_2 . Como en todos los casos, se presenta el problema del aumento del vapor de agua, que ocasiona una elevación de temperatura, ya que este ejerce también un efecto invernadero, reforzándose el del CO_2 con un calentamiento añadido. La interacción temperatura-vapor de agua es un factor importante a considerar en las previsiones de cambios climáticos.

Con el modelo Manabe se ha estudiado los cambios climáticos que producirá una duplicación del contenido en CO_2 atmosférico, como se espera suceda en el año 2050. El aumento de temperatura, efecto primario de máxima importancia, varía con la latitud. En los trópicos el aumento de temperatura no llega a 2° Celsius, a 35° de latitud Norte es 3° , a 50° Norte el ascenso es de 4° y, por encima del círculo polar Artico se eleva a 7° . Con respecto a las variaciones estacionales, el modelo permite deducir que el aumento de temperatura será mayor entre los meses de octubre a mayo y menor en el verano, para latitudes boreales. El modelo Manabe, ha permitido también predecir las modificaciones en la precipitación, que serían muy importantes.

En estos modelos radiactivo-convectivos, es importante considerar, no solo la altitud, cuya relación con las temperaturas es de sobra conocido, sino la latitud. Así, la diferencia de temperatura entre el Ecuador y regiones polares, es de unos 50° C y, este gradiente de temperatura crea una circulación general de la atmósfera.

Los modelos monodimensionales, solo altitud, o bidimensionales, altitud latitud, son claramente insuficientes y ha habido que acudir a modelos tridimensionales, en los que se tiene en cuenta, altitud, latitud y longitud, denominados "modelos de circulación general de la atmósfera" o MCGA, análogos a los que utilizan los meteorólogos para la previsión del tiempo a largo plazo.

Los resultados obtenidos por diferentes modelos MCGA, de los cambios climáticos que se producirán, duplicando la atmósfera su contenido en CO_2 , han sido recopilados por Schlesinger y Mitchell (15) y entre ellos, destacamos los siguientes: aumento de la temperatura media en la troposfera de $3,5^\circ$ a $4,5^\circ$ C, que a latitudes elevadas será máxima en invierno y mínima en verano, reduciéndose la variación estacional. La reducción del espesor de la banquisa polar, campo de hielo, por la elevación de la temperatura, decrece el gradiente térmico entre Ecuador y polos, lo que hace disminuir la circulación general atmosférica. Con respecto a las precipitaciones, estas

aumentarán en el Ecuador y más allá de los 50° en ambos hemisferios y, por el contrario, disminuirán entre 10 y 50° de latitud.

Han adquirido gran relieve y se han dado amplia difusión, a las previsiones del meteorólogo alemán Flohn de la Universidad de Bonn(16). El cambio climatológico que considera muy importante, es el desplazamiento del cinturón de altas presiones subtropicales en el que se desarrollan los grandes anticiclones. De acuerdo con los modelos de Flohn, la disminución en 1° entre la temperatura del Ecuador y los polos, hace ascender las altas presiones subtropicales unos 50 km en dirección al polo. Estos cambios en las altas presiones, provoca como efecto inmediato una variación profunda en el régimen de precipitaciones, disminuyendo entre los 40° N y 10° S y aumentando entre 10 y 20° N y por encima o por debajo de 50° N y 30° S, respectivamente.

Las previsiones de Flohn, han provocado una justificada alarma, pues de cumplirse se produciría un cambio muy importante en los recursos hidráulicos del planeta, además de graves inundaciones en cuencas fluviales importantes, lo que conduciría a que se produjesen emigraciones masivas de poblaciones enteras.

Sin embargo, la realidad es que estos modelos MCGA resultan insuficientes para proporcionar datos irrefutables cuando se aplican a este caso particular del efecto invernadero del CO₂ y, no a previsiones meteorológicas. La peculiaridad de este caso radica en el papel decisivo que juegan los océanos en la eliminación del CO₂ atmosférico, y no se pueden hacer previsiones, como se hacen, confiando a los océanos un papel pasivo como simples depósitos de calor. Como hemos venido diciendo la dinámica del océano, oleaje, corrientes superficiales y profundas, velocidad de los vientos, son, entre otros, factores a considerar, además de la temperatura global, en los modelos de previsión de los cambios climáticos con aumento del CO₂ atmosférico. Se requiere un mayor desarrollo de modelos MCGA, referidos a los océanos y posteriormente un acoplamiento de los modelos atmosférico y oceánico, pero esto aún no se ha conseguido satisfactoriamente, aunque se han hecho intentos.

Un inconveniente general de los modelos MCGA, con mayor significado referido al efecto invernadero del CO₂, es que los cálculos se realizan en puntos bastante distantes y así, por ejemplo para uno de ellos, estas distancias son 5° de latitud, 7° de longitud y 3-4 km de altura. Esto implica que no se van a contemplar fenómenos climatológicos locales, que sucedan dentro de la rejilla tridimensional que forman esos puntos. Este es el caso de las nubes, que ejercen un efecto de disminución de la temperatura por reflexión de la luz solar incidente. Bien es verdad, que este problema y otros, de índole semejante se resuelven introduciendo parámetros deducidos empíricamente, pero también lo es que en este sistema quedan varias dudas pendientes.

La realidad es que los modelos de simulación actuales, no permiten obtener una predicción exacta de los cambios climáticos que se pueden producir con efecto invernadero creciente del CO₂, incluso referido exclusivamente a

los dos más importantes: temperatura y precipitaciones. Además de todas las limitaciones que hemos ido señalando, en estos modelos es difícil introducir un factor importante; el proceso de autoalimentación de un cambio climático. Como ejemplo, la fusión de los hielos por elevación de la temperatura global, con disminución del albedo y consiguiente elevación de temperatura, que se añade a lo anterior. Más complicada es la relación temperatura-agua. Al aumentar aquella se forma más vapor de agua, que por su efecto invernal da lugar a un recalentamiento adicional, pero al formarse nubes sucede lo contrario, por la reflexión que estas ejercen sobre la luz solar.

La limitación del contenido en CO₂ atmosférico reduciendo las combustiones crea tal cúmulo de problemas y de costos, que requieren una gran seguridad en los modelos y, eliminar resultados puramente especulativos o de entretenimiento científico. Los poderes públicos de todos los países al encontrarse con este problema, pueden tener la tentación de eludirlo si no se les proporciona una información veraz y objetiva de los riesgos. Los datos deben ser incuestionables, aún considerando que no se refiere a una situación actual, sino a un futuro previsible; la duplicación del contenido en el CO₂ atmosférico para el año 2050, o aún más si crece el ritmo de emisión actual.

Conscientes los científicos dedicados a este tema, de contrastar sus previsiones teóricas de ordenador con realidades, se han hecho numerosos ensayos para conseguirlo por dos vías diferentes; datos actuales o del pasado. Un cambio climatológico importante que se produce actualmente son las variaciones estacionales más extremas, es decir verano-invierno. Los modelos de circulación general MCGA se han mostrado eficaces para deducir estos cambios, aunque con algunas reservas para procesos lentos, y a este respecto hay que recordar que la difusión del CO₂ a las capas profundas de los océanos se produce con suma lentitud.

Al comparar el modelo con cambios climatológicos importantes producidos en estos últimos años, se han obtenido resultados concordantes entre el modelo y las observaciones y datos del cambio producido. Un ejemplo de este caso es la erupción del volcán mejicano de Chichon en abril de 1982 (17)(18). Se tomaron datos de elevación de temperatura, cambios químicos en la atmósfera, reflexión de los aerosoles emitidos, impacto en la estratosfera. El modelo teórico con estos datos daba unas previsiones que se habían observado, como era una elevación de décimas de grado en la temperatura terrestre perdurable por 2-3 días.

Otro cambio climático importante del que se conocen datos, que pueden ser contrastados con modelos teóricos es el fenómeno denominado *El Niño*, el cual consiste en un calentamiento de 12° C en las aguas del Pacífico ecuatorial, acompañado de cambios climatológicos importantes.

Sin embargo, los estudios más interesantes son los que se han realizado con cambios climáticos del pasado y observación de fósiles. Retrocediendo a edades geológicas muy del pasado, los cambios climáticos han estado dominados por el paso de épocas glaciales a interglaciales. Es importante, por

lo tanto, deducir a que se debe esta transición de una época a otra y, la climatología propia de cada época por examen de restos fósiles.

El Sol es quien domina el clima sobre la Tierra y, las variaciones climáticas en períodos breves, como los estacionales, o de miles de años, son atribuibles a cambios en la incidencia de la radiación solar sobre el planeta. Esta se proyecta directamente sobre el Ecuador y oblicuamente en los Polos, con la correspondiente diferencia de temperatura entre regiones tropicales y polos, que se compensa por el movimiento del aire caliente a las zonas frías. Los cambios en luminosidad solar, según se deduce de medidas con satélite, son escasos, del orden del 0,1% y, se producen en las épocas de actividad solar, en ciclos que duran 11 años.

Descartada la mayor o menor actividad solar, como causa del cambio de una época glacial a una interglacial, estos tienen que producirse por la variación en los ciclos astronómicos de rotación y órbita; inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano cuyo cambio origina la variación estacional, precesión de los equinoccios y, paso de la órbita circular a elíptica en un período de 100.000 años, según la teoría de Milankovich.

Sin embargo, el paso de una época glacial a interglacial, se caracteriza por una variación en el contenido de CO₂ atmosférico, de menos a más, con lo que surge la duda, pues hay opiniones en ambos sentidos, si el desencadenante del proceso glacial es la disminución del efecto invernadero del CO₂ al ser menor su concentración en la atmósfera, o si esto último es debido a las condiciones especiales de las épocas glaciales y lo que desencadena el proceso de los cambios indicados de rotación y órbita. Predomina más esta última versión, entre otras cosas porque la fluctuación en el contenido atmosférico del CO₂, no puede justificar descensos de 10-20° C en la temperatura global. En cambio, si se ha justificado el descenso de CO₂ atmosférico con la absorción en los océanos y, especialmente en el denominado "*transportador del Atlántico Norte*", que permite difundir el CO₂ a capas profundas oceánicas. Cambios en la temperatura superficial y en la salinidad, juegan un importante papel en la formación de esta corriente oceánica profunda. En definitiva, esta hipótesis, que se debe a Wallace Broeken, de la Universidad de Columbia, considera como un factor importante en los cambios climáticos, la interacción entre atmósfera y océanos y por eso, dijimos anteriormente que en todos los modelos de previsión climática hay que incluir esta variable.

Las simulaciones climáticas, con modelos teóricos en un período comprendido entre hace 5.000 y 9.000 años, en el que se alcanzan las máximas temperaturas estivales del período interglacial que disfrutamos con intensos monzones, hacen ver que la causa es una ligera inclinación del eje de rotación de la Tierra, con un acercamiento máximo al Sol en junio, en lugar de en enero como ahora sucede.

El Cretáceo ha ofrecido un campo de estudio muy interesante, pues en ese período se producía un efecto invernadero acrecentado, con altas elevaciones de temperaturas, a consecuencia de una concentración muy elevada en el contenido en CO₂, situación que nos deparará el futuro si no se limitan

las emisiones de CO_2 . Era un periodo interglacial, de hace unos 100 millones de años, con temperaturas bastante por encima de las actuales, y permanentemente por encima de los 0°C . No existía hielo en el círculo polar Artico, ni en la Antártida y el nivel de las aguas marinas era, en consecuencia superior al actual. La simulación con modelos teóricos, fijando la temperatura del océano en 10°C y luego en 20°C , no concordaban con la situación climática de ese periodo, ya que se obtienen temperaturas en la parte central de los continentes por debajo de 0°C . Tuvo que intervenir un factor que reforzase el calentamiento previsible por la irradiación solar. Se ha supuesto que la atmósfera podía contener 5 a 10 veces más CO_2 que en el momento actual, al menos eso se deduce con los modelos, cuyo efecto invernadero elevado daría lugar a temperaturas muy altas. La presencia en la atmósfera de tan gran cantidad de CO_2 , se ha buscado en un escape interior a través de grietas oceánicas provocadas por movimientos de las placas que en aquel periodo se sabe eran muy intensos.

Actualmente, se están realizando estudios sobre la climatología del periodo Jurásico, contrastando los datos de los modelos teóricos con observaciones sobre fósiles de plantas. Se basan en la discriminación de las plantas por el isótopo ^{13}C en el proceso de fotosíntesis. Durante las épocas calurosas absorben mayor proporción de ^{13}C que en las épocas frías, dando lugar a un fraccionamiento isotópico, del cual se puede deducir, determinando en el fósil la proporción de ^{13}C , la temperatura media.

Un recordatorio de climas pasados se puede deducir también, analizando el contenido en los isótopos ^{16}O y ^{18}O en los caparazones de los foraminíferos, basándose en que el agua evaporada es más rica en ^{16}O y el agua líquida en ^{18}O . En situaciones climáticas como la que disfrutamos, esto no ejerce ningún efecto en la composición isotópica del agua de mar puesto que, el vapor de agua se condensa y vuelve a precipitarse en forma de lluvia. En época glacial se produce sin embargo, otra situación. El agua cae en forma de nieve más rica en ^{16}O y se mantiene con esta composición, formando las masas de hielo, enriqueciéndose el agua oceánica en ^{18}O . Los foraminíferos tienen caparazones de CO_3Ca , formados con intervención del agua de mar y, su proporción, en ^{18}O permite deducir, según Shakleton la época de la glaciación.

Lo que interesa de estos estudios es que si los modelos de previsión teóricos son capaces de predecir un pasado tan lejano; ¿porqué no pueden predecir un futuro tan próximo como el año 2050?

II.5. Situación actual y futuro del efecto invernadero.

