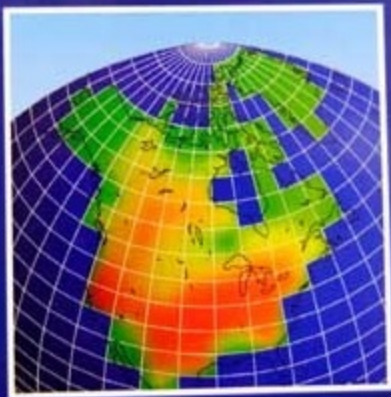


INSTITUTO DE ESPAÑA

CONTAMINACIÓN y ENERGÍA



Antonio L. Doadrio Villarejo

Académico de Número de la Real Academia Nacional de Farmacia

2005

Introducción

Juan Manuel Reol Tejada
Presidente de la Real Academia Nacional de Farmacia

En los años setenta u ochenta circulaba por los EE. UU. una curiosa "leyenda urbana". Se decía que Rosevelt encargó a un grupo de grandes expertos un estudio prospectivo para que señalaran cuales serían los grandes logros científico en el corto y medio plazo. Al cabo de unos años se comprobó que ninguno de los más espectaculares descubrimientos de la Ciencia habían sido previstos. Sarcásticamente la "leyenda" indicaba que ni siquiera el ¡bolígrafo! fue anticipado como gran revolucionador de la escritura manual.

He recordado esta anécdota para dejar patente mi escepticismo frente a los estudios prospectivos. Dos tentaciones acechan a los escépticos cuando se habla de los temas relacionados en el binomio energía-contaminación. Primero lo falible de los estudios prospectivos. Segundo: la falta de rigor o excesiva extrapolación en la utilización de los datos estadísticos. En el primer caso fue paradigmática, en los años 60-70, la visión de las organizaciones internacionales –Unesco....-, en relación con la catástrofe humana que se produciría inexorablemente en la India como consecuencia del hambre. La "revolución verde" supuso un cambio sustancial en esa predicción. Sin que con ello quiera eludir la gravedad de la situación actual en la gran democracia asiática.

En el segundo aspecto, el polémico trabajo del ex-ecologista militante Bjorn Lomborg, quien acierta en críticas muy severas sobre el tratamiento de muchos datos, junto a hipótesis más discutibles.

He aquí un caso curioso que ilustra la distorsión de estas cuestiones en los medios de comunicación: la Academia Nacional de Ciencias de EE. UU. hizo público en 2001 un elaboradísimo informe sobre el cambio climático. Las televisiones y la prensa dijeron que el informe era un grito de alarma sobre el carácter antropogénico del cambio. La Academia Nacional de Ciencias se vio precisada a aclarar públicamente su postura. La Academia dijo: 1º) que en los últimos 100 años la elevación era de 0,5 grados; 2º) que el nivel de CO₂ varía creciendo ya los "dos" últimos siglos; 3º) que el nivel de CO₂ no debía magnificarse en relación con el efecto producido por el vapor de agua y las nubes. La Academia concluía llamando a la calma en relación con el cambio climático inducido por el CO₂ y recordando que hace treinta años lo que preocupaba a los científicos era... el enfriamiento del planeta.

Como la otra cara de la moneda diré que estudiar el cambio climático y la acción del hombre me parecen absolutamente necesarios pues alertan sobre posibles límites, remueven nuestras conciencias y permiten a la ciudadanía y a los dirigentes democráticos cambiar de estrategia o controlar riesgos.

El Prof. Doadrio Villarejo se ha atrevido, con audacia y prudencia, a tocar un tema extraordinariamente sensible: la interconexión entre energía y contaminación. Lo ha hecho con profundo rigor, con perfiles didácticos

iluminadores y con un gran sentido del riesgo. Porque los científicos deben anticipar escenarios a la luz de los signos de los tiempos, pero las profecías apocalípticas están reservadas a los demagogos y a los profesionales del "cuanto peor, mejor".

El Prof. Doadrio estudia sistemáticamente los problemas energéticos y los subsiguientes derivados de aquellos: la contaminación. Limita su estudio al análisis de las energías alternativas renovables. Excluye, pues, prudentemente, la energía nuclear, en parte (la de fisión) porque los recursos de uranio son limitados, en parte por lo difícil de la predicción (la de fusión).

Del trabajo del Dr. Doadrio me gusta especialmente la ponderación científica de los resultados, la aceptación del debate científico interno y su referencia al hombre y al medio ambiente. Desarrollo sostenible, se dice, es un tipo de desarrollo humano social y económico que debe tener en cuenta el ecosistema sobre el que se asienta, la sociedad destinataria del mismo y principalmente el individuo, la persona, que constituye esa sociedad. En esta línea no duda en decir que la lucha por una energía más limpia tiene un precio y que una sociedad informada y comprometida con el futuro debe pagar.

He dicho futuro porque en el horizonte jurídico más próximo ya está definido entre los "derechos de las generaciones futuras" el derecho al medio ambiente, como un derecho humano de primera fila. Es la ética del medio ambiente proyectada hacia nuestros sucesores. Este es un planteamiento correcto. Lo que es rechazable es el "secuestro" del compromiso ecologista, que nos obliga, y debemos compartir todos, por ciertos grupos fundamentalistas o por los nostálgicos de regímenes totalitarios que han dejado rastros tan evidentes de su nulo respeto al medio ambiente cuando gobernaron, como la destrucción del Mar de Aral.

Recientemente personalidades de máximo relieve, Gorbachov en el Forum de Barcelona o Lovelock en un artículo de difusión internacional, decían que a corto plazo es necesario reflexionar sobre la utilización de la energía nuclear ante la magnitud de la repercusión medio-ambiental de otras energías contaminantes. Muchos se han rasgado las vestiduras ante tamaña herejía, pero nadie argumenta seriamente en contra.

El efecto invernadero y el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono y la lluvia ácida, son cuestiones de máximo interés que el texto recoge con profusión de datos y gráficos. El Prof. Doadrio nos recuerda la genialidad de Molina, el químico Premio Nóbel que planteó la conocida hipótesis sobre el papel de ciertos compuestos de cloro como destructores del ozono... antes de que se hubiera descubierto el célebre "agujero" en la Antártida.

El Prof. Doadrio nos cuenta como la capa de ozono muestra mínimos históricos, en las últimas mediciones, seguido de esperanzadoras recuperaciones. Variaciones que tienen posibles explicaciones científicas. Nos sitúa ante el "efecto invernadero" y el cambio climático producto de la actividad humana y el consumo de combustibles fósiles principalmente. Pero expone el problema en sus justos términos sin extrapolaciones interesadas. El aumento

de la temperatura podría ser, los últimos 130 años, de 0,6 décimas de grado, sin que pueda decirse en que proporción corresponde a la actividad humana. A partir de aquí nos muestra los estudios prospectivos que aventuran desaparición de glaciares, elevación del nivel del mar... Sin embargo el margen de error de los modelos a 100 años era del 60%, aunque ahora sea bastante menor.

La conclusión es la imperiosa necesidad de investigar energías alternativas no contaminantes. Esto significa que el futuro está en nuestras manos. No se trata de reducir el crecimiento, no se trata de culpabilizar a Occidente y por supuesto a ¡EE. UU!. por no suscribir el protocolo de Kioto mientras nos olvidamos de China, la India, Brasil... que, afortunadamente, crecen al 10%, y tampoco han suscrito Kioto. España firmó y su incumplimiento es "galáctico". Lo que me llama la atención de este debate es que no sólo desde ámbitos políticos o sociales interesados, sino, también, desde amplios sectores del mundo científico, se comparte una misma hipótesis pesimista: la disminución del crecimiento. Me parece increíble que quienes hacen ciencia puedan ser pesimistas. La ciencia fundamenta el optimismo. Mientras hacemos predicciones apocalípticas la propia ciencia avanza soluciones que al parecer, como los expertos de Roosevelt, ni siquiera atisbamos.

En un trabajo, a finales de 2002, Antonio Colino y Ángel Martín Municio, -a quien una vez más rindo el homenaje de mi amistad y admiración-, en un trabajo, que creo que no fue publicado, decían que las energías del siglo XXI serían las derivadas del ciclo del hidrógeno y la electricidad, que son además complementarias. En 1979 un estudio del Instituto Nacional de Prospectiva no vislumbraba el hidrógeno como posibilidad estimable. Todo ello sin minimizar que no es energía primaria, que entraña riesgos y que su aplicación presenta muchas incógnitas por resolver.

Tony Blair, cuyos planteamientos políticos y sociales suscribo en gran medida, desde mi condición liberal, ha declarado que el cambio climático será una de sus prioridades en 2005 como líder europeo y anfitrión de la comisión del G-8. Ello evidencia el papel responsable de Occidente, tan frívolamente cuestionado en múltiples ocasiones.

En resumen: primero tomar conciencia del problema; segundo poner en marcha los compromisos internacionales suscritos: Agenda 21 y Protocolo de Kioto y tercero hacer propuestas desde el optimismo y la fe en la ciencia y no desde el profetismo apocalíptico.

El libro del Prof. Doadrio contribuye muy eficazmente a un debate que debe ser tan urgente como riguroso.

CAPÍTULO 1

ENERGÍA, CONTAMINACIÓN Y ALTERNATIVAS

1.- Principales problemas de contaminación relacionados con la Energía.

El medio ambiente en el que vivimos está sometido a continuos y a veces, bruscos cambios debido a causas que denominamos naturales y sobre las que tenemos poco o ningún control, como son las manchas solares, erupciones volcánicas, terremotos, vientos huracanados, inundaciones o incendios forestales¹. Sin embargo, la vida en la Tierra ha mostrado una gran flexibilidad a estos constantes cambios, aunque ha dejado en muchas ocasiones especies extintas por el camino.

No obstante, la aparición del hombre moderno está provocando otros cambios o acelerándolos, en especial desde después de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, y sobre todo en el siglo XX, la agresión antropogénica hacia el medio ambiente ha sido cada vez más continuada, sin que en el presente siglo parezca, al menos de momento, que vaya a desacelerarse significativamente.

Lo que caracteriza a estos cambios medioambientales causados por el hombre moderno es que ocurren en cortos períodos de tiempo y como resultado, hay nuevos problemas en este campo que se han convertido en objeto de estudio científico y de gran preocupación internacional.

En la Tabla I se muestra una relación de los principales problemas medioambientales en relación con la fuente causante y el grupo afectado. En ella podemos apreciar que la utilización de la Energía es la principal promotora de todos los problemas de contaminación actuales, ya que salvo la disponibilidad y calidad del agua potable, relacionada con el incremento de la población y la agricultura, el resto son ocasionados por la Energía y la Industria.

Tabla I.- Principales problemas medioambientales y su relación con la Energía y con los grupos de población afectados. Fuente: Portal de Internet “Educación ambiental”.

Recursos naturales. Los contaminantes atmosféricos.

PROBLEMA	FUENTE	GRUPO SOCIAL
Contaminación del aire urbano	Energía (industria y transporte)	Población urbana
Contaminación del aire dentro de las casas	Energía (cocina)	Población rural de escasos recursos
Lluvia ácida	Energía (consumo de combustibles fósiles)	Todos
Disminución de la capa de ozono	Industria	Todos
Efecto invernadero y cambio climático	Energía (consumo de combustibles fósiles)	Todos
Disponibilidad y calidad de agua potable	Incremento de la población, agricultura	Todos
Degradación de las costas	Transporte y energía	Todos
Deforestación y desertificación	Incremento de la población, agricultura y energía	Población rural de escasos recursos.
Residuos químicos tóxicos y peligrosos	Industria y energía nuclear	Todos

Todo ello originado, por nuestra actual y elevada dependencia de los combustibles fósiles, en especial el petróleo, gas y carbón; económicamente baratos, pero de un alto coste para el medio ambiente. Después de estos combustibles, y a gran distancia, la mayor fuente de energía es la nuclear.

2.- Impacto ambiental de las distintas fuentes de energía.

Los impactos medioambientales que se producen por la utilización de las distintas fuentes energéticas de las que hoy disponemos y consumimos, se pueden clasificar, según su nivel de perturbación, en dos tipos:

- Impactos globales
- Impactos locales

Los **impactos globales** afectan a toda el Planeta y nadie está a salvo de sus consecuencias. Dentro de estos debemos de considerar las siguientes alteraciones medioambientales y sus efectos:

-  El cambio climático, debido a una acentuación del efecto invernadero, que provocará una subida del nivel del mar, aumento de la desertización y difusión de enfermedades olvidadas, que no afectarán por igual a todas las regiones como veremos en el capítulo 5.
-  Disminución de la capa de ozono estratosférica, con un incremento en las enfermedades de piel y oftálmicas.
-  Las lluvias ácidas, con la consecuente modificación del ecosistema y la destrucción de infraestructuras realizadas por el hombre y del Patrimonio de la humanidad.
-  La disminución en la biodiversidad de las especies con la minoración en la información genética necesaria para el diseño de nuevos fármacos y materiales.

Los **impactos a nivel local** son más reducidos, pero no menos significativos, ya que pueden afectar a importantes núcleos de población, en especial a grandes urbes. Las alteraciones que producen son derivadas de la producción, consumo y transporte de las distintas fuentes de energía, contaminando la atmósfera, el agua y los suelos y generando residuos, algunos radiactivos, de difícil y costoso tratamiento y que producen graves problemas en los ecosistemas. Los principales de estos, en este nivel, son: las emisiones a la atmósfera de gases y partículas contaminantes como el SO₂, CO, NO_x (óxidos de nitrógeno), metales pesados, hidrocarburos, etc., y la contaminación del agua y suelos debida a vertidos industriales de todo tipo. Así mismo, hay que tener muy en cuenta la propia ocupación del suelo en el transporte,

almacenamiento y consumo de energía, la generación de ruidos y los impactos visuales sobre el paisaje, que produce la utilización de las diversas fuentes de energía a nivel local.

3.- Energías alternativas.

Teniendo en cuenta los hechos contrastados de que los recursos energéticos actuales se agotan progresiva y rápidamente, en especial el petróleo, nuestra principal fuente energética; que la mayoría de estos no son renovables y que son contaminantes, lo que traerá graves repercusiones en las próximas generaciones, es necesario buscar unas fuentes de energía alternativas, que cumplan el requisito de producir un menor impacto medioambiental, a través de una inferior y si es posible nula contaminación, y buscando también el requisito de ser renovable, ya que de esta forma se minimiza la conmoción causada sobre el medio ambiente.

Los organismos especializados de las Naciones Unidas, manejan un total de 14 fuentes renovables. Nosotros, vamos a estudiar en este capítulo las principales energías alternativas que hoy en día ya están en funcionamiento, y que son las siguientes:

-  HIDRÁULICA
-  MAREOMOTRIZ
-  EÓLICA
-  SOLAR
-  GEOTÉRMICA
-  BIOMASA

Prescindimos de la energía nuclear en este apartado, porque aunque es una alternativa muy válida, no tiene de momento buena prensa y no se ha solucionado todavía el problema de los residuos radiactivos. Además no se considera renovable.

En realidad, las fuentes que vamos a estudiar son, excepto la geotérmica, derivadas o dependientes de alguna manera de la energía solar.

Las principales características de estas energías alternativas es que son renovables, se producen de forma continua y son inagotables a escala humana. Además son fuentes de abastecimiento energético mas respetuosas con el medio ambiente, aunque a veces ocasionan efectos nocivos, sobre todo a nivel local, pero éstos resultan menores a los de las energías convencionales. Por ejemplo, se considera que el impacto medioambiental en la generación de electricidad de las energías convencionales es de unas 31 veces superior al de las energías renovables.

Las energías renovables, y fundamentalmente la biomasa, constituyen actualmente el 14% del consumo energético global^I.

Entre las ventajas de las energías renovables que influyen sobre el medio ambiente de una manera positiva, caben destacar tres: su **nula o baja emisión de gases contaminantes** responsables del calentamiento global del Planeta (CO₂) y de la lluvia ácida (SO₂, NO_x), lo que si ocurre en la combustión de los combustibles fósiles; la **no generación de residuos peligrosos** de difícil tratamiento y que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente; y su contribución al **equilibrio territorial**, ya que pueden instalarse en zonas rurales y en parcelas individuales, con la ventaja de una independencia de suministros externos, ya que las energías renovables son autóctonas, mientras que los combustibles fósiles se encuentran concentrados en un número determinado de países, como todos sabemos^{II}.

Estas y otras ventajas, han llevado a que la UE dicte normativas, para ir sustituyendo las energías convencionales por las renovables².

^I Fuente: Energy Information Agency, U.S. Department of Energy. Outlook 1998 with Projections through 2020. Washington. D.C.

^{II} Fuente: M. Ortega. Portal de Internet "En buenas manos". Energías renovables.

3.1.- La energía hidráulica.

La energía hidráulica no es un invento nuevo; sin embargo, hoy en día el aprovechamiento que se puede hacer de ésta fuente de energía no tiene comparación.

Actualmente, la energía hidráulica se obtiene a partir de la energía potencial asociada a los saltos de agua y a la diferencia de alturas entre dos puntos del curso de un río. Esta caída del agua desde cierta altura a un nivel inferior provoca el movimiento de ruedas hidráulicas o turbinas, que se utiliza para generar electricidad.

La **hidroelectricidad** resulta así un recurso natural, solo disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua. Además, el desarrollo de este tipo de energía requiere construir pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. A estas construcciones se las denomina **centrales hidroeléctricas**.

Las centrales hidroeléctricas son el sustituto “natural” de las centrales térmicas, por contraposición. Entonces, se nos presenta aquí un dilema: ¿Central térmica o central hidroeléctrica? Para intentar resolver este problema, tenemos primero que definir lo que es una central térmica, y el porqué se hace necesario el sustituirla o mejorarla, en base a criterios medioambientales.

Una central térmica convencional produce una energía no renovable, donde la energía química del combustible fósil (carbón, gas o fuel), se transforma en energía eléctrica, en un proceso de refinado de energía. En este, se producen una serie de contaminantes que se lanzan a la atmósfera, como son el SO₂ y sulfatos, responsables de las lluvias ácidas^{III}; NO_x; y CO₂, que contribuye al incremento del efecto invernadero. Además, hay que tener en cuenta la contaminación de las aguas que

^{III} En el tema de las lluvias ácidas insistiremos en este tema y veremos la responsabilidad de las centrales térmicas en este tipo de contaminación.

necesitan para su refrigeración, ya que producen un aumento en la temperatura de éstas y en algunos casos la contaminación por metales pesados, como el mercurio³.

El esquema básico de funcionamiento de todas las centrales térmicas convencionales es prácticamente el mismo, las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y el diseño de los quemadores de la misma, que varía según el tipo de combustible empleado, y que estudiaremos en el capítulo 4 de las lluvias ácidas.

Entonces, y fundamentalmente debido a la gran emisión de gases contaminantes por parte de las centrales térmicas, ¿las centrales hidroeléctricas son sustitutivas de las centrales térmicas, al ser poco contaminantes^{IV}?

Las centrales hidroeléctricas son una real y efectiva competencia de las centrales térmicas, aunque no resulte competitiva desde el punto de vista económico en aquellas regiones donde el carbón o el petróleo son baratos y las grandes centrales hidroeléctricas puedan tener un gran impacto medioambiental por la construcción de pantanos, cuando éstos son necesarios. Pese a ello, la hidroelectricidad, representa actualmente una alternativa eficaz dentro de la producción energética mundial y sobre todo en los países en vías de desarrollo.

Para tener una más amplia visión de este tema, vamos a desarrollar a continuación el esquema de funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.

Para empezar, vamos a clasificar estas centrales en dos tipos:

- Las grandes centrales hidroeléctricas.
- Las centrales minihidráulicas o minicentrales.

Estas últimas, no requieren de grandes embalses reguladores y por tanto su impacto medioambiental es mucho menor, por lo que se palia uno de los problemas de estas centrales.

^{IV} No aportan CO₂, ni otros gases contaminantes a la atmósfera.

Las grandes centrales hidroeléctricas, como venimos diciendo, dependen de un gran embalse de agua contenido en una presa, donde el caudal del agua se controla y se puede mantener casi constante. El agua, se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados por válvulas y turbinas para adecuar el flujo de agua con respecto a la demanda de electricidad. El agua que entra en la turbina sale por los canales de descarga. Los generadores están situados justo encima de las turbinas y conectados por árboles verticales. El diseño de las turbinas depende del caudal de agua. Actualmente, se emplean dos tipos de turbinas:

- Turbinas tipo Francis. Se utilizan para caudales grandes y saltos medios y bajos.
- Turbinas tipo Pelton. Se usan para grandes saltos y pequeños caudales.

En la figura 1, se muestra un esquema genérico del funcionamiento de una central hidroeléctrica y en la figura 2, un esquema más amplio de estas centrales, con los equipamientos técnicos básicos.

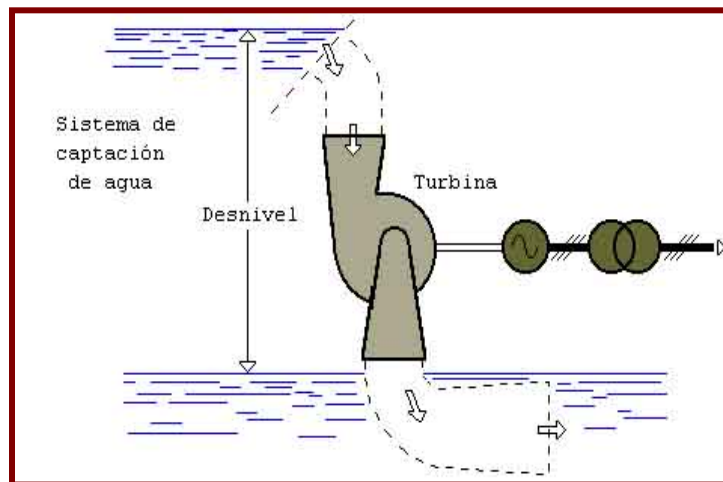


Figura 1.- Esquema general de funcionamiento de una central hidroeléctrica. Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina una cierta energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el alternador y produce la corriente eléctrica. Fuente: <http://thales.cica.es>.

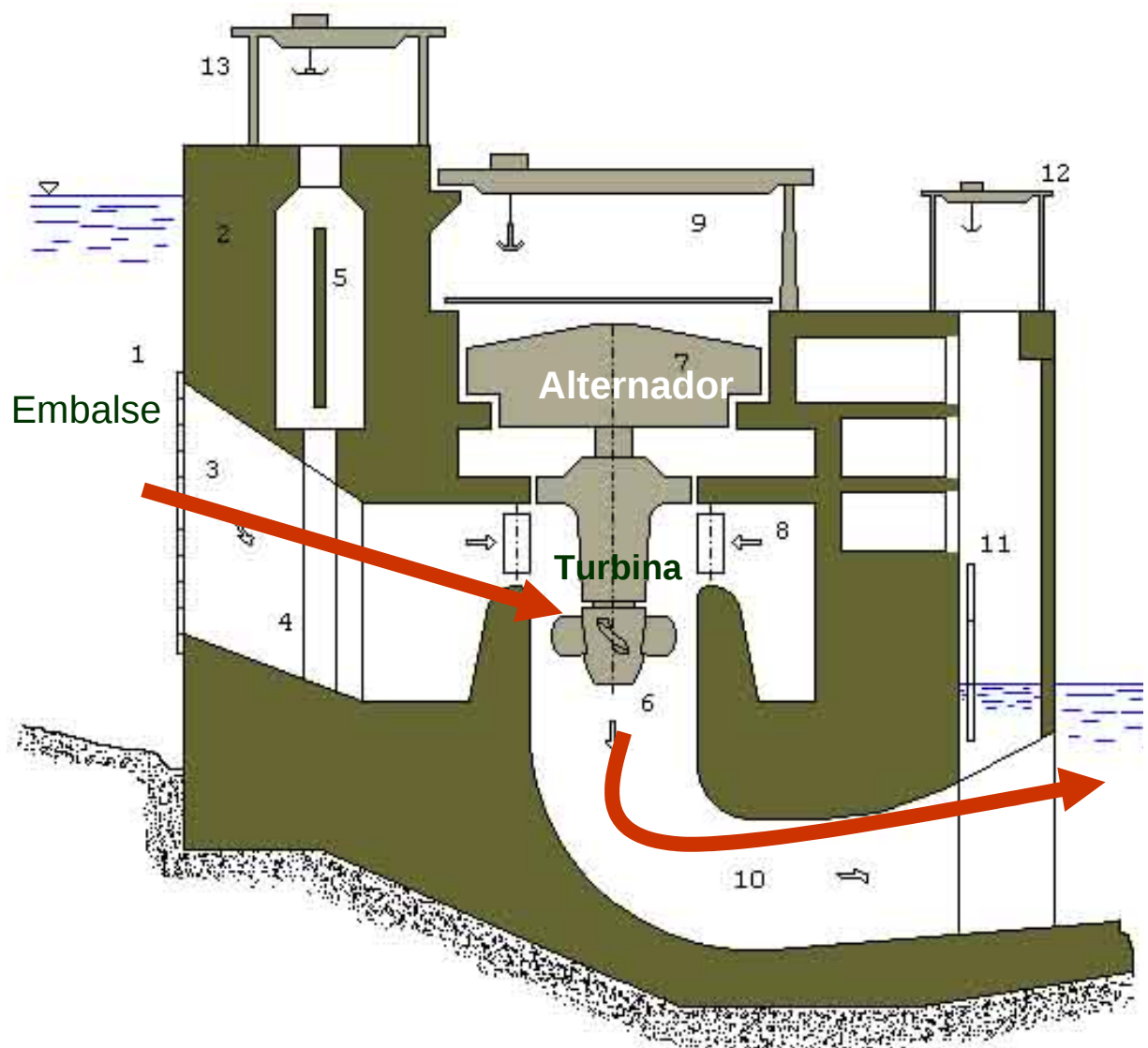


Figura 2.- Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica. 1. Embalse. 2. Presa de contención. 3. Entrada de toma de agua a las máquinas, con reja. 4. Conducto de entrada del agua. 5. Compuertas planas de entrada, en posición de izadas. 6. Turbina hidráulica. 7. Alternador. 8. Directrices para regulación de la entrada de agua a turbina. 9. Puente de grúa de la sala de máquinas. 10. Salida de agua por el tubo de aspiración. 11. Compuertas planas de salida, en posición de izadas. 12. Puente grúa para maniobrar las compuertas de salida. 13. Puente grúa para maniobrar las compuertas de entrada. Las flechas rojas indican la dirección del flujo de agua. Fuente: <http://thales.cica.es>.

El primer componente de una gran central hidroeléctrica, es la presa. La de Itaipú es la que tiene la mayor central hidroeléctrica del mundo (figura 3).

La construcción de una presa, constituye un problema, a veces muy grave, de impacto medioambiental. El agua de la presa inunda riveras, poblaciones y destruye ecosistemas. Estos efectos son muy dañinos para los peces migratorios y a veces son irreversibles. Por ejemplo, la población de salmones del río Columbia (USA), casi ha desaparecido debido a los grandes embalses construidos a lo largo del río.

El segundo componente en importancia es la turbina, que como hemos dicho, pueden ser de dos tipos, los cuales se muestran en la figura 4.

Con estos componentes se regula el caudal de agua, pero para la generación y el transporte de la electricidad, se requieren otros equipamientos. En primer lugar, es necesario un equipo generador de la corriente eléctrica, para que sea finalmente transportada por líneas y transformadores, tal como se muestra en la figura 5.



Figura 3.- Presa de Itaipú. Paraguay. Río Paraná. Tiene 14 vertederos (cataratas artificiales), 196 m de altura y 8 km de largo. Fue un proyecto conjunto Brasil-Paraguay, del que se obtienen importantes recursos energéticos. Puede generar hasta 75.000 GWh. Fuente: <http://mapx.map.vgd.gov.lv>.

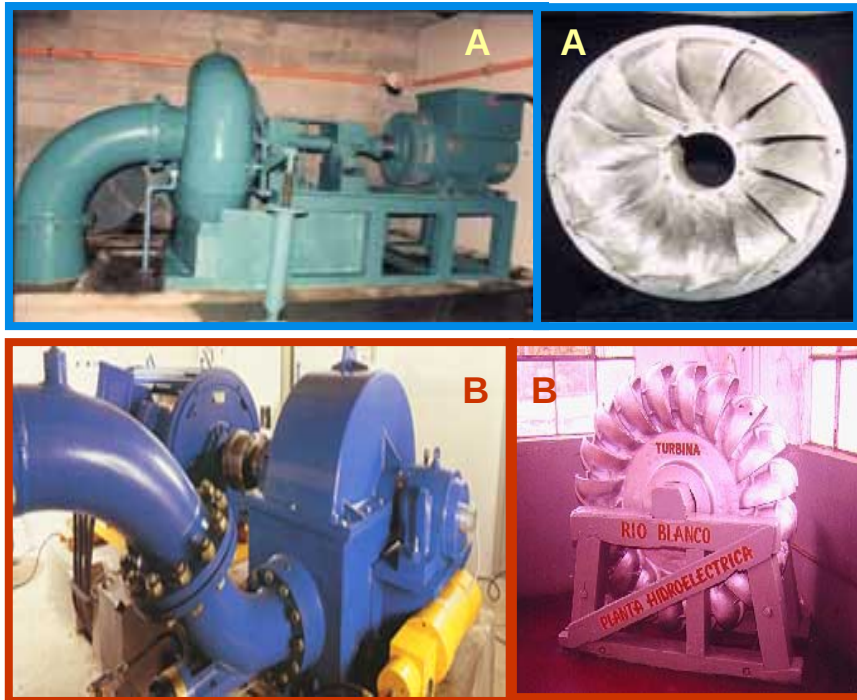


Figura 4.- (A). Turbina Francis. Genera de 100 a 1.000 kWh. (B). Turbina Pelton. Fuente: <http://www.turbinasmancini.netfirms.com>.

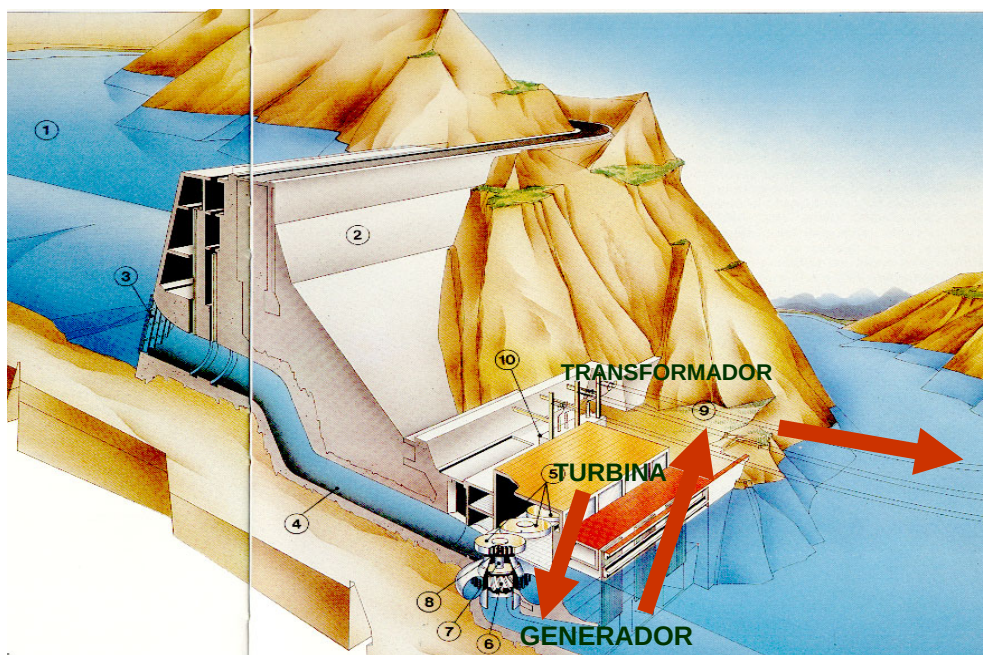


Figura 5.- Esquema completo del funcionamiento de una central hidroeléctrica. 1. Agua embalsada. 2. Presa. 3. Rejas filtradoras. 4. Tubería forzada. 5. Conjunto de grupos turbina-alternador. 6. Turbina. 7. Eje. 8. Generador. 9. Líneas de transporte de energía eléctrica. 10. Transformadores. Las flechas indican la dirección de la corriente eléctrica. Fuente: <http://thales.cica.es>.

La siguiente cuestión es, ¿qué repercusión a nivel mundial ha tenido y tiene este tipo de energía? Pues bien, a principios de la década de los noventa, en el siglo XX, las primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos. Canadá obtiene un 60% de su electricidad de éstas centrales hidráulicas. Además, en todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Hay países en los que constituye su fuente productora de electricidad más importante y casi exclusiva, como son: Noruega (99%), Zaire (97%) y Brasil (96%)^V.

Hemos dicho, y repetimos ahora, que la construcción de una gran presa, para generar hidroelectricidad, crea problemas serios de impacto medioambiental. Pues bien, también dijimos **si es necesario**, ya que se puede obtener también esta fuente de energía sin el requisito de construir presas, allí donde la caída natural del agua es importante y de flujo constante. A estas centrales hidroeléctricas se denominan **centrales de agua fluente**, y el representante más clásico es el de las cataratas del Niágara, donde hay una central hidroeléctrica de este tipo.

Otra forma de reducir el impacto medioambiental, es con la construcción de **centrales minihidráulicas**. En algunos países se han instalado centrales hidroeléctricas reducidas, sobre pequeñas presas, capaces de generar entre un kilovatio y un megavatio. En muchas regiones de China, estas pequeñas presas son la principal fuente de electricidad y en otras naciones en vías de desarrollo se está utilizando este sistema de producción de energía con muy buenos resultados^{VI}. En España, en la Comunidad Foral de Navarra, la empresa EHN^{VII} dispone de 20

^V Datos obtenidos de la Enciclopedia Microsoft Encarta 2004.

^{VI} Veremos más adelante, en el estudio del ciclo de la vida, que este tipo de energía es la de menor impacto medioambiental.

^{VII} <http://www.ehn.es>

minicentrales, que suponen 215 GW/h de producción media anual, y que representan casi el 5% del consumo eléctrico en esa Comunidad.

3.2.- La Energía mareomotriz.

Podemos considerarla como otro tipo de energía hidroeléctrica, pero de tecnología diferente a la anteriormente estudiada, ya que es un recurso hidráulico que tiene analogía con la hidroelectricidad. La energía mareomotriz podría aportar unos 635.000 GWh anuales, lo que equivale aproximadamente a unos 1.045.000.000 barriles de petróleo ó 392.000.000 toneladas de carbón al año.

Es una energía basada en las mareas de los océanos y por tanto, constituye una fuente en principio gratuita, limpia e inagotable de energía⁴. Sin embargo, solamente Francia y Rusia tienen experiencia práctica en centrales eléctricas accionadas por mareas.

La técnica que se utiliza consiste en encauzar el agua de la marea en una cuenca (ría), y en su camino accionar las turbinas de una central eléctrica. De esta manera, se aprisiona el agua en el momento de la marea alta y se libera, obligándola a pasar por las turbinas durante la bajamar. Cuando la marea sube, el nivel del mar es superior al del agua del interior de la ría. Abriendo las compuertas, el agua pasa de un lado a otro del dique, y sus movimientos hacen que también se muevan las turbinas de unos generadores de corriente situados junto a los conductos por los que circula el agua. Cuando por el contrario, la marea baja, el nivel del mar es inferior al de la ría, porque el movimiento del agua es en sentido contrario que el anterior, pero también se usa para producir electricidad⁵. En la figura 6, se muestra una planta mareomotriz de este tipo.

Se considera que los lugares más viables para aprovechar esta energía son unos 40 en el mundo, que rendirían unos 350.000 GWh anuales⁶.

La primera planta de energía mareomotriz, se puso en marcha en 1966 en el río Rance, en el noroeste de Francia, con un estuario de 720 metros de largo, y una cuenca de 22 km².

Sus grandes ventajas son: es renovable, no contaminante, silenciosa, de bajo costo de materia prima, disponible en cualquier clima y época del año. Por el contrario, las desventajas de este tipo de energía se centran en el impacto visual y estructural sobre el paisaje costero, a semejanza con el que produce la construcción de la presa en la generación de este tipo de energías hidroeléctricas, así como de su localización puntual, que es dependiente de la amplitud de las mareas, de traslado de energía muy costoso y de efectos negativos sobre la flora y la fauna, que en muchas ocasiones hace inviable su instalación, por el gran impacto sobre ciertos núcleos de población marina.

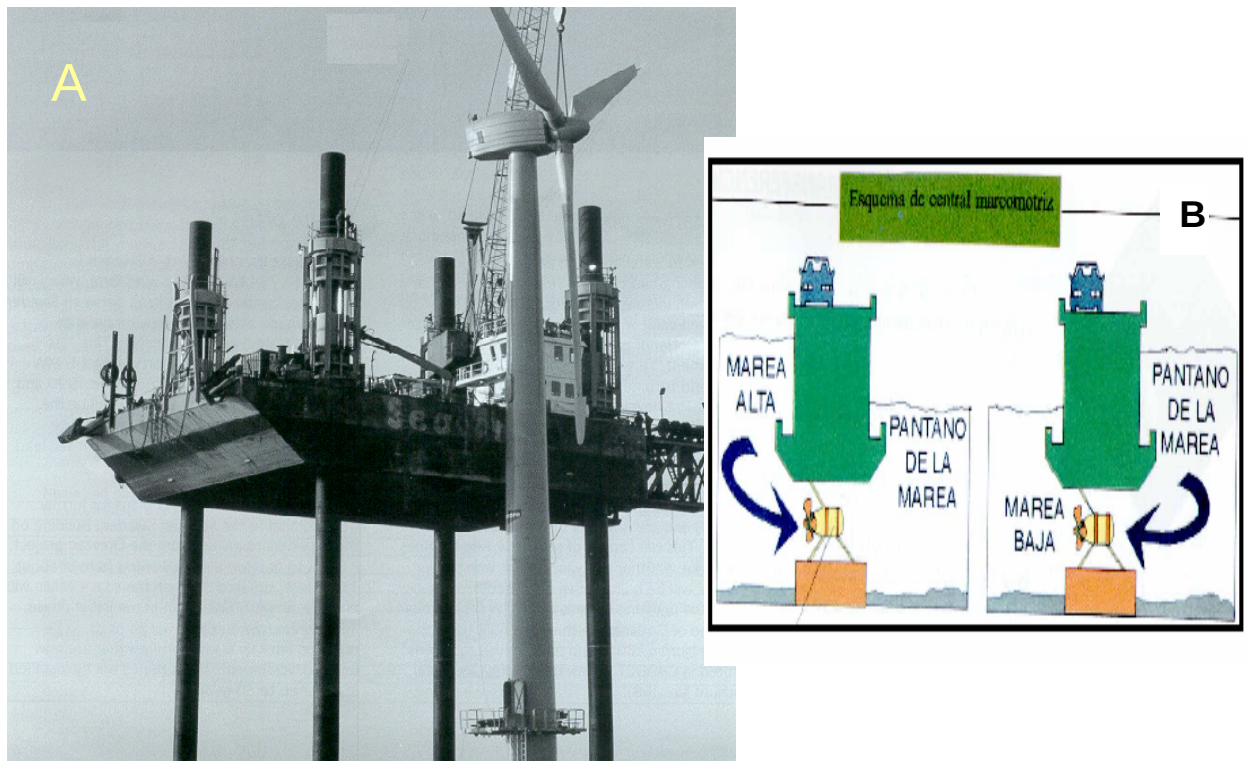


Figura 6.- (A) Planta mareomotriz. (B) La técnica utilizada consiste en encauzar el agua de la marea en una cuenca y, en su camino, accionar las turbinas de un aerogenerador que estudiaremos en la siguiente sección. Fuentes: (A) <http://www.etsin.upm.es>. (B) <http://thales.cica.es>.

3.3.- La energía eólica.

La energía eólica es la producida por el viento^{VIII}, y ya ha sido empleada con éxito, en la antigüedad, en los molinos de viento, para la producción de energía mecánica. En China se empleaban ya hace 2.000 años para bombear agua y en Persia para moler el grano, siendo introducidos en Europa por los cruzados hacia el s. XI. Hoy en día, la generación de este tipo de energía requiere de un tipo de instalaciones denominadas eólicas. Las **instalaciones eólicas**, son construcciones técnicas que transforma la energía cinética que contiene el viento en otras formas de energía, bien eléctrica, mecánica o térmica, con la ayuda de aerogeneradores o generadores eólicos, que pueden satisfacer demandas de pequeña potencia (bombeo de agua, electrificación rural, etc.), pero que pueden agruparse y formar **parques eólicos** conectados a la red eléctrica, aptos para una apreciable demanda.

A finales del s. XX, la capacidad energética total instalada era de 17.000 MW. Su desarrollo se debió fundamentalmente a la crisis del petróleo de 1973.

Las instalaciones eólicas se agrupan en dos grandes tipos, según el tipo de rotor que utilizan:



TURBINAS DE EJE HORIZONTAL.

Sus principales características son:

- Los ejes principales están paralelos al suelo.
- Los aerogeneradores modernos pueden tener 3, 2 o 1 aspa o más de 3 aspas. Las instalaciones utilizadas para generar electricidad tienen de una a tres aspas, mientras que las empleadas para bombeo pueden tener muchas más.
- Se asemejan a los molinos de viento tradicionales.

^{VIII} Solo una pequeña parte de la energía solar que llega a la Tierra se transforma en energía cinética del viento, pero a pesar de ello, la cantidad de energía total es enorme.

Son las instalaciones típicas de las granjas de Estados Unidos.

TURBINAS DE EJE VERTICAL.

Su característica más destacada es la de que sus ejes están situados perpendiculares al suelo. Hay dos tipos:

- Turbinas Savonius; que se emplean sobre todo para bombeo.
- Turbinas Darrieus; máquina de alta velocidad que se asemeja a una batidora de huevos.

Las ventajas principales de las turbinas de eje vertical, es que son independientes de la dirección del viento, no necesitando un mecanismo de orientación para girar el rotor en contra del viento, lo que si es necesario en los rotores de eje horizontal. Además, son de fácil instalación, ya que la maquinaria puede situarse a nivel del suelo y no necesitan de torres, como en el caso del rotor de eje horizontal. En la figura 7, se muestran los dos tipos de rotores de turbinas de eje vertical.

Por el contrario, las principales desventajas del rotor de eje vertical son: su menor rendimiento, comparadas con las de eje horizontal, ya que a nivel de suelo las velocidades del viento son menores, y además la máquina no es de arranque automático, aunque puede utilizarse el generador como motor para arrancar la máquina.

Actualmente, la mayor parte de la tecnología eólica utiliza turbinas de eje horizontal, que cada vez van siendo más habituales en nuestros paisajes. En la figura 8, se muestra un esquema de un aerogenerador de esta tecnología, comparado con otro de eje vertical.

Las turbinas de eje horizontal, se pueden agrupar además, como hemos indicado anteriormente, formando parques eólicos o granjas de viento, tal como se pone de manifiesto en la figura 9.

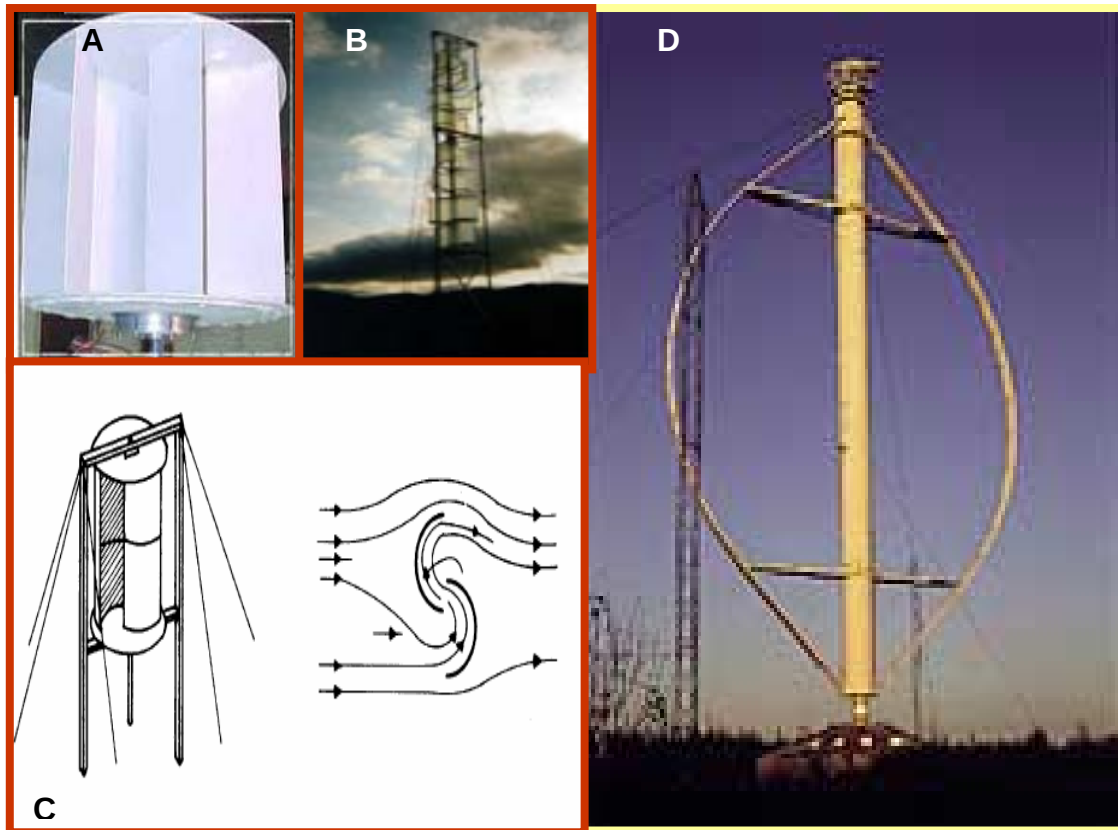


Figura 7.- Aerogenerador tipo Savonius (A, B, C). (A). Rotor, (B). Instalación eólica, (C). Dirección del viento al atravesar el rotor. (D). Aerogenerador tipo Darrieus. Fuentes: A, B y C, obtenidas de <http://www.solener.com>. Fuente D, <http://www.elektrownie.tanio.net/nietypowe.html>.

Las turbinas de eje horizontal, se sitúan en lugares elevados para aprovechar la mayor velocidad del viento y su menor turbulencia que se produce con la altitud. La energía generada aumenta con la velocidad del viento, en un factor de x^3 y con el área de las hélices, siendo proporcional al cuadrado de la longitud. Por ello se emplean grandes hélices en torres elevadas. Las alturas más adecuadas para las torres son las de 70 y 100 m y los diámetros de las hélices de 56 m para las primeras y de 54 m para las torres de 100 m. Actualmente, se emplean torres de unos 30 m, pero se espera que en el año 2005, ya sean de 70 m.

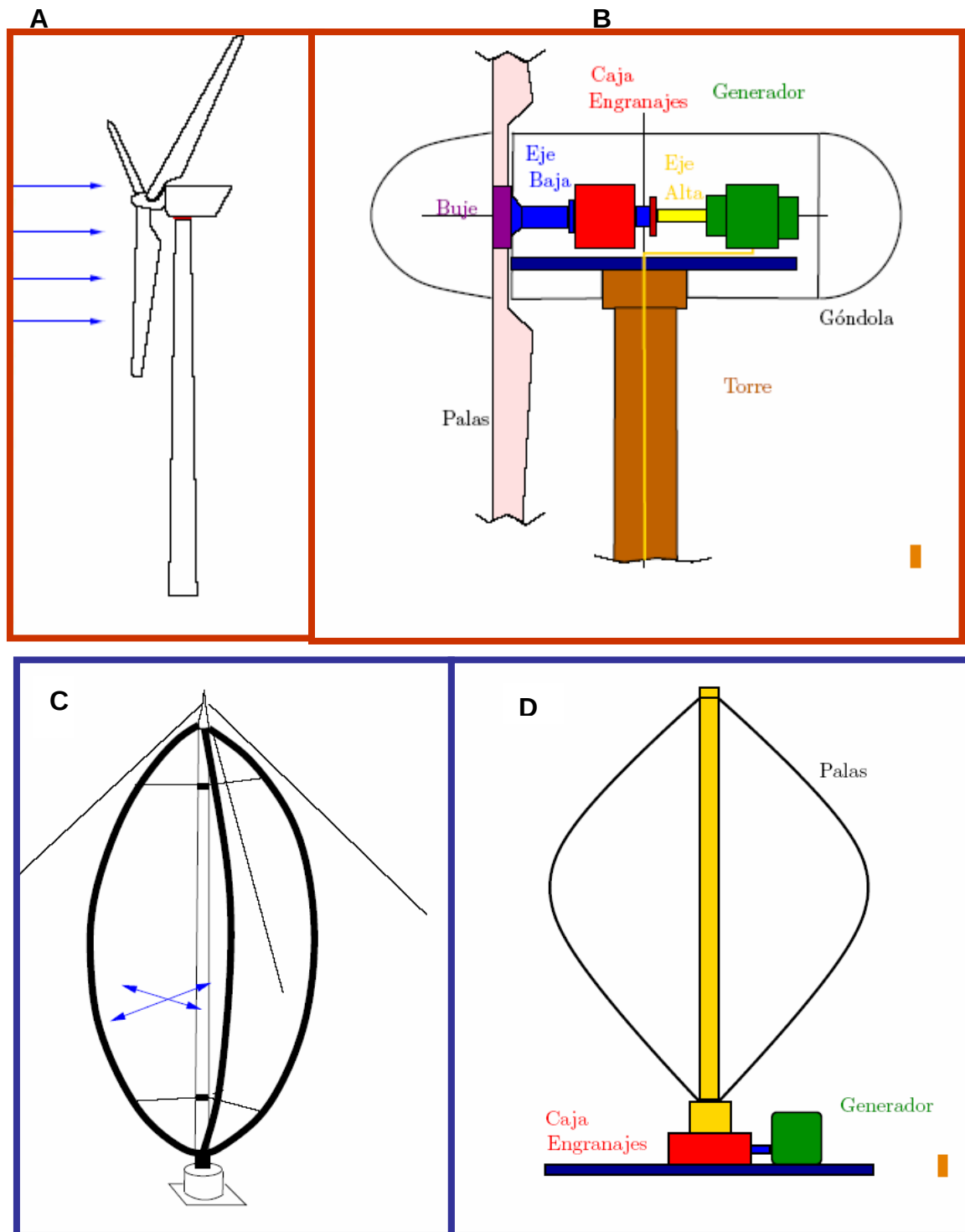


Figura 8.- (A). Instalación eólica con rotor de eje horizontal, llamados HAWT (horizontal axis wind turbines). (B). Configuración del rotor, con sus principales partes: Buje, palas, ejes, caja de engranajes, generador, góndola, montados sobre su torre característica. En (C y D), lo mismo para el eje vertical VAWT. Fuente: O. L. García. Energía eólica. Tecnología de aerogeneradores. <http://www.iit.upco.es/~oscar/pfc>.



Figura 9.- Visión de un parque eólico de Estados Unidos. Fuente: <http://ddcasatitorino.scuole.piemonte.it>.

Las instalaciones más empleadas de este tipo son las de 3 palas, con casi el 75%. Las características y los efectos que producen estas son diferentes, según apreciamos en la Tabla II.

Tabla II.- Efectos que producen el número de palas y % de instalaciones según estas.

Fuente: <http://www.iit.upco.es/~oscar/pfc>.

Palas	3 	2 	1 
Equilibrado	Alto	Medio	Bajo
Coste rotor	Mayor	Menor	Mínimo
Instalación	Difícil	Fácil	Muy Fácil
Unión	Buje	Basculante	Contrapeso
% Diseños	74	24	2

Para finalizar con el estudio del tipo de rotor en este tipo de tecnología, en la Tabla III, mostramos una comparativa entre las turbinas de eje horizontal y las de eje vertical.

Tabla III.- Estudio comparativo entre los dos tipos de rotores. El eje horizontal (HAWT) solo se puede orientar a barlovento o sotavento, mientras que el rotor de eje vertical (VAWT) es autoorientable. Fuente: <http://www.iit.upco.es/~oscar/pfc>.

Tipo	HAWT VAWT	
		
Generador en tierra	No	Si
Eficiencia aerodinámica	Mayor	Menor
Estructura pasiva	No	Si
Sistema de orientación	Si	No
Impacto visual	Menor	Mayor
Ocupación de terreno	Menor	Mayor

La conversión de la energía mecánica que produce el rotor, en energía eléctrica, es debido a la utilización en estas instalaciones de un generador. En grandes aerogeneradores (alrededor de 100-150 kW) el voltaje generado por la turbina suele ser de 690 V de corriente alterna trifásica (AC). Posteriormente, la corriente es enviada a través de un transformador que se puede situar en un lugar anexo a la turbina o dentro de la torre, y que aumenta el voltaje entre 10.000 y 30.000 V, dependiendo del estándar de la red eléctrica local. En la figura 10, se muestra un aerogenerador tipo para las instalaciones eólicas.

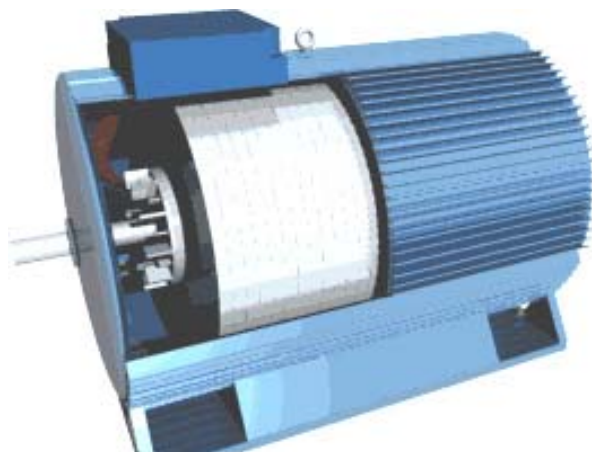


Figura 10.- Generador tipo para turbinas eólicas. Fuente: Desconocida.

Las instalaciones eólicas requieren de una serie de características de velocidades de viento. Generalmente, empiezan a funcionar cuando el viento alcanza una velocidad de 20 km/h, logran su máximo rendimiento con vientos entre 40 y 48 km/h y dejan de funcionar cuando los vientos alcanzan los 100 km/h. Sin embargo, la tecnología moderna, con controlador electrónico del aerogenerador, lo conecta cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s y parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento excede de 25 m/s, con el fin de proteger a la turbina. Debido a esto, los lugares idóneos para la instalación de estos generadores de turbina son aquellos en los que el promedio anual de la velocidad del viento es de unos 20 km/h.

Las ventajas principales de la energía eólica son las siguientes: En primer lugar, no contamina el medio ambiente con CO_2 ,^{IX} SO_x o NO_x , por lo que es una alternativa frente a los combustibles no renovables como el petróleo. Además, los generadores de turbinas de viento para producción de energía a gran escala y de alto rendimiento tienen un tamaño relativamente reducido^X. Por ejemplo, una instalación con una potencia entre 100 y 400 kWh tiene de 15 a 30 m de diámetro y si se instalan

^{IX} No contribuye al aumento del efecto invernadero.

^X Poco impacto visual.

en parques eólicos, sus turbinas pueden generar unos 1.120 MW de potencia, similar a la de una central nuclear. Frente a ello, las desventajas son mínimas, destacando el impacto visual y sonoro y la mortandad de aves por colisión con las aspas.

Entonces, ¿qué futuro y qué presente tienen estas instalaciones eólicas? Se calcula, que hasta un 10% de la electricidad mundial se podría obtener de generadores de energía eólica a mediados del presente siglo. En la actualidad, el precio de la generación de energía eléctrica por este método resulta ya competitivo con las convencionales. En Gran Bretaña, que es uno de los países más ventosos del mundo, los proyectos de turbinas de viento, especialmente en Gales y en el noroeste de Inglaterra, generan actualmente una pequeña parte de la electricidad procedente de todas las fuentes de energía renovable instaladas en ese país. En España se inauguró en el año 1986, un parque eólico de gran potencia en Tenerife. Posteriormente, se inauguraron otras instalaciones en La Muela (Zaragoza), El Ampurdán (Gerona), Estaca de Bares (La Coruña) y Tarifa (Cádiz), aunque esta última se ha dedicado fundamentalmente a la investigación. En la figura 11, se evidencia el mapa de las centrales eólicas instaladas en España.

La mayor potencia instalada se encuentra en Galicia, donde el potencial eólico aprovechable es el mayor de España. Navarra pretende lograr un alto porcentaje de autoabastecimiento energético con este y otros procedimientos. En las Islas Canarias son ya una opción muy rentable para la producción de energía eléctrica. El crecimiento de la electricidad eólica en Castilla-La Mancha está siendo muy rápido, tanto que ha pasado de 174 aerogeneradores en 1999 a 457 instalados en el 2000. Actualmente, Higuera (Albacete), con 169 aerogeneradores y 111 MW de potencia, es el mayor parque eólico europeo. También en Castilla y León y en Aragón está cobrando día a día gran importancia esta tecnología para producir electricidad.

La energía eólica supone ya un 6% de la producción de energía primaria en los países de la UE.