Los datos objetivos, fidedignos, que poseemos en este momento, son los siguientes: el contenido de CO_2 en la atmósfera es de 345 ppmv; el ritmo de aumento de CO_2 en la atmósfera crece a razón de 1ppm, desde 270 ppm en la era preindustrial, con lo que el aumento desde entonces ha sido de un

28%. Al ritmo actual de emisión se duplicará la cifra de CO₂ emitida en el año 2050.

Los gases responsables del efecto invernadero se emiten a la atmósfera en las siguientes proporciones: CO₂ de combustión de combustibles fósiles, excepto centrales térmicas 20%; CO₂ de centrales térmicas 10%; CO₂ de deforestación 20%; metano 18%; clorofluorocarbonos 14% y, ozono troposférico 12%. Como se aprecia de estos datos, el CO₂ representa un 50% del total, por lo que es importante si se quiere reducir el efecto invernadero, limitar la emisión de los restantes gases contaminantes, los cuales ejercen mayor efecto invernadero que el propio CO₂. Mención especial merecen en este aspecto los clorofluorocarbonos, con un efecto invernadero 10.000 veces superior al del CO₂.

El cambio climático más importante, del cual derivan los demás, es el aumento de la temperatura global en la superficie terrestre, por el efecto invernadero de estos gases contaminantes. Los estudios climáticos llevados a cabo por Jones y col.(19), tomando en consideración la respuesta de los océanos, dan como resultado un aumento de 0,5^oC en el período 1861-1984. Los resultados de Hansen y Lebedeff (12) son muy semejantes, pues deducen aumentos de 0,5 – 0,7^oC en el período 1880-1985.

De acuerdo con los resultados anteriores, Wigley(20), calcula que al duplicarse el contenido de CO₂ emitido a mediados del siglo XXI, el aumento de temperatura sería de 1,2 a 1,6^oC, valor que coincide bastante bien con el que se deduce de los modelos teóricos.

En fecha más reciente, Ramanathan(21), ha realizado un estudio considerando que las emisiones de CO₂ y clorofluoro carbonos, se mantengan al ritmo actual hasta el año 2050. Teniendo en cuenta la difusión térmica de los océanos, que reduce a la mitad este valor, se obtiene un recalentamiento de 1-2^o C a mediados del siglo XXI, cuando se hubiese duplicado la emisión de CO₂.

Aceptada una cifra de 1-2^o C de elevación de temperatura para el año 2050, que puede considerarse como otro dato objetivo más a considerar, los cambios climáticos que el futuro nos depara, ocasionados por este aumento de temperatura, se va a deducir de modelos teóricos de previsión. Y lo que prevén, son cambios muy perjudiciales: desplazamientos de zonas cálidas hacia los polos; lluvias intensas en regiones ecuatoriales; sequías estivales en las regiones actualmente templadas; desaparición del campo de hielo de la Antártida, con subida del nivel de los océanos y, aumento del número de ciclones tropicales, que además se desplazaran a zonas que nunca los han padecido.

Ante este panorama, se constituyen Comités internacionales, y se celebran numerosas reuniones en estos últimos años, para atajar el problema del futuro climático del planeta, en los que se arbitran las medidas a adoptar. Sucede sin embargo, que estas medidas no son vinculantes, y que como en otros casos, se concede una moratoria a los países en desarrollo. Por el contrario, el protocolo de Montreal y la declaración de Helsinki, comprometen a

los países desarrollados fabricantes y consumidores de clorofluoro carbonos, a la eliminación de los cinco más perjudiciales para el año 2000. Hay una mayor permisividad para los países no desarrollados y esto, puede ser una puerta abierta que anule en parte la prohibición.

El problema que plantean los países no desarrollados, con solo un 13% de la emisión total de gases de efecto invernadero, es que su ritmo de emisión es mucho más rápido. Europa y Norteamérica, son responsables de los dos tercios de la emisión total de CO₂, pero ofrecen mejores posibilidades para el futuro, pues tienen capacidad tecnológica y económica para emprender las acciones que eviten el efecto invernadero excesivo.

Entre estas acciones, la más importante es encontrar energías renovables, que no sean las nucleares, y emprender una reforestación. Como esto puede tardar mucho en producirse, y el problema es acuciante, mientras tanto se han de arbitrar una serie de medidas que reduzcan la emisión de CO₂. Lo más importante, es aumentar la eficacia en la producción y consumo de la energía, como en realidad se ha venido haciendo desde la crisis del petróleo de 1973 y, disminuir la lluvia ácida que produce una fuerte deforestación.

Se considera como una medida mínima indispensable, bajar las emisiones de CO₂ en un 30% para el año 2000 y en un 50% para el 2015, con respecto a los niveles del año 1986. Para los restantes gases contaminantes, hay que adoptar medidas de reducción en su emisión, que en los casos del N₂O y O₃ troposférico, está relacionada con la circulación de coches. La medida obvia es aumentar el transporte colectivo, además de mejoras técnicas en los vehículos que disminuyan la contaminación de los gases de escape. En el caso concreto del N₂O, además se requiere un menor uso de abonos nitrogenados, sustituyéndolos por abonos orgánicos.

Todas estas acciones son complejas, pues las políticas energéticas de cada país son diferentes; los países no desarrollados tienen que aumentar su consumo de combustibles y además, con los más contaminantes, como el carbón. Por otra parte, estos países carecen de la capacidad económica y el desarrollo tecnológico, que se requieren para emprender las acciones restrictivas. Son precisamente los países más contaminantes, los que ofrecen mayores posibilidades de reducir la contaminación.

Entre el cúmulo de reuniones internacionales celebradas, para evitar el efecto invernadero, voy a comentar una reciente celebrada en Nordwijk (Holanda), el 6 de noviembre de 1989, con participación de 69 países. En su declaración, dice entre otras cosas: "La composición de la atmósfera terrestre se ve seriamente alterada por la actividad humana, a un ritmo sin precedentes. Aunque todavía existen incertidumbres sobre la magnitud, el curso y los efectos de los cambios climáticos, causados por la actividad humana, existe un creciente consenso en la comunidad científica, en la alta probabilidad de que en el curso del próximo siglo ocurra un significativo cambio e inestabilidad climatológica. Las predicciones hoy en día disponibles, indican dislocaciones económicas y sociales potencialmente graves para las próximas generaciones."

Para garantizar la salvaguardia de nuestro planeta, y mantener su equilibrio ecológico, se deben realizar acciones comunes, encaminadas a reducir las emisiones, hasta un nivel acorde con su capacidad de autodepuración. Este nivel, debe conseguirse en un plazo que permita la adaptación natural de los ecosistemas a los cambios climáticos. La información disponible parece señalar la necesidad de una reducción del 50% en las emisiones, para controlar los cambios climáticos a un límite adecuado.

Se considera en la reunión de Nordwijk que los puntos esenciales para conseguir estos objetivos, son los siguientes: supresión del uso de fluorocarbonos, cumpliéndose estrictamente los acuerdos de Helsinki; mejoras tecnológicas en la producción y consumo de la energía, que reduzcan el CO₂ emitido por unidad de energía; acciones encaminadas a limitar emisiones de otros gases de efecto invernadero, como N₂O, O₃ y CH₄; acciones para evitar la deforestación y desertización, por talas, incendios o lluvia ácida, y aumento de la repoblación forestal, así como estudios tendentes a la búsqueda de energías renovables.

Estas acciones requieren una cooperación de todos los países, utilizando para ello los organismos internacionales. Para conseguir resultados satisfactorios, es necesario una ayuda desinteresada de los países industrializados a los países en fase de desarrollo, para proporcionarles tecnologías de producción y consumo de energía menos contaminantes. Pero ello no es suficiente, si no se introducen en la sociedad nuevas actitudes y conceptos. Todos los países, deben ser conscientes que han de ajustar sus actividades socio-económicas y sus modos de vivir más acordes con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ROSELLE. R. (1982) *Investigación y Ciencia*. 73,10.
- (2) RASMUSSEN. R. A. y KHAHL. (1984) *J. Geophys. Res.* 89, 11599.
- (3) NEFTEL. A. (1982) *Nature*. 295, 220.
- (4) SNESS. H. E. (1955) *Science*. 22, 415.
- (5) MESLIVAL. L. (1913) *J. Geophys. Res.* 88, 707.
- (6) FRIEDLI. H. y col. (1986) *Nature*. 224, 337.
- (7) SAULAT. G. (1987) *Mundo Científico*. 7, 72, 848.
- (8) KEELING. C. D. (1982) *Carbon dioxide review*. W.C. Clarke. Oxford University Press.
- (9) DELMAS. J. y col. (1980) *Nature*. 284, 1551.
- (10) NEFTEL A. y col. (1982) *Nature*. 295, 220.
- (11) SNESS. H. E. (1955) *Science*. 22, 415.
- (12) HANSEN J. y LEBEDEFF. S. (1987) *J. Geophys. Res.* 91, 13395.
- (13) MANABE S. y STRICKER. R. F. (1964) *J. Atmos. Sci.* 21, 361.
- (14) MANABE S. y WETHERALD. R. T. (1975) *J. Atmos. Sci.* 32, 3.
- (15) SCHLESSINGER M. E. y MITCHELL. J. A. (1987) *Rev. Geophys.* 25, 760.
- (16) FLOHN. H. (1979) *La Meteorología*. VI. n^o 16, 35.

- (17) HOFFMAN. D. J. (1987) *Rev. Geophy.* 25, 743.
- (18) SEAR. C. B. (1987) *Nature.* 330, 365.
- (19) JONES P. D., WIGLEY T. M. y WRIGHT. P. R. (1986) *Nature.* 322, 430.
- (20) WIGLEY. T. (1987) *Geophys. Res. Lett.* 14, 1135.
- (21) RAMANATHAN V. y col. (1987) *Rev. Geophys.* 25, 1991.
- (22) ROBERT M. WHITE. *Investigación y Ciencia.* Septiembre 1990.

III. LA LLUVIA ACIDA

La denominada lluvia ácida se caracteriza por contener ácidos sulfúrico, SO_4H_2 , y nítrico, NO_3H ; formados en la atmósfera por reacciones catalíticas o fotoquímicas de unos precursores que son el anhídrido sulfuroso, SO_2 , ácido sulfhídrico, SH_2 , y vapores nitrosos NO_x . Estos compuestos se emiten a la atmósfera mediante procesos naturales como, por ejemplo, las erupciones volcánicas, pero algunas actividades humanas, especialmente la combustión de carbón, gasoil y muchos procesos metalúrgicos lanzan a la atmósfera cantidades muy importantes de SO_2 , mientras que los motores de explosión son los más destacados en la emisión de vapores nitrosos.

En el año 1960 suena la primera voz de alarma. Se observaba un fuerte deterioro de los bosques, especialmente de coníferas, en muchas regiones del mundo, pero sobre todo en Alemania (la Selva Negra), Estados Unidos y Canadá. Esta agresión a los árboles que al final provocaba su muerte iba acompañada de una desaparición de especies vegetales y animales constituyendo en algunas zonas un auténtico desastre ecológico.

Simultáneo con este proceso de deforestación, se apreciaba también una acidificación de las aguas continentales, muy acusada en los lagos suecos, con la consiguiente destrucción de especies acuáticas. El conjunto de ambos fenómenos creó una gran inquietud en los países afectados y los estudios que se emprendieron inmediatamente hicieron ver la gran acidez de la lluvia, incluso con valores de pH inferiores a 3, en algunas regiones, y su elevado contenido en SO_4H_2 .

Esto no es todo en el problema de la lluvia ácida, ya que ésta se relaciona con los dos procesos más graves de la contaminación atmosférica: el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono. La deforestación de los grandes bosques contribuye en buena medida al efecto invernadero del CO_2 , no solo porque desaparece un depósito de acumulación del CO_2 atmosférico, sino además porque la muerte del árbol va acompañada de la emisión de este gas.

Por otra parte, los aerosoles de SO_4H_2 , componentes de la lluvia ácida, se supone que pueden tener alguna intervención en la destrucción de la capa estratosférica de ozono, en las zonas templadas, en la que ejercería el mismo papel que realizan en la Antártida las nubes con aerosoles de hielo y ácido nítrico, como superficies específicas en la catálisis heterogénea entre la molécula de O_3 y los radicales procedentes de freones y halones.

Aun con ser suficientes las acciones indicadas para considerar a la lluvia ácida como un grave problema de la contaminación atmosférica aún hay más, ya que presenta otros más específicos. Tanto los aerosoles de SO_4H_2 y NO_3H como sus precursores SO_2 , SH_2 y vapores nitrosos ejercen acciones biológicas perjudiciales en los seres vivos, de los que carece, por ejemplo, el CO_2 , junto con otras de tipo corrosivo en materiales inertes.

En los seres humanos el SO_2 y el SO_4H_2 ejercen efectos irritantes en las mucosas y tracto respiratorio que pueden afectar gravemente a personas

con enfermedades pulmonares. De acuerdo con los estudios epidemiológicos efectuados, se acepta que en el episodio ocurrido en Londres en 1952 a causa del *smog* se produjeron entre 3.500 y 4.000 defunciones más de el valor que se podría considerar normal. Su acción agresiva sobre la vegetación es manifiesta e igualmente lo es para especies animales inferiores.

Otra acción importante muy específica de la lluvia ácida es su acción corrosiva sobre diversos tipos de materiales como papel, cemento, metales, etc., dando lugar a cuantiosos daños materiales, pero lo que es peor provocando el deterioro del patrimonio cultural de la humanidad. Pinturas, códices, monumentos, todo puede ser atacado y seriamente dañado por efecto del ácido sulfúrico. Se cita como ejemplo que el Parthenon ha experimentado más deterioro en estos últimos 25 años que en los siglos transcurridos desde su construcción.