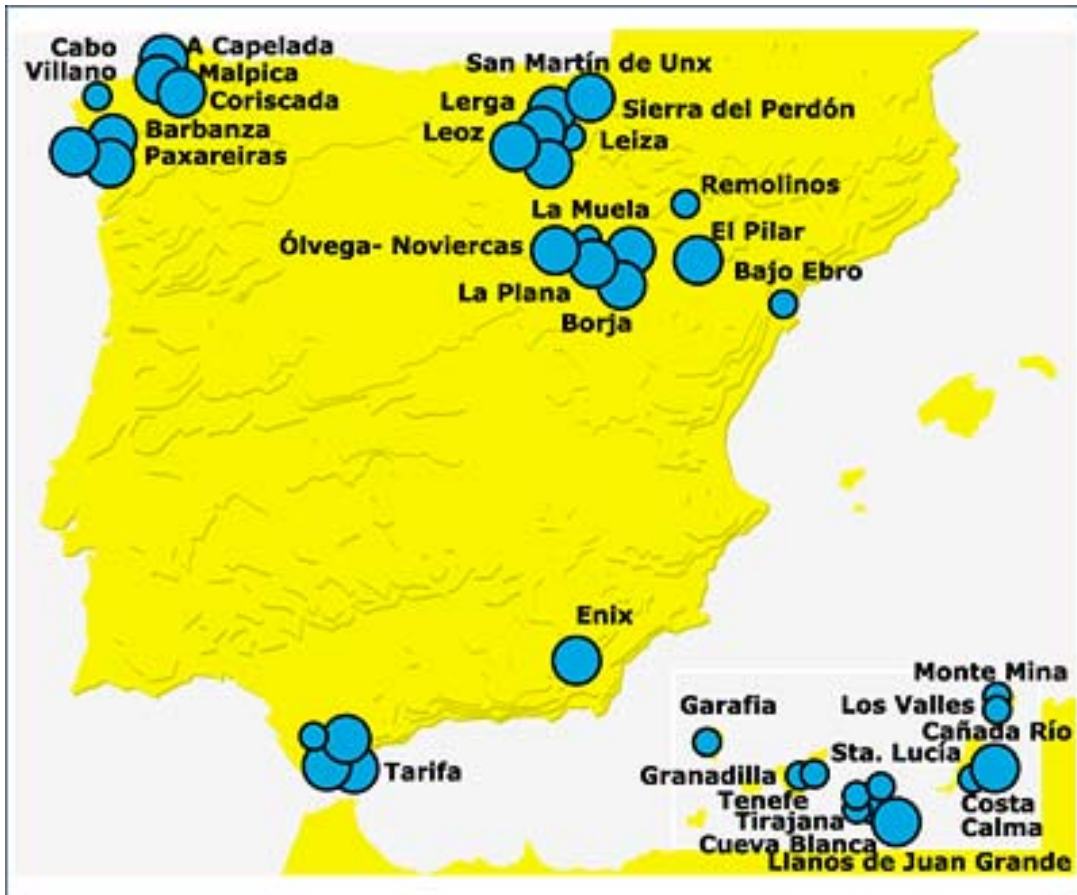


Figura 11.- Mapa de las instalaciones de centrales eólicas en España con potencias superiores a 1 MW (año 2000). Los círculos grandes representan las centrales de potencia superior a 10 MW y los círculos pequeños las de 1-10 MW. Fuente: UNESA. Datos actualizados en la sección de Material complementario.

Para instalar una central eólica, hay que elaborar primero un mapa eólico en cada país, que proporcione los datos de recursos eólicos disponibles, tal como se muestra en la figura 12, para la UE.

Pero, ¿qué piensan los ciudadanos de los parques eólicos? Los resultados de las encuestas entre los vecinos de los municipios en los que se han instalado parques eólicos dan como resultado que están satisfechos de su implantación.

Efectivamente, un 70% los considera beneficiosos, y el 3% perjudiciales. El 62% afirma que el entorno no ha perdido valor paisajístico por dicha implantación, frente al 23% que opina lo contrario. Otros sondeos reflejan que entre el 79% y el 91%,

según las zonas, considera que el beneficio medioambiental de la energía eólica compensa los posibles efectos de los parques sobre el medio natural. Como dato curioso, en la localidad de Higuera, antes mencionada, con el parque eólico más grande de Europa, el 23% de la población los considera bonitos, el 22% feos y el 54%, ni bonitos ni feos, lo que pone en realidad de manifiesto, la subjetividad a la hora de evaluar el impacto visual de estas máquinas⁷.

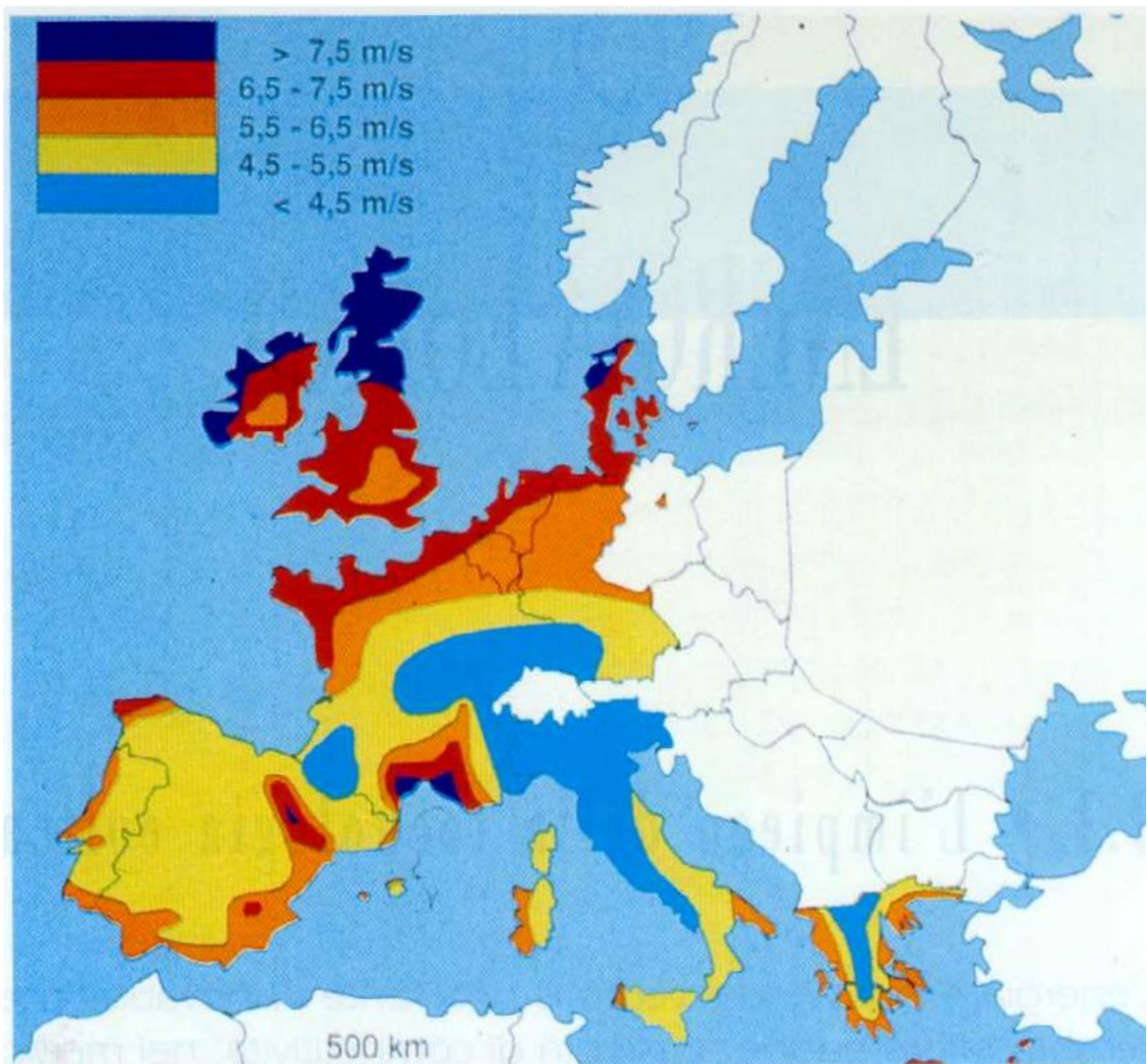


Figura 12.- Mapa eólico de la UE. Las regiones azul y rojo oscuros, representan los mayores recursos eólicos, que para España, están situados en Galicia, Andalucía (especialmente Tarifa), Aragón y las Islas Canarias (fuera del mapa). Fuente: <http://www.paciolo.com>.

3.4.- La energía solar.

La energía solar como tipo de energía renovable, se fundamenta en el aprovechamiento de la radiación solar para la obtención de energía, bien en forma de calor o de electricidad.

La recogida directa de energía solar requiere de dispositivos artificiales, llamados **colectores solares**, diseñados para absorber energía, después de concentrar los rayos del sol. Esta energía, se emplea en dos procesos:

- Térmicos o fotoeléctricos.
- Fotovoltaicos.

En los **procesos térmicos**, la energía solar se utiliza para calentar un gas o un líquido que luego se almacena o se distribuye. Produce por tanto **calor**, que se puede utilizar como método para calentar una vivienda, como sustituto de la calefacción convencional o para obtener agua caliente.

En los **procesos fotovoltaicos**, la energía solar se convierte en energía eléctrica sin ningún dispositivo mecánico intermedio. Su uso es pues, en la generación de **electricidad**.

Los colectores solares, se pueden clasificar según estos dos procesos en.

- Colectores térmicos.
- Colectores de electricidad fotovoltaica.

Básicamente, hay dos tipos de colectores térmicos, los de **placa plana** y los de **concentración**.

Los colectores de **placa plana**, se usan para calentar agua o para calefacción. Su funcionamiento consiste en absorber la radiación solar en una placa de absorción por la que pasa un fluido portador. Este fluido, en estado líquido o gaseoso, se calienta al atravesar los canales, por transferencia de calor desde la placa de absorción. Son capaces de calentar fluidos portadores hasta los 82 °C y obtener entre el 40 y el 80% de eficiencia calorífica. En la figura 13, se muestra una foto de un colector de este tipo.



Figura 13.- Colector térmico de placa plana, instalado en el tejado de una vivienda.

Fuente: <http://www.chromagen.co.il>.

La aplicación más importante de este tipo de colectores, es en las instalaciones solares denominadas **casa-habitación**. En estas, los colectores son fijos, y van montados sobre el tejado. En el hemisferio norte se orientan hacia el sur y en el hemisferio sur hacia el norte. El ángulo de inclinación óptimo para montar los colectores depende de la latitud. Los colectores se inclinan (respecto al plano horizontal) un ángulo igual a los 15° de latitud y se orientan unos 20° latitud S o 20° de latitud N. La instalación posee además, bombas de circulación, sensores de temperatura, controladores automáticos para activar el bombeo y un dispositivo de almacenamiento. El fluido puede ser tanto aire como un líquido^{XI} y se emplea un lecho de roca o un tanque aislado como medio de almacenamiento de energía. En la figura 14, se muestra un esquema del funcionamiento del sistema colector casa-habitación.

Por otra parte, los colectores de **concentración**, se utilizan para aplicaciones como el aire acondicionado y la generación de energía centralizada, así como la de calor para cubrir las grandes necesidades industriales. Son dispositivos que reflejan y concentran la energía solar incidente sobre una zona receptora pequeña, intensificando la intensidad de la energía solar e incrementando de esta manera la temperatura del receptor, que pueden acercarse a varios cientos o miles de $^\circ\text{C}$. Los

^{XI} El líquido puede ser agua o agua mezclada con anticongelante.

concentradores deben moverse para seguir al sol, mediante helióstatos, para conseguir que actúen con más eficacia.

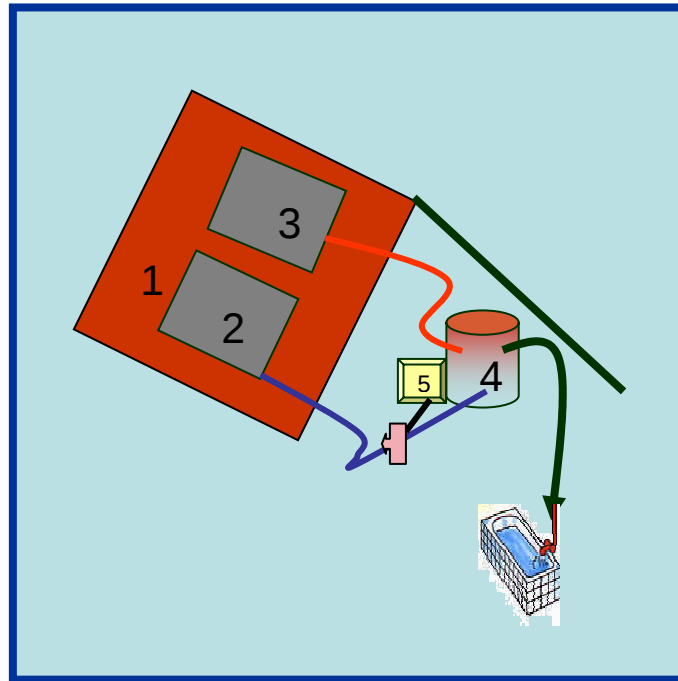


Figura 14.- Instalación solar casa-habitación. En el tejado (1), se instala el colector de placa plana (2), que capta la energía solar. Su funcionamiento se basa en el efecto invernadero y está constituido por varias capas. También se instala en el tejado una placa (3) generalmente de cobre, que absorbe el calor y que contiene los tubos por donde circula el fluido. Esta placa absorbe el máximo de radiación y emite la mínima al exterior. Tiene un aislamiento térmico para evitar pérdidas y una lámina reflectante. Dentro del interior de la vivienda, se instala un tanque de almacenamiento (4), con un consumo estimado por persona y día de 55 L a 45 °C. En el tanque se introduce un ánodo que hay que cambiar periódicamente para evitar la corrosión. Es necesario además, un sistema de control (5), que comprueba la temperatura en distintos puntos de la instalación y que conecta y desconecta los sistemas de apoyo y las bombas. En los momentos en que no hay radiación solar es necesario un apoyo energético mediante energías convencionales. Fuente: Imagen de elaboración propia.

Una aplicación importante de los colectores de concentración, son los **hornos solares**, que resultan ideales para investigaciones; por ejemplo, en la de materiales, que requieren altas temperaturas en ambientes libres de contaminantes. El mayor de estos hornos, se encuentra en Odeillo, en la parte francesa de los Pirineos, y cuenta con 9.600 reflectores con una superficie total de unos 1.900 m², produciendo temperaturas de hasta 4.000 °C.

Para general electricidad, se utilizan los colectores de **electricidad fotovoltaica**. Son células solares de obleas finas de silicio, arseniuro de galio u otro material semiconductor en estado cristalino, tal como se muestra en la figura 15.

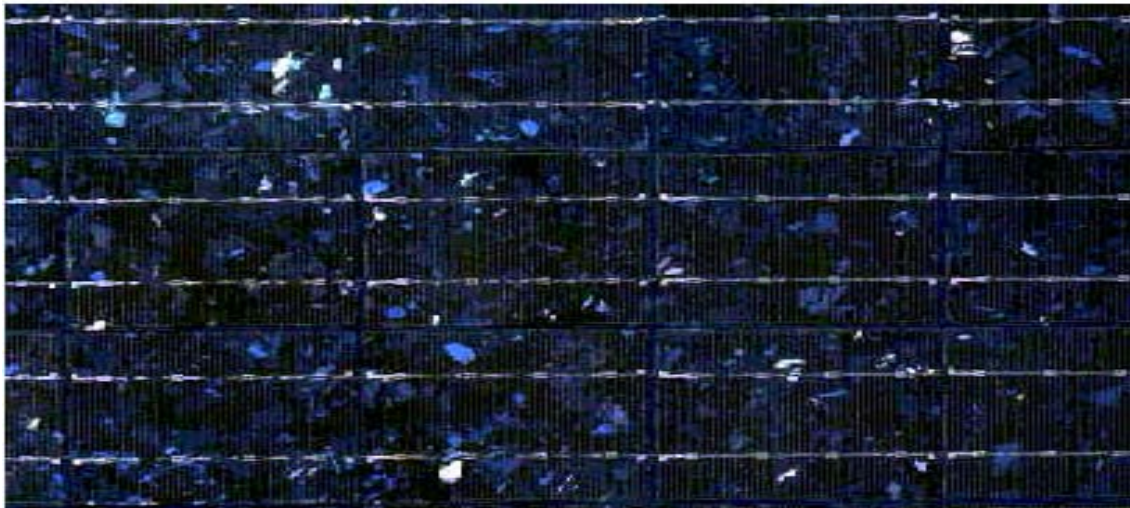


Figura 15.- Célula fotovoltaica. La luz excita a los electrones del semiconductor. De esta forma convierten la radiación en electricidad. Fuente: Walter Rawlings y Robert Harding Picture Library. <http://centros5.pntic.mec.es>.

El gran problema de esta tecnología es su elevado costo, aunque actualmente se ha reducido mucho al utilizar módulos. No obstante, la mayor parte de su uso actual se limita a dispositivos de baja potencia, remotos y sin mantenimiento, como boyas y equipamiento de naves espaciales. Sin embargo, esta tecnología puede tener un gran futuro, si se utiliza en conexión con redes de distribución eléctricas. Así, se pueden construir plantas fotovoltaicas de gran potencia conectadas a la red. En España, la

más importante es la de Tudela (Navarra) con 1,2 MW de potencia nominal. Por otra parte, los paneles solares instalados en los tejados y en instalaciones comerciales, pueden convertirse en una red eléctrica de distribución, generando una gran potencia, que puede resultar excedente y venderse. Un esquema del funcionamiento de estas últimas, se muestra en la figura 16, para el sistema casa-habitación.

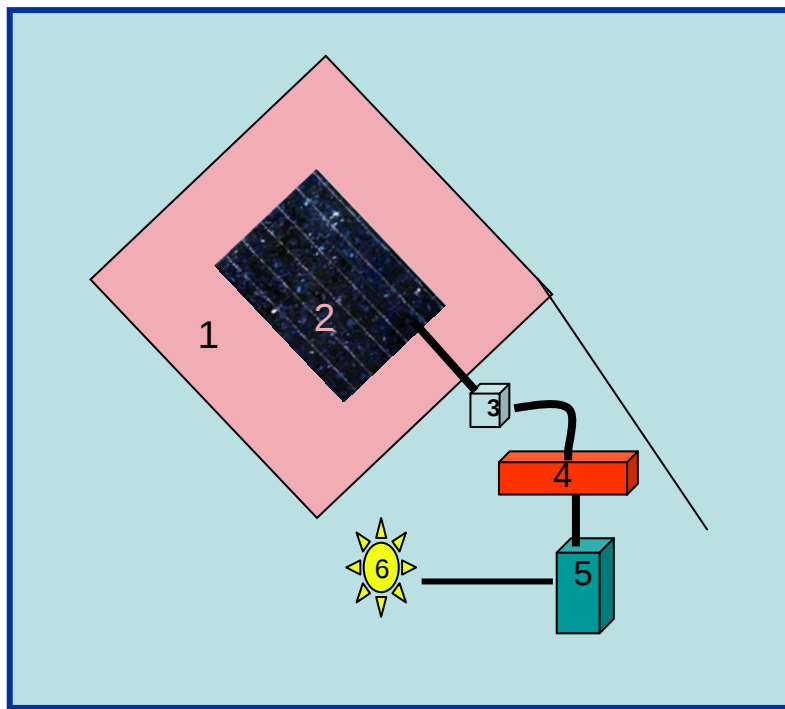


Figura 16.- Esquema de funcionamiento de una instalación en una vivienda para generar electricidad mediante célula fotovoltaica: En el tejado (1) se instala el panel de células fotovoltaicas (2), que están conectadas entre sí, para generar una corriente de una intensidad y voltaje determinados. Las células más eficientes son las de Si monocristalino. En el interior de la vivienda tenemos: un sistema de control de carga (3), que impide la sobrecarga de las baterías (4), las cuales acumulan la energía producida para que esté disponible por la noche y los días nublados. Finalmente, es necesario un inversor (5) de corriente continua (DC) de los paneles a alterna (AC) de los electrodomésticos y motores. Cuando solo se necesita para iluminación (6), se puede prescindir del inversor. Fuente: Imagen de elaboración propia.

También, se puede generar electricidad mediante la energía solar de tipo térmico, aunque todavía no es una tecnología madura. Hay tres diseños en desarrollo: parabólico, torres y plato motor. La más investigada es la de diseño parabólico, que consta de un reflector parabólico, que concentra la energía solar en una tubería receptora rellena de aceite. La radiación calienta el aceite hasta los 400 °C, y mediante un generador de vapor convencional, convierte el calor en electricidad. Esta tecnología es más barata que la electricidad producida a través de combustibles fósiles, aunque actualmente solo se utiliza como apoyo a los sistemas convencionales.

3.5.- La energía geotérmica.

La geotermia es la ciencia relacionada con el calor en el interior de la tierra. Aunque en sentido estricto no es una fuente de energía renovable, se considera como tal y se usa para la generación de energía eléctrica, calefacción o en procesos de secado industrial. Aprovecha el calor que se produce entre la corteza y el manto superior de la tierra, sobre todo por desintegración de elementos radiactivos. Esta energía geotérmica se transfiere a la superficie, bien por difusión, por movimientos de convección en el magma (roca fundida) o por circulación de agua en las profundidades. Se exterioriza hidrotérmicamente en superficie, en forma de manantiales calientes, géiseres y fumarolas.

Tampoco es un descubrimiento reciente, ya que los colonos escandinavos en Islandia llevaban agua desde las fuentes calientes cercanas hasta sus viviendas a través de conductos de madera. Ahora bien, la aplicación de la moderna tecnología de la que hoy en día disponemos, hace que la energía geotérmica tenga un gran potencial. Se calcula, basándose en todos los sistemas hidrotérmicos conocidos con temperaturas superiores a los 150 °C, que Estados Unidos podría producir 23.000 MW en los próximos 30 años. Refiriéndonos al año 1990, en otros 18 países, la capacidad

geotérmica total fue de 5.800 MW, lo que nos da una idea de lo que puede ser el desarrollo futuro de esta tecnología^{xii}.

La energía geotérmica se clasifica en tres categorías, según la temperatura:

- Elevada. $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Media. T entre $90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Baja. $T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las de alta temperatura, se emplean exclusivamente para generar electricidad; las medias para calefacción, agua caliente, invernaderos y piscifactorías y las de baja temperatura, para bombas de calor y refrigeración de viviendas.

Actualmente, se construyen **centrales geotérmicas**, para la producción de energía. En la figura 17 se observa una de estas centrales y un esquema de su funcionamiento. Básicamente, una central geotérmica consta de una perforación realizada en la corteza terrestre a gran profundidad. Para lograr la temperatura de generación de electricidad, debe perforarse varios kilómetros, ya que para conseguir los 150°C , la profundidad mínima debe ser de unos 5 kilómetros.

Las grandes ventajas de las plantas geotérmicas son: en primer lugar su baja emisión de gases contaminantes comparados con las centrales térmicas, con emisiones inferiores al 1% de los NO_x y del 5% del CO_2 con producciones de cantidades de energía comparables. Además, la energía geotérmica, no produce partículas de material contaminante asociadas a la quema de combustibles fósiles y no produce ningún residuo radiactivo.

Sin embargo, también tiene desventajas, fundamentalmente por su impacto medioambiental. La energía geotérmica se desarrolla a nivel local y produce: **ruido, emisiones de gas e impacto visual**. Además, el desarrollo de plantas geotérmicas produce una contaminación térmica considerable a partir de los residuos de agua

^{xii} Datos obtenidos de la Enciclopedia Microsoft Encarta 2004.

caliente que pueden ser altamente corrosivos. Técnicamente, no tienen capacidad de conducir el calor, debido a ello, cuando la central entra en funcionamiento y comienza a inyectar agua al interior de la sima, ésta se va enfriando ya que no es capaz de recuperar la temperatura a la misma velocidad que la consume. En la práctica este inconveniente impide el funcionamiento continuo de la central, ya que una vez que la sima ha cedido todo su calor, el sistema se detiene y es preciso esperar a que la roca recupere de nuevo su temperatura habitual.

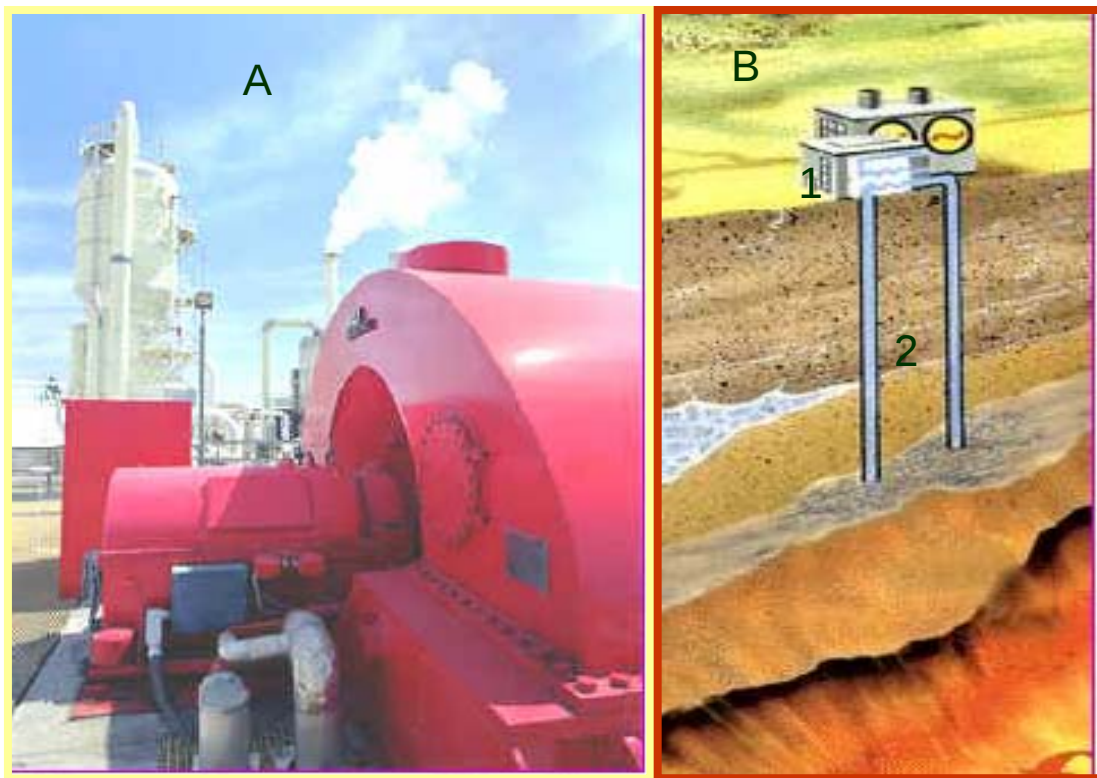


Figura 17.- (A). Central geotérmica de Brawley en California (USA). (B). Esquema simple de funcionamiento: Dos tubos (2) que han sido introducidos en la perforación practicada, mantienen sus extremos en circuito cerrado en contacto directo con la fuente de calor. Por un extremo del tubo se inyecta agua fría desde la superficie, cuando llega al fondo se calienta y sube a chorro hacia la superficie a través del otro tubo, que tiene acoplado una turbina con un generador (1) de energía eléctrica. El agua enfriada es devuelta de nuevo por el primer tubo para repetir el ciclo. Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos15/fuentes-electricidad/fuentes-electricidad.shtml>.

3.6.- La biomasa.

La biomasa es la abreviatura de masa biológica^{XIII}. Este término, sin embargo, se utiliza con más frecuencia para definir la energía de biomasa, es decir, el combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La biomasa tiene por tanto, una composición de materia orgánica, bien de origen animal o vegetal.

Respecto a su origen, se puede clasificar en tres tipos:

☞ Cultivos energéticos. Cultivos de plantas y árboles, que se utilizarán con el exclusivo propósito de producción de energía. Se pueden dividir en:

- o Cultivos ya existentes, como la remolacha, cereales, oleaginosas, etc.
- o Lignocelulósicos forestales, caso del chopo, eucalipto o sauce.
- o Lignocelulósicos herbáceos, como el cardo.
- o Otros cultivos, como la patata^{XIV}.

☞ Residuos.

- o De origen forestal, procedentes de podas, limpiezas, etc.
- o De origen agrícola, como paja de cereales, zuros de maíz, residuos de aceituna, cascarilla de arroz o cáscaras de frutos secos.
- o De origen ganadero, como los purines de los cerdos.
- o De origen urbano. Basuras biodegradables.
- o Industriales. Papeleras, industria del mueble, manufacturación agroalimentaria (cáscaras, huesos) y lodos de las depuradoras.

^{XIII} Cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico.

^{XIV} Tubérculo de la aguaturma, planta de la familia de las Compuestas.

- 🏠 Transformación química o biológica, de especies vegetales o aceites domésticos, en biocombustibles que sirven de complemento o sustitutos del gasóleo o de la gasolina.

Los combustibles más utilizados para conseguir energía, y que representan a estos tipos de biomasa son:

- La leña, como cultivo energético.
- El estiércol, como residuo.
- Los combustibles alcohólicos (metanol y etanol), ejemplo clásico de transformación de la energía. A estos, se denominan bioalcoholes.

La leña y el estiércol siguen siendo combustibles importantes en algunos países en vías de desarrollo, pero también, los elevados precios del petróleo han hecho que algunos países industrializados vuelvan a interesarse por la leña. Por ejemplo, se calcula que casi la mitad de las viviendas de Vermont, en Estados Unidos, se calientan parcialmente con leña. En Brasil, la caña de azúcar, por fermentación, se transforma en etanol, y en la provincia de Sichuán (China) se obtiene gas a partir de estiércol.

Los bioalcoholes, se pueden utilizar como complemento o sustitutivo de la gasolina o para generar electricidad. La mitad de los transportes públicos en Brasil, emplean bioetanol como combustible.

En realidad, como estamos viendo, la biomasa no es una tecnología como las anteriores que hemos estudiado, sino un recurso para sustituir las fuentes de energía convencionales, y se pueden emplear por ejemplo, como sustitutivo del carbón en plantas térmicas o para calentar viviendas, en la sustitución de la gasolina de los vehículos a motor, o incluso para generar electricidad, por lo que su desarrollo se considera fundamental para sustituir a los combustibles fósiles y tiene grandes perspectivas.

Según el tratamiento al que se somete al material, se pueden clasificar en dos tipos de técnicas⁸:

 Métodos termodinámicos.

- o **Combustión.** Consiste en quemar materiales leñosos, paja, cardo o cualquier otro cultivo energético, en condiciones aerobias, integrada en un sistema o ciclo de vapor, que libera vapor de agua y CO₂. Se utiliza para calefacción doméstica y producción de calor industrial.
- o **Pirolisis.** Es una combustión incompleta a alta temperatura (500 °C), en condiciones anaerobias. Libera una mezcla de CO, CO₂, hidrocarburos ligeros e H₂, denominada “gas pobre”, que puede usarse para producir electricidad o para motores diesel, en un proceso de **gasificación** casi total de la biomasa. El “gas pobre”, también puede servir como base de síntesis de metanol, para su uso como sustitutivo de la gasolina (carburol). Otro ejemplo es el aperujo^{xv}, que es utilizado para alimentar una caldera y con el vapor que genera se produce electricidad mediante el movimiento de una turbina de vapor.

 Métodos biológicos.

- o **Fermentación alcohólica.** Transforma la biomasa en combustible bioalcohólico, por fermentación de azúcares.
- o **Fermentación metánica.** Digestión anaerobia de la biomasa, generalmente húmeda, por bacterias. En los fermentadores, o digestores, la celulosa se degrada en un gas, el cual contiene alrededor del 60% de CH₄ y 40% de CO₂. Para este proceso se requiere una temperatura entre 30-35 °C. Estos digestores por su gran autonomía

^{xv} Residuo de la aceituna.

presentan una opción favorable para las explotaciones de ganadería intensiva.

Estas tecnologías, permiten abrir un gran abanico de posibilidades en la utilización energética de la biomasa, que actualmente son:

- o **Producción de Energía Térmica.** Ha sido y es el aprovechamiento más convencional de la biomasa natural y residual. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos, calefacción o secado de productos agrícolas. Además, también se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y para generar electricidad.
- o **Producción de Energía Eléctrica.** Obtenida principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos, de crecimiento rápido (Chopo, Sauce, Eucalipto, Robinia, Coníferas, Acacia, o Plátano) y herbáceos (Cardo lleno, Miscanto, Caña de Provenza, Euforbias, o Chumberas) y mas minoritariamente a partir de biomasa residual (restos de cosecha y poda) o a través del biogás resultante de la fermentación de ciertos residuos (lodos de depuradora o residuos sólidos urbanos). Para producir electricidad, hay que utilizar esta materia prima en un ciclo, dentro de las denominadas **centrales de biomasa**, cuyo esquema de funcionamiento lo podemos ver en la figura 18. El problema de estas centrales es su bajo rendimiento energético, que puede aumentarse utilizando la **tecnología de cogeneración** de calor y electricidad, proceso ya usado en las industrias papeleras. Para ello se dispone de una turbina de contrapresión o bien se hace una extracción de vapor en la zona de baja presión de la turbina. Se instalan los intercambiadores de calor adecuados y se pueden obtener rendimientos globales entre el 40 y 60%^{XVI}.

^{XVI} Datos de la APPA. Asociación de Productores de Energías Renovables.



Figura 18.- Esquema de funcionamiento de una central de biomasa. Fuente: http://geocities.com_yosemite. Más información en la sección Material complementario.

- o **Producción de Biocombustibles.** Existe la posibilidad, por otra parte ya legislada, de alimentar los motores de gasolina con bioalcoholes y los motores diesel con biodiesel. En cuanto a los primeros, el principal representante es el **bioetanol**, obtenido por fermentación alcohólica de los azúcares presentes en los productos vegetales (caña de azúcar, remolacha, cereales, etc.). Su proceso de elaboración es semejante al de la cerveza: primero se tritura la materia vegetal y se mezcla con agua y con un enzima, calentado la papilla resultante a una temperatura de entre 120 y 150 °C. A continuación la masa se cuele, se le añaden otras enzimas y se deja que fermente, en un proceso que dura alrededor de 48 horas y convierte los azúcares en etanol y CO₂. Esa masa fermentada, que contiene alrededor de un 10% de alcohol y otros compuestos sólidos, es destilada para separar el líquido del sólido, hasta obtener un porcentaje de un 96% de alcohol que posteriormente es deshidratado para

eliminar el agua. El CO₂ generado durante estos procesos puede ser utilizado en la elaboración de bebidas gaseosas. El **biodiesel**, por su parte, se obtiene de aceites vegetales (Colza, Girasol, Soja, etc.)⁹, en un proceso denominado transesterificación, en el que los aceites se combinan con un alcohol y se alteran químicamente para formar glicerina y un metil éster. La glicerina es un subproducto, que puede venderse para otros usos.

- o **Producción de Gases Combustibles.** Es una aplicación poco utilizada actualmente, consistente en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible es básicamente metano, pero también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible. El gas obtenido es de bajo poder calorífico, pero útil en aplicaciones térmicas en el propio entorno ganadero o agrícola, suministrando luz y calor.

En España, la única biomasa explotada actualmente para fines energéticos es la de los bosques^{xvii}, a pesar de que somos un país deficitario de madera, por lo que sólo es razonable contemplar el aprovechamiento energético de la corta y seca y de la limpia de las explotaciones forestales (leña, ramaje, follaje, etc.), así como de los residuos de la industria de la madera. En este sentido, la oferta energética subyacente a las leñas ha sido evaluada en 2.500.000 Tep. En cuanto a los residuos agrícolas, solo es recomendable el uso de la paja de los cereales en los casos en que el retirarla del campo no afecte apreciablemente a la fertilidad del suelo, y las deyecciones y camas del ganado cuando el no utilizarlas sistemáticamente no perjudique las productividades agrícolas. Siguiendo este criterio, en España se ha evaluado una

^{xvii} Fuente: APPA. Asociación de Productores de Energías Renovables.

hipotética oferta energética de 3.700.000 Tep procedentes de la paja de cereales^{XVIII}.

La utilización de biomasa en España es todavía muy escasa, y su proyección no es importante, como vemos en la figura 19.

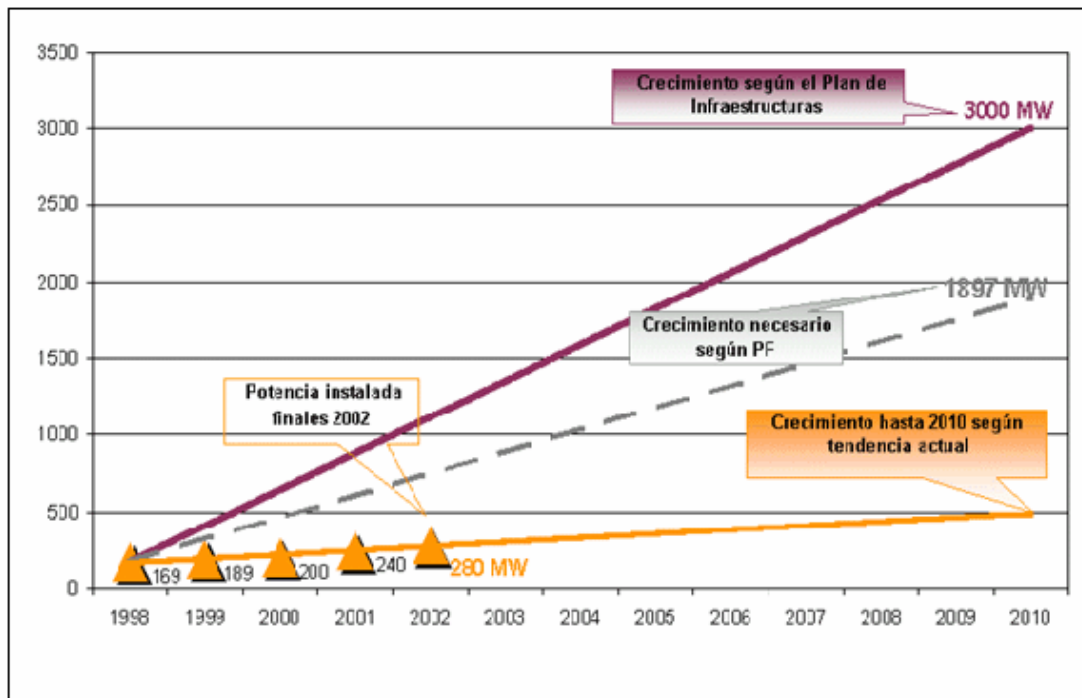


Figura 19.- La potencia instalada de biomasa a finales de 2002 era de 280 MW, con una tendencia hasta el 2010 de alrededor de 500 MW. El crecimiento necesario, sería de 1897 MW, según el Plan de Fomento de Energías Renovables o de 3000 MW, según el de Infraestructuras. Fuente: APPA. Asociación de Productores de Energías Renovables.

La gran ventaja de la biomasa es la emisión de CO₂ que producen, ya que es la misma cantidad que previamente han consumido las plantas durante su crecimiento, y forma parte por tanto, de la circulación natural entre la atmósfera y la vegetación, siempre que la vegetación se renueve, porque sino, las emisiones de CO₂ resultarían en mayor cantidad y contribuirían a un aumento del efecto invernadero, como de

^{XVIII} Datos de la APPA.

hecho ocurre con las energías convencionales. Además, no produce emisiones sulfuradas o nitrogenadas y, en el caso del aprovechamiento energético de residuos, supone la virtud de convertir un residuo en un recurso. Así mismo, reduce la dependencia externa del abastecimiento de combustibles y permite una rotación en los cultivos.

Los inconvenientes que plantea son los de un mayor gasto de producción, un menor rendimiento energético, con respecto a los convencionales, además de una producción estacional y el volumen que ocupan, ya que la materia prima es de menor densidad energética que los combustibles fósiles, con el problema consiguiente de transporte y almacenaje.

Pero, su gran limitación es la contaminación que producen en los interiores de los hogares^{XIX}, con efectos nocivos para el ser humano, y que son debidos a la cocción de alimentos dentro de las casas, lo que produce humo, partículas, monóxido de carbono y otros gases contaminantes¹⁰, que afectan principalmente a los ciudadanos de escasos recursos. La OMS calcula que más de un millardo de personas de los países en vías de desarrollo, son víctimas de este tipo de contaminación.

Este problema es más grave de lo que parece, ya que se producen altos niveles de exposición al humo, entre diez o más veces mayores que los límites recomendados por la OMS, en varios países en vías de desarrollo y que se relacionan con la contracción de infecciones respiratorias agudas (IRAs), y sobre todo con la neumonía. Las mujeres, que todavía realizan la mayoría de las tareas domésticas y los niños, son la población que se expone en mayor medida y de forma continuada a la contaminación del aire dentro de las viviendas. Los niveles de contaminación en las casas y cocinas, representan la dosis equivalente a fumarse varios paquetes de

^{XIX} A este tipo de contaminación se le denomina “tradicional”, que junto a la “ocupacional” y la “moderna”, constituyen los tres tipos de contaminación dentro de los edificios.

cigarrillos al día. Las IRAs resultan así, el riesgo de salud más importante para los niños en las naciones en vías de desarrollo y son las responsables de unos 4,3 millones de muertes al año, resultando que entre todas las enfermedades endémicas, incluyendo la diarrea, las IRAs constituyen la causa de enfermedad más universalmente extendida. En la Tabla IV, se muestran datos de esta problemática.

Para paliar este problema, actualmente se fabrican modernas calderas de biomasa para las viviendas, que realizan un control de la combustión para que las emisiones de CO₂ y partículas estén dentro de los límites permitidos de 150 mg/nm³ para partículas y 200 mg/nm³ de CO₂ a plena carga, resultando que además proporcionan un confort similar al de la calefacción por gas natural. Una de estas tecnologías, es la caldera de llama invertida para la combustión de leña, que mostramos en la figura 20.

Tabla IV.- Concentraciones de contaminantes del aire dentro de las viviendas y exposiciones recomendadas por la OMS. Fuente: OMS, Ginebra. 1990.

Exposición típica en algunos países en vías de desarrollo	Contaminante	Exposiciones diarias recomendadas por la OMS
1-20 mg/m ³	Partículas de materia sólida	0,12 mg/m ³
10-50 mg/m ³	CO	10 mg/m ³
0.1-0,3 mg/m ³	N ₂ O	0,15 mg/m ³
1-20 µg/m ³	Benzo-alfa-pireno	0,001 µg/m ³ *

*Concentración causante de cáncer en 100.000 personas después de una exposición de toda la vida.

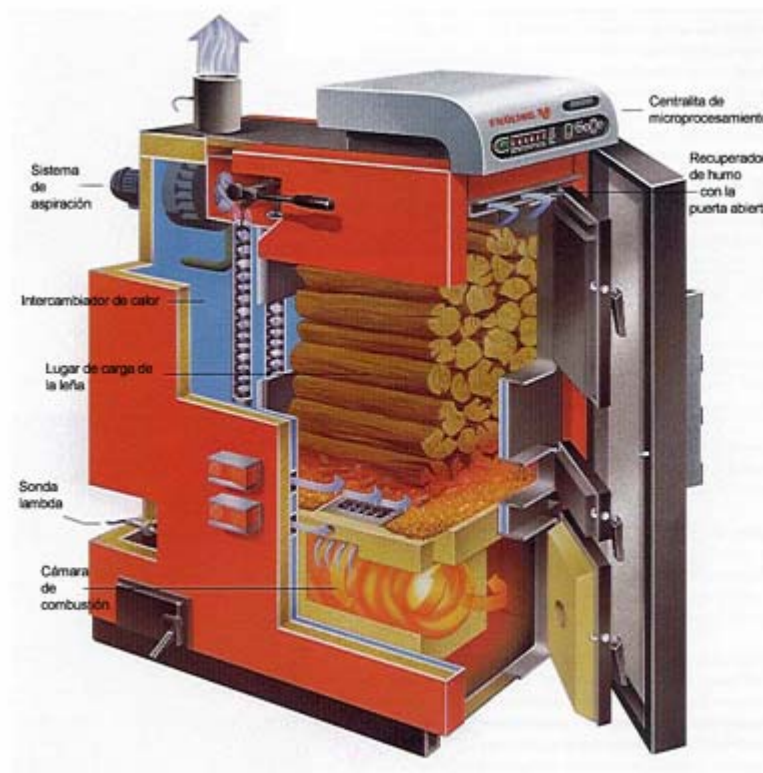
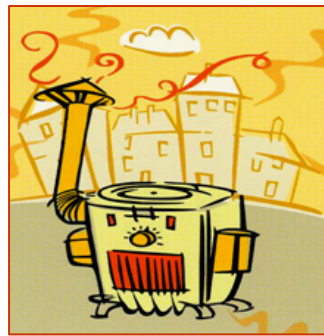


Figura 20.- Caldera de leña moderna de llama invertida. Fuente: <http://www.cecua.es>.

4.- Impactos medioambientales de la contaminación urbana y sus alternativas.

Las grandes urbes, producen un tipo específico de contaminación, que también contribuye a la general de la atmósfera, y que es debida fundamentalmente a dos factores: **el tráfico rodado** y **las calefacciones**, con características estacionales^{xx}. Las calefacciones producen gases y partículas contaminantes, tal como vemos en la figura 21. Por su parte, el tráfico rodado, incrementa la cantidad de contaminantes anteriormente descritos, además de algunos específicos, como el Pb, tal como se muestra en la figura 22.

^{xx} Aumento en invierno y disminución en verano, además de un tipo de contaminación, denominada “de fondo”, que persiste todo el año.



CO
CO₂
NO_x
SO₂
HCs
PSS
COVs

Figura 21.- Contaminantes producidos por las calefacciones. NO_x, engloba a todos los óxidos de nitrógeno. HCs a los hidrocarburos. PSS son las partículas sólidas en suspensión y los COVs, los compuestos orgánicos volátiles. Su concentración experimenta grandes oscilaciones estacionales. Fuente: Gas Natural. S. A.



CO
CO₂
NO_x
SO₂
HCs
PSS
COVs
Pb

Figura 22.- Contaminantes producidos por el tráfico rodado. Son los mismos, que los emitidos por las calefacciones, y además el Pb. Las oscilaciones estacionales son menores que el de las calefacciones, aunque se notan disminuciones los fines de semana y en las vacaciones veraniegas. Fuente: Gas Natural. S. A.

Los impactos medioambientales que se producen, debido a la emisión de esos contaminantes son diversos, tanto a nivel local como global. El CO₂ emitido, contribuye al aumento del efecto invernadero a nivel planetario, mientras que el CO, a la destrucción del ozono estratosférico y a la formación del troposférico^{xxi}.

Por su parte, los NO_x contribuyen a la acidificación del suelo, al incremento del efecto invernadero, a la destrucción del ozono estratosférico y la formación del troposférico. Los hidrocarburos, junto al ozono troposférico, son los principales componentes de la niebla fotoquímica. Las partículas en suspensión, producen turbidez y suciedad atmosférica, formando nubes de polución que se pueden observar a kilómetros de distancia. El plomo, también contribuye a estos efectos. El SO₂, a la acidificación del suelo y a la destrucción del ozono estratosférico. Por último, los compuestos orgánicos volátiles, a la formación de ozono troposférico, por lo que son precursores de las nieblas fotoquímicas.

Alternativas energéticas.

Debido a la alta contaminación que se origina en las grandes urbes, en la utilización de las fuentes de energía convencionales para las calefacciones y los motores de los vehículos, se están estudiando el uso de otras fuentes alternativas, algunas de las cuales ya están operativas y en funcionamiento.

Las alternativas energéticas para la calefacción, se pueden cifrar en cinco:

1. Carbón mineral en caldera.
2. Gas natural con bomba de calor.
3. Gasóleo en caldera.
4. Electricidad.
5. Propano en caldera.

^{xxi} El ozono troposférico es el gas contaminante más oxidante y perjudicial de las llamadas nieblas fotoquímicas o smog urbano.

El **carbón mineral en caldera**, tiene como ventajas principales el ser barato y abundante. Como inconvenientes el de sus elevadas emisiones de CO, CO₂, COVs, SO₂ y NO_x, y su bajo rendimiento. El **gas natural con bomba de calor**, como ventajas, la disponibilidad del combustible a largo plazo, sus bajos niveles de emisión de contaminantes, que son los más menores entre todos los combustibles fósiles; no contribuye a la niebla fotoquímica y no produce emisiones de SO₂. Entre sus inconvenientes, se cuenta las elevadas emisiones acústicas, que requieren insonorización y las posibles fugas de metano. El **gasóleo en caldera** produce bajas emisiones de CO y de HCs, pero en contraposición tiene altas emisiones de NO_x y de SO₂, además de altas emisiones de PSS y humos negros, y es dependiente del petróleo. La **electricidad directa**, con bomba de calor, tiene como ventajas, las reducidas emisiones en el lugar de consumo, junto a una elevada eficiencia energética, pero se desplaza el foco de contaminación al lugar de producción, con emisiones elevadas de SO₂ y NO_x. Finalmente, el **propano en caldera**, emite bajas concentraciones de contaminantes, junto a una elevada eficiencia energética, pero es dependiente del petróleo y puede tener fugas de HCs.

Las alternativas al tráfico rodado, son:

1. Gasolina sin plomo.
2. Gasóleo.
3. Biocarburantes.
4. Gas natural.

La utilización de **gasolina sin plomo**, ya obligatoria en la UE, presenta las ventajas además de no emitir Pb, que los catalizadores de los tubos de escape, disminuyen la emisión de NO_x, CO y HCs, frente a los inconvenientes de su dependencia del petróleo, mayores emisiones de COVs, el propio impacto del transporte de combustible, la baja eficacia de los catalizadores en zonas urbanas y en el invierno, lo que provoca que no reduzcan sensiblemente la contaminación, y

además los compuestos aromáticos que elevan el octanaje, son cancerígenos. El **gasóleo**, presenta bajas emisiones de CO y HCs, pero altas de NO_x y PSS, además de su dependencia del petróleo y de la emisión de partículas que crean problemas respiratorios. Los **biocarburantes**, que como hemos visto se obtienen de la biomasa, y por tanto reducen la dependencia del petróleo, y de los problemas asociados a su transporte, e incrementan el octanaje sin necesidad de aditivos, con la ventaja añadida de sus bajas emisiones de CO y CO₂. Las principales desventajas, son su alto coste económico, la dificultad de construir estaciones de carga, que son específicas y no convencionales, y las altas emisiones de NO_x. Entre los biocarburantes actuales, hay que destacar el bioetanol y el biodiesel, de los que anteriormente describimos como se obtenían. El bioetanol, se puede utilizar directamente, o como aditivo antidetonante de la gasolina en sustitución del tetrametil o tetraetil plomo, en forma de ETBE (etil éter terciario). Sus ventajas son: mejora el índice de octanos, una mayor energía mecánica producida, un desarrollo más eficiente del par del motor y reduce el número de compuestos aromáticos en la gasolina, incluidas las emisiones de benceno a la atmósfera. El biodiesel es biodegradable, menos contaminante, de igual rendimiento y precio que el gasoil normal y puede sustituir a este o complementarlo¹¹. La principal ventaja es la no emisión de CO₂ ni de SO₂, junto a una menor de partículas (-40%). Además, se incrementan los parámetros de lubricidad y limpieza, con lo que se alarga la vida del motor y reduce los costes de mantenimiento. En Segovia, Burgos, Valladolid, Zamora, Ávila y Soria, ya se vende biodiesel^{xxii}, en estaciones de servicio¹². El biodiesel es una de las energías renovables alternativas que mayor implantación tiene en Europa.

El **gas natural**, presenta muchas ventajas; produce mucha menor contaminación urbana, ya que no emite PSS, cenizas, COVs, metales pesados, ni

^{xxii} Nombre comercial: Biodiésel vegetal –Bionor MX15

SO₂, y junto a una baja emisión de CO, CO₂^{xxiii} y de NO_x, su contribución al efecto invernadero y a la niebla fotoquímica es mínimo. Además, las emisiones sonoras del motor, también se reducen en gran medida. Frente a estas, sus desventajas son pocas en el orden medioambiental, destacando las ligeras fugas de metano, pero en el orden técnico son mayores, ya que debido a su poca autonomía, solo se utiliza actualmente en los vehículos de transporte público.

Hay otras alternativas que se están estudiando, y que ya están en proceso de desarrollo, la principal de las cuales es la utilización del hidrógeno como combustible de los motores. El motor híbrido de hidrógeno, combinado con la electricidad, que Hyundai en su programa I+D, tiene ya aprobado por el Departamento de Energía de Estados Unidos¹³, es un ejemplo. Otros fabricantes, como la Ford, tienen prototipos de pilas de combustibles de hidrógeno, dispositivo similar al de una batería, pero que no se agota ni se recarga, y que mediante dos electrodos separados por un electrolito, convierte la energía química en eléctrica, en un proceso de combustión fría, produciendo también calor y vapor de agua, evitando por completo las emisiones de CO₂.

Las ventajas y desventajas de la utilización del hidrógeno como combustible, derivan de sus propiedades. En cuanto a sus ventajas, al ser la molécula más ligera y más pequeña, tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible y, en caso de accidente, se dispersaría rápidamente. También permite la combustión a altas relaciones de compresión y altas eficiencias en máquinas de combustión interna. Como desventajas, está su temperatura de licuefacción que es muy baja (20 K) y una energía también muy pequeña por unidad de volumen como gas o como líquido (más o menos una tercera parte de la del gas natural o gasolina, respectivamente). Además, el transporte de hidrógeno gaseoso es

^{xxiii} Reduce en un 30% las emisiones de CO₂ con respecto a las gasolinas.

menos eficiente que para otros gases, los contenedores para su almacenaje son grandes y el almacenamiento de hidrógeno en el depósito de un vehículo todavía es difícil, lo que se une al problema de garantizar la seguridad al repostar, ya que hay que tener en cuenta, que el hidrógeno aunque reacciona lentamente con el oxígeno atmosférico, mediante una elevación local de temperatura (una cerilla, por ejemplo), hace que aquella sea muy rápida y explosiva.

Por otra parte, el hidrógeno no es tóxico y no es contaminante, pero es difícil de detectar sin sensores adecuados ya que es incoloro, inodoro y su llama en el aire es casi invisible.

Pero el principal problema hasta ahora, de la utilización de hidrógeno es su disponibilidad, porque hay que obtenerlo a partir del agua, en un proceso lento y caro, aunque el Instituto de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Valencia, ha descubierto un catalizador de molibdeno que en contacto con el agua, separa de manera rápida y con bajo coste el H_2 del O_2 .

Parece, que la tendencia actual como alternativa energética a las gasolinas, es utilizar la biomasa como combustible de los vehículos o bien motores híbridos electricidad-fósil, pero solo hasta que se resuelvan los problemas de seguridad y coste de la utilización del hidrógeno, para entonces introducir la pila de hidrógeno como la principal tecnología sustitutiva a la de los combustibles fósiles.

5.- El ciclo de la vida.

El llamado **ciclo de la vida**, es una metodología de análisis, denominada con las siglas ACV, que supone una valiosa herramienta de gestión ambiental. Se denomina así, porque supone una recopilación y evaluación de entradas y salidas de las materias primas, la energía, y de las emisiones residuales, desde la “cuna”, es decir desde su extracción a la “tumba” (residuos), tal como se analiza en la figura 23.

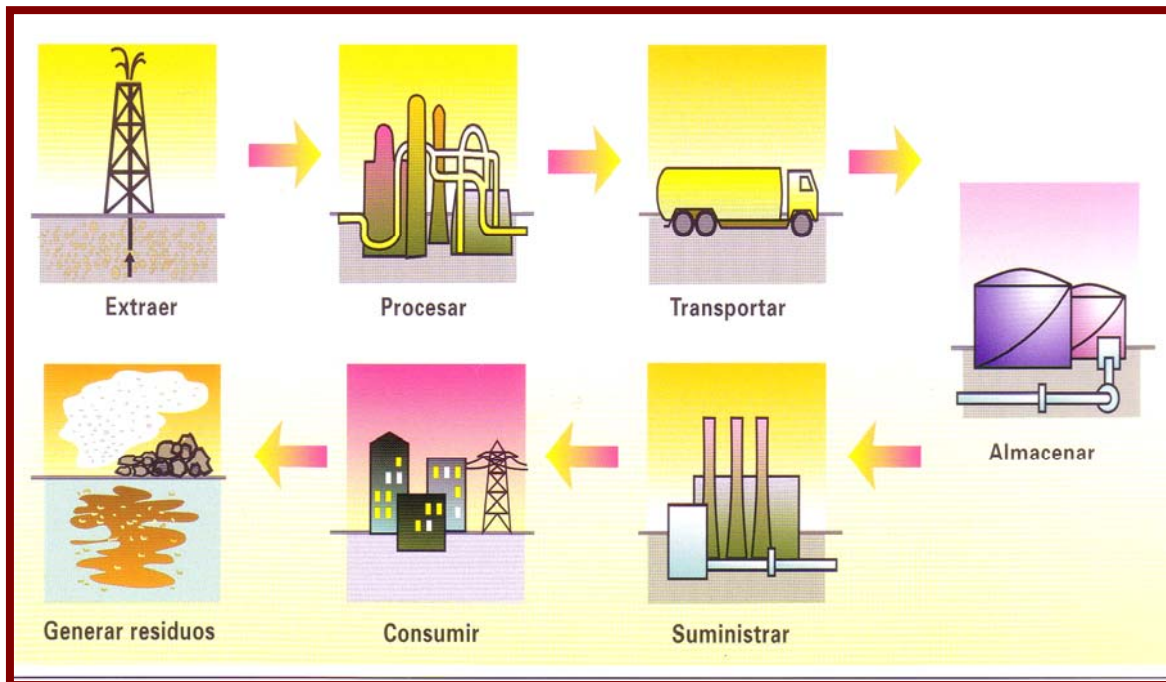


Figura 23.- Esquema del análisis del ciclo de la vida, desde la extracción de la materia prima hasta la generación de residuos después de su utilización como fuente de energía, pasando por las etapas de conversión de la materia primas, su transporte, almacenaje y suministro. Fuente: Gas Natural S. A.

Un ejemplo muy significativo de análisis de un ciclo de vida, es el que mostramos en la figura 24, para las tecnologías que hemos estudiado.

De esta manera, y mediante la asignación de eco puntos, podemos evaluar el impacto medioambiental de las distintas tecnologías, tanto convencionales, como las alternativas y las renovables, tal como apreciamos en la figura 25. Como se puede apreciar en dicha figura, la energía minihidráulica, es la que menor impacto medioambiental produce, tal como comentamos anteriormente. La energía eólica, es también una alternativa muy válida, ya que ocupa la segunda posición, en cuanto a menor impacto, y del análisis del ciclo de la vida, se deduce que la casi única problemática que plantea es la contaminación por metales pesados, similar a la del gas natural, y que representa un 63% de la puntuación negativa de eco puntos.

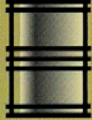
Sistemas energéticos	Lignito	Petróleo	Carbón	Nuclear	Solar Foto-voltaico	Gas Natural	Eólico	Mini-hidráulica
Impactos ambientales								
Calentamiento Global	135,00	97,00	109,00	2,05	15,40	95,80	2,85	0,41
Disminución Capa de Ozono	0,32	53,10	1,95	4,12	3,66	0,86	1,61	0,05
Acidificación	920,00	261,00	265,00	3,33	97,00	30,50	3,49	0,46
Eutrofización	9,83	9,76	11,60	0,28	1,97	6,97	0,27	0,06
Metales pesados	62,90	244,00	728,00	25,00	167,00	46,60	40,70	2,58
Sustancias Cancerígenas	25,70	540,00	84,30	2,05	75,70	22,10	9,99	0,76
Niebla de Invierno	519,00	135,00	124,00	1,50	53,30	3,08	1,48	0,15
Niebla Fotoquímica	0,49	36,90	3,05	0,32	3,03	3,47	1,25	0,06
Radiaciones Ionizantes	0,02	0,02	0,05	2,19	0,12	0,00	0,01	0,00
Residuos Residuos	50,90	0,62	12,90	0,28	1,84	0,58	0,29	0,52
Radiactivos Agotamiento	5,28	7,11	10,60	565,00	34,90	1,34	1,83	0,32
Recursos Energéticos	5,71	13,60	5,47	65,70	7,06	55,80	0,91	0,07
Total	1735,16	1398,11	1355,92	671,82	460,98	267,11	64,67	5,43

Figura 24.- Análisis del ciclo de la vida para la generación de 1 kWh para 8 tecnologías y 12 categorías de impacto medioambiental. Una vez definidos estos objetivos y su alcance, se pasa a la segunda etapa, que consiste en un análisis del inventario, lo que supone un balance completo de entradas de materia y energía en el sistema y salidas de corrientes residuales necesarias para producir 1 kWh y sus cargas ambientales asociadas. Posteriormente, la tercera etapa, consiste en la asignación a cada entrada y salida su contribución relativa en las 12 categorías. Por último, se interpretan y cuantifican los resultados, asignando a cada categoría unos eco puntos. Cuanto mayor es la cantidad de eco puntos, mayor es el impacto medioambiental. Fuente: Gas Natural S.A.