En definitiva, la lluvia ácida colabora en los dos grandes retos que tenemos planteados, efecto invernadero, destrucción del ozono, y por sus acciones específicas corrosivas, ataca y deteriora tanto a nuestro patrimonio cultural como a todo el ecosistema, produciendo incluso la muerte de especies vegetales y animales incluido el ser humano. No es un problema baladí y afecta tanto a los amantes de la naturaleza, como a los que no lo son, con tal que tengan un mínimo de sensibilidad cultural.

La resolución del problema planteado por la lluvia ácida parece en principio más sencillo que el del efecto invernadero del CO_2 , aunque ambos se provocan por la misma causa: las combustiones de combustibles fósiles. Se puede mejorar el sistema de combustión pero siempre se tiene que producir CO_2 , pero la emisión de SO_2 es debida al contenido en azufre de los combustibles fósiles, por supuesto muy inferior al de carbono, y que además puede disminuirse eliminando en el combustible buena parte del azufre que contiene mediante unos procesos de desulfuración.

Esto que parece fácil no lo es por los elevados costes que ocasiona, y como luego veremos es más conveniente eliminar el SO_2 en la mezcla de gases producidos. La desulfuración no elimina naturalmente el CO_2 ni el efecto invernadero que este provoca pero al menos evita la acción añadida de la lluvia ácida que refuerza el proceso anterior y sobre todo elimina la acción irritante y corrosiva de ésta.

Con el fin de dar una visión panorámica del tema de la lluvia ácida, antes de entrar en la exposición detallada del mismo, se puede acusar abiertamente a las centrales térmicas como las principales responsables de la misma, pues se atribuye a ellas el 67% del total de la emisión de SO_2 , siguiendo a continuación la industria con el 25%. A su vez dentro de las centrales térmicas las más contaminantes son las que consumen lignito. El número de centrales térmicas en nuestro país es de 33 de las cuales las dos más importantes (Puentes de García Rodríguez y Andorra) pertenecen a ENDESA, sociedad mayoritariamente estatal y entre las dos emiten un tercio del total de SO_2 que corresponde a las centrales térmicas.

No se puede considerar en nuestro país, como a veces se quiere hacer

ver, un problema sin importancia el de la emisión de SO_2 por las centrales térmicas. En una publicación de la Dirección General del medio ambiente (1) se afirma que los problemas de contaminación de las grandes instalaciones de combustión es evidente que no tienen la misma importancia en los países del centro de Europa que en España. Parece que al menos eso de ser diferente a los demás nos sirve para algo.

Sin embargo los datos estadísticos de emisiones de SO_2 en España (1) no parecen tan tranquilizadores pues lanzaron a la atmósfera 67 Kg por habitante cuando la media en los países de la CEE es de 47,6 Kg por habitante. Se argumenta que ello es debido a nuestra baja densidad demográfica (1) y efectivamente el cálculo por superficie nos resulta más favorable pues emitimos 5 T / Km^2 , mientras que la media comunitaria es de 12,4 T / Km^2 . El total de SO_2 que España lanza a la atmósfera son 2.545.279 Kt, de las cuales un tercio corresponden a centrales térmicas estatales.

La primera solución que acude al pensamiento para disminuir la lluvia ácida es sustituir las centrales térmicas, ya que la emisión de SO_2 en procesos metalúrgicos además de ser de menor cuantía es consustancial con el propio proceso pues se está operando con sulfuros metálicos.

Los sustitutos de las centrales térmicas de momento son las hidroeléctricas y nucleares. Las primeras siguen su lenta marcha de instalación, pero no pueden cubrir todas las necesidades y respecto a las nucleares se ha paralizado su construcción, pero es que realmente aunque puedan resolver un problema, crean otro con los residuos radiactivos y los peligros de fugas.

Si se descarta la sustitución por centrales nucleares, el único método posible para disminuir la lluvia ácida es hacer más limpias a las centrales térmicas por dos vías: eliminando el azufre del combustible o el SO_2 en los gases producidos durante la combustión y mejorando en general el proceso tecnológico de la combustión.

El proceso de reducción del contenido en azufre de los combustibles lleva aparejado unos costes elevados lo que plantea una serie de dificultades. Más conveniente parece la eliminación del SO_2 en los gases de combustión como luego veremos.

En cualquier caso es muy elevado el coste económico de estos procesos. Se estima en 670.000 millones (1) lo que costaría a nuestro país ajustarse a las normativas de la Directiva comunitaria de 24-11-1988 que establece unos límites de emisión de SO_2 y vapores nitrosos. Pero la consideración de nuestra situación técnica y económica, ha permitido que España lo pueda aplicar a escala más reducida y se ha rebajado la cifra de desulfuración de combustibles y sustitución de calderas a 270.000 millones.

Comprendiendo el problema que se plantea en nuestro país con muchas centrales térmicas obsoletas, no comprendemos, sin embargo, el razonamiento que se utiliza en la publicación oficial aludida (1): "Parece pues lógico no aplicar recursos con una rentabilidad adicional exigua cuando se pueden derivar a otras actuaciones de mayor importancia y significado en el contexto español".

Manteniendo mis reservas sobre la actividad más importante a la que irán destinadas los 450.000 millones de ahorro, no creemos que el problema de la lluvia ácida y de la contaminación en general, se pueda plantear en términos de rentabilidad. Me parece que no se puede traducir en pesetas el futuro incierto de la humanidad, ni la desaparición actual de especies animales o vegetales y de nuestro patrimonio cultural como consecuencia de la contaminación.

El experto en temas económicos del Comité de expertos creado por la OMS emplea un lenguaje distinto: "A menos que se calcule o incluya en el costo del producto terminado el costo total de los insumos empleados en el proceso el precio de dicho producto resultaría subestimado". El medio ambiente (el uso del aire) se incluye como un insumo. En tanto que no se asuma en el costo del producto cualquier deterioro fungible que resulte del proceso de producción, existirá una asignación errónea de los recursos. Más adelante dice: Cualquier estrategia para mejorar la calidad del aire tendrá que tener en cuenta la relación entre el costo de cada incremento y el beneficio que resulte de dicho incremento en términos de salud o disminución de los daños causados por la contaminación atmosférica. Las restricciones ambientales son tan solo un elemento más del complejo y dinámico proceso que determina los costes de producción, en el que se incluyen variaciones de salarios y precios de materias primas, niveles de producción, tipos de interés, etc.

La consideración que la lluvia ácida, como el efecto invernadero o la destrucción de la capa de ozono, son problemas universales, aunque pueda tener más incidencia en un país que en otro, da lugar a que se celebren desde hace años una serie de reuniones con el fin de unificar criterios y dictar medidas de control, lo que no se termina de conseguir por los intereses puestos en juego. Entre ellos destaca la celebrada en Ginebra en 1979 sobre "Contaminación transfronteriza a larga distancia" con participación de 34 países entre ellos España. Como consecuencia de esa reunión y de las presiones que se ejercían sobre los poderes públicos se firmó un protocolo en Septiembre de 1987 por 21 de esos países en el que se acuerda reducir en un 30% las emisiones de SO₂ para el año 1993 en relación con las cifras de 1980. Este protocolo no fue firmado por España, según indica la asociación ecologista Green Peace (2).

Es importante, por la obligatoriedad que conlleva para todos los países miembros, la Directiva del Consejo de Ministros de la Comunidad Económica Europea del 7-12-1988, en la que se fijan topes de emisión de SO₂ y vapores nitrosos. Los topes negociados y fijados para España son: Para la emisión de SO₂ y tomando como base las 2.290 kilotoneladas lanzadas en 1980, en el año 1993 seguiremos igual con 2.290 kilotoneladas y ya en el año 1998 se rebajaría la cifra a 1.730 kilotoneladas y para el siglo que viene (2003) a 1.400 kilotoneladas.

Creo que objetivamente y a la vista de los datos expuestos, la reducción puede calificarse de modesta y a muy largo plazo (en 1998 el 25% de reduc-

ción y en el siglo que viene el 38%). Claro está que se parte del supuesto que en España no hay problema de deforestación atribuible a la lluvia ácida según afirma la publicación estatal citada (1), con lo que no se muestra de acuerdo la asociación ecologista Green Peace (2) que aporta datos de los daños forestales, y además hace ver la carencia de estudios a fondo de este tema en nuestro país, y por ello la muerte de muchas especies vegetales que no se atribuyen a la lluvia ácida pudiera encontrarse en una agresión previa de la contaminación que ha debilitado a la planta, la cual puede morir después por otros ataques al carecer de defensas.

Sin querer entrar en polémica, la verdad es que no existiendo sustitutos de las centrales térmicas y aún comprendiendo que una elevación de costes en el sector eléctrico repercute en todos los sectores, deberían tomarse medidas más eficaces. Bien es verdad que según datos oficiales de la Red Nacional de Vigilancia y Prevención de la Contaminación Atmosférica, de ámbito estatal, (1) el valor mínimo de pH observado en las lluvias es 4,92, siendo muy frecuente valores superiores a 7. Por ello España se diferencia del resto de los países de Europa y de América en que su lluvia es alcalina, en lugar de ácida, lo que resulta una muy conveniente ventaja.

III.1. Fuentes naturales y antropogénicas de los precursores de la lluvia ácida. Ciclo del azufre.

Los compuestos de azufre precursores de la lluvia ácida presentes en la atmósfera son el anhídrido sulfuroso SO_2 y el ácido sulfhídrico SH_2 . Este último se oxida en fase homogénea o heterogénea, a SO_2 por acción del O_3 troposférico, y por tanto, pueden considerarse en conjunto ambos gases. Tanto el SO_2 como el SH_2 pueden existir en la atmósfera por causas naturales. El primero se desprende entre los gases volcánicos en una cuantía que se estima en 2 millones por año, mientras que el SH_2 se produce en la descomposición de restos orgánicos. Las cantidades que se emiten de ambos por procesos naturales son muy pequeñas en comparación con las que se lanzan a la atmósfera por actividades humanas.

La principal fuente antropogénica de SO_2 son las combustiones ya que los combustibles fósiles contienen azufre en una proporción del 3% para carbón y fuel-oil y un 0,05% en el caso del petróleo. Los combustibles representan un 67% sobre el total de SO_2 emitido. Sigue a continuación los procesos de obtención de metales a partir de sulfuros, como sucede en los casos de cobre, plomo y cinc con un 25% de emisión. El total de toneladas de SO_2 procedentes de fuentes antropogénicas es 102×10^6 T de la combustión del carbón; $28,5 \times 10^6$ T de la del petróleo; $12,9 \times 10^6$ T de la metalurgia del cobre; $1,5 \times 10^6$ T de la del plomo y $1,3 \times 10^6$ T para la metalurgia del cinc. En total, 146×10^6 T de SO_2 emitido. A esta cantidad deben agregarse las producidas por oxidación del SH_2 , el cual se emite a la atmósfera por descomposición de restos orgánicos producidos en actividades humanas, que a su vez contamina también a las aguas. La cantidad de SH_2 que procede de fuentes naturales

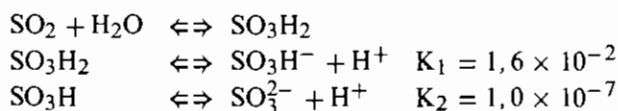
o antropogénicas no está perfectamente delimitada, pero corresponde a un valor muy elevado, algo menor que el del SO_2 .

El valor medio del SO_2 contenido en la atmósfera es de 0,3 a 1,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el del SH_2 0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En las proximidades de las fuentes de emisión como centrales térmicas el contenido en SO_2 puede subir hasta 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En analogía a lo que sucede en el caso del CO_2 , también el SO_2 puede ser retirado de la atmósfera por disolución en los océanos o por absorción en la biomasa además de una deposición seca o por arrastre de la lluvia directamente sobre el terreno. Se establecen intercambios por lo tanto, entre el SO_2 atmosférico con el que se desprende o deposita en los continentes o en los océanos. Estas interrelaciones entre atmósfera, continentes y océanos constituyen el ciclo del azufre que se puede considerar por separado en estas tres partes: En los continentes se desprenden a la atmósfera 70×10^6 T de SO_2 antropogénico y 68×10^6 T de SH_2 procedente de descomposición de restos orgánicos. A su vez el SO_2 atmosférico se deposita sobre la superficie terrestre en cuantía de 90×10^6 T y se absorbe por la vegetación otras 26×10^6 T. Con respecto a los océanos las cifras son: emiten 44×10^6 T de SO_2 y 30×10^6 T de SH_2 y por disolución absorbe 25×10^6 T y mediante precipitación del SO_2 atmosférico a la superficie marina se depositan 71×10^6 T. De los continentes pasan a los océanos por intermedio de los cursos fluviales 73×10^6 T, y por transporte atmosférico 26×10^6 T, mientras que los océanos devuelven a los continentes por este último medio 4×10^6 T.

La Naturaleza dispone de dos procedimientos para retirar SO_2 de la atmósfera y disminuir con ello su efecto contaminante. Uno es la disolución en las aguas marinas, y el otro su deposición sobre la superficie terrestre mediante captación por la vegetación y suelo. (deposición seca) o por arrastre del agua de lluvia (deposición húmeda).