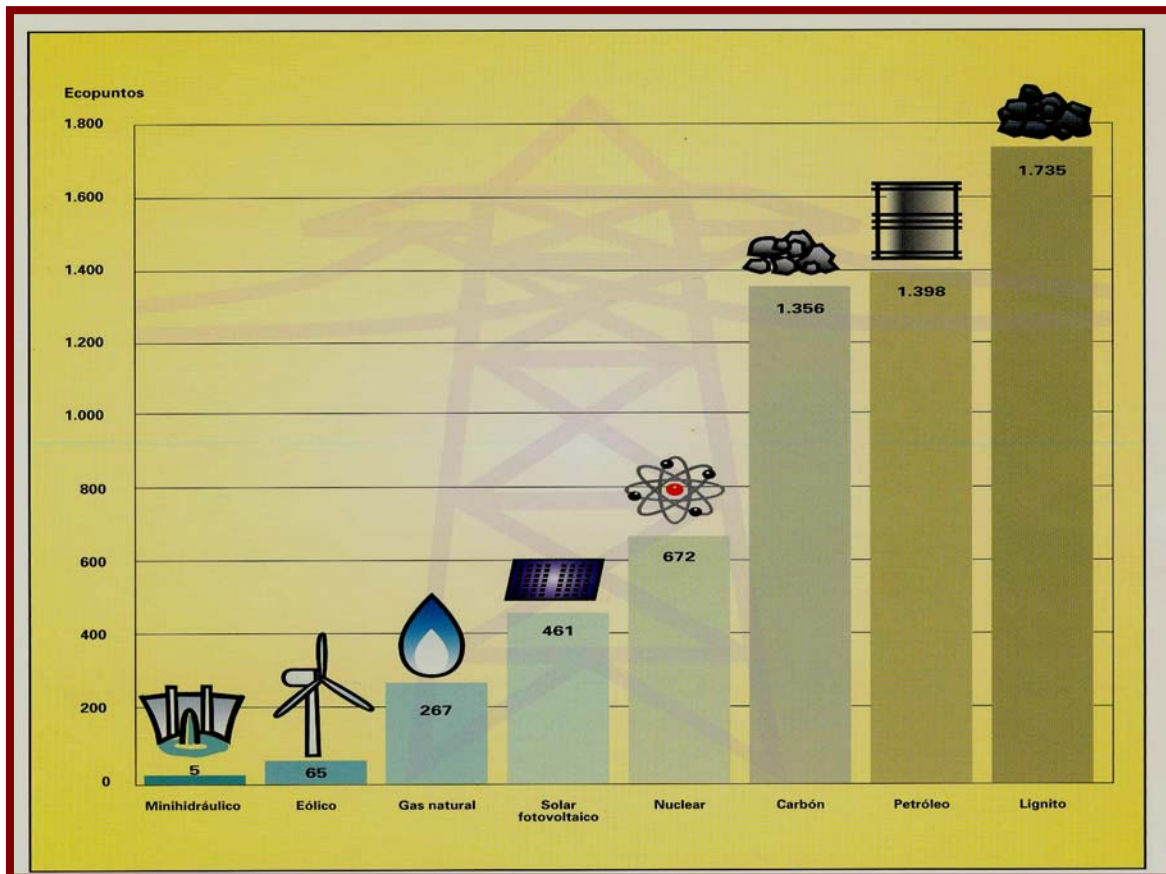


Figura 25.- Esquema representativo del ciclo de la vida de las 8 tecnologías estudiadas. En la figura se representan de menor a mayor impacto medioambiental, resultando la de menor impacto la minihidráulica con solo 5 eco puntos y la de mayor, la utilización del lignito con 1.735 eco puntos. En cualquier caso, las energías alternativas y renovables se comportan mejor que las convencionales. Fuente: Gas Natural S. A.

6.- Desarrollo sostenible.

La utilización de las energías convencionales, con su alto grado de contaminación que producen y el desarrollo de tecnologías alternativas, han hecho acuñar este término de **desarrollo sostenible**, que se utiliza para definir el desarrollo que satisface las necesidades actuales sin poner en peligro la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades^{xxiv}. Hay otras definiciones, como:

^{xxiv} Informe Brundtland (Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, 1987).

“El desarrollo sostenible implica la mejora de la calidad de vida dentro de los límites de los ecosistemas”^{xxv}, o “el desarrollo sostenible es aquél que ofrece servicios ambientales, sociales y económicos básicos a todos los miembros de una comunidad sin poner en peligro la viabilidad de los sistemas naturales, construidos y sociales de los que depende la oferta de esos servicios”^{xxvi}. Pero, en el orden práctico, ¿qué es y que supone el desarrollo sostenible? ¿Se puede cuantificar? En realidad, si se puede contabilizar, tal como vamos a ver a continuación.

El desarrollo sostenible, es un tipo de desarrollo humano, social y económico en su conjunto. El sistema sobre el que se aplican las medidas de desarrollo posee tres componentes:

- a) El ecosistema con todos los recursos y características que lo definen.
- b) La sociedad implantada en el citado ecosistema.
- c) El individuo que forma parte de esa sociedad.

Por tanto, hay un cómputo de costes y beneficios económicos, en donde se tiene en cuenta cómo afecta (favorable o desfavorablemente) a cada uno de los elementos anteriormente citados las actuaciones y proyectos realizados. Se contabiliza así un producto, bien o servicio, como beneficio cuando, sin mermar los recursos de los tres elementos citados anteriormente (naturaleza, sociedad e individuo), se produce un incremento de aquellos. Se tiene pues, un enfoque económico opuesto al convencional, el cual no contabiliza como costes los efectos negativos a largo plazo sobre: el medio ambiente (contaminación atmosférica, de acuíferos, marina, degradación de bosques, etc.), la sociedad (degradación social o cultural, inseguridad ciudadana, etc.) o el individuo.

^{xxv} Unión Mundial de la Conservación. Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas y Fondo Mundial de la Naturaleza. 1991.

^{xxvi} Consejo Internacional de Iniciativas Ambientales Locales (ICLEI). 1994.

Con respecto a estos parámetros, se obtienen unos modelos de evolución de sociedades, tal como vemos en la Tabla V.

Tabla V.- Modelos de evolución histórica de las sociedades humanas.

	Desarrollo pasado	Desarrollo actual	Desarrollo futuro
Modelo	Sostenible	Insostenible	Sostenible
Sociedad	Socialmente injusta	Mejoras sociales	Mejoras sociales

El paso a dar actualmente hacia una sociedad sostenible es factible gracias al diseño de un sistema en que el factor diferenciador fundamental sea **el uso intensivo de la información y del conocimiento del medio** y de los elementos del mismo. Es, preponderante, la calidad del pensamiento y del diseño del sistema lo que determinará su productividad y éxito, y no el uso intensivo de capital o recursos materiales.

7.- Acciones Internacionales.

La Sociedad Internacional, está actualmente muy preocupada por el grado de contaminación que hemos alcanzado a nivel global, por el uso abusivo de los medios energéticos de que disponemos, y camina ya hacia la consecución de un verdadero desarrollo sostenible, es decir que sin renunciar al progreso y a los niveles de bienestar que hemos alcanzado, nuestro Planeta y las generaciones futuras no se vean seriamente amenazados por la contaminación global a escala planetaria.

A continuación, mencionamos una serie de hechos históricos y recientes, de las acciones internacionales que se han realizado al respecto y que se han traducido en acciones concretas para la defensa del medio ambiente, en especial en los países industrializados, destacando en nuestro entorno, el V y VI Programa de la UE de acción en materia de medio ambiente:

1970-1980s

 1972. Conferencia de Estocolmo.

Por primera vez a nivel mundial se manifiesta la preocupación por la problemática ambiental global en esta conferencia junto con el informe del Club de Roma: “Los límites del crecimiento”.

 1987. Informe Brundtland.

Se formaliza el concepto de desarrollo sostenible, con el informe de Naciones Unidas elaborado por la Comisión Mundial sobre medio ambiente y desarrollo “Nuestro Futuro Común”.

1990s

 1992. Conferencia de Río “La cumbre de la Tierra. Agenda 21.

Amplio acuerdo intergubernamental en torno a un plan de acción global a favor del desarrollo sostenible.

Se crea la comisión para el desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.

 1992. V Programa de Acción en materia de medio ambiente de la UE: “Hacia un Desarrollo Sostenible”.

Objetivo: integrar las políticas ambientales en el resto de políticas, económicas y sociales de la UE.

 1994. Primera Conferencia de ciudades europeas sostenibles. Aalborg (Dinamarca).

Nace la campaña europea de ciudades y pueblos sostenibles.

 1996. Segunda Conferencia de ciudades europeas sostenibles. Plan de actuación de Lisboa.

 1997. Cumbre extraordinaria Río+5. New York.

Revisión de los objetivos establecidos en la Cumbre de Río de 1992.

2000s

-  2000. Tercera Conferencia de ciudades europeas sostenibles. “Llamamiento de Hannover”.
-  2001. VI Programa de Acción en materia de medio ambiente de la UE: “El futuro en nuestras manos” 2001-2010.
-  2001. Estrategia de la Unión Europea para el desarrollo sostenible: “Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor”.
-  2002. Conferencia mundial Río +10. II Cumbre de la Tierra. Johannesburgo (Sudáfrica).

Esperemos que todas estas acciones y las futuras, sean comprendidas, analizadas responsablemente y desarrolladas por los Gobiernos, para que entre todos se logre un Mundo mejor.

CONCLUSIONES

Las tecnologías para producir energías alternativas renovables a los combustibles fósiles, están aquí y ahora, y son necesarias no solo por motivos medioambientales, sino por el agotamiento de las fuentes convencionales. A este respecto, está previsto que las reservas de petróleo se extingan en el 2020-2030, a menos que el ritmo de suministro sea mucho menor al actual; el gas durará algo más y solo del carbón, puede tener presencia como fuente fósil a lo largo de este siglo.

Hasta ahora, hemos dependido de una fuente fósil, sobre todo del petróleo, que ha sido y todavía es, suficiente por sí misma, para ser la única que nos suministre energía, tanto eléctrica como térmica, necesaria para el desarrollo industrial y para nuestro bienestar. Sin embargo, no hay actualmente una exclusiva de las llamadas alternativas, que pueda reemplazar esta capacidad del petróleo, ya que no producen

suficiente capacidad energética, sobre todo para cubrir todas las necesidades energéticas. Por tanto, hay que combinar una serie de tecnologías alternativas, a menos que queramos manejar la opción de la energía nuclear, para que podamos proceder a la sustitución de las fuentes convencionales, y además deberemos ahorrar en el gasto energético, por ejemplo con la cogeneración de energía; con el intercambio de calor con el suelo, ya utilizado en la UPV (Universidad Politécnica de Valencia), que en el norte de Europa y en Estados Unidos tiene gran éxito, o con el desarrollo de la arquitectura bioclimática, diseñada para aprovechar el clima y las condiciones del entorno para conseguir un confort térmico, solo con diseño y elementos arquitectónicos sin utilizar sistemas mecánicos complejos.

Hemos comenzado una lucha contra la contaminación industrial, que al menos en los países desarrollados, se está empezando a ganar. Realmente, las industrias están haciendo un gran esfuerzo, para ser más respetuosas con el medio ambiente y generan menos emisiones contaminantes que hace 10-20 años y aunque los países en vías de desarrollo, también han empezado a tomar medidas al respecto, no son todavía suficientes. En cualquier caso, se empieza a tomar conciencia de que los beneficios de contaminar menos superan a los costos, sobre todo en estos países en desarrollo, donde los márgenes comerciales de las empresas no están tan apretados como en los países desarrollados, debido a la carestía de la mano de obra.

Sería interesante, crear una conciencia social, en el sentido de que si las empresas deciden incluir como un insumo más, el coste ecológico de la producción, no les penalice el consumidor por el mayor valor económico del producto, sino al contrario que lo asuma como un bien ecológico y que decida su compra, frente a otros artículos más baratos, pero producidos con un coste medioambiental mayor.

CAPÍTULO 3

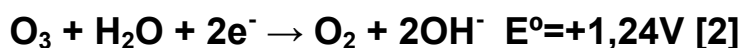
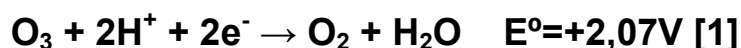
DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO ESTRATOSFÉRICA

1.- Propiedades y estructura del Ozono.

El ozono, fue descubierto hacia 1840 por Schombein,, pero no se detectó su presencia en la atmósfera, hasta el año 1921 por Fabry y Buisson.

Es un gas diamagnético de color azul, con puntos de fusión y ebullición superiores al oxígeno. Es muy poco soluble en agua, de fuerte olor, con momento dipolar y termodinámicamente inestable.

Es un oxidante muy potente, superior al oxígeno, según las reacciones:



Su poder oxidante, es mayor en medio ácido [1]^{XLII}, que en medio básico [2].

La estructura del ozono es resonante, con dos híbridos, de igual longitud de enlace (1,28 Å) y ángulo de enlace de 116°, con un orden de enlace de 1,5, tal como se muestra en la 37.

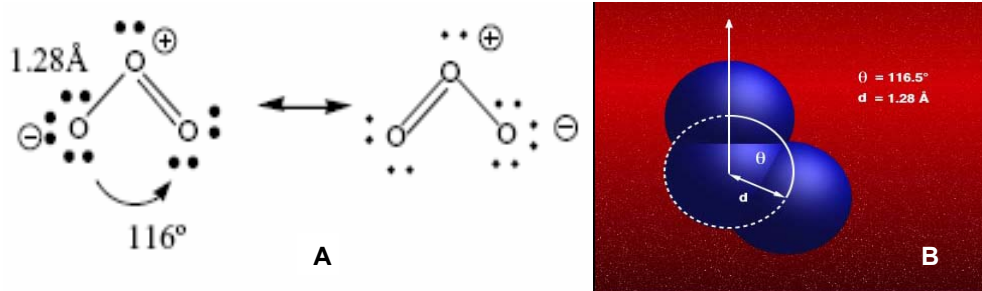


Figura 37.- Estructura del ozono. (A) Híbridos resonantes. (B) Modelo en 3D. Fuentes: A. Enlace en el ozono. Education in Chemistry, 46-50 (1996). B. Active Archive Center. NASA Goddard Space Flight Center.

^{XLII} El potencial redox de la reacción $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ es de +1,23V.

La formación de los enlaces, según la teoría de orbitales moleculares, para el ozono, se puede ver en la figura 38.

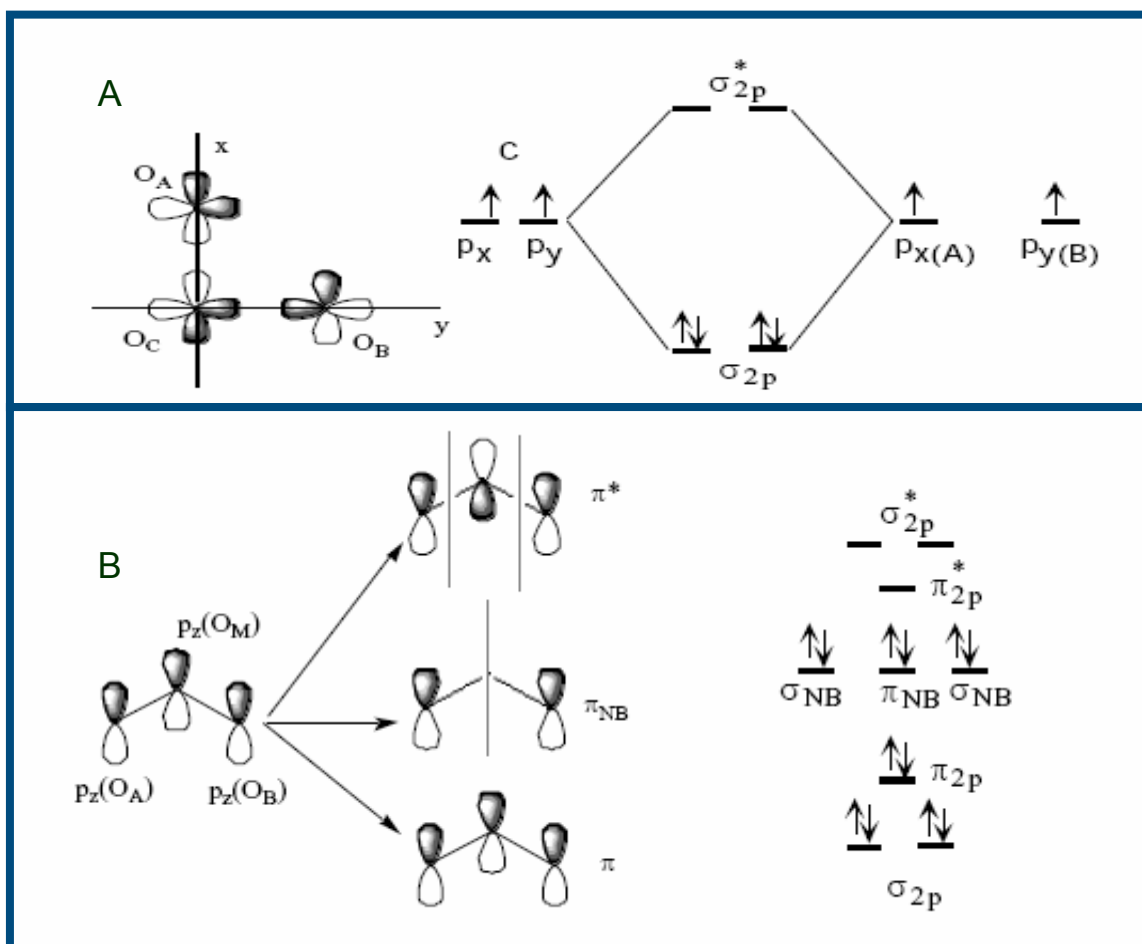


Figura 38.- (A). Formación de enlaces σ con $2e^-$ del O central C y $2e^-$ de los otros 2 átomos A y B, para dar una primera combinación $\sigma_{2p}^2 \sigma_{2p}^2$. (B). Formación de enlaces π con $2e^-$ del O central M y otros $2e^-$ de los 2 átomos A y B para una segunda combinación $\pi_{2pz}^2 \pi_n^2$. Los otros $4e^-$ sobrantes de A y B dan otros dos orbitales moleculares no enlazantes $\sigma_n^2 \sigma_n^2$, para completar la configuración $\sigma_{2p}^2 \sigma_{2p}^2 \pi_{2pz}^2 \sigma_n^2 \sigma_n^2 \pi_n^2$. Fuente: Enlace en el ozono. Education in Chemistry, 46-50 (1996).

El ozono se descompone espontáneamente para dar oxígeno, tal como se muestra en la figura 39.

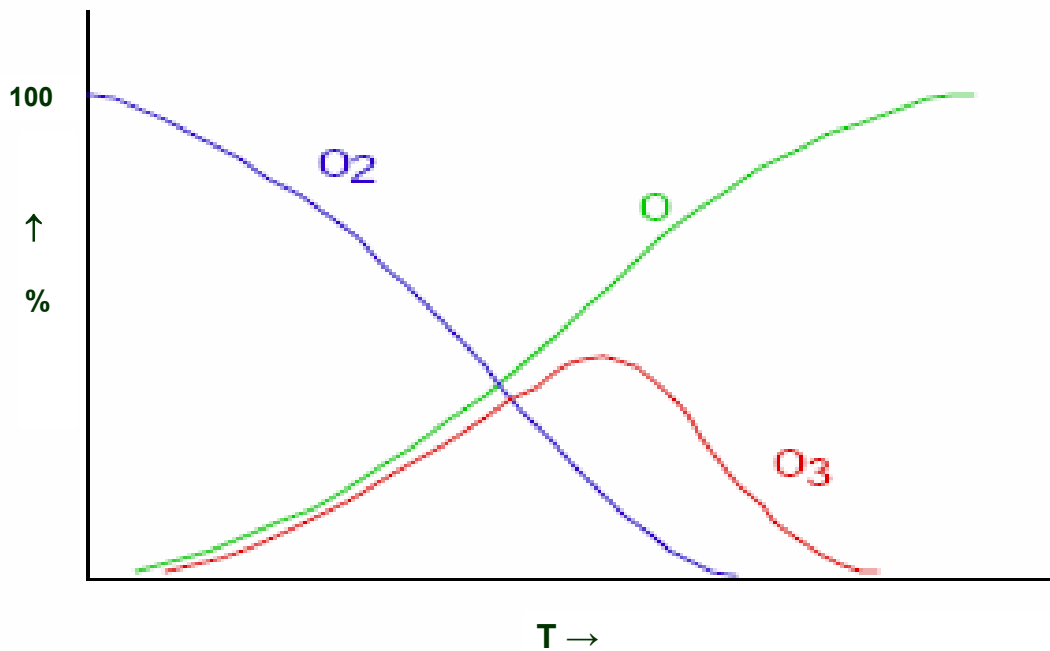


Figura 39.- Proporción en equilibrio de las tres formas de oxígeno en función de la temperatura: Ozono O_3 , dioxígeno O_2 y oxígeno atómico O . A bajas temperaturas la forma más estable es la molécula de dioxígeno O_2 , mientras que a altas temperaturas, lo es el oxígeno atómico. Fuente: Imagen habitual en los Tratados de Química.

2.- La capa de ozono estratosférica.

La atmósfera se divide en las capas que se muestran en la figura 40. La estratosfera es la capa superior a la troposfera, y se sitúa entre los 10 y 50 km de altura, separadas ambas por la tropopausa²⁶. En la estratosfera, se produce una gran inversión de temperatura. Además solo se producen movimientos horizontales del aire y la única presencia de nubes polares. A través de esta capa, solo pasan aviones estratosféricos como el ER2 de la NASA, que alcanza una altura de 23 km. Estos aviones son utilizados para medidas “in situ” de ozono.

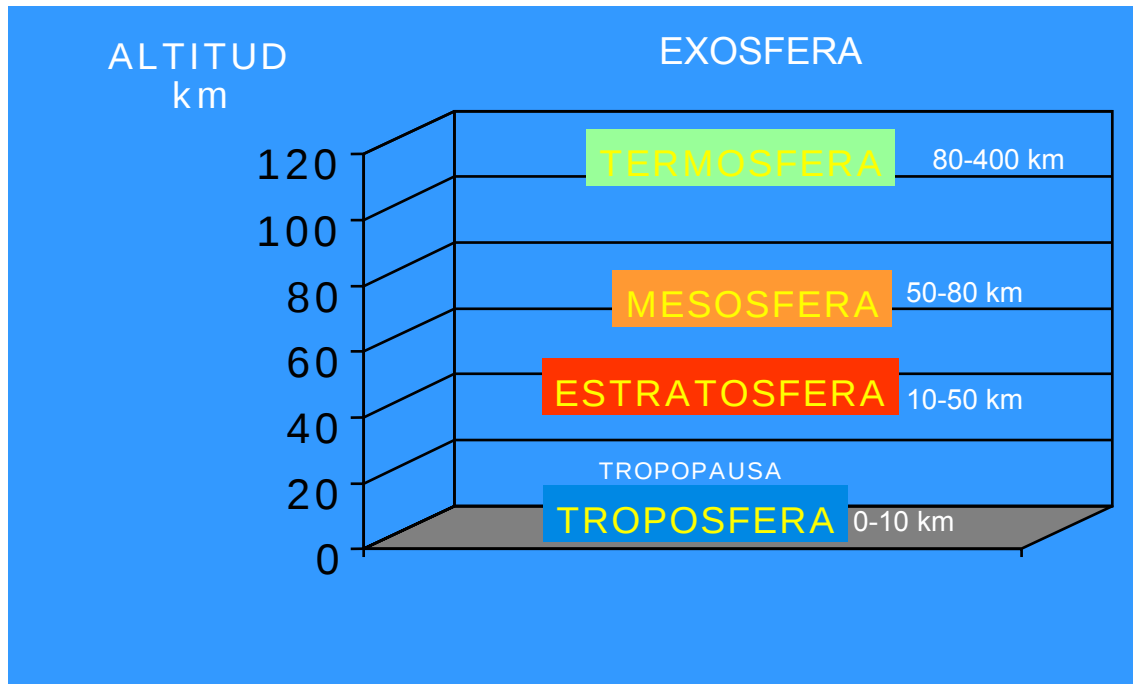


Figura 40.- Capas de la atmósfera. La tropopausa es la capa que separa a la troposfera de la estratosfera y hay que tenerla muy en cuenta para explicar la química atmosférica. La estratosfera es la capa situada aproximadamente entre 10 a 50 km de altura.

Las temperaturas en la estratosfera no oscilan demasiado, siendo la mínima en el Ecuador, con $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y las máximas en los polos ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). En el resto del Planeta, la temperatura media es de $-56,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El ozono presente en la estratosfera, forma una fina capa de espesor variable, cuyo aspecto lo vemos en la figura 41.



Figura 41.- Capa de ozono estratosférica, vista desde un avión ER2. El ozono es de color azul. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

Pero, ¿para qué sirve esta capa de ozono? La capa de ozono estratosférica, absorbe la radiación ultravioleta proveniente del Sol, el cual emite radiaciones en el espectro UV en tres frecuencias, denominadas UVA, UVB y UVC. El ozono, es capaz de absorber las dos últimas pero no la UVA. En cualquier caso, la acción del ozono es fundamental, ya que la UVB²⁷ es muy dañina para el ser humano y la UVC resulta letal para todas las formas de vida²⁸, no resultando tan peligrosa la UVA. Por tanto, la capa de ozono estratosférica, tiene un efecto filtrante y selectivo de la radiación UV del Sol que llega a la Tierra, tal como se observa en la figura 42.

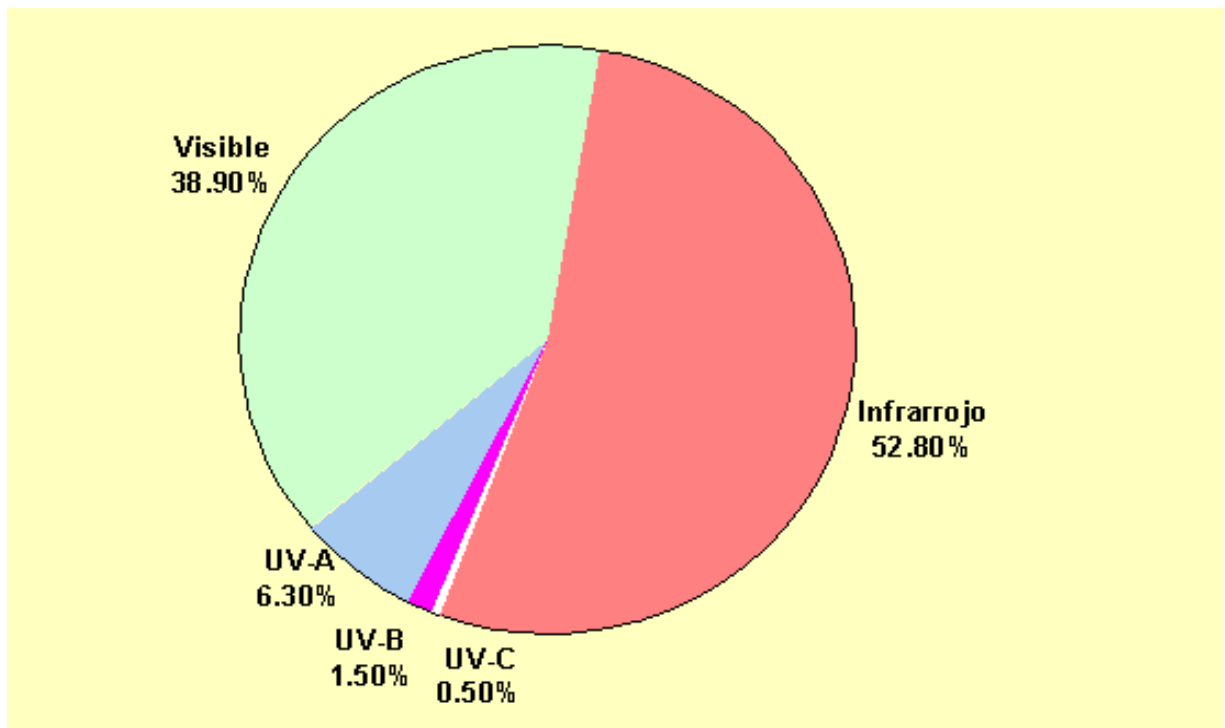


Figura 42.- Distribución del espectro solar. La radiación UVC es totalmente absorbida por el ozono, mientras que la UVB lo es parcialmente y no es absorbida la UVA.

El porqué de las diferencias en la absorción de las diferentes radiaciones UV, lo podemos apreciar en la figura 43, donde se muestra el espectro de absorción del ozono.

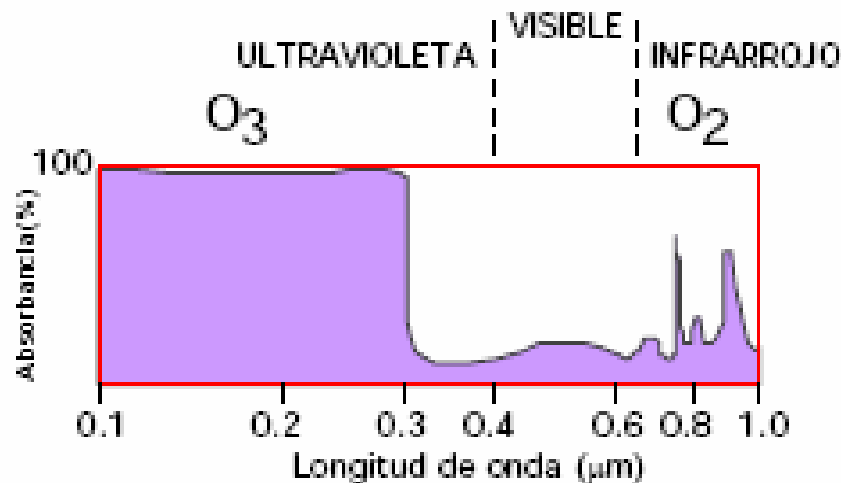


Figura 43.- Espectro de absorción del ozono. La radiación UVA de $\lambda=315-400$ nm, queda fuera de su espectro de absorción, mientras que las UVB de 280-315 nm y la UVC de 180-200 nm, están dentro de su espectro. Imagen obtenida de Internet con el programa Copernic 2001 Pro. Fuente: desconocida.

Los efectos de la potencial destrucción de la capa de ozono estratosférica, produciría por tanto, una mayor incidencia de la luz UV²⁹ perjudicial para el hombre, con las consecuencias de la formación frecuente de eritemas solares, envejecimiento prematuro de la piel, aumento del cáncer de piel,^{XLIII} daños en la visión, con formación de cataratas y querato conjuntivitis. Además, se producirían efectos negativos en otras formas de vida como en la vegetación y el plancton.

La concentración de ozono, y consecuentemente el espesor de su capa estratosférica, sufren variaciones debidas a los siguientes factores: altitud, estacionales, latitud, diarias y temperatura, que vamos a pasar a analizar a continuación:

^{XLIII} Debido a la UVB.

Factor altitud.- En la figura 44 se muestra un gráfico de la variación de la concentración de ozono con la altura. Los valores máximos se alcanzan entre los 20 y 25 km de altitud, dependiendo de las zonas geográficas.

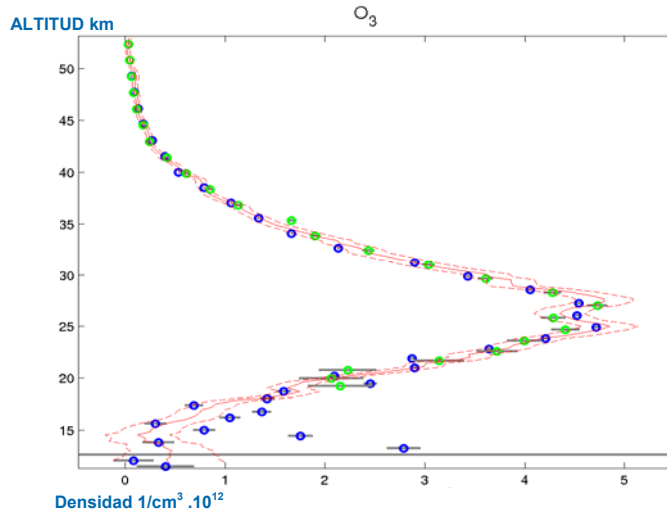


Figura 44.- Variaciones en la densidad de la capa de ozono con la altitud. Máximos entre 20-25 km. El valor medio del máximo es de 22-23 km. Fuente: <http://www.geo.fmi.fi/AERON/GOMOS-CALVAL/ozone.png>.

Factores estacionales.- La concentración de ozono, sufre variaciones con las estaciones del año, con mínimos en el hemisferio sur,³⁰ sobre todo a finales de septiembre y en octubre (figura 45).

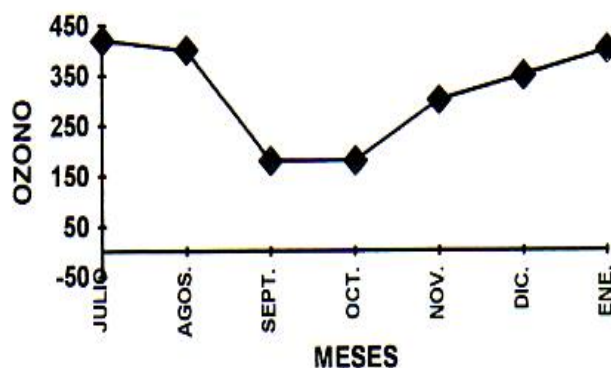


Figura 45.- Variación de la capa de ozono estratosférica por meses en el hemisferio sur. Fuente: Natural Environment Research Council British Antarctic Survey.

Factor latitud.- La capa de ozono estratosférica es más gruesa en el Ecuador y menor en los Polos, tal como se muestra en la figura 46.

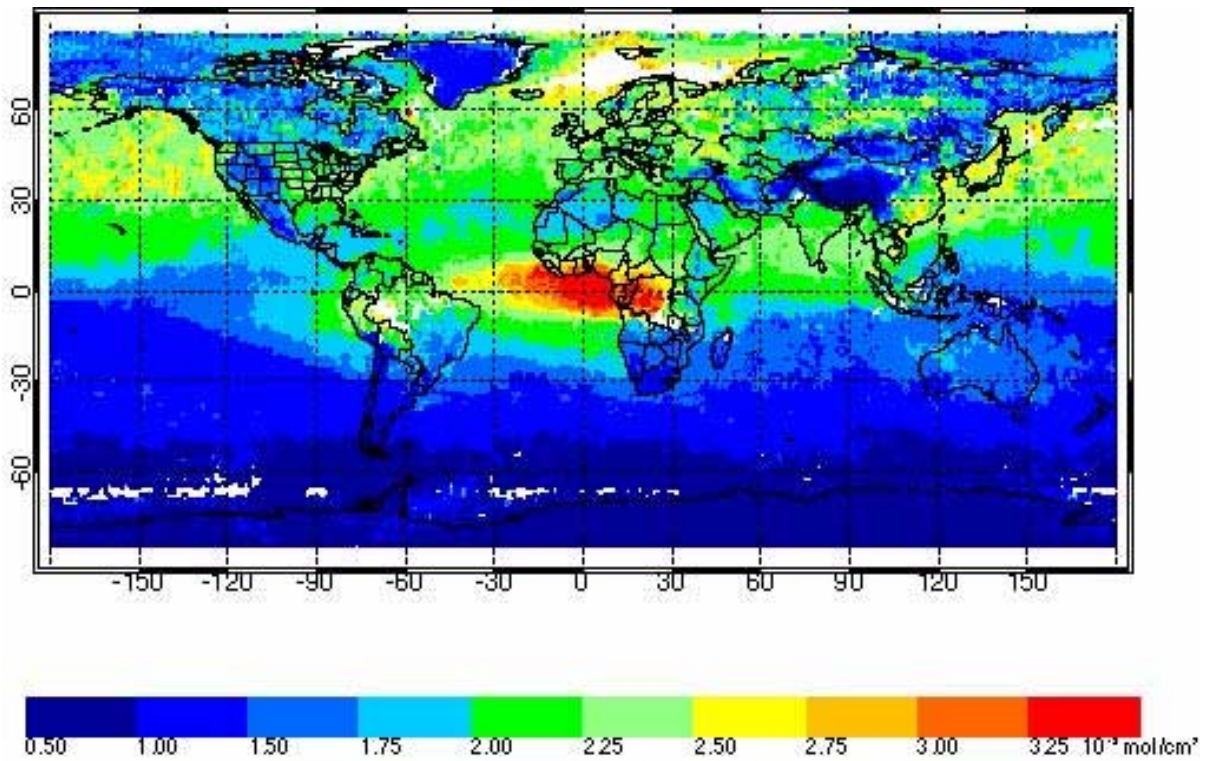


Figura 46.- Variación de la capa de ozono estratosférica con la latitud. Las zonas en color rojo indican la mayor concentración, mientras que las azules la menor. Es máxima en el Ecuador y mínima en los Polos, debido a los vientos transportadores. Fuente: NASA.

Variaciones diarias.- También la concentración de ozono estratosférica está sometida a variaciones día a día en la misma zona geográfica. Pueden oscilar de un día a otro en un factor del 30%.

Variaciones con la temperatura.- En general, la concentración de ozono aumenta al disminuir la temperatura. Debido a esto, un incremento del efecto invernadero, que a un nivel estratosférico^{XLIV} haría bajar la temperatura, sería beneficioso para recuperar la capa de ozono.

^{XLIV} El efecto invernadero hace subir la temperatura a nivel troposférico, pero enfría a nivel estratosférico, ya que bloquea la radiación infrarroja saliente.

2.1.- El llamado “ciclo natural” del ozono.

Descubierto por Chapman en el año 1930³¹, es un ciclo de formación y destrucción del ozono en la estratosfera, de una manera natural, producido por las radiaciones solares en el espectro UV³² (figura 47).

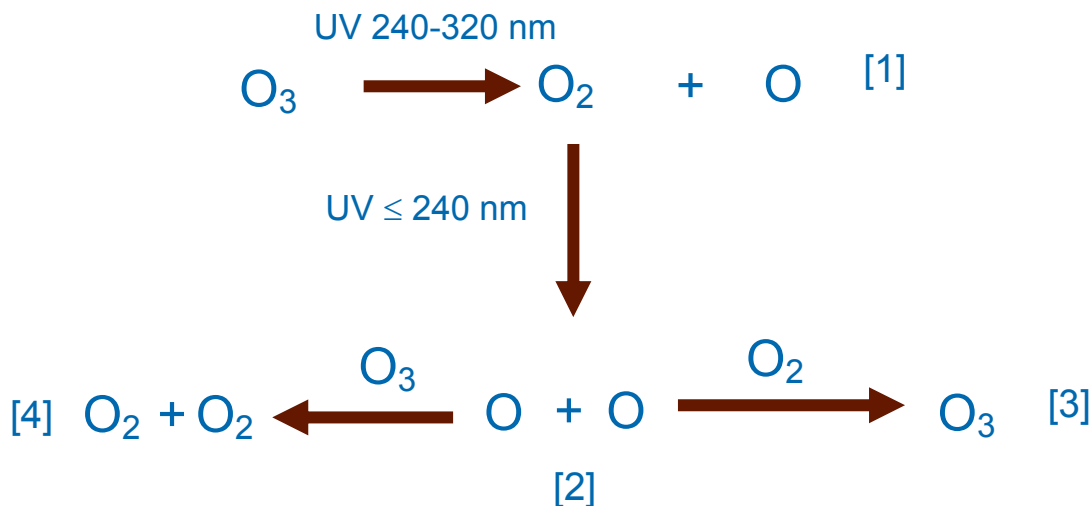


Figura 47.- Ciclo de formación y destrucción del ozono. La reacción [1] es de destrucción del ozono, la [2] de descomposición del O₂, la [3] de formación de ozono y la [4] de destrucción del ozono por choque con un átomo de O, y si bien aunque esta última es muy lenta, es catalizada por contaminantes atmosféricos como los NO_x, el ClO o el Cl. Las reacciones [1] y [2] son iniciadas por la luz UV.

La destrucción de ozono es dependiente de la temperatura, según la ecuación:

$$\frac{dc}{dt} = -k_1 - k_2 c^2$$

Donde c es la concentración de O₃ en moles/L y k_1 y k_2 , son constantes que dependen de la T , incrementándose entre 80 y 100 °C. A 95 °C, los valores son respectivamente, de: $k_1 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$; $k_2 = 4.1 \text{ L mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$ k_2 es independiente de la

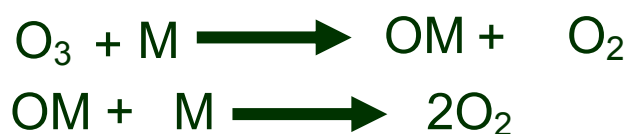
presión parcial de O_2 , pero aumenta con la presencia de N_2 y sobre todo con la de CO_2 . k_1 es independiente de la Presión parcial de cualquier gas atmosférico^{XLV}.

Además, la concentración de ozono, depende de variaciones estacionales, según la ecuación:

$$n_3^1 = (n_3^1)_0 + (n_3^1)_1 \cos \tau$$

Donde $(n_3^1)_1$ es positivo; correspondiendo a n_3^1 un máximo en el equinoccio de primavera. La variación anual pronosticada de n_3 (n° de átomos de O por mL en el aire, para el O_3 $n=3$) es de cero en el ecuador, con máximos en el hemisferio norte en primavera y mínimos en otoño y con fluctuaciones diarias muy pequeñas. De acuerdo con esta teoría, en el círculo ártico durante el período de oscuridad; el ozono debe ser constante a su vez, y el aumento de otoño a primavera debe ocurrir durante los períodos previos y siguientes a los de oscuridad^{XLVI}.

La destrucción de la molécula de O_3 , también se puede realizar, por el choque con un tercer cuerpo, según las reacciones:



2.2.- Destrucción de la capa de ozono estratosférica.

La preocupación por la capa de ozono estratosférica no es nueva. Su estudio, fue iniciado por Dobson en el año 1924³³, con la construcción de un aparato de medida, denominado espectrofotómetro Dobson, en su honor (figura 48) Las primeras observaciones, se realizaron por este investigador en Oxford, donde era profesor,

^{XLV} Discusión de S. Chapman, en A Theory of Upper-Atmospheric Ozone, Memoirs of the Royal Meteorological Society, 3, 103-125, 1930.

^{XLVI} Referencia anterior. En realidad en el hemisferio norte los valores mínimos son en primavera (marzo-abril), y en el sur también (septiembre-octubre). Es cierto, que en la oscuridad permanece constante la concentración de ozono, ya que no hay fotólisis.

obteniendo valores diarios muy oscilantes, que le hacían recalibrar continuamente su equipo^{XLVII}. Actualmente hay alrededor de un centenar de estaciones Dobson de medida de ozono. Sin embargo, el despegue definitivo de la investigación de la capa de ozono estratosférica, tuvo lugar con la celebración del Año Geofísico Internacional en el año 1957 y la firma del Tratado Antártico de 1959, que iniciaron la investigación de la capa de ozono en la estratosfera de la Antártida.

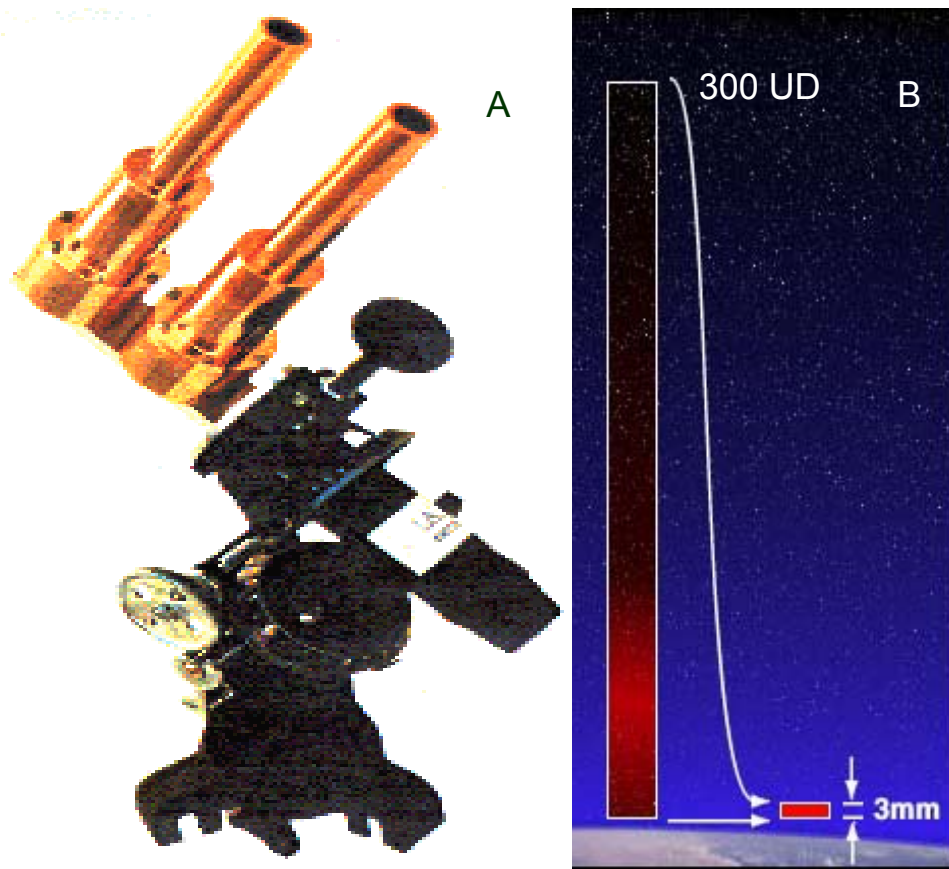


Figura 48.- (A). Espectrofotómetro Dobson. (B). Unidades Dobson. 1 UD=0,01 mm de espesor a T y P ambiente. 300 UD equivalen a 3 mm de espesor de la capa de ozono. La cantidad total de O₃ se deduce comparando las mediciones de la reducción de la intensidad de la radiación solar de pares de longitudes de onda entre 340 y 220 nm. Fuentes: A. NASA. <http://www.nasa.gov>. B. <http://ds9.ssl.berkeley.edu>.

^{XLVII} Como hemos visto anteriormente sabemos hoy en día, que la oscilación diaria en las concentraciones de ozono es un factor normal.

Para medir la concentración de ozono en una determinada zona del planeta, se utilizan las unidades Dobson. Una unidad Dobson (UD), equivale a 0,01 mm de espesor de la capa. La concentración media de ozono se puede cifrar en 300 UD, lo que equivale a 3 mm de espesor, es decir a una finísima capa de ozono, tal como indicamos antes (figura 48).

2.3.- Medidas de la capa de ozono.

Las mediciones de la capa de ozono estratosférica, resultan difíciles, ya que se necesitan días de cielo despejado y determinaciones “in situ” atravesando la capa.

Existen varias técnicas para medir la concentración de ozono; las cuales vamos a desarrollar a continuación.

2.3.1.- Las Bases Antárticas.

Son medidas directas de la concentración de ozono sobre la vertical de una determinada zona del continente antártico. Las bases desplegadas por las distintas naciones en la Antártida³⁴, se muestran en la figura 49. Estas bases pueden ser de carácter permanente o ser utilizadas para determinadas campañas. España, posee tres bases antárticas, pero no están destinadas a la recogida de datos sobre el ozono.

Argentina y Chile, poseen también bases situadas en su territorio, para medir directamente la capa de ozono.

Estas medidas directas, utilizando el modelo antártico, proporcionan una gran cantidad de datos sobre la destrucción de la capa de ozono, y aunque no pueden ser utilizados a nivel planetario en su totalidad, si que nos han dado gran información sobre el comportamiento de las reacciones químicas estratosféricas de destrucción del ozono, siendo de especial interés las suministradas por las bases de Halley Bay, Admunsen-Scott, Mc Murdo, y Syowa, a las que últimamente se ha sumado la base argentina de Belgrano.

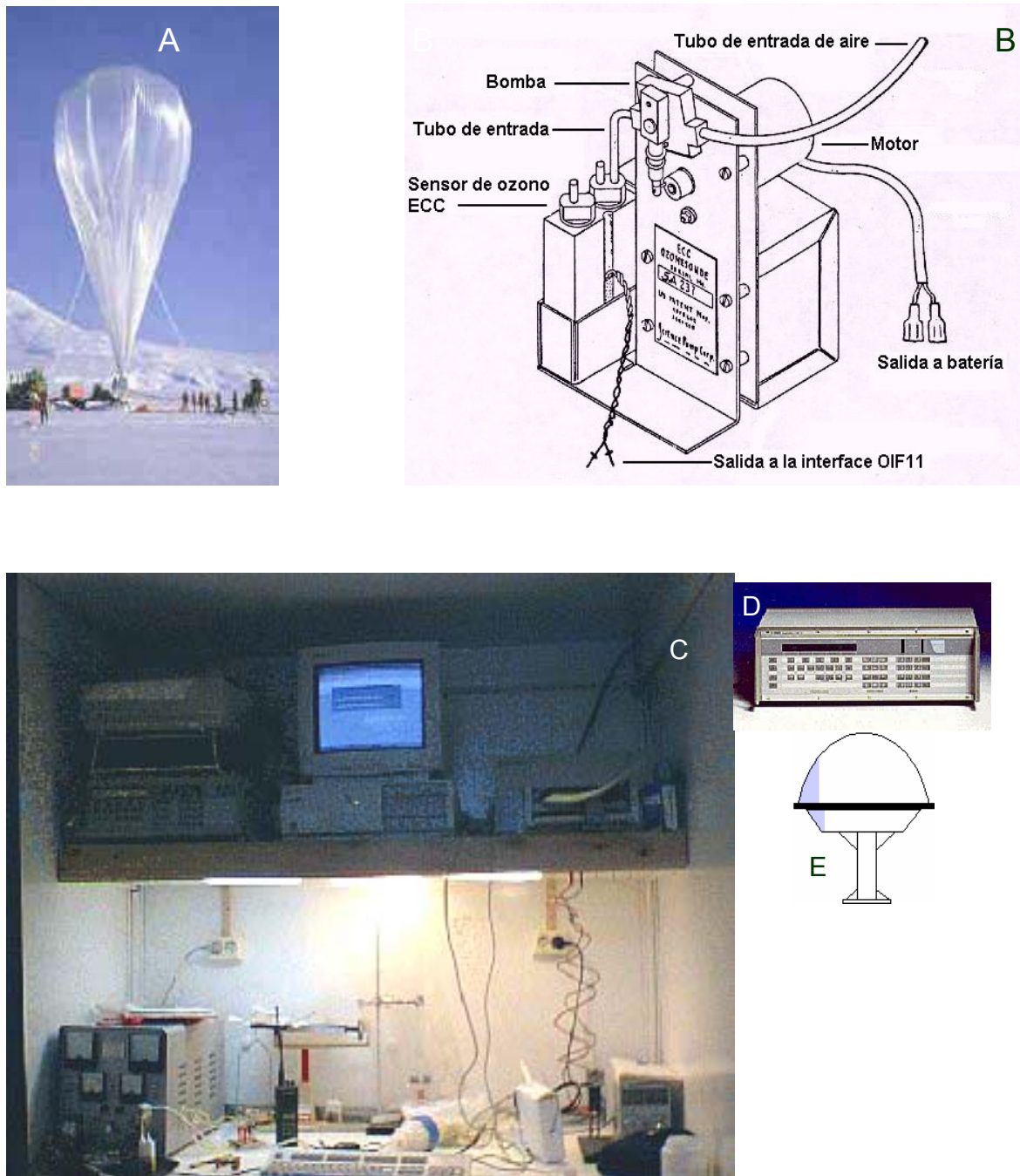


Figura 50.- (A) Globo sonda antes de ser lanzado. (B), esquema de una ozonosonda. Esta va acoplada a otro equipo que contiene la batería que suministra energía y la antena UHF emisora. (C), estación en tierra. (D), receptor en tierra y (E), antena receptora en tierra. Fuentes: (A), http://www.iespana.es/natureduca/ant_eco_ozonoestudiosos.htm. (B a E), Instituto Nacional de Meteorología de España. Base de Belgrano (Argentina). <http://www.inm.es>.

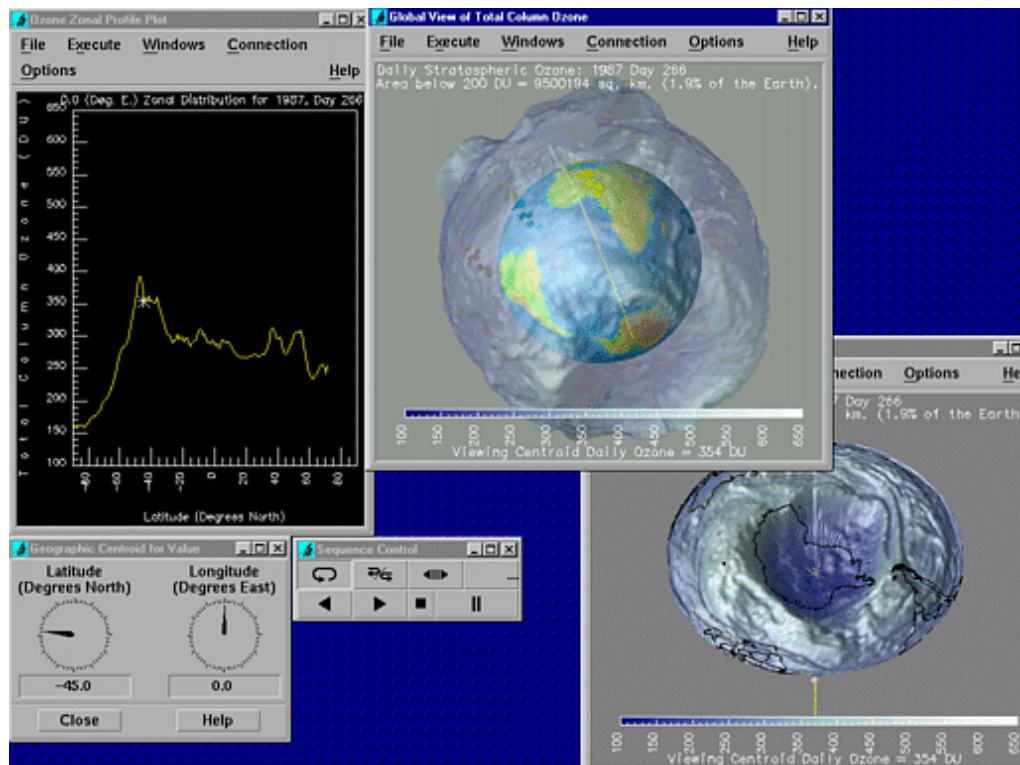


Figura 51.- Versión para Microsoft Windows de uno de los algoritmos matemáticos por software, que se utilizan para visualizar los gráficos de la capa de ozono. Fuente: Base de Belgrano (Argentina).

2.3.2.- Los aviones supersónicos.

También realizan medidas directas, atravesando la capa de ozono estratosférica. Para ello, se utilizan aviones ER2 de la NASA (figura 52), generalmente equipados con espectrofotómetros Dobson, y que pueden ascender hasta los 23 km de altitud, donde está la máxima concentración de ozono estratosférico. La utilización de estos aviones en una expedición que partió de Punta Arenas (Chile), dio como resultado uno de los más importantes resultados analíticos, para establecer la relación del cloro con la destrucción del ozono³⁶. Efectivamente, en esa expedición se logró determinar que la concentración de ClO asciende al triple, cuando se produce un descenso del 50 % de la capa de ozono, lo que tiene una gran relación con la química antártica del ciclo catalítico del Cl, como después veremos.

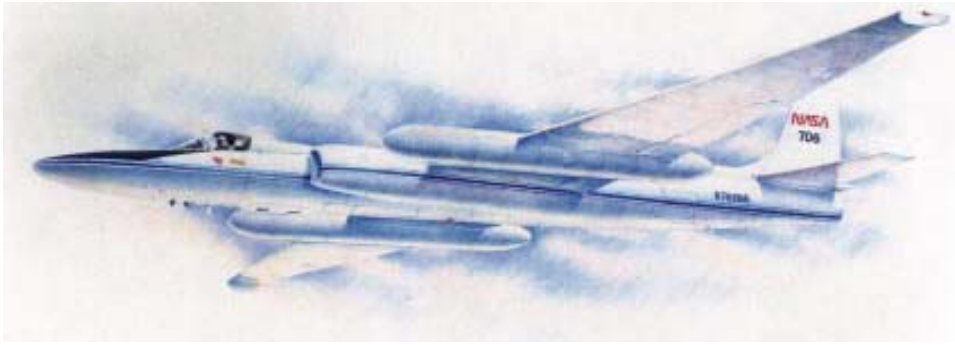


Figura 52.- Avión supersónico ER2 de la NASA, utilizado en expediciones antárticas.

Fuente: NASA.

2.3.3.- Satélites espaciales.

La utilización de satélites espaciales, y en especial las misiones de la NASA, para analizar el ozono estratosférico, dan una nueva perspectiva a la investigación del ozono al obtener mapas de ozono a nivel global. El primer satélite en aportar datos fiables del adelgazamiento de la capa de ozono antártica fue el NIMBUS 7, siendo el que más tiempo ha estado operativo y por tanto aportó más datos en esta investigación. Otros satélites empleados han sido el METEOR 3 5, el ADEOS y el EARTH-PROBE, tal como vemos en la figura 53.

El gran avance de estos satélites, es la incorporación de una nueva tecnología, la SBUV (solar backscatter ultraviolet)-TOMS (total ozone mapping system), que se muestra en la figura 54, la cual permite el análisis del ozono total.

En la sección de Material complementario, se ofrece una información más amplia del sistema SBUV/TOMS y de los satélites espaciales equipados con esta instrumentación.

Actualmente, la NASA, prepara otra misión espacial, denominada TRIANA, que aportará nuevos avances con respecto a las anteriores. La instrumentación de la que se equipará el satélite, permitirá por primera vez el análisis de datos a 10 longitudes de onda diferentes, con lo que se pueden obtener informaciones más completas, tal como se muestra en la Tabla XIII.