Como en el caso análogo del CO_2 , la disolución del SO_2 en los océanos constituye un método muy eficaz de retirar este gas de la atmósfera. La capacidad de disolución de los océanos viene regida por unos conceptos teóricos semejantes a los indicados en el caso del CO_2 . En primer lugar, depende de las presiones parciales del gas en la fase gaseosa y líquida, los cuales a su vez vienen condicionados por otros factores como temperatura. Se aplica también el concepto de películas de flujo laminar en la interfase gaseosa-líquida. El coeficiente de cambio de SO_2 es constante por encima de un valor 6 del pH y disminuye drásticamente por debajo de pH 6. Ello es debido a los procesos químicos que se producen al disolver SO_2 en agua que da lugar en una primera fase, a la formación del ácido sulfuroso SO_3H_2 el cual se ioniza en aniones disulfito HSO_3^- y sulfito SO_3^{2-} , de acuerdo con el pH del medio:



Se manifiestan dos diferencias en el caso del SO_2 comparado con el CO_2 . Una de ellas, es la mayor solubilidad en agua del SO_2 (45 volúmenes de SO_2 por un volumen de agua) y el otro el valor más elevado de las constantes de ionización del ácido sulfuroso, comparado con el carbónico. A consecuencia de ambas, en el agua de mar, de $\text{pH} = 8$, predominan más las especies iónicas procedentes del SO_2 que del CO_2 .

Por otra parte, la velocidad de cambio en el caso del CO_2 viene controlada por la difusión en la fase líquida, que es diez mil veces menor que en la fase gaseosa, mientras que para el SO_2 es, por el contrario, de difusión a la fase gaseosa, ya que los coeficientes de cambio en esta fase vienen a ser unas tres veces superiores. Se puede calcular (3) el SO_2 que absorben los océanos y se obtiene un valor de 41×10^6 T/año, lo que representa un 28% del total de SO_2 emitido por fuentes antropogénicas (146×10^6 T/año).

La captación del SO_2 por la biomasa vegetal no tienen la importancia ni el significado que en el caso del CO_2 , pues mientras el primero produce agresión a la planta, el CO_2 resulta indispensable para que ésta construya sus tejidos vegetales. La entrada del SO_2 a la planta se produce a través de los estomas, aprovechando los momentos en que éstos se abren en función de sus necesidades de CO_2 y agua.

El intercambio SO_2 atmosférico-biomasa vegetal se puede expresar, con razonamientos análogos a los indicados para su disolución en aguas oceánicas, en función de unas resistencias al cambio de la fase gaseosa, a través del estoma y del mesófilo. Se puede llegar a calcular el valor de la resistencia al cambio y de su recíproco que es la velocidad de captación del SO_2 por las hojas de las plantas. El máximo valor de esta velocidad se ha calculado en $0,36 \text{ cm} \times \text{s}^{-1}$.

Utilizando un razonamiento análogo al que se usa para el agua de mar (3) se puede calcular la cantidad de SO_2 que capta la biomasa. Se obtiene así un valor medio aproximado de 26×10^6 T/año, lo que representa un 18% del total del SO_2 emitido a la atmósfera y un 40% del que disuelven los océanos.

En los cálculos anteriores se engloba dentro de la biomasa vegetal el SO_2 que se deposita directamente sobre la superficie terrestre o que es arrastrada a ella por la lluvia, pero la realidad es que la absorción en el terreno del SO_2 es muy diferente pues depende de varios factores y entre ellos su composición y humedad.

En resumen, la disolución del SO_2 en los océanos y su absorción por la biomasa vegetal retiran de la atmósfera 67×10^6 T/año, lo que representa un 46% del SO_2 emitido, quedando 79×10^6 T/año para producir sus efectos contaminantes y biológicos. Pero a esta cifra hay que descontar el que se va a eliminar por oxidación del SO_2 , proceso que puede conducir a la formación de SO_4H_2 y por tanto de la lluvia ácida, de acción contaminante y corrosiva, o bien a aerosoles de sulfato, factor contaminante inerte. Este último proceso se suma al de disolución en los océanos como los dos sistemas de eliminación del SO_2 que evitan la contaminación por este gas, pues no pueden incluirse

en esta categoría la absorción por la biomasa vegetal, o la oxidación a SO_4H_2 y formación de lluvia ácida.

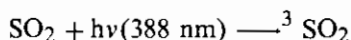
III.2. Procesos de oxidación catalítica y fotoquímica del SO_2 .

Constituyen los procesos de oxidación del SO_2 un punto crucial en la acción contaminante de este gas y que además marca una diferencia con el CO_2 . Este último sólo puede ser retirado de la atmósfera por disolución en el agua de mar o absorción en la biomasa. En el caso del SO_2 además de estos dos procesos puede ser eliminado en parte de la atmósfera mediante un proceso de oxidación.

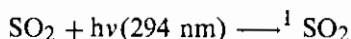
Un aspecto importante desde el punto de vista de la acción contaminante de este gas, es que la oxidación puede conducir a la formación de SO_3 el cual origina aerosoles de SO_4H_2 en contacto con la humedad atmosférica, cuando la oxidación transcurre en fase gaseosa. Sin embargo, en medio acuoso puede formarse directamente SO_4H_2 o si el pH es apropiado la oxidación puede conducir a la formación del anión SO_4^{2-} desprovisto de efecto contaminante. Este mismo anión puede formarse en el primer caso si la atmósfera contiene compuestos alcalinos, como por ejemplo el NH_3 .

Según el mecanismo seguido por el proceso de oxidación, que depende a su vez de las condiciones como se opera, fase gaseosa o acuosa y a su vez homogénea o heterogénea, se puede producir anión sulfato desprovisto de efectos biológicos y acción contaminante o bien SO_4H_2 y la correspondiente lluvia ácida.

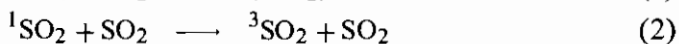
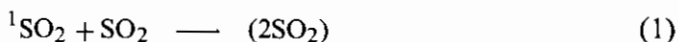
Considerando en primer lugar la oxidación en fase gaseosa, ésta se produce por procesos fotoquímicos que al final conducen a la formación de SO_3 , por intermedio de unos estados electrónicamente excitados del SO_2 . La absorción de radiación solar de 388 nm conduce a la formación de estado triplete del SO_2 :

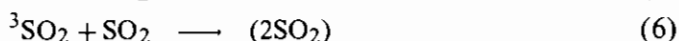


mientras que la absorción de radiación de 294 nm da lugar a estados singletes excitados

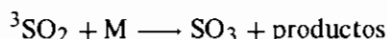


Se producen una serie de reacciones entre estos estados excitados, que conducen o bien a la formación de especies no excitadas (2SO_2) o la interconversión de estados singletes y tripletes:

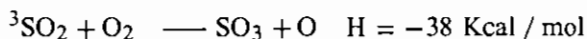




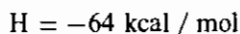
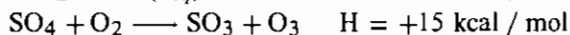
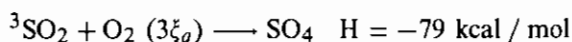
De estas reacciones destacan por su importancia las que dan lugar a un estado triplete del SO_2 (2) y (4) ya que es mucho más reactivo que las especies singletes y de él se origina el SO_3 por oxidación con otras sustancias (M):



Una de estas reacciones es la que tiene lugar entre el estado triplete ${}^3\text{SO}_2$ y la molécula de dioxígeno con formación de SO_3 y oxígeno atómico, el cual puede reaccionar posteriormente con otra molécula de O_2 y formar ozono:

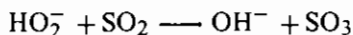


Esta reacción puede transcurrir por otra vía, a través del radical tetraóxido de azufre, SO_4 , con lo que resultan idénticos productos:

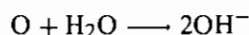
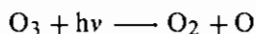


De mayor significado parecen ser las reacciones de oxidación del SO_2 con un conjunto de radicales, y entre ellos el hidroperóxido HO_2^- e hidroxilo:

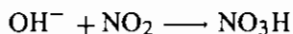
La reacción del SO_2 con el radical hidroperóxido, conduce a la formación de SO_3 , produciéndose además el radical hidroxilo



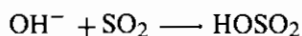
El radical hidroxilo, se forma en el proceso anteriormente indicado, pero también a partir del ozono troposférico existente en el *smog* fotoquímico:



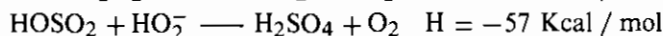
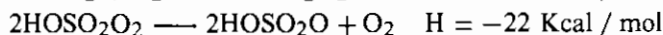
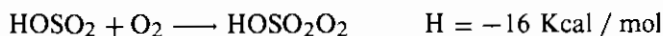
Este radical puede formar, por una parte, ácido nítrico al reaccionar con el NO_2 integrante de los vapores nitrosos:



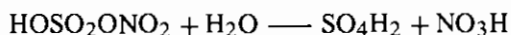
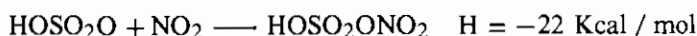
o bien dan lugar a SO_4H_2 por intermedio de una especie inestable HOSO_2 , formando en la reacción de radical OH^- con SO_2 :



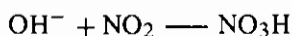
del cual derivan otros radicales por un conjunto de reacciones encadenadas, al final de las cuales se obtiene SO_4H_2 :



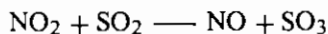
La reacción de la especie inestable HOSO_2O puede discurrir por otro camino, si reacciona con los vapores nitrosos, formando ácido nitril-sulfúrico el cual al hidrolizarse genera ácido SO_4H_2 y NO_3H :



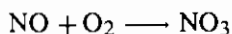
El ácido nítrico también puede formarse por reacción directa del radical hidroxilo con el dióxido de nitrógeno:



Otras reacciones de oxidación que pueden tener significado en atmósferas contaminadas con vapores nitrosos, son las que estas producen con el SO_2 o bien directamente con el NO_2 :



o mediante el radical intermediario NO_3



Algunos autores consideran que de todas las reacciones indicadas las más importantes en la formación de la lluvia ácida son las que se producen con el radical hidroxilo (4), pues aunque su proporción es baja en la troposfera, se forma en las reacciones del SO_2 con el radical hidroperóxido o en la de éste con los vapores nitrosos:

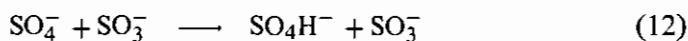
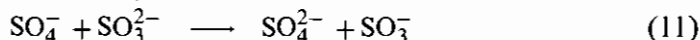
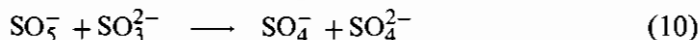
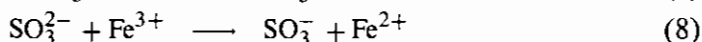
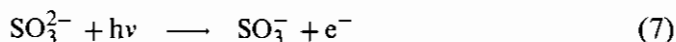


El ácido sulfúrico, formado al reaccionar el SO_3 producido con la humedad atmosférica se condensa formando gotas microscópicas de 0,1 - 0,2

μm , que son arrastradas por la lluvia o precipitan directamente sobre la superficie terrestre.

La oxidación del SO_2 en fase acuosa y homogénea puede dar lugar a la formación de SO_4H_2 o bien a anión sulfato de acuerdo con el pH del medio puesto que éste condiciona que el SO_2 pueda existir en la disolución acuosa, como SO_3H_2 , SO_3H^- y SO_3^{2-} . Es la especie SO_3^{2-} precisamente la que por oxidación puede transformarse en anión sulfato evitando que se produzca la lluvia ácida y para ello hace falta que el pH sea superior al valor del pK_1 ($K_1 = 1,6 \times 10^{-2}$).

La oxidación directa en disolución acuosa de las distintas especies en que se ha transformado el SO_2 por acción del O_2 atmosférico es lenta pero se acelera en presencia de iones metálicos especialmente Mn^{2+} , y Fe^{3+} que actúan como catalizadores. Esta reacción se inicia con la formación del radical SO_3^- formado fotoquímicamente por absorción de radiación del anión sulfito o bien por acción de un ión metálico catalizador.



Al formarse SO_4H_2 en el curso de estas reacciones, baja el valor del pH y si resulta inferior al pK_1 disminuye la velocidad de la reacción de oxidación. Sin embargo, la capacidad tampón del CO_2 y NH_3 disueltos permiten mantener el pH en el valor adecuado para que exista un valor máximo de SO_3^{2-} y la reacción se acelere. En este caso se formaría $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$ y efectivamente se ha comprobado la presencia de esta especie en el aerosol atmosférico.

III.3. Efectos biológicos y acción corrosiva de la lluvia ácida y de sus precursores.

La lluvia ácida interfiere en los ciclos biogeoquímicos con los cuales interaccionan los seres vivos y el medio ambiente. Los dos efectos más ostensibles son la acidificación de lagos y la deforestación por la muerte de los árboles, lo que es comprensible teniendo en cuenta la fuerte acidez de esta lluvia que en algunos lugares de Estados Unidos, como en Los Angeles con fuerte *smog* fotoquímico se han registrado valores de pH entre 2 y 3 siendo de

4,2 el valor promedio del pH en la región nororiental de los Estados Unidos (4).

Considerando en primer lugar la acidificación de los lagos, hay que tener en cuenta las reacciones químicas que tienen lugar al caer la lluvia ácida sobre el terreno, lo cual va a condicionar las características de las aguas que llegan al lago. Entre los ácidos de la lluvia y los aniones CO_3H^- y cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} procedentes de la meteorización de las rocas se puede producir un intercambio catiónico reteniéndose sobre el terreno los hidrogeniones de los ácidos.

El mayor o menor intercambio de los hidrógenos por cationes metálicos depende de las características de la cuenca hidrográfica, y muy especialmente del tipo de terreno. Si las aguas subterráneas o de la escorrentía pasan por terrenos graníticos, poco meteorizados, el intercambio es muy escaso y las aguas muy ácidas.

Las aguas pueden contener aniones bicarbonatos procedentes de la meteorización de las rocas y en ese caso pueden neutralizar parcialmente la acidez de las aguas que llegan al lago. Este efecto se denomina capacidad de neutralización de ácidos, y si es muy escasa el lago se acidifica. La norma general es, por lo tanto, que los lagos situados en regiones donde no hay rocas meteorizables se acidifican con la caída de lluvia ácida.

En los Estados Unidos son muy numerosos los lagos con valores de pH por debajo de 5 (4) y con una biota acuática alterada, e igual sucede en los lagos suecos.

Con respecto a los bosques de coníferas situados en altitudes relativamente elevadas, se han registrado daños muy intensos y así en algunas regiones de Estados Unidos se ha demostrado que en los últimos 25 años han muerto un 50% de las especies de *Picea rubens*. En Alemania Federal están dañados o han muerto casi el 50% de sus bosques. Con respecto a España un informe de los ecologistas (2) señala que al menos un 25% de la superficie forestal está enferma en mayor o menor grado.

No hay aún pruebas evidentes que acusen a la lluvia ácida como único responsable de la deforestación masiva producida en estos últimos años. Lo indudable es que interviene junto con otros factores a la enfermedad o muerte del árbol. También es indudable que los suelos con escasos nutrientes y algo ácidos en los que se asientan las coníferas de altura junto con las bajas temperaturas y fuertes vientos reinantes son factores que pueden influir en el debilitamiento general del árbol facilitando la acción de insectos, hongos y plantas parásitas que provoquen su destrucción.

La mayoría de las investigaciones apuntan a una falta de nutrientes como causa primordial de la enfermedad. Se atribuye al aluminio liberado de las rocas por la lluvia ácida una interferencia con la captación de calcio por las raíces. La propia lixiviación de la lluvia ácida puede hacer perder al suelo nutrientes esenciales para el árbol como calcio, magnesio y potasio.

Además la acidez del terreno donde cae la lluvia puede matar las bacterias que liberan nutrientes de la materia orgánica en descomposición.

La acción corrosiva de la lluvia ácida sobre diversos materiales se manifiesta con mucha claridad en sus efectos en los materiales de construcción, papel, cuero y metales. Las calizas utilizadas como material de construcción absorben con facilidad la lluvia ácida o su precursor el SO_2 , formándose en su interior SO_4Ca que al tener un mayor volumen molecular que el CO_3Ca crea tensiones mecánicas produciéndose finalmente la demolición de la piedra caliza. La madera absorbe SO_2 y experimenta degradación debido a la reacción del sulfito con la celulosa.

El papel y el cuero experimentan una degradación muy importante a consecuencia del SO_2 atmosférico y se cita como detalle curioso, que fue Faraday en 1843 (3), el que indicó que el deterioro de los sillones de cuero del Club de Londres era atribuible al SO_2 .

En los metales, especialmente hierro y acero ejerce una acción corrosiva que se relaciona directamente con el contenido en SO_2 de la atmósfera y la humedad relativa.

III.4. Situación actual del tema y perspectivas del futuro.

Desde hace ya algunos años y más concretamente desde la Convención de Ginebra de 1979, se viene efectuando en la mayor parte de los países más industrializados (Norteamérica, Japón y C. E. E.) una reducción en la emisión de SO_2 , mediante procesos de mejora de la calidad del combustible o de la propia combustión. En el año 1983 se firma un protocolo en el que 21 países se comprometen a reducir en un 30% la emisión de SO_2 para el año 1993, en relación con la cifra del año 1980, al que de momento no se adhiere España.

Los métodos para lograr esa disminución en la emisión de SO_2 , se centran fundamentalmente en la combustión de las centrales térmicas que son las más contaminantes con respecto a este gas. Por una parte, se están efectuando mejoras técnicas con las centrales ya instaladas y en las de nueva construcción se están montando con modificaciones importantes que evitan una emisión masiva de SO_2 .

Los procedimientos para reducir la emisión de SO_2 en los combustibles de las centrales térmicas son tres: eliminación o reducción de el contenido en azufre de los combustibles empleados, eliminación del SO_2 durante el proceso de combustión, desulfuración de los gases emitidos.

La desulfuración del combustible se lleva a cabo por lavado del carbón, con lo que se elimina el azufre inorgánico que contiene en forma de piritas, pero no el azufre orgánico. La central española de Andorra en Castellón, tiene instalado un lavadero de carbón y con ello consigue eliminar un 30 - 35% del azufre total. El método no es pues muy satisfactorio, pero de todas formas se debía aplicar en las centrales que usan como combustibles lignitos.

La desulfuración durante el proceso de combustión se efectúa agregando absorbentes del SO_2 como calizas o dolomita en la combustión. Esta técnica de lecho fluidificado, no se puede aplicar a las centrales ya instaladas y además la desulfuración que produce es de menor cuantía que la de los gases emitidos en la combustión.

Este último proceso, eliminación del SO_2 emitido en los gases de la combustión, denominado FGD, es uno de los métodos más eficaces, al menos para la mejora de las centrales térmicas ya instaladas. Con él se consigue eliminar entre el 85 y 95% de las emisiones de SO_2 . Consiste en nebulizar caliza húmeda entre los gases de escape de la central la cual retiene el SO_2 emitido. Tiene el inconveniente, de la descarga de la caliza, que retiene el SO_2 y además, que no evita la contaminación con vapores nitrosos que también se producen en las centrales térmicas.

En el caso de los procesos metalúrgicos que producen gran emisión de SO_2 , la solución es también utilizar técnicas FGD de desulfuración de los gases producidos, ya que en este caso no se puede aplicar las otras técnicas, puesto que se está tratando un sulfuro metálico. De todas las maneras, la emisión de SO_2 ya hemos dicho que es muy superior en centrales térmicas en relación con los procesos industriales.

La solución más eficaz del problema de la contaminación con SO_2 se encuentra en la instalación de nuevas centrales térmicas con tecnología mejorada, ante las dificultades de montar centrales hidroeléctricas por falta de localización adecuada, y el rechazo general a las centrales nucleares. Se han desarrollado tres técnicas, de lo que se denomina carbón limpio, para las nuevas instalaciones. Una es la combustión en lecho fluidificado, en la que se suspende mediante una fuerte corriente de aire un lecho turbulento de carbón y caliza. De esta manera, se puede conseguir una combustión a temperaturas inferiores a las de cualquier central convencional, y esto aporta la ventaja de evitar la formación de vapores nitrosos, además de la retención del SO_2 en la caliza. Modificación a esta técnica es la combustión presurizada también en lecho fluidificado, con la que se consigue una mejora del rendimiento.

La técnica realmente eficaz para eliminar emisiones de SO_2 y vapores nitrosos es la instalación de centrales térmicas de gasificación. En ellas el carbón se hace reaccionar con vapor de agua en corriente de aire, a altas temperaturas con lo que se produce el denominado gas de agua, mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Posteriormente se quema este gas mediante un proceso técnico con el que se obtiene un alto rendimiento en la combustión, bastante superior al de una central térmica convencional.

Existe, por lo tanto, solución para este problema, aunque resulta costoso, pues el primer paso a acometer es modificar las centrales antiguas que en Norteamérica representan más de la mitad (4). La forma de conseguirlo es restaurando las centrales viejas, con incorporación de unidades de combustión basadas en las nuevas tecnologías del carbón limpio aunque se mantenga su equipamiento en las otras partes que no afectan al proceso de combustión.

La situación en nuestro país con respecto a la lluvia ácida podríamos calificarla de contradictoria. Existen datos recogidos en la región catalana que muestran la presencia de ácidos en la lluvia recogida con valores de pH de 4,7 (Montseny), 4,57 (Barcelona), 4,4 (Sierra de Pradés).

En el conjunto de las cinco estaciones en las que se han hecho mediciones por el Instituto de Sanidad Carlos III, no han recogido ningún dato que acuse valores de acidez semejantes a los indicados anteriormente. Bien es verdad que las mediciones que realizan se refieren sobre todo a aerosoles de sulfatos y los de pH sólo se hicieron en las estaciones de Madrid con un valor medio de 5,6 calificado como prácticamente neutro y en San Pablo de los Montes con valores de 6,5 a 7, por lo que se califica como lluvia alcalina. El valor de pH 5,6 es el que corresponde al agua de lluvia con CO_2 disuelto a saturación sin contener ácido sulfúrico o nítrico.

En el año 1988, se pone en marcha en nuestro país el programa CORINE-AIRE de la CEE para la detección de contaminantes especialmente SO_2 y vapores nitrosos, con el que se ha realizado un inventario de emisiones de SO_2 , NO y partículas. España ocupa un lugar bastante destacado dentro de la CEE en emisiones de SO_2 (1) siendo Galicia la región que presenta mayores índices de contaminación. Posiblemente influye en ello la presencia en esta zona de dos centrales térmicas muy importantes, la de Puentes de García Rodríguez y la de Meirama, ambas en la provincia de La Coruña con emisiones de 632.766 t de SO_2 /año la primera.

La Dirección General del Medio Ambiente (1) ha llevado a cabo en 1988 un inventario estimativo de las emisiones de contaminantes atmosféricos siguiendo la metodología del programa EMEP de la Convención de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia. Deducen de los datos obtenidos que en nuestro país las emisiones de SO_2 según las fuentes son: centrales térmicas 67%, industria general 25%, fuentes móviles 5%, calefacciones domésticas 2%.

El sistema nacional integrado de vigilancia de la calidad del aire ha instalado, una red de estaciones de medida de contaminantes distribuidas en 14 comunidades autónomas. Dentro del Programa EMEP de Contaminación Transfronteriza se han montado cuatro estaciones en San Pablo de los Montes (Toledo), La Cartuja (Granada), Las Roquetas (Tarragona) y Logroño (La Rioja). Estas estaciones están integradas en la red BAPMON (Background Air Pollution Monitoring) y se realizan mediciones de SO_2 , NO_2 , aerosoles de sulfato, pH, nitratos, amonio, calcio, cloruros, potasio, sodio y magnesio, además de mediciones meteorológicas.

Se cuenta también con una red de corrosión atmosférica en San Pablo, con expositores de materiales diversos, sobre unas muestras que luego son analizadas por el Instituto sueco de corrosión. Finalmente, se ha instalado en Tenerife una estación para mediciones de contaminación atmosférica de fondo integrada en la red mundial BADMON del programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA) con medidas continuas de CO_2 ,

O₃ troposférico, N₂O, y CH₄ y con alguna periodicidad isótopos ¹³C y ¹⁴C del CO₂.

Por los datos obtenidos en las estaciones que siguen el programa EMEP de la Convención de Ginebra, se aprecia como valor mínimo de pH el de 4,42 en períodos de poca frecuencia y escasa duración. Por el contrario son abundantes valores de pH mayores de 7 con un máximo de 8,06. Resulta según estos datos (1) que la lluvia ácida de Centroeuropa, es en nuestros país lluvia alcalina. Bien es verdad que la propia publicación oficial (1) reconoce que los datos recogidos son insuficientes para llegar a conclusiones absolutas.

Se han tratado de justificar estos datos anormales de España comparados con el resto de Europa, teniendo en cuenta la posición geográfica de nuestro país de clima mediterráneo con escasa pluviosidad y los vientos saharianos que aportan partículas alcalinas. Creo que en parte, puede aceptarse esta justificación, pero no en su totalidad, puesto que el principal emisor de SO₂ es la central térmica de Puentes situada en Galicia que no es una región de escasa pluviosidad y en la que raramente llega viento sahariano. Lo que se debe apreciar también es la localización de las estaciones de medida y si están situadas cerca o no de los focos de emisión especialmente de centrales térmicas.

Es indudable que España no importa contaminación de lluvia ácida. No existe contaminación transfronteriza probablemente por nuestra situación geográfica y la dirección de los vientos predominantes que no permiten la llegada del único vecino peligroso que tenemos en este aspecto. Pero también es verdad que no exportamos lluvia ácida y ésta, si se produce, cae en nuestro país ocasionando deterioro de la biomasa vegetal y acciones corrosivas. También resulta extraño que el SO₂ en España se oxida totalmente a sulfato sin producir SO₄H₂, pues esto es más difícil de justificar por los motivos indicados.

En definitiva creemos que el problema de la lluvia ácida no está estudiado a fondo en España, tanto en su producción como en los efectos que produce en la biomasa vegetal y en la corrosión. Por otra parte, las medidas que se han tomado para evitarla son muy insuficientes, quizás como consecuencia de la escasa información disponible, lo cual resulta muy conveniente desde un punto de vista económico sin tener en cuenta ninguna otra consideración, que sería necesario tenerla.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Medio ambiente en España. Publicación de la Dirección General del Medio Ambiente. M.O.P.U. 1989
- (2) QUERCUS. Julio - Agosto 1988.
- (3) D. J. SPEDDING. (1989) *Contaminación Atmosférica*. Ed. Reverté.
- (4) V. A. MOHNEN. Octubre 1988. *Investigación y Ciencia*.
- (5) A. FERNANDEZ. (1990) "*Investigaciones de iones sulfato en las partículas en suspensión en el aire*". Tesis Doctoral en Farmacia.

IV. AIRE URBANO

Las grandes aglomeraciones urbanas, generan una importante contaminación atmosférica, además de residuos sólidos y aguas fecales, la cual ejerce una acción local sobre los habitantes y materiales de la ciudad, pero además contribuye en gran medida a la contaminación general de la atmósfera terrestre, participando en los tres procesos antes indicados.

Son dos las principales causas de la contaminación del aire en las ciudades: calefacciones domésticas y circulación rodada, aparte de la que pueden emitir pequeños talleres e industrias localizadas en el casco urbano. A este respecto, no está de más recordar que la OMS (1), define la salud como “*un estado completo de bienestar físico, mental y social y, no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades*”. Dentro de este contexto, es frecuente en las ciudades, focos de emisión de malos olores, ruidos, etc., que atentan contra el bienestar con el cual hay que contar, pues la sociedad además del progreso técnico, desea mejorar en la calidad de vida.