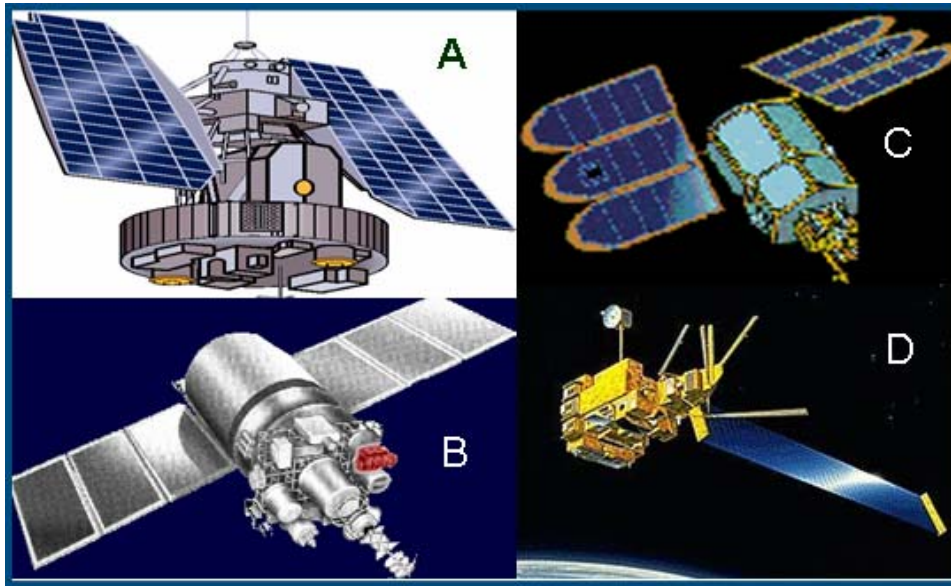


Figura 53.- (A) Satélite Nimbus 7 de la NASA. Operativo entre 1978-1993. Altura orbital: 955 km. Datos técnicos: 965 kg de peso, 3 m de altura, y 1,52 de diámetro. (B) Meteor 3 5, proyecto conjunto USA-antigua CEI. Operativo entre 1991-1994. (C) Earth-Probe (NASA). Operativo desde 1996, era complementario del (D) ADEOS I, en órbita desde 1996, pertenece a Japón y dejó de funcionar en junio de 1997. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

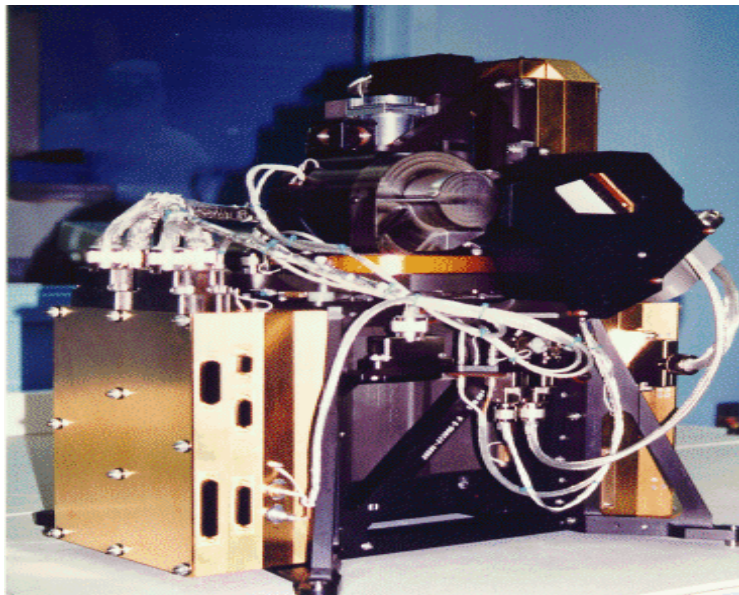


Figura 54.- Equipamiento instrumental del Nimbus 7, consistente en un espectrofotómetro SBUV-TOMS, que permitió un gran avance en la recogida y análisis de datos del ozono total. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

Tabla XIII.- Relación de longitudes de onda y objetivos de medida perseguidos, en la equitación del satélite de la misión TRIANA de la NASA. Fuente: NASA. <http://toms.gsfc.nasa.gov/future/triana.html>.

Canal	λ nm	Objetivo
1	317.5	Ozono Total.
2	325	Ozono Total y SO ₂
3	340	Ozono Total y aerosoles UV.
4	388	Aerosoles UV altura nubosidad.
5	393.5	Altura nubosidad.
6	443	Indice de vegetación y albedo RGB azul.
7	551	Vegetación y mapas de albedo RGB verde.
8	605	Perfiles de las bandas Chapuis de Ozono y perfiles SZA.
9	645	Vegetación RGB rojo, albedo, y fase de la nube.
10	869.5	Fase de la nube y vegetación.

De esta forma, se podrán obtener imágenes diarias de: ozono, aerosoles, vapor de agua, altura y espesor de las nubes e información de la vegetación, desde la salida del sol al ocaso y para todos los rincones del planeta, con una resolución espacial, hasta ahora no conseguida de 8 km.

2.3.4.- Los satélites NOAA TOVS.

La NOAA³⁷ (National Oceanographic and Atmospheric Administration) cuenta con una serie de satélites polares denominados Advanced Tiros-N (ATN) desde octubre de 1978, equipados con el TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder), compuesto por tres instrumentos: HIRS (High Resolution Infrared Radiation Sounder), MSU (Microwave Sounding Unit) y el SSU (Stratospheric Sounding Unit)^{XLVIII}, que

^{XLVIII} Estos dos últimos sensores han sido sustituidos en los nuevos satélites por los instrumentos AMSU-A y AMSU-B.

fueron diseñados primordialmente para aplicaciones meteorológicas, pero que se ha mostrado muy valioso en una serie de aplicaciones de observación de la Tierra relacionadas con el medio ambiente, y entre ellas las de la capa de ozono, para lo cual se utiliza el equipo HIRS, aplicando un algoritmo para estimar la columna total de ozono.

El nuevo software, elimina los bajos valores causados por la contaminación de los cirros (nubes blancas). Un satélite NOAA y un ejemplo de la utilización de esta instrumentación para crear gráficos de la concentración de ozono, se muestra en la figura 55.

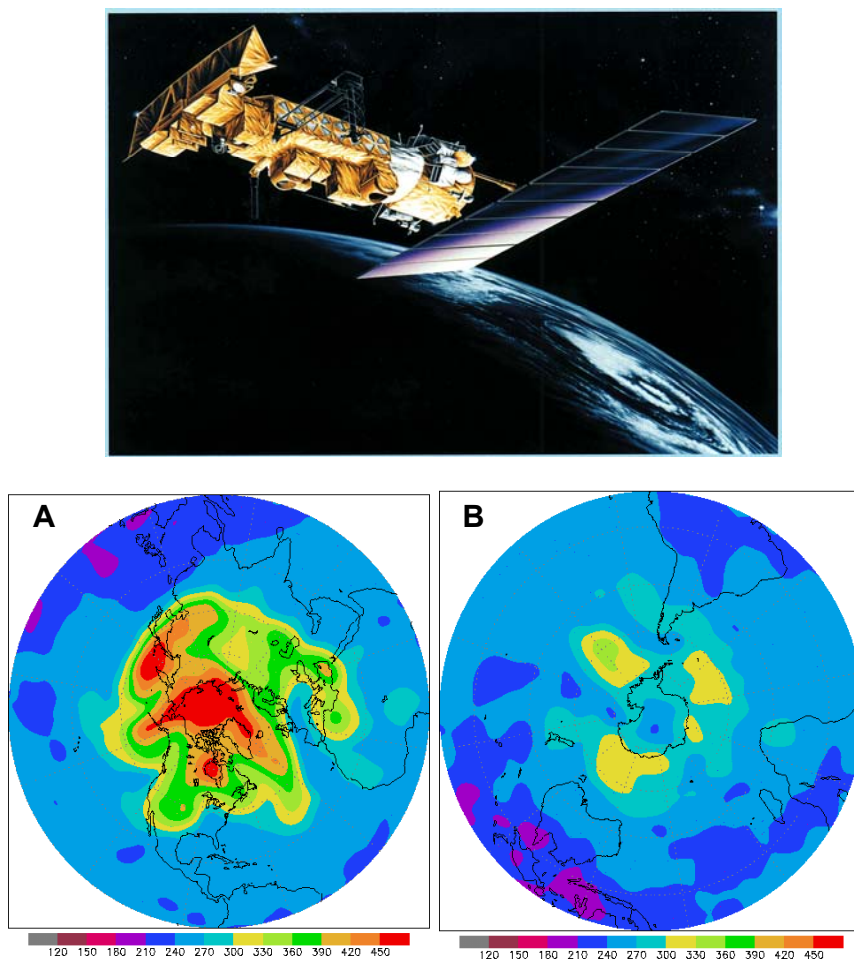


Figura 55.- Parte superior: Satélite polar NOAA. Parte inferior: Gráficos obtenidos por algoritmos con la instrumentación TOVS de la concentración de ozono (UD) el 2 de mayo de 2004 en (A) Hemisferio Norte y (B) Hemisferio Sur. Fuente: NOAA.

3.- El llamado “agujero de ozono” antártico.

Realmente, el llamado agujero de ozono no existe, al menos de momento, ya que lo que recibe periódicamente este nombre, es en realidad un adelgazamiento de la capa de ozono de ~3 mm hasta 1 mm o incluso menos en la primavera antártica. Sin embargo, este término se utiliza actualmente, para referirse a la extensión que abarca la disminución de ozono. Por ejemplo, en septiembre de 1998, el agujero antártico, midió 27,3 millones de km². Este agujero ha crecido en los últimos años y puede seguir haciéndolo, según informes de la NASA.

3.1.-Las medidas antárticas del agujero de ozono.

Las primeras medidas tomadas de la concentración de ozono en la Antártida, resultaron desconcertantes, ya que eran muy oscilantes, siendo muy bajas en septiembre y altas en noviembre, lo que se atribuyó a un mal funcionamiento de los aparatos de medida. En 1984, la estación de Syowa, acepta los valores medidos, pero sus conclusiones tienen poca o nula difusión. Sin embargo, al año siguiente, en 1985, los valores medidos por la estación de Halley Bay, son publicados en la revista Nature, y se empieza a hablar del agujero de ozono. En trabajos posteriores, se consideran pérdidas normales en octubre de un 40-50%, con un pico en 1987 del 60% (máximo de la década). Por su parte, el Nimbus 7 observa grandes concentraciones de HNO₃, NO_x y HCl en las nubes antárticas. Los trabajos de la estación antártica de Halley Bay, marcaron un después en la investigación del ozono para el Nimbus 7, ya que desde su lanzamiento en el año 1978, no detectó variaciones significativas en las concentraciones de ozono, porque el ordenador rechazaba los valores altos y los muy bajos. A partir del año 1984, debido a las observaciones de la estación de Halley Bay, se recalculan los datos,^{38,39} observando ya el “agujero de ozono”, tal como se muestra en la figura 56.

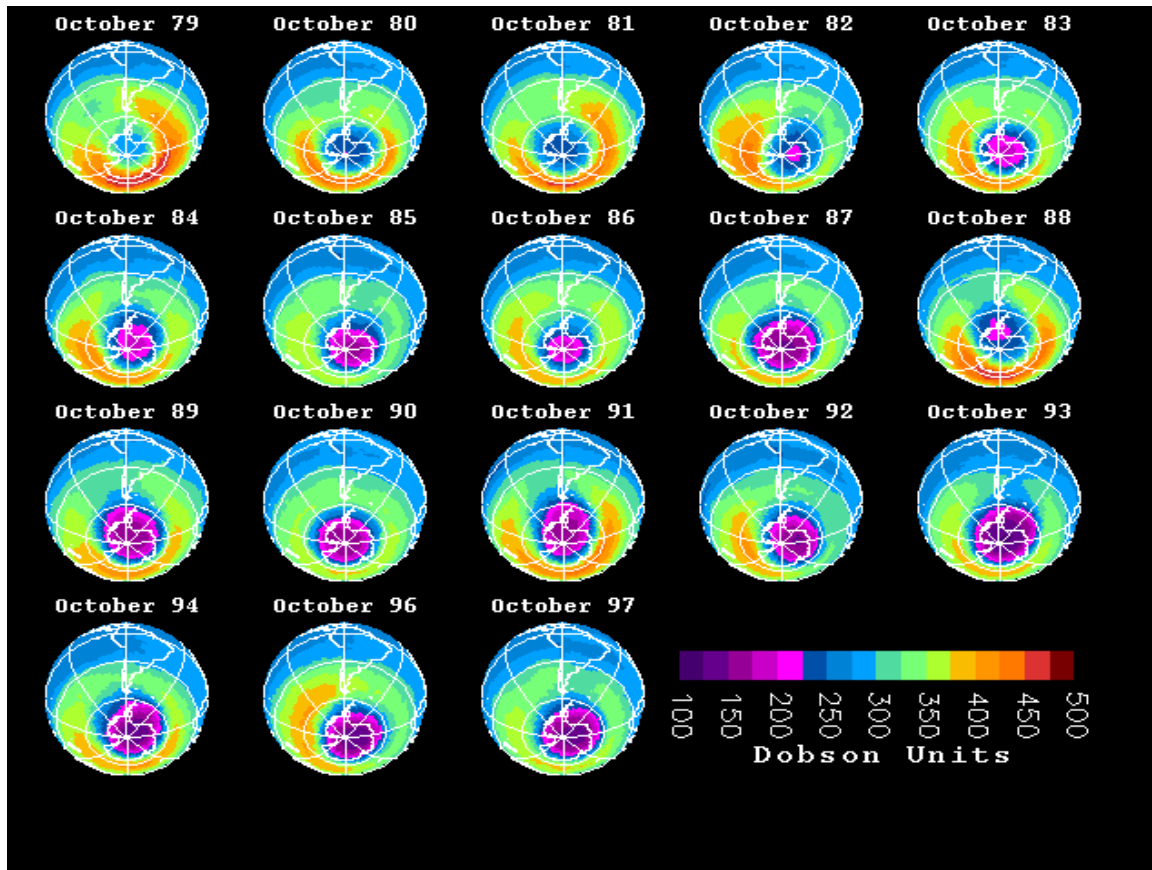


Figura 56.- Medidas TOMS del satélite Nimbus 7 en el mes de Octubre (mes donde se producen los valores mínimos), desde 1979 a 1992 para el hemisferio sur. Los datos a partir del año 1993 son del Meteor3 y Earth Probe. Los valores en violeta son los más bajos y los azules y verdes los más altos. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

Además, en la figura 57, podemos observar un gráfico, con los mínimos históricos⁴⁰ de las concentraciones de ozono antárticas, junto con medidas actuales de octubre de 2003. Las medidas TOMS del gráfico 57A, muestran un mínimo en 1995, para recuperarse en los años posteriores hasta el 2000, donde marca un mínimo histórico. Los años siguientes 2001 y 2002, señalaron otra recuperación, que ha sido frustrada el año pasado, con otro mínimo histórico. Estas fluctuaciones, son desconcertantes, pero esta variabilidad es debida a las muy cambiantes condiciones meteorológicas de la estratosfera antártica, donde la “gota fría” puede variar de -80 a -100 °C, y que producir una división en dos del agujero de ozono, como en el 2002⁴¹.

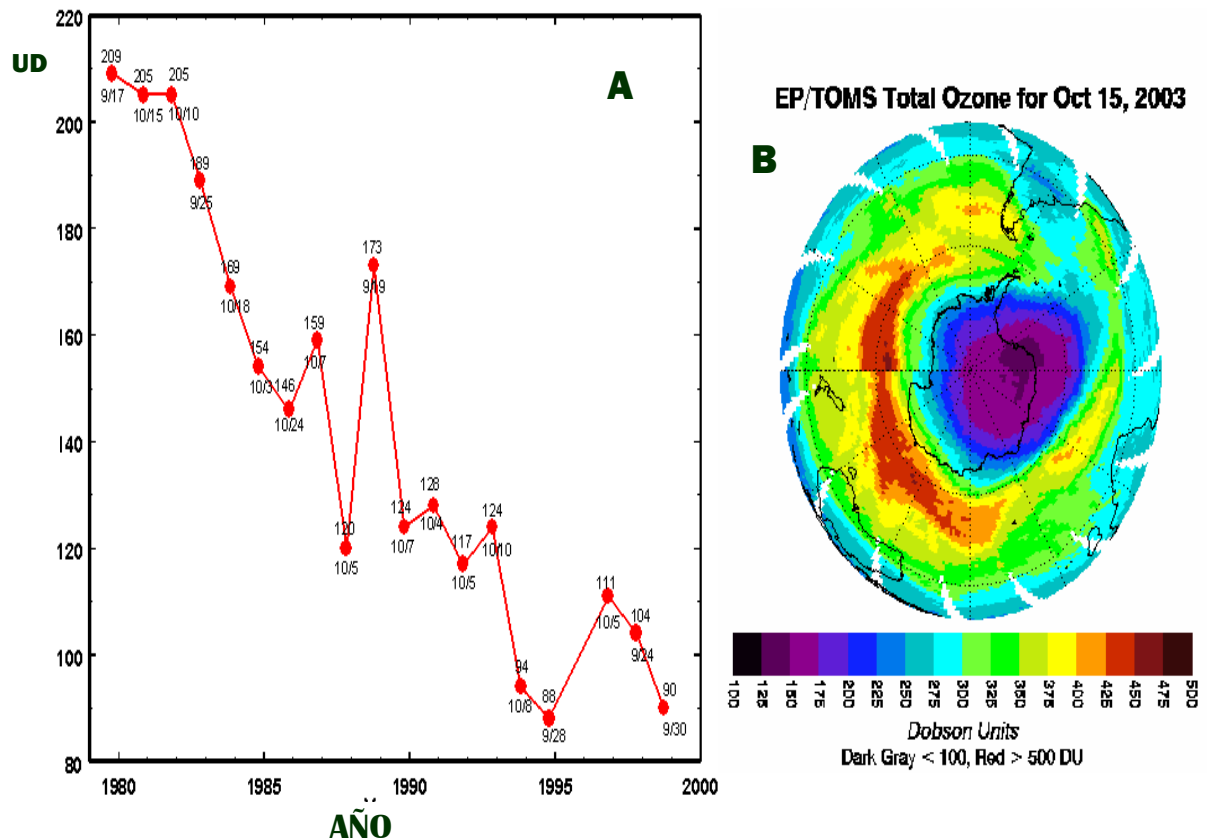


Figura 57.- (A). Mínimos históricos de ozono en la Antártida, desde 1979 a 2000. Datos: Nimbus 7 1979-1992. Meteor3 1993-1994. Earth-Probe 1996-1998. En 1995 no hubo satélites TOMS en órbita y el dato del gráfico no es fiable. (B). Mapa TOMS del satélite Earth-Probe el 15 de octubre del 2003. Marca un mínimo histórico. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

La situación del año 2003 como hemos dicho es mala, pero los datos de la NASA, que mostramos en la figura 58, comparativamente con el año anterior y con los datos medios desde el año 1979, son confirmados con las mediciones directas en la estratosfera antártica por la estación de Halley Bay, tal como se muestra en la figura 59. Por ello, tenemos que seguir preocupados por la destrucción de la capa de ozono.

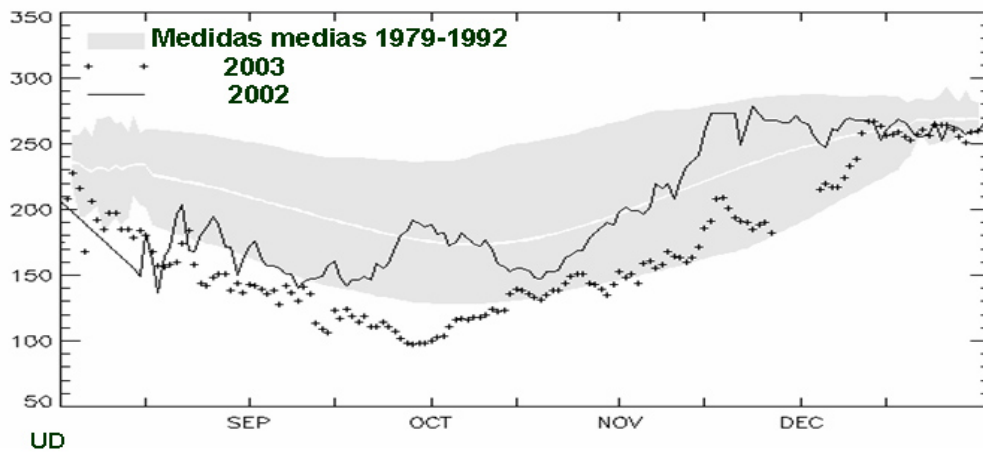


Figura 58.- Medidas del agujero de ozono comparativas desde 1979-1992, 2002 y 2003. Los valores más bajos se corresponden con el año 2003, llegando en octubre a valores inferiores a 100 UD. Como apreciamos en el gráfico, los valores mínimos son en septiembre-octubre (primavera hemisferio sur), para recuperarse en noviembre-diciembre (verano). Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

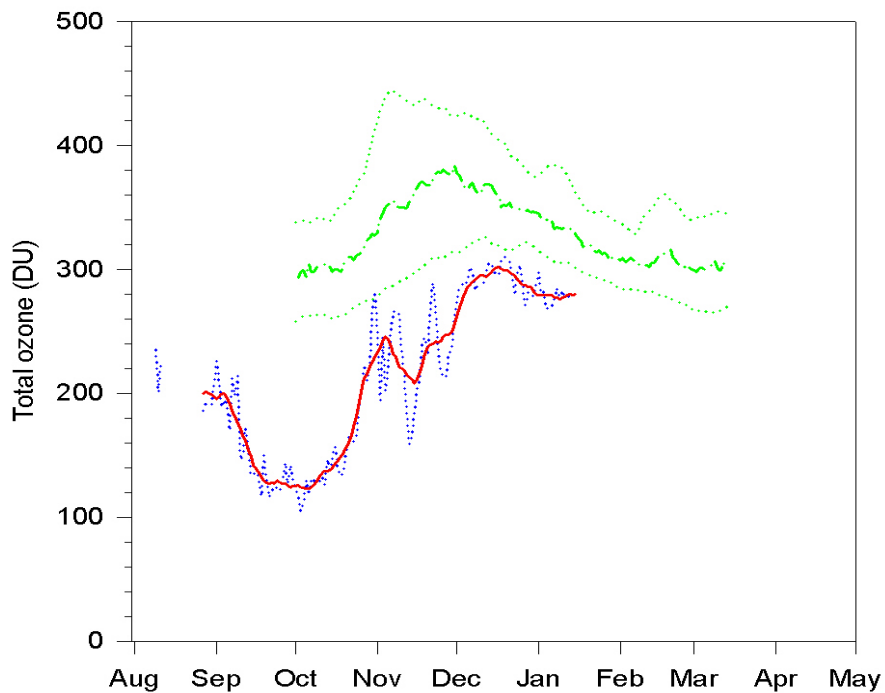


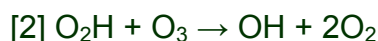
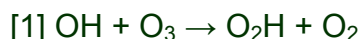
Figura 59.- Medidas de ozono recogidos por la estación de Halley Bay en la Antártida. La línea azul corresponde al año 2003 y hasta febrero del 2004 (en rojo, los valores medios). En verde los valores para 1972 y 1957 (línea punteada). Fuente: British Antarctic Survey Ozone. Halley Bay, Rothera & Vernadsky/Faraday. <http://www.antartica.ac.uk>.

3.2.- La responsabilidad del agujero de ozono. Teoría de Molina..

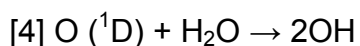
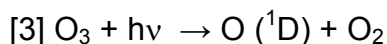
Hemos determinado, a la vista de las medidas anteriores, que se produce una disminución de la capa de ozono en la Antártida, que ocurre en la primavera antártica, con mínimos en el mes de octubre, para luego recuperarse en el verano. La pregunta obvia es ¿esto es un proceso natural o hay otros responsables, producidos por el hombre? Pues bien, el ciclo natural de formación y destrucción del ozono, que estudiamos anteriormente, no puede ser el causante de este proceso, ya que establece un equilibrio dinámico donde la concentración de ozono permanece constante. Por tanto, los investigadores buscaron otro camino en el laboratorio, lo que llevó históricamente a tres teorías de otros tres tipos de contaminantes, que podrían ser los responsables del llamado agujero de ozono: los óxidos de nitrógeno, el ciclo del OH y el grupo de los freones y halones.

Ciclo del OH

En la década de 1960, incluso antes, se estudian las reacciones de destrucción del ozono, por parte de radicales OH, que serían^{42,43}:

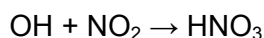


La fuente primaria propuesta para los radicales de OH es la fotólisis del O_3 por la radiación ultravioleta solar de longitudes de onda menores de 320 nm, produciendo primariamente átomos de O (^1D) electrónicamente excitados, según las reacciones:



Sin embargo, el O (^1D), reacciona con el N_2 o el O_2 del aire, y regenera la molécula de O_3 , con lo que el ciclo es nulo. Además, las constantes de las reacciones [1] y [2], no podían explicar la distribución vertical de ozono en la estratosfera, aunque sí en la troposfera⁴⁴.

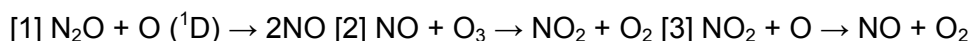
No obstante, el OH radical, puede catalizar la destrucción del ozono, a través de reacciones, que involucran a productos precursores, como el HNO₃:



Posteriormente, el HNO₃, puede ser descompuesto por la luz en: NO₂ y OH.

Óxidos de nitrógeno.

En las décadas de 1960 y 1970, se empieza a estudiar la relación de los NO_x con la destrucción del ozono. Las reacciones, que se deberían producir para destruir la molécula de O₃, serían entonces⁴⁵:



Estas reacciones, se iniciarían con la producción de NO, a partir del óxido nitroso N₂O, que reacciona con un átomo de oxígeno excitado O (¹D), cuya presencia fue demostrada por Davis⁴⁶; posteriormente el NO reaccionaría con el ozono, para producir NO₂ y la molécula de oxígeno diatómica. A su vez, el NO₂ generado reacciona con el oxígeno atómico, para producir más NO, que inicia otra vez la destrucción del ozono. Esto significa un ciclo cerrado, de tal manera que la destrucción de ozono puede ser muy elevada.

Esta serie de reacciones, se pueden producir en alturas entre 25 y 45 km, es decir dentro de la capa de ozono estratosférica.

Las fuentes antropogénicas del N₂O, son debidas a la utilización de fertilizantes; pero las fuentes naturales también son importantes, por procesos de microorganismos en el ciclo del nitrógeno. A esto, había que sumar por entonces, una fuente estratosférica antropogénica de NO_x por la contaminación de los aviones supersónicos (Concorde, Tupolev 144 y Boeing 707).

En realidad, los dos ciclos que hemos estudiado, se complementan y se pueden reunir en el siguiente esquema de reacciones, que fue propuesto por

Crutzen^{XLIX} en 1970⁴⁷ como la probable importancia del NO y NO₂ en el control de la concentración de ozono estratosférica, y que no tenía en cuenta ni el efecto del Cl ni el de las nubes:

Reacción	λ excitación	k
(1) NO + O ₃ → NO ₂ + O ₂		k ₁
(2) NO ₂ + hν → NO + O	λ < 3975 Å	j ₂
(3) NO ₂ + O → NO + O ₂		k ₃
(4) O ₂ + hν → 2 O	λ < 2425 Å	j ₄
(5) O + O ₂ + M → O ₃ + M		k ₅
(6) O + O ₃ → 2 O ₂		k ₆
(7) O ₃ + hν → O + O ₂	3080 Å < λ < 11400 Å	j ₇
(8) O ₃ + hν → O(¹ D) + O ₂	λ < 3080 Å	j ₈
(9) O(¹ D) + M → O + M		k ₉
(10) O(¹ D) + H ₂ O → 2 OH		k ₁₀
(11) OH + O → H + O ₂		k ₁₁
(12) H + O ₂ + M → HO ₂ + M		k ₁₂
(13) HO ₂ + O → OH + O ₂		k ₁₃
(14) OH + O ₃ → HO ₂ + O ₂		k ₁₄
(15) OH + OH → H ₂ O + O		k ₁₅
(16) OH + HO ₂ → H ₂ O + O ₂		k ₁₆
(17) HO ₂ + HO ₂ → H ₂ O ₂ + O ₂		k ₁₇
(18) H ₂ O ₂ + OH → HO ₂ + H ₂ O		k ₁₈
(19) H ₂ O ₂ + hν → 2 OH	λ < 5650 Å	j ₁₉

A través de las reacciones (1) y (3), los óxidos NO y NO₂, se encuentran en equilibrio⁴⁸:

$$\frac{[NO]}{[NO_2]} = \frac{j_2 + k_3[O]}{k_1[O_3]} \quad j_2=5 \cdot 10^{-3}; k_1=1,7 \cdot 10^{-12}; k_3=3,2 \cdot 10^{-11} \text{ L}$$

El estudio de estos efectos, fue realizado por el Programa de valoración del impacto climático (CIAP) en Estados Unidos, Reino Unido y Francia. Los resultados

^{XLIX} Fue galardonado con el Nóbel de Química de 1995 por estos trabajos.