Un caso especial de contaminación, lo presentan algunas ciudades por su particular situación geográfica y condiciones climatológicas, las cuales pueden ser causa de una contaminación muy elevada o de tipo diferente al habitual, por quedar los gases atrapados en una zona localizada. Un ejemplo típico, lo constituye la ciudad de Los Angeles, situada en una hondonada, rodeada de montañas, que dificultan la libre circulación de los vientos y además, con un grado de insolación muy elevado, frecuentes inversiones de temperaturas y un número muy elevado de coches. En estas condiciones geográficas y meteorológicas, los gases de escape de los automóviles quedan encerrados en el ámbito de la ciudad, y se producen una serie de reacciones fotoquímicas, entre sus componentes, que dan lugar a un tipo de contaminación especial, denominada “*niebla fotoquímica*”, o “*niebla oxidante*”. Se caracteriza, por su elevado contenido en óxidos de nitrógeno, especialmente dióxido de nitrógeno, ozono y, peróxidos, gases todos ellos de actividad biológica en el ser humano.

Algunas ciudades, están situadas próximas a núcleos industriales importantes o a centrales térmicas, con lo cual pueden sufrir los habitantes de la ciudad, además de su contaminación propia, las procedentes de estas industrias, que en algunos casos son diferentes a las habituales en las atmósferas urbanas.

Si se consideran exclusivamente ciudades con características normales de ubicación geográfica y climatológica, y sin industrias próximas, los contaminantes que se encuentran en el aire urbano, son en su mayor parte, los que corresponden a procesos de combustión, como CO₂, SO₂, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y humos. Para formarse una idea de lo que representan, dentro de la contaminación general de la atmósfera, indicamos el porcentaje que emiten las ciudades de algunos de estos contaminantes, sobre el contenido global de la atmósfera terrestre:

CO₂ : 12%

SO₂ : vehículos 10%, calefacciones 2%. Total=12%.

NOx: vehículos 48% calefacciones 21%. Total=69%.

Partículas: vehículos 10% calefacciones 2%. Total=12%.

Hidrocarburos: vehículos 40%.

De estas cifras, destacan las de emisión de óxidos de nitrógeno y partículas, sobrepasando, en especial la primera, a la que lanza la industria.

Por otra parte, las ciudades emiten unos contaminantes muy específicos de ellas, a consecuencia del intenso tráfico rodado, como son monóxido de carbono, aerosoles de plomo procedentes de los antidetonantes de las gasolinas y, una serie de compuestos oxidantes presentes en la niebla fotoquímica ya mencionados, que participan en el efecto invernadero. A todo ello, se une la emisión de freones de los frigoríficos domésticos y de los spray, en los países en los que no está prohibido su uso, que destruyen la capa de ozono estratosférica.

Por lo tanto, no se puede atribuir a las centrales térmicas y a la industria, como los únicos responsables de la contaminación atmosférica general, pues las ciudades contribuyen en una medida importante a ella, especialmente en determinados contaminantes. No es solo la revolución industrial la causante de la contaminación, como con harta frecuencia se dice, también intervienen todos los factores que ocasionan la formación de grandes aglomeraciones urbanas, como desplazamiento a la ciudad del campo, desarrollo demográfico, progreso social y consumismo, etc. La proliferación de neveras, aire acondicionado y coches, ha hecho crecer en el espacio de unas pocas décadas la contaminación urbana y, en consecuencia también la general de la atmósfera. Parece sin embargo, que causa menos impacto este tema que los del efecto invernadero o la destrucción de la capa de ozono, en parte por una menor incidencia en el ecosistema y además, porque una reducción en la contaminación de la ciudad, exige algunos sacrificios en avances sociales, como es el del uso del coche particular. Su sustitución por transportes públicos, si además son estos de tracción eléctrica, disminuye fuertemente la contaminación, sobre todo en óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, pero hay muy poca predisposición al cambio, probablemente porque la alternativa que se ofrece no reúne condiciones idóneas.

La contaminación por calefacciones, es un problema estacional, que solo se manifiesta durante algunos meses, mientras que la circulación rodada lo es durante todo el año, aunque también experimenta ligeras variaciones estacionales. En ambos casos, se puede reducir la emisión de gases contaminantes, con una mejora en el proceso técnico de combustión o de los combustibles empleados, por técnicas conocidas, pero cuya aplicación se demora en muchos casos por la elevación de los costos, y por el coste político que significa para el que debe imponerlo.

Las medidas a adoptar, para conseguir una atmósfera urbana más pura, son semejantes a las indicadas en el apartado de la lluvia ácida. En primer

lugar, emplear combustibles con bajo contenido en azufre, tanto referido a los carbones y fuel oil para calefacciones, como a gas oil y gasolinas, a fin de disminuir la producción de SO_2 . Mejorar técnicamente los sistemas de combustión, con lo que se consigue reducir la emisión de CO, humos e hidrocarburos.

La producción de los óxidos de nitrógeno por los vehículos de motor, puede reducirse con sistemas catalíticos acoplados al tubo de escape, pero presenta el inconveniente este método, de requerir gasolina sin antidetonantes, ya que el plomo de estos envenenan al catalizador.

En fin, la emisión de humos e hidrocarburos, importante sobre todo en los motores Diesel, se puede disminuir en todos los tipos de coches, incluidos los de gasolina, con sistemas de inyección, y la de aerosoles de plomo, mediante el empleo de gasolina sin antidetonante, que ya se ha empezado a introducir en el mercado.

Claro está, que todas estas medidas originan que vayan acompañadas de una legislación de cumplimiento de las mismas y, de control. En el caso de las calefacciones, se han dictado muchas disposiciones y reglamentos, tanto a nivel nacional como local, e igual puede decirse de las actividades insalubres, molestas y peligrosas, que atentan a la salud o bienestar. Para los coches, se ha dictado una directiva por el Consejo de Ministros de la CEE (24-12-1988), que fija límites de emisión de CO, NO_x e hidrocarburos, en los gases de escape, a cumplir según la cilindrada en 1991 o 1992.

Hasta ahora, solo hemos venido hablando de la emisión de contaminación y medios o normas que la limitan, pero en el tema de la contaminación atmosférica, hay que contar siempre con dos factores; emisión de los contaminantes y, su dispersión a las capas superiores de la atmósfera, por acción de los vientos, o bien su deposición en el terreno por precipitación o arrastre con el agua de lluvia.

Los factores meteorológicos, juegan un papel primordial en la disminución de la contaminación urbana. Los vientos en calma, con ausencia de lluvias y, sobre todo las inversiones de temperaturas, si duran durante algunos días, hace que se multiplique por diez o veinte el nivel de sustancias contaminantes en el aire. Además, en las condiciones de inversión de temperatura, que impide la mezcla por convección turbulenta del aire inferior con el resto de la atmósfera, pueden producirse reacciones entre radicales de iniciación fotoquímica, si la insolación es suficiente, con formación de contaminantes de acción más perjudicial que los emitidos, como ozono y peróxidos. Esto es lo que sucede en la niebla fotoquímica.

La intensidad y dirección de los vientos predominantes, las características térmicas y de humedad de las masas de aire, son factores que ejercen una gran influencia en la polución. Las impurezas, se difunden a la atmósfera por movimientos verticales y horizontales, acoplados entre sí, que modificados por la influencia del relieve geográfico, dan lugar a la turbulencia del aire. Pero la eliminación de la impurezas del aire de las ciudades, produce naturalmente, la contaminación de la atmósfera, en general.

El panorama actual de las grandes aglomeraciones urbanas, no es muy halagador, pues prácticamente todas fueron construidas sin tener en cuenta los factores que se deben considerar, para una planificación urbanística correcta contra la contaminación. Además, conforme aumenta el nivel social, aumenta también el número de coches, de frigoríficos, aires acondicionados, etc; es decir de focos de emisión de contaminantes, que se multiplica a su vez, por el índice de expansión demográfica.

Es verdad, que todas las ciudades importantes, tienen sistemas para el control de los contaminantes presentes en la atmósfera urbana, automáticos en el caso de Madrid y Barcelona.

Unas ciudades, reúnen mejores condiciones geográficas, climatológicas y, de ausencia de industrias que otras, pero en todos los casos, la circulación rodada y las calefacciones, generan abundante polución. Técnicamente, no hay dificultades insalvables para resolver esta situación y, se pueden mejorar la calidad de los combustibles, y los sistemas de combustión, tanto en calefacciones como en coches. La dificultad estriba en su aplicación, ya que implica elevados costos económicos.

Un tema importante, es reducir la contaminación, cuando se sobrepasa el nivel máximo permisible de algunos contaminantes, en especial SO_2 y humos. Las normas restrictivas, en el uso de las calefacciones y del coche particular, no son cómodas de aplicar, por la autoridad a la que corresponde y, por otra parte, la sociedad parece que prefiere algo de contaminación, a cambio de un nivel de vida más alto, que es en definitiva lo que sucede, cuando se emigra del campo a la ciudad, o al menos es lo que se busca.

IV.1. Contaminantes del aire urbano.

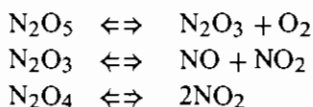
Anhidrido sulfuroso. La contribución del SO_2 producido en calefacciones y coches, 10% y 2%, respectivamente, a la contaminación general de la troposfera es escasa, comparada con centrales eléctricas e industrias. Sin embargo, en el ámbito urbano constituye, junto con los humos, un indicador del grado de contaminación de la ciudad, y es obligada su determinación cuantitativa, generalmente por medición automática, para conocer en todo momento el estado de la atmósfera urbana. En todas las legislaciones, se fijan unos límites máximos del contenido en este gas, que no se deben sobrepasar, adoptando si es preciso medidas restrictivas.

Lo indicado en el apartado de la lluvia ácida, es aplicable al SO_2 de la atmósfera de la ciudad, con algunas matizaciones. En primer lugar, es más factible en este caso conseguir una reducción en los niveles de emisión de SO_2 , durante los procesos de combustión, con el empleo de combustibles con menor contenido en azufre. El empleo de gas natural, electricidad o gas-oil parcialmente desulfurado, para muchas de las combustiones urbanas, en sustitución del carbón, ha hecho bajar los índices de contaminación, tanto en SO_2 , como en humos y, en algunos casos espectacularmente, como en Londres.

Otra diferencia entre la emisión de SO_2 en las ciudades o, en centrales térmicas e industria, con ventaja por el contrario, para estas últimas, es que el SO_2 se lanza en la ciudad a la atmósfera, a alturas más bajas, ya que en industrias y centrales térmicas, es obligatorio chimeneas mucho más altas que las domésticas. Además, el SO_2 emitido por los coches, en los gases de escape, especialmente los de motor diesel, se lanzan a nivel del suelo. Estos hechos, pueden adquirir un cierto significado desde un punto de vista sanitario, ya que se puede producir una mayor inhalación de SO_2 .

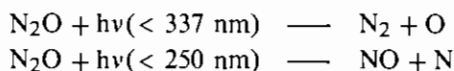
Oxidos de nitrógeno. Los vehículos a motor, constituyen la fuente antropogénica más importante de emisión de óxidos de nitrógeno (48%) y, junto a las calefacciones, representa un 69% del total que se lanza a la atmósfera, por actividades humanas. Un problema que plantean los óxidos de nitrógeno, es que no se pueden eliminar por ninguno de los procesos usados para el SO_2 , mediante absorción en calizas o dolomitas. Es más, los procesos técnicos de combustión más eficaces, con mayor rendimiento energético, en los que disminuye la emisión de óxidos de carbono y humos, conducen a una mayor producción de óxidos de nitrógeno.

De los seis óxidos de nitrógeno que han podido ser aislados y cuyas características y propiedades se conocen perfectamente, tres de ellos, monóxido de dinitrógeno N_2O , monóxido de nitrógeno NO y dióxido de nitrógeno NO_2 , son estables, mientras que los restantes, trióxido, tetraóxido y pentóxido de dinitrógeno, N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 , son inestables originando reacciones de descomposición, con producción de NO y NO_2 :



Además de estos óxidos, hay que tener en cuenta también, al radical nitrato NO_3 , no aislable, presente como intermediario en varias reacciones fotoquímicas de los óxidos de nitrógeno.

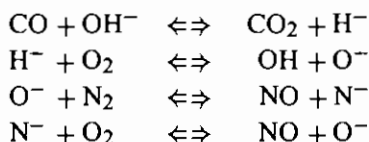
Los tres óxidos estables, N_2O , NO y NO_2 , se encuentran siempre presentes en las atmósferas contaminadas. El monóxido de dinitrógeno, puede ser emitido a la atmósfera por causas naturales, debido a la descomposición de las proteínas por microorganismos. Al ascender a altitudes elevadas, absorbe radiación ultravioleta con formación de nitrógeno y oxígeno atómicos, y transformación en NO :



Para su fotodisociación a nitrógeno atómico, requiere una radiación ultravioleta de menor longitud de onda ($> 250 \text{ nm}$), que cuando lo hace a oxígeno atómico ($< 337 \text{ nm}$), lo que significa una mayor altitud en el primer caso.

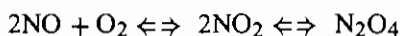
Además de por fuentes naturales, el N_2O puede ser emitido por actividades humanas y muy especialmente, por el empleo de abonos nitrogenados. Este óxido, es un contaminante primario, con una acción biológica útil para el ser humano, como anestésico dental, pero su interés como contaminante estriba en que por fotodisociación puede producir NO y de este, el NO_2 , que ya son óxidos con una acción biológica desfavorable.

Los óxidos, NO y NO_2 , se emiten en las ciudades con los gases de escape de los coches, y también se producen en la atmósfera por oxidación del NH_3 presente en ella. Este óxido se produce en todas las combustiones a temperaturas elevadas, en las cuales reaccionan las moléculas de dinitrógeno y dióxígeno por intermedio de unos radicales, formados en una serie de reacciones en cadena, en las cuales interviene como promotor, el CO producido también en la combustión. En estas reacciones van a participar, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno atómicos:

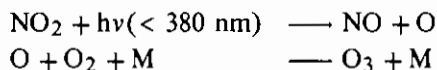


La producción de NO depende marcadamente de la temperatura; con una mayor elevación de ésta aumenta la proporción de NO.

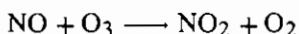
El óxido nítrico, es el progenitor del NO_2 , el cual se forma en la troposfera por reacción del primero con el oxígeno atmosférico, en una reacción reversible que depende de la temperatura.



En el efecto contaminante del NO_2 juega un papel destacado la fotodisociación que tiene lugar al absorber radiación ultravioleta de longitud de onda inferior a 380 nm. En esta reacción, se forma oxígeno atómico, que al reaccionar con la molécula de dióxígeno, en presencia de un tercer cuerpo (M), da lugar a la formación de ozono:



El ozono producido en esta reacción, regenera de nuevo el dióxido de nitrógeno, al reaccionar con óxido nítrico:

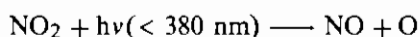


La proporción de NO y NO_2 que existe en la mezcla de óxidos de nitrógeno viene regulada por esta reacción cuando existe además ozono, cosa que sucede en la niebla fotoquímica.

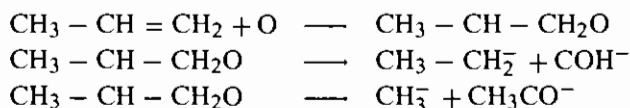
Ozono y peróxidos. Niebla fotoquímica. Como ya dijimos, la niebla fotoquímica es un tipo de contaminación específica de los vehículos a motor, pero requiere unas condiciones geográficas y climatológicas determinadas, como sucede en la ciudad de Los Angeles. Fuerte insolación e inversiones de temperatura, son factores climatológicos importantes para la formación de la niebla fotoquímica.

En estas condiciones se producen una serie de reacciones fotoquímicas (2) en las que juegan un papel predominante los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, producidos ambos en la combustión del motor. Estas reacciones en cadena conducen a la formación final de ozono y de nitratos de peroxo ácido (PAN), compuestos ambos a los que pueden atribuirse parte del efecto agresivo de la niebla fotoquímica.

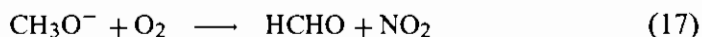
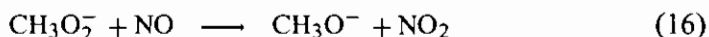
La fotodisociación del NO_2 por absorción de luz ultravioleta que conduce a la formación de oxígeno atómico constituye el comienzo en esta serie de reacciones:



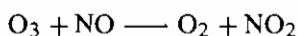
Este oxígeno atómico reacciona con los hidrocarburos lanzados a la atmósfera con los gases del tubo de escape de los coches, especialmente con los hidrocarburos olefínicos, dando lugar a la formación de radicales:



Los radicales originados, se transforman en aldehídos por reacción con el dióxígeno o con el NO, en el curso de una serie de reacciones en cadena en las cuales se originan peróxidos y dióxido de nitrógeno:



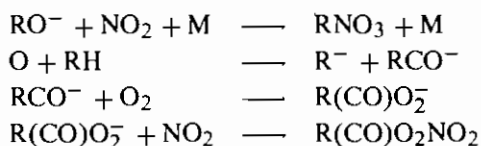
Se establece una relación entre la proporción de hidrocarburos, NO, NO_2 , O_3 y aldehídos. Al aumentar la concentración de hidrocarburos en la atmósfera procedentes de los gases de escape, disminuye la de NO a consecuencia de la reacción que éste produce con los radicales peroxo alquilo (2). Este hecho, ocasiona que aumente la concentración del O_3 formado a expensas del NO_2 , ya que su reacción de destrucción por el NO disminuye:



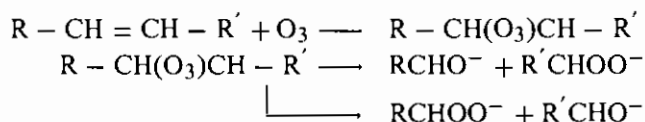
Al mismo tiempo también disminuye la concentración de hidrocarburos y aumenta la de aldehídos.

Es muy importante para comprender la acción irritante y agresora sobre algunos materiales de la niebla fotoquímica, considerar otro tipo de reacciones que tiene lugar con los radicales hidrocarburos y el NO_2 , cuya concentración ha ido aumentando por la reacción anteriormente citada.

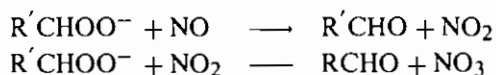
En estas reacciones se forman peróxidos y entre ellos el nitrato de peroxo ácido, $\text{CH}_3\text{COONO}_2$, denominado PAN, de gran actividad biológica:



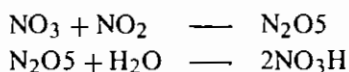
El ozono presente en la niebla fotoquímica puede reaccionar con los hidrocarburos olefinicos, generando un ozónido, el cual se descompone posteriormente por dos vías diferentes, produciendo radicales:



Estos radicales reaccionan a su vez con los óxidos NO y NO_2 , formándose entre otros compuestos el radical nitrato NO_3 y aldehídos:

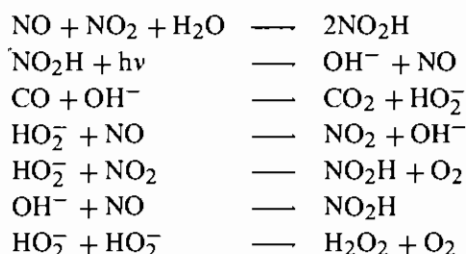


La acidez de la niebla fotoquímica es debida a que el radical nitrato formado en la reacción anterior, reacciona con el NO_2 dando lugar al N_2O_5 , el cual se transforma en ácido nítrico por acción de la humedad. También se puede formar este ácido por reacción entre el NO_2 y el O_3 en la que se forma radical NO_3 , que luego reacciona con el NO_2 :

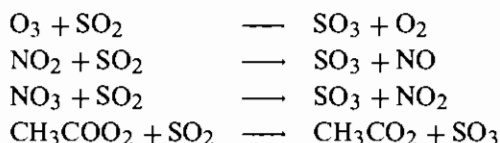


La formación de ácido nítrico por estas dos ecuaciones explica la contribución de la niebla fotoquímica a la lluvia ácida.

El monóxido de carbono, CO , que se produce en la combustión de los motores de explosión y que se emite mezclado con los óxidos de nitrógeno en el tubo de escape, va a intervenir en las reacciones que se producen en la niebla fotoquímica que al final conducen a la formación de peróxido de hidrógeno:



Otro gas presente en los tubos de escape, es el SO_2 que puede intervenir también en varias de las reacciones que tienen lugar en la niebla fotoquímica. Entre ellas cabe destacar sus reacciones con el O_3 , el NO_2 y radicales nitrato y peroxo ácidos, con los cuales se oxida a SO_3 :

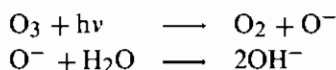


El SO_3 así formado, reacciona con la humedad atmosférica y forma neblinas de SO_4H_2 que dan lugar a lluvia ácida.

En resumen, en las reacciones que se producen en la niebla fotoquímica se forman O_3 , NO_2 , peroxo compuestos y aldehído compuestos, todos ellos de acción agresiva sobre los seres humanos, plantas y materiales diversos, pero sobre todo caucho, y además los ácidos sulfúrico y nítrico dando lugar a una lluvia ácida.

Monóxido de carbono. Es un contaminante importante en las ciudades, y muy especialmente en locales cerrados o sitios de escasa ventilación como túneles de carreteras, ya que es un tóxico para el ser humano y todos los animales que usen hemoglobina como transportador de O_2 , pues impide la oxigenación reversible al unirse fuertemente al hierro de este pigmento respiratorio.

Existen dos fuentes naturales que lanzan CO a la atmósfera. Una de ellas, la oxidación del metano presente en la atmósfera debido a causas naturales, por el radical OH^- , el cual se forma por fotodisociación del O_3 :



La oxidación con el radical OH^- , sigue una serie de pasos transformándose el metano en radicales metilo (CH_3^-), metoperóxido (CH_3O_2^-) y metoxilo (CH_3O^-), con formación final de formaldehído (HCOH), el cual se fotoliza originando el CO.

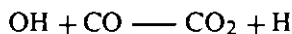
Más importante es la emisión de CO de las aguas oceánicas superficiales, en las cuales se ha formado por oxidación de materia orgánica, bien de tipo fotoquímico o mediante organismos vivos.

Las fuentes antropogénicas de emisión del CO, son cualquier tipo de combustión que se realice sin un exceso de aire, y muy especialmente los coches. Se calcula en $2,6 \times 10^8$ T.año⁻¹ el total de CO que se lanza a la atmósfera, pero esta cantidad no representa más del 10% del CO emitido por fuentes naturales.

El contenido normal de CO en el aire urbano es de 100 mg.kg⁻¹, pero en sitios no muy ventilados como túneles de carreteras puede ascender a 300 mg.kg⁻¹.

Aunque el CO ejerce una acción manifiestamente tóxica en los seres humanos, no resulta excesivamente peligrosa en atmósfera libre, pues se difunde rápidamente y además experimenta procesos de descomposición en la atmósfera, de tal manera que se ha calculado en 0,2 años su vida media en la misma.

Por medidas del perfil vertical en el contenido en CO, se observa que éste permanece constante en la troposfera, experimentando ya una disminución apreciable al entrar en la troposfera, que se acrecienta aceleradamente en la estratosfera inferior. La explicación pudiera ser su reacción con radicales hidroxilo de la estratosfera:



Esta reacción puede producirse a nivel de la troposfera en los casos de niebla fotoquímica.

Además de esta descomposición fotoquímica, el CO se descompone en el suelo por hongos y plantas. La acción de los hongos se considera suficiente para eliminar holgadamente todo el CO que se emite.

A pesar de lo que acabamos de indicar, el CO es un contaminante cuyo nivel en la atmósfera debe controlarse, porque se emite a nivel de superficie y se produce absorción continua de él por aquellas personas cuya actividad profesional es precisamente la calle, como guardias, taxistas, etc. Se considera que con una exposición de cuatro horas, en una atmósfera que contenga 30 mg.kg⁻¹, el contenido en carboxihemoglobina, se eleva a un 5%, lo que acarrea ciertos trastornos respiratorios.

Hidrocarburos. Los hidrocarburos, haciendo omisión del metano, se emiten principalmente en los tubos de escape de los vehículos a motor, como consecuencia de una combustión incompleta.

Su interés como agentes contaminantes se debe a varias causas. Una de ellas, su intervención en las reacciones que se verifican en la niebla fotoquímica con producción de ozono y PAN. Los más activos en este aspecto son las olefinas.

El mal olor de los hidrocarburos que se lanzan por los tubos de escape,

constituye un atentado al bienestar, resultando muy desagradable. Pero esto sería lo de menos, se puede tolerar un malestar en beneficio de un progreso, si no fuese porque a los hidrocarburos aromáticos policíclicos, y especialmente al 3,4 benzopireno, se le atribuye una acción cancerígena. Se ha comprobado que produce cáncer de piel en animales de experimentación y en los seres humanos se sospecha su posible intervención en el cáncer de pulmón.

Aerosoles. Humos. La producción de humos consustancial con todo proceso de combustión, produce efectos ostensibles en la disminución de la visibilidad y en el deterioro de edificios, a los que se adhieren partículas de los humos, comunicándoles aspectos muy desagradables.

Los humos constituyen junto con el SO_2 , un índice del grado de contaminación de la atmósfera urbana y es obligada la determinación de su contenido en el aire.

Pero no es solo sus efectos sobre la visibilidad y deterioro de monumentos y edificios lo que obliga a limitar su contenido en la atmósfera, es que existen ciertas pruebas de que pueden atacar contra la salud. En primer lugar, su inhalación y penetración a alvéolos, si el tamaño de la partícula es pequeño, provoca irritación en todas las mucosas, pero además el aerosol de humos puede llevar adsorbido gases contaminantes como SO_2 , o incluso más tóxicos, como Pb, Cd, etc. y favorecer la entrada de estos. Es un hecho comprobado que SO_2 y aerosoles ejercen un efecto sinérgico.

Las medidas para reducir el porcentaje de humos, son las que corresponden a una buena combustión. Si esta es incompleta, con defecto de aire, la producción de humos está asegurada. Por otra parte, influye mucho el combustible empleado, correspondiendo la máxima emisión de humos al carbón y la mínima al gas natural. El problema económico es mucho menor en estos casos que para las centrales térmicas.

IV.2. Aspectos sanitarios de la contaminación urbana.

De todos los contaminantes que se emiten al aire en las ciudades, destacan por su posible trascendencia en la salud humana el anhídrido sulfuroso, humos, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y compuestos oxidantes de la niebla fotoquímica.

Los contaminantes en la ciudad se emiten prácticamente a nivel del suelo, y además está más dificultada su dispersión horizontal o vertical que en el campo, por lo que las inhalaciones de estos gases pueden tener lugar en cantidades suficientes como para producir una alteración en el estado de salud de la población. Hay que tener en cuenta además dos factores, aparte de la cuantía de la emisión. Uno de ellos la meteorología, pues una inversión de temperatura provoca una elevación muy considerable del nivel de contaminantes para el mismo porcentaje de emisión. El otro, las características sanitarias y sociales de determinados sectores de la población, más sensibles que otros a los contaminantes gaseosos, como ancianos con procesos

bronquíticos crónicos, niños, personas con afecciones cardiovasculares, etc.

En distintos países, se ha comprobado estadísticamente que el aumento en el nivel de contaminantes en el aire urbano, va acompañado de un aumento paralelo en la mortalidad y morbilidad, como sucedió en el incidente de Londres de 1952. Es por lo tanto de gran importancia, establecer valores máximos admisibles de cada uno de los contaminantes, lo que encierra sus dificultades, pues es distinto el valor medio de un contaminante determinado durante un período de tiempo prolongado, que el instantáneo en períodos breves, el cual puede alcanzar valores muy altos por las circunstancias del propio proceso de emisión, horas punta en la circulación rodada, encendido material de las calefacciones, o bien de tipo meteorológico.

No es de menor importancia, el hecho de los efectos sinérgicos que se establecen entre determinados contaminantes, por ejemplo anhídrido sulfuroso y humos, ya que puede ejercer menos efecto en la salud un solo contaminante, que su mezcla con otro, aunque se encuentre en menor proporción.

Finalmente, se debe diferenciar la contaminación en la calle de la del interior de los edificios. En algunos casos, dentro del edificio la contaminación es menor que en la calle. Así sucede, con aquellos contaminantes que presentan gran capacidad para adherirse o ser absorbidos por las superficies de los interiores, como por ejemplo SO_2 y aerosoles, de los cuales se detectan dentro, aproximadamente el 20% de la contaminación en el exterior. Sin embargo, hay que tener cuidado en los interiores, con algunos contaminantes como el CO producido en las combustiones incompletas de estufas, y contenido en el humo de cigarrillos, ya que no se puede difundir en la atmósfera con la misma facilidad que en espacios libres.

En cualquier caso, resulta un problema difícil conocer con suficiente exactitud, el efecto perjudicial en la salud humana que ejerce cada uno de los contaminantes. Los resultados en ensayos con animales de experimentación no son extrapolables, en la mayor parte de los casos, a seres humanos. Los ensayos clínicos, con voluntarios, son también muy incompletos, pues por razones deontológicas no se pueden aplicar a los sectores de población más sensibles, como personas con afecciones bronquíticas o cardíacas.

Los estudios epidemiológicos, quedan casi como único medio de llegar a conocer los efectos agudos y crónicos de los contaminantes, aunque también presentan dificultades en la interpretación de los datos, por las numerosas variables de que depende la morbilidad, como hábito de fumar, malnutrición, stress, etc.

Vamos a considerar en primer lugar, conjuntamente SO_2 y humos, no solo porque tienen el mismo origen, las combustiones, sino además porque se aprecia un efecto sinérgico en estos dos contaminantes. Además, los métodos epidemiológicos no permiten diferenciar con exactitud, la acción de cada uno de ellos por separado, pues en la realidad práctica, siempre van juntos. Experiencias clínicas si se han efectuado con ambos por separado o juntos.

Los efectos agudos de la contaminación por SO_2 a muy elevadas concen-

traciones se manifiestan ostensiblemente, con un aumento de la mortalidad o morbilidad, especialmente en los sectores de población más sensibles, como sucedió en una serie de accidentes ya históricos. Más difícil de dilucidar son los efectos crónicos, entre los cuales figura la bronquitis crónica. Se encuentran bastantes dificultades para determinar la relación dosis-efecto, aunque en cualquier caso es indudable que anhídrido sulfuroso y partículas afectan al tracto respiratorio.

El Comité de expertos de la OMS (2), teniendo en cuenta los ensayos clínicos y estudios epidemiológicos, ha establecido la siguiente relación dosis-efecto para SO_2 y humos:

Si el contenido en SO_2 o de humos, se mantiene en un promedio diario de $500 \mu\text{g} / \text{m}^3$, se produce aumento de la mortalidad en la población, sobre todo en la especialmente sensible. Entre los efectos de morbilidad, se observa empeoramiento de enfermos pulmonares con concentraciones de 500 a $250 \mu\text{g} / \text{m}^3$ y de humos con $250 \mu\text{g} / \text{m}^3$, como promedio diario. Con $100 \mu\text{g} / \text{m}^3$, tanto de SO_2 como de humos, se producen algunos trastornos respiratorios. Finalmente, se considera que una cifra de $80 \mu\text{g} / \text{m}^3$ de SO_2 o de humos reduce la visibilidad y causa molestias.

Estos valores pueden experimentar variaciones, de acuerdo con los restantes contaminantes presentes en la atmósfera.

El monóxido de carbono, es un contaminante típico de las ciudades, en las que se produce por emisión de los tubos de escape, aunque también hay que tener en cuenta su contenido en el humo de los cigarrillos, que puede llegar hasta un 4%. Como se emite a nivel del suelo, se absorbe fácilmente por vía respiratoria, y en la sangre se combina fuertemente con el hierro de la hemoglobina, formando la carboxihemoglobina, que impide la función de oxigenación reversible de la hemoglobina. Las concentraciones de carboxihemoglobina en la sangre, dependen de las concentraciones de CO en el aire, de la duración de la exposición y de la ventilación pulmonar. Así por ejemplo, para una concentración de CO de 100 ppm, el nivel de carboxihemoglobina asciende al 3,6%, y a las 8 horas a 12,9%. Como comparación digamos, que normalmente existe en la sangre un 0,8% de carboxihemoglobina, producida en procesos catabólicos.

Los efectos del CO en el ser humano, dependen del contenido en sangre de carboxihemoglobina. Se han observado cefaleas y alteraciones de la coordinación, con concentraciones del 10%. En ensayos clínicos con voluntarios (3), sometidos a una atmósfera con 100 ppm de CO, hasta lograr un 7,2% de carboxihemoglobina, se observa que se producía en ellos una reducción de la percepción visual y de la habilidad manual. Stewart (4) también comprobó la aparición de cefaleas y alteraciones de coordinación, para contenidos en carboxihemoglobina del 15 al 20%.

Se considera de cierta importancia, el efecto que puede ejercer el CO sobre el sistema cardiovascular y sobre la oxigenación de los tejidos. Los trabajos de Ayres (5)(6), demostraron que con una saturación de un 9% de carboxihemoglobina, la presión arterial y venosa del O_2 disminuía. Observó

además, modificaciones miocárdicas con una saturación de carboxihemoglobina superior al 6%. Hay muchos enfermos, para los cuales puede ser bastante grave la hipoxia que produce el CO.

Es difícil establecer límites para el contenido en CO, pero se estima en general, que la concentración en carboxihemoglobina no debe sobrepasar el 4%, lo cual se consigue con una exposición durante 24 horas en una atmósfera que contenga 25 ppm de CO. Este debe ser, por lo tanto, el límite máximo tolerable.

Los oxidantes fotoquímicos, son característicos de contaminación urbana, producida por los gases de escape de los coches y unas condiciones climatológicas especiales. Dentro del amplio grupo de sustancias que integran la niebla fotoquímica, destacan por su acción perjudicial sobre el ser humano y la vegetación, el ozono troposférico, el dióxido de nitrógeno y el nitrato de peroxoácido (PAN).

Los estudios epidemiológicos, llevados a cabo con relación a la acción de estos contaminantes, parecen demostrar una relación entre episodios de asma y concentraciones elevadas de oxidantes, superiores a $500 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (0,25 ppm). Para el nivel medio de $260 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (0,13 ppm), no se puede observar esta relación.

Se manifiesta con claridad una disfunción pulmonar, en enfermos pulmonares crónicos, para concentraciones de oxidantes de 390 a $1370 \mu\text{g} / \text{m}^3$ (7). Con cantidades inferiores, el efecto que producen los oxidantes fotoquímicos, es una irritación manifiesta de ojos, nariz y garganta.

Como consecuencia de los estudios realizados, el Comité de expertos de la OMS (1), ha establecido las siguientes normas de dosis-respuesta: El aumento de crisis asmáticas, se manifiesta en concentraciones de $250 \mu\text{g} / \text{m}^3$; la disfunción pulmonar con $200 \mu\text{g} / \text{m}^3$, y la irritación en los ojos, con $200 \mu\text{g} / \text{m}^3$. En todos los casos, el tiempo de exposición es de una hora.

El último contaminante estudiado por el Comité de expertos de la OMS, es el dióxido de nitrógeno, gas integrante de la niebla fotoquímica pero que también se debe considerar aisladamente, pues puede existir en la atmósfera como contaminante primario, en zonas en las que no se forma la niebla fotoquímica. Unas experiencias (8) (9), demostraron que existe una relación entre contaminación alta de NO_2 y afecciones en las vías respiratorias bajas, en niños de corta edad, para una concentración de NO_2 de $190 \mu\text{g} / \text{m}^3$.

Aunque está comprobado que el NO_2 es biológicamente activo frente a animales y plantas, el Comité de expertos de la OMS, considera que de momento y hasta conseguir un mayor aporte de datos, no se pueden establecer relaciones dosis-efecto y dosis respuesta.

Para conseguir unos criterios de pureza del aire, y de evaluación de los riesgos que puede producir un nivel determinado de contaminantes, se requeriría conocer para cada uno de ellos, unos datos fiables de dosis-respuesta, para los distintos tipos de población, y para cada efecto. Esto no se ha conseguido, y será difícil que se consiga, a causa de la mezcla de compuestos

que existe en las atmósferas contaminadas, cuyo exponente máximo es la niebla fotoquímica.

Se recomienda, que todos los países dispongan de unas normas de salubridad del aire, con el fin primordial de proteger la salud. Pero además, se debe tener en cuenta el efecto que los contaminantes puedan tener sobre el clima, la vegetación, la vida animal, y los materiales. Es decir, atender a la salud en su sentido más amplio, que incluye también el bienestar.

Para conseguir este objetivo, se requieren numerosas experiencias clínicas con voluntarios, y ensayos con animales de experimentación, para conseguir más información sobre la acción de los contaminantes y sus dosis-efecto, utilizables en estudios epidemiológicos. A este respecto, hay que tener en cuenta los efectos de los contaminantes en periodos cortos y en periodos más largos, con distintas concentraciones de contaminantes, los cuales pueden ser diferentes.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Manual de calidad del aire en el medio urbano. Organización Panamericana de la Salud. 1980.
- (2) SPEDLING. D. J. (1985) *Contaminación atmosférica. Reverté.*
- (3) BEUDER W. y col. (1971) *Arch. Toxicol.* 27, 142.
- (4) STEWART. R. (1970) *Arch. Envir. Health.* 21, 154.
- (5) ARGRES. S. M. (1965) *Science.* 149, 193.
- (6) ARGRES. S. M. (1969) *Arch. Envir. Health.* 18, 669.
- (7) MOLTEY. H. J. (1959) *J. Amer. Med. Assoc.* 171, 1469.
- (8) SLEY. C. M. (1970) *J. Air. Pollut. Control. Assoc.* 20, 583.
- (9) SLEY. C. M. (1970) *J. Air. Pollut. Control. Assoc.* 20, 539.

EPILOGO

Hemos revisado en este discurso de apertura, las agresiones que las actividades humanas están produciendo al medio ambiente, con consecuencias para un futuro próximo que, sin ánimo catastrofista, significan hipotecar el porvenir de la humanidad, o al menos su forma de vida actual, si no se toman las medidas oportunas.

Es especialmente preocupante el efecto invernadero del CO₂ y otros gases, pues la elevación de temperatura que se va acusando ha de provocar necesariamente cambios climatológicos de gran envergadura, aunque se pueda dudar de las previsiones teóricas, si se tiene en cuenta los precedentes de otras edades geológicas.

Se ha llegado a esta alarmante situación por el egoísmo de unos e irresponsabilidades de otros. La sociedad en general, ha demostrado poca sensibilidad para estos problemas sumida en la satisfacción que le produce el consumismo de nuevos productos, sin pararse a pensar en las consecuencias contaminantes de su obtención y uso. Se ha preocupado poco del papel del ser humano en el contexto de un ecosistema que constituye una herencia irrenunciable, posible de mantener y compatibilizar con el también irrenunciable, avance tecnológico y social, si se reparten equitativamente los costos económicos del ajuste.

Por ello, creo es de justicia destacar y agradecer, la labor meritoria de los dos grupos que más han contribuido a poner en marcha la resolución de este problema: ecologistas y científicos.

Los ecologistas y, en general, los amantes de la Naturaleza, han creado un estado de opinión, ante la primera voz de alarma, lanzada por los científicos, que ha servido para movilizar a los poderes públicos de los países más industrializados, los cuales han iniciado acciones tendentes a mejorar la situación actual. Se celebran reuniones internacionales en cadena, adoptándose en varias de ellas acuerdos vinculantes, se crean en muchos países Ministerios del Medio Ambiente, y las agresiones a la Naturaleza, constituyen delitos ecológicos cuya repercusiones crean preocupaciones políticas de primera magnitud. Esto le ha permitido decir al presidente soviético Gorbachov, que en el siglo venidero será más importante la seguridad ecológica que la seguridad militar (22).

Los científicos han conseguido desentrañar muchas de las incógnitas de la contaminación ambiental, y han marcado a los políticos las pautas a seguir para la resolución del problema, a costa en muchos casos de sacrificios personales, y pienso en estos momentos en los que realizan sus investigaciones en las bases de la Antártida o en la cumbre del Mauna Loa. En general, no han trabajado por puro entretenimiento científico, ni han pensado que la Ciencia es un bien absoluto, ajena a toda otra consideración, sino que han puesto sus conocimientos en favor del único bien absoluto: el ser humano, a cuyo servicio deben ponerse todos los demás.