^L k₁ y k₃ de Schofield, K., 1967, 'An evaluation of kinetic rate data for reactions of neutrals of atmospheric interest,' *Planet Space Sci.*, **15**, pp. 643-670. j₂ de Nicolet, M., 1965, 'Nitrogen oxides in the chemosphere,' *J. Geophys. Res.*, **70**, pp. 679-689.

fueron concluyentes, la concentración de NO_x en la Antártida es la más baja del Planeta, por lo que se estableció entonces, que no existía relación causa-efecto. Hay que tener en cuenta que estos estudios, fueron anteriores al hallazgo del agujero de ozono, y posteriormente como veremos, se descubre la influencia de las nubes antárticas, el ciclo del cloro y el papel de los NO_x (en realidad, NO_2 y N_2O_5) en el ciclo destructivo del ozono estratosférico.

Ciclo de los freones y halones.

Los freones son una serie de compuestos de fórmula general CF_nCl_m . Para los halones, es la misma, susutituyendo el Cl por Br (CF_nBr_m). En ambos casos $m+n=4$. Uno de los freones más utilizados hasta hace poco ha sido el de fórmula CF_2Cl_2 , cuya estructura se observa en la figura 60.

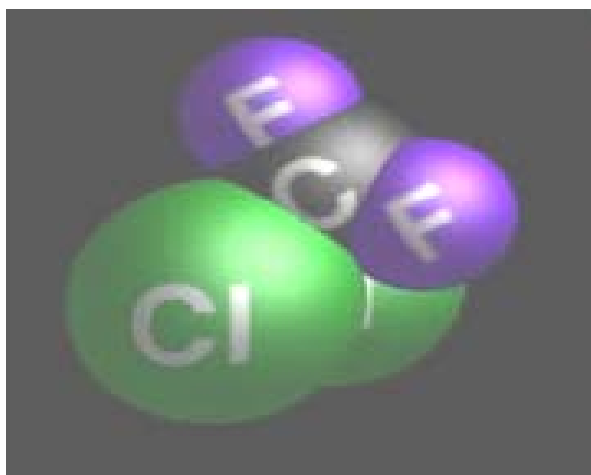


Figura 60.- Estructura en 3D del freón CF_2Cl_2 , utilizado en refrigerantes. Fuente:
http://www.iespaña.es/natureduca/ant_eco_ozonoteoria.htm.

Estos compuestos, que son gases, se utilizan o se han utilizado en sprays, como gas propelente, en frigoríficos, congeladores y en general en toda la cadena del frío, como gas refrigerante y en extintores. Para este último uso, se utilizan los halones y para el resto los freones (figura 61). La producción de los freones se inicia en Bélgica en el año 1892, pero no es hasta que la General Motors los produce en 1929 en Estados Unidos, cuando su uso se globaliza. Estos gases, son muy estables, no son

tóxicos para ninguna forma de vida, son baratos de producir, de fácil almacenaje y nos producen el bienestar de tener aire acondicionado y conservar los alimentos dentro de la cadena del frío. Por tanto, eran los compuestos ideales para estos usos. Sin embargo, las investigaciones que posteriormente se efectuaron, dieron como resultado su responsabilidad con la destrucción de la capa de ozono estratosférica, como después veremos.

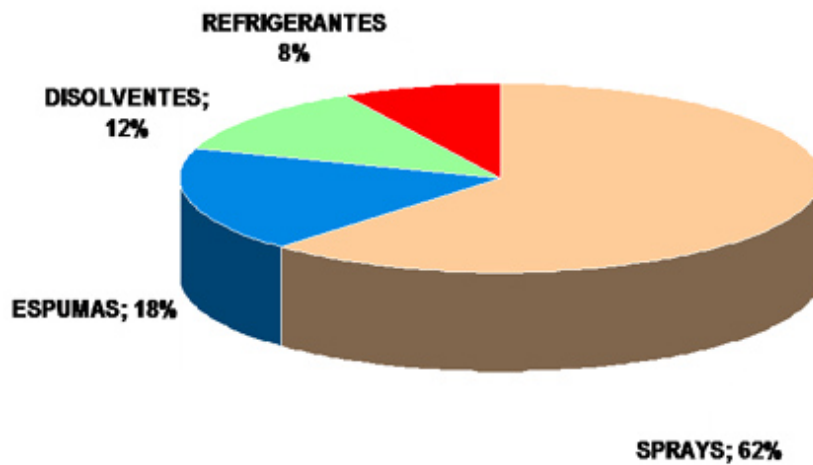


Figura 61.- Usos industriales de los freones hasta el año 1980. El principal fue su utilización en sprays. Modificado de <http://www.prodiversitas.bioetica.org>.

Pero, vayamos por pasos. La producción mundial de freones, denominados CFCs, fue en aumento⁴⁹ hasta su regulación en 1987 por el Protocolo de Montreal, resultando que un año antes de la congelación de su producción en el año 1986, la producción mundial de CFCs era superior al millón de Toneladas, siendo los principales países productores Estados Unidos (38%), Europa (36%), Japón (12%) y Rusia (10%)⁵⁰.

Por todo ello, hay que entender el enorme revuelo que produjeron los resultados de las investigaciones que señalaban a estos compuestos como únicos responsables de la destrucción de la capa de ozono.

Los que podemos denominar gases ozonolíticos, incluyen además de a los CFCs o clorofluoruros de carbono (CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114s, CFC-115, HCFC-22), a los bromofluoruros de carbono (halones 1211, 1301, 2402), el tetracloruro de carbono y el metil-cloroformo. Los CFCs, también contribuyen al "efecto invernadero".

Además, hay que tener en cuenta que el potencial de "vida química activa" de los halocarbonos, es muy elevado: CFC-115 más de 400 años; CFC-114 unos 200 años; CFC-113 unos 90 años; Halón 1301 unos 110 años; CFC-11 unos 60 años; tetracloruro de carbono unos 40 años y CFC-12, halón 1211, halón 2402, metil-cloroformo y HCFC-22 menos de 25 años cada uno, con lo que sus efectos resultan muy prolongados.

De esta manera, la concentración total atmosférica de los CFCs ha ido aumentando progresivamente. En 1960 su concentración sumada era de aproximadamente 0,9 ppmv; en 1970, 1,5 ppmv; en 1980 aproximadamente 2,7 ppmv y en 1990 alcanzaron las 4,0 ppmv^{LI}. Los valores desglosados en 1990 de concentraciones de cloruro de metilo, tetracloruro de carbono, metil-cloroformo, CFC-11, CFC-113 y otros compuestos variaba entre 0,1 y 0,7 ppmv, mientras que el CFC-12 tenía una concentración superior a 1,1 ppmv.

En términos de potencial de agotamiento del ozono (PAO), donde se utiliza como referencia al freón CFC-11 (valor=1), el CFC-12 tiene el mismo potencial; los CFC-113, CFC-114, CFC-115, metil-cloroformo y HCFC-22 están por debajo de ese límite (siendo el HCFC-22 el menos activo); mientras que el PAO del tetracloruro de carbono es ligeramente superior al del CFC-11; el halón 1211 es unas 3 veces más activo; el halón 2402 es casi 6 veces más activo, y el halón 1301 es >10 veces más activo que el CFC-11 (datos del PNUMA, 1992).

^{LI} Datos del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), 1992.

Para demostrar esa responsabilidad hubo que realizar muchas y precisas investigaciones, y a pesar de eso todavía hay científicos que dudan de la responsabilidad de los CFCs. Pero vamos a analizar por partes los hechos científicos.

1º.- El dilema de la presencia de los CFCs en la estratosfera.

Esta es una de las principales bazas que esgrimen los que no están de acuerdo con la responsabilidad de los CFCs. La cuestión es que estos gases son más pesados que el aire^{LII}, por lo que no deberían ascender a capas altas como la estratosfera⁵¹, además no son solubles en agua, y por tanto no pueden ser arrastrados por las gotas de lluvia, y no entrarían en el ciclo del agua.

Sin embargo, hay pruebas analíticas de la presencia de los CFCs en la estratosfera,^{52,53,54} tal como se aprecia en la figura 62.

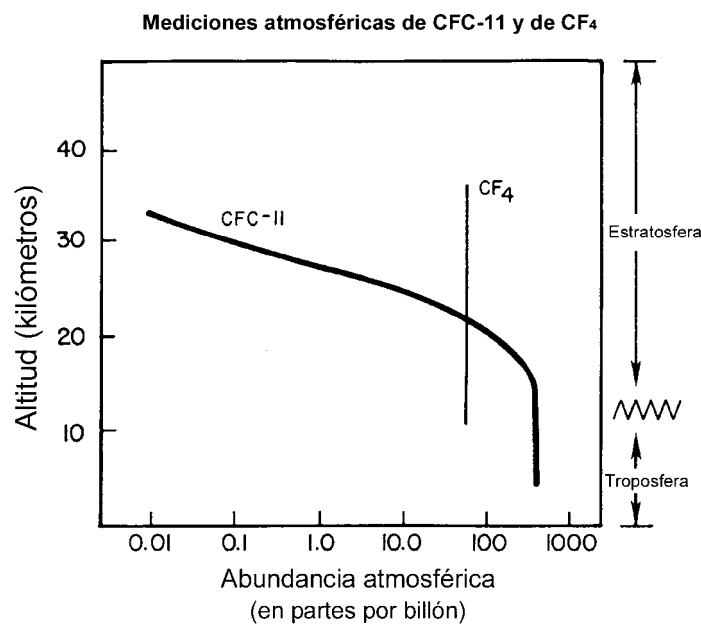


Figura 62.- Mediciones de CFCs (CFC-11 y CF₄) en la atmósfera. Se observa la presencia de ambos en la estratosfera. La concentración del CFC-11 es menor conforme la altitud es mayor, pero la del CF₄ es la misma. Fuente: UNEP (United Nations Environment Programme). The Ozone Secretariat, Nairobi. 6 Febrero 2004.

^{LII} Peso molecular del CFC-11=137,51. CFC-12=121,01. Peso molecular medio atmósfera terrestre=29,01.

Efectivamente, los freones, ascienden a la estratosfera por movimientos del aire en la tropopausa ecuatorial, en un período de unos doce años. La vida media de estos compuestos es de cien años, por lo que llegan intactos a la estratosfera. En la figura 63, se muestra un esquema de este proceso.



Figura 63.- En verano, por la tropopausa ecuatorial, ascienden los CFCs, y aunque en invierno se produce el proceso contrario a nivel de las regiones polares, hay persistencia de CFCs en la estratosfera. Además, la gran estabilidad de estos compuestos impide la actuación de los mecanismos de limpieza de la atmósfera y no entran en el ciclo del agua.

2°.- La Teoría de dos Premios Nóbel de Química.

Enlazando con el apartado anterior; en 1974 dos investigadores de la Universidad de California, Mario Molina⁵⁵ y Sherwood Rowland⁵⁶, terminaron sus trabajos sobre la química atmosférica del ozono, junto a expertos en dinámica de la atmósfera, concluyendo que los CFCs liberados en la Tierra, tenían que ser dispersados por los vientos a toda la atmósfera, independientemente del lugar desde

el que partieran. En una elevación lenta pero segura, las corrientes ecuatoriales ascendentes deberían transportarlos hasta la estratosfera, tal como hemos indicado anteriormente, donde chocarían con la radiación ultravioleta solar más energética⁵⁷. Los estudios de Molina y Rowland en su laboratorio, demostraron que los químicamente inalterables CFCs son poco estables ante la radiación UVC, y que muestran su debilidad por encima de los 29 km de altitud, por lo que en una reacción fotoquímica dan lugar a la liberación de átomos de cloro, muy activos en la destrucción del ozono. Estos trabajos, fueron publicados en Nature⁵⁸, y supusieron como dijimos anteriormente, un gran impacto a nivel mundial, por la trascendencia de la producción de los freones, y fue el primer paso para la eliminación de estos. Las reacciones de Molina se muestran en la figura 64.

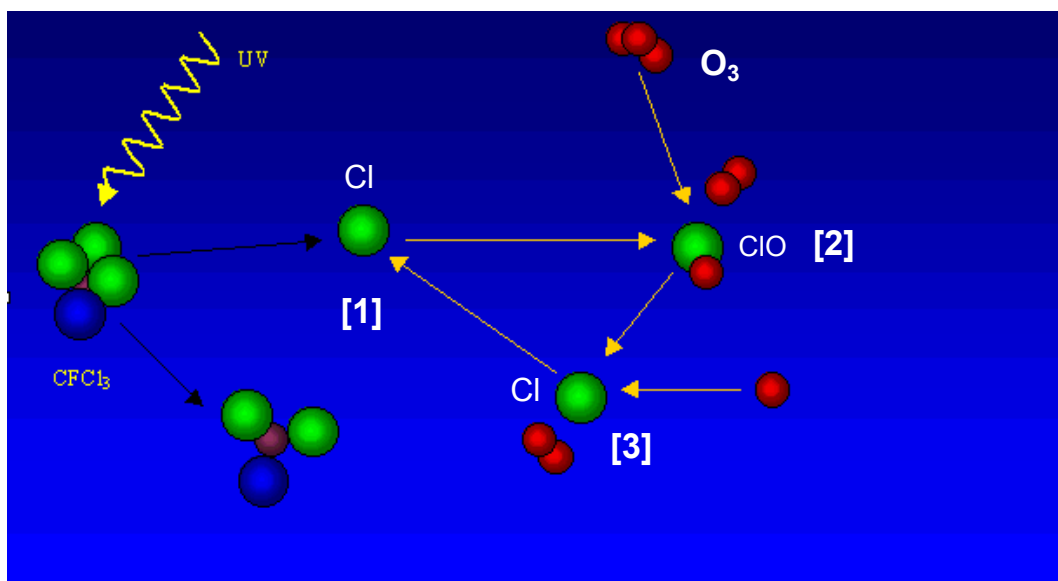
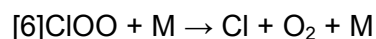
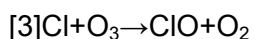
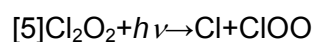
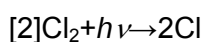
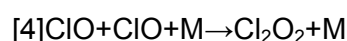
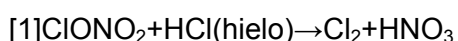


Figura 64.- La reacciones de Molina de destrucción del ozono por los CFCs, se producen en tres pasos. [1] $\text{CFCl}_3 + h\nu \rightarrow \text{CFCl}_2 + \text{Cl}$ [2] $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$ [3] $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$. En la reacción [1], el CFC por acción de la UVC, da lugar a Cl activo, el cual reacciona con la molécula de O_3 , produciendo ClO y O_2 [2]. El ClO, cierra el ciclo, al reaccionar con O atómico y producir mas Cl activo [3]. Debido a ello, un solo átomo de Cl puede destruir hasta 100.000 moléculas de O_3 . Esta es la llamada teoría clásica de Molina. Colores de las esferas y su correspondencia atómica: O, rojo; Cl, verde, F, granate, C, azul. Fuente: <http://marine.rutgers.edu/mrs/education/class/vito/cfc.htm>.

Los trabajos de Molina y Rowland⁵⁹, no se limitaron a las investigaciones anteriores. El verdadero mérito de estas, fueron su trabajo exhaustivo en el laboratorio reproduciendo condiciones de la química atmosférica y que permitió tener un conocimiento físico-químico estratosférico bastante completo,⁶⁰ aunque en ese momento, todavía no se conocía el agujero de ozono antártico.

En base a estas investigaciones, Molina⁶¹ predijo las siguientes reacciones, que llevarían a la destrucción de ozono en la estratosfera:



Donde M es lo que llama un “chaperón”^{LIII} de colisión y el Cl_2O_2 es el llamado dímero de Molina. El resultado neto de esta compleja serie de reacciones químicas es que dos moléculas de ozono (O_3) serán convertidas en tres moléculas de oxígeno (O_2). Esta es la explicación para la destrucción del ozono por parte del cloro, que supuestamente provendría de los CFCs. Surge el así llamado **“ciclo cloro catalítico del ozono”**. El cloro de la teoría de Molina proviene de dos “reservorios”: **el ClONO_2 y el HCl**. Por estas investigaciones a Molina y Rowland, conjuntamente con Crutzen, se les concedió el Premio Nobel de Química de 1995, “por el descubrimiento de los mecanismos que afectan al grosor de la capa de ozono en la atmósfera”.

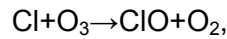
Posteriormente investigaciones realizadas en el laboratorio, en condiciones similares a la estratosfera en P y T, demostraron que la reacción del Cl con el O_3 es 1.500 veces más rápida que con el átomo de oxígeno.⁶²

3º.- Los estudios con modelos antárticos.

La llamada teoría clásica de Molina que acabamos de estudiar, como hemos dicho, se formuló antes de que se detectara el agujero de ozono, pero está confirmada

^{LIII} También se llaman moléculas carabinas, es decir acompañantes.

y ampliada por los estudios posteriores en numerosos modelos matemáticos e investigaciones antárticas, que demuestran entre otros parámetros, la relación que existe entre el aumento de la concentración de la molécula de ClO y la disminución de la de O₃ a nivel planetario⁶³, según la reacción [3] de Molina:



tal como vemos en la figura 65. Todos los modelos teóricos son consecuentes con la responsabilidad de los CFCs en la destrucción de la capa de ozono, indicando asimismo, que la disminución de la capa de ozono planetaria entre 1969 y 1986, fue de un 1,7 al 3 %, aumentando en algunas partes del Planeta hasta el 8%⁶⁴.

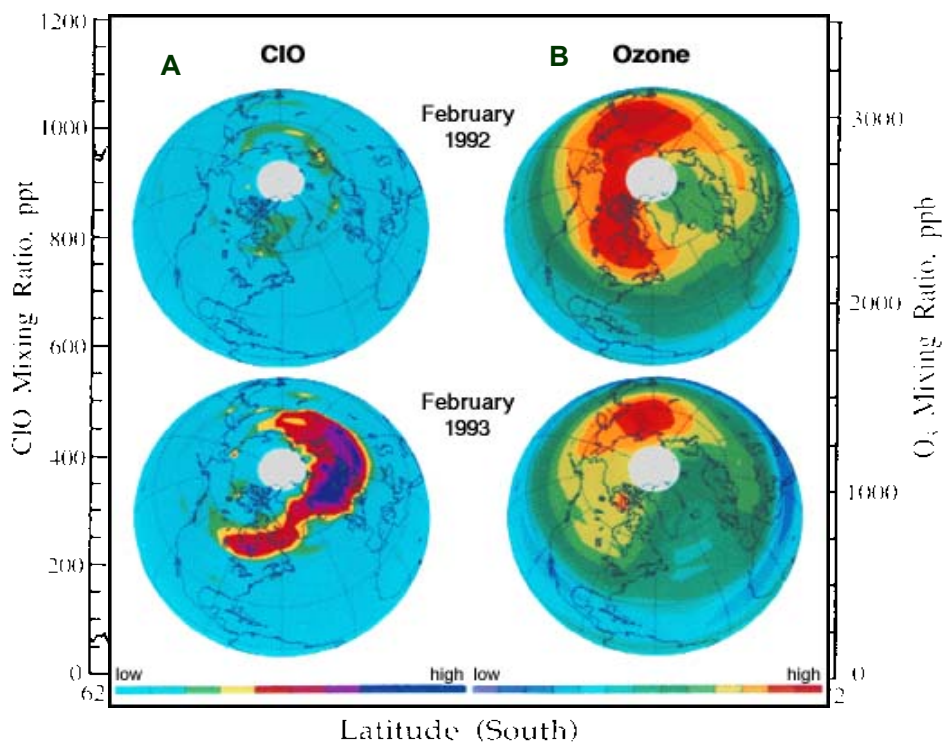


Figura 65.- Representación mediante software de algoritmo matemático de (A), concentración de ClO y (B) de O₃. Los valores en rojo son los mayores y en azul los menores. El color blanco indica ausencia de datos. Se puede observar que existe una relación entre los altos valores de ClO y los bajos de ozono. Fuente: UNEP. The Ozone Secretariat. 2004.

3.3.- Las condiciones antárticas para formar el agujero de ozono.

Hemos visto hasta ahora, que se ha trabajado sobre el modelo antártico; por tanto la cuestión que se plantea en este momento, es si este modelo es transportable a todo el Planeta, es decir si es un modelo global o solo válido en la Antártida.

La respuesta es inmediata; la climatología de la Antártida es única en el Planeta, como también lo es las bajas concentraciones de ozono que se registran en ese continente y, eso hace que el modelo no se pueda transportar a otros lugares. La principal condición climatológica es la formación de un vórtice polar único en su género, que aísla al continente en el invierno polar, junto con la formación de nubes estratosféricas, que solo se generan en esa parte del planeta. Estos factores, además de la luz solar, son los tres ingredientes necesarios para la formación del agujero de ozono en la Antártida. Vamos a estudiar a continuación estos factores:

1º.- El vórtice polar antártico.

En el invierno polar, la pared del vórtice está formada por vientos huracanados de hasta 400 km/h, que sellan al continente⁶⁵, impidiendo la entrada o salida de los gases y partículas y creando un enorme contenedor de reacciones químicas, que va a producir algunas de las más complejas y menos comprendidas reacciones químicas atmosféricas que se efectúan durante las cuatro a seis semanas de duración del vórtice. Ocurren cambios en la composición química de la estratosfera a medida que se pasa del exterior al interior del vórtice⁶⁶. Las concentraciones de muchos gases caen, incluyendo al vapor de agua, óxidos de nitrógeno y oxígeno. Al mismo tiempo, las concentraciones de otros gases destructores del ozono, como el monóxido de cloro (ClO) aumentan considerablemente (figura 66).

Esto hace, que la atmósfera antártica se comporte como un reactor químico sellado que tiene en su interior un **“agujero de vapor de agua”**, otro de **“óxidos de nitrógeno”** y otro de **“ozono”** y todos manifestándose de manera simultánea.

Estas condiciones químicas de la atmósfera no ocurren en ninguna otra parte del mundo, excepto durante el vórtice polar Ártico de muy corta vida.

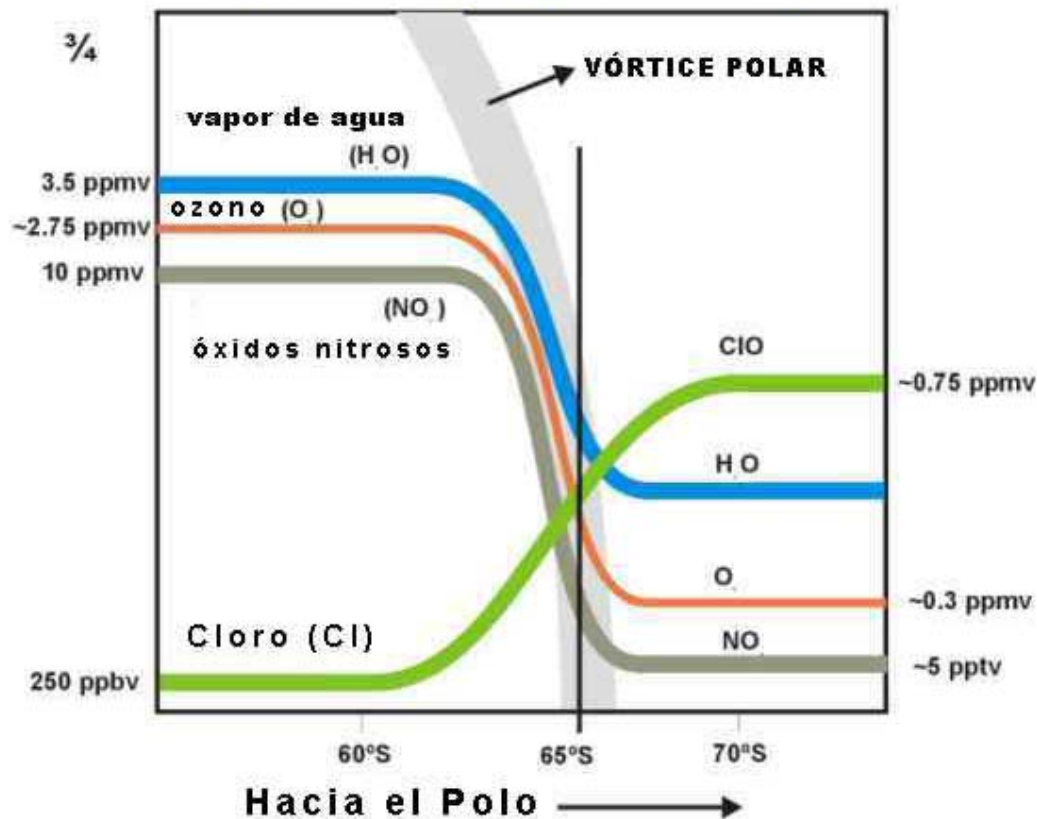


Figura 66.- La química dentro del vórtice polar antártico. Antes de la formación del vórtice polar, las concentraciones en la atmósfera de vapor de agua, ozono y óxidos de nitrógeno son altas, mientras que la de Cl es baja. Con la formación del vórtice disminuyen las concentraciones de vapor de agua, ozono y óxidos de nitrógeno y aumenta espectacularmente las de Cloro en forma de ClO. Imagen obtenida de Internet con el programa Copernic 2001 Pro. Fuente: Desconocida.

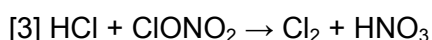
2º.- Las nubes estratosféricas antárticas.

El invierno antártico, trae el segundo ingrediente de la formación posterior del agujero de ozono. A pesar de su belleza, como apreciamos en la figura 67, son las verdaderas responsables de la desaparición de ozono en la estratosfera antártica⁶⁷.



Figura 67.- Nubes estratosféricas antárticas, denominadas NEP (nubes estratosféricas polares) o más conocidas por PSC en la terminología anglosajona. Son de un color rosa característico. Se forman en el invierno antártico. Foto: <http://earthobservatory.nasa.gov>.

La teoría de Molina, no contemplaba la presencia de las PSC ni por tanto, los procesos químicos que se producen en el interior del vórtice, que como hemos indicado, son muy complejos, e involucran procesos de catálisis. En primer lugar, es necesario que haya hielo, como superficie sólida que es, para que la reacción pueda comenzar; por ello es que son necesarias las nubes estratosféricas polares, ya que este hielo, que es especial, se forma únicamente cuando las temperaturas caen por debajo de los -80°C . y a una altura de entre 12 y 20 kilómetros de altura, solo posible en las PSC⁶⁸. Realmente, a temperaturas de -78°C , ya se pueden formar las nubes, pero es a temperaturas inferiores a los -85°C , cuando se aceleran los procesos químicos que se establecen en las PSC, dentro del vórtice, que son los siguientes:



El “misterio” de la desaparición de óxidos de nitrógeno durante la formación del vórtice, lo tenemos resuelto en la ecuación [2], ya que el ClO reacciona con aquellos, para formar ClONO₂. Además, puede reaccionar con CH₄ o con NO, para formar HCl.

En las reacciones [1] y [2], se forman dos depósitos de cloro, en forma de HCl y ClONO₂, aunque estos compuestos son estables y no reaccionan directamente con O₃.

La reacción [3] es la reacción [1] propuesta en la teoría de Molina; necesita como catalizador el hielo que se forma en las PSC y produce depósitos de Cl₂.

Dentro de las PSC, se establecen otras reacciones, que retiran NO_x y agua de la atmósfera antártica: [4] $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3$ y [5] $\text{ClONO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HOCl} + \text{HNO}_3$.

Lo que ocasiona que el vapor de agua decrezca en su concentración al provocar las nubes la deshidratación, además de aumentar la concentración de HNO_3 , lo que también resuelve el “misterio” de las bajas concentraciones de agua en la formación del vórtice.

A su vez, el N_2O_5 , está en equilibrio con el NO_2 , lo que provoca la eliminación de este último de la fase gaseosa: $2\text{N}_2\text{O}_5 \leftrightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$. También el N_2O_5 puede reaccionar con el HCl , para producir más HNO_3 : [6] $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{HCl} \rightarrow \text{ClONO}_2 + \text{HNO}_3$.

Por todo ello, no es de extrañar, que los satélites espaciales encontraran elevadas concentraciones de HNO_3 en la estratosfera antártica, ya que al menos cuatro reacciones lo justifican ([3] a [6]), a las que hay que añadir una pequeña contribución de las reacciones del ciclo del OH : $\text{OH} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$; $\text{O}_2\text{H} + \text{NO} \rightarrow \text{HNO}_3$, que ocurren durante el día, ya que de noche, las reacciones que tienen lugar retiran NO y OH y destruyen ozono: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ y $\text{OH} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2\text{H} + \text{O}_2$.

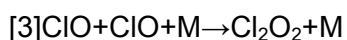
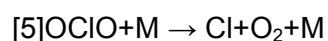
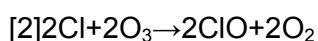
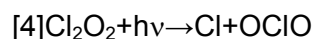
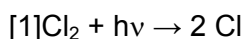
Por otra parte, parece que hay una relación directa entre la caída de la temperatura en la estratosfera antártica, con la formación de nubes PSC, y la amplitud del vórtice. Así, en el 2003, los valores de la “gota fría”, fueron muy bajos, de -93°C durante junio y de -100°C en algunos días de agosto, que resultaron ser inferiores a los últimos años, y las PSC, cubrieron entre el 80 y 90% del vórtice polar, lo que supone alrededor de 35 millones de km^2 , más del doble de la superficie de la Antártida^{LIV}, lo que se correspondió con la peor situación del agujero de ozono desde que se tiene constancia de su aparición^{LV}.

^{LIV} 13.340.000 km^2 .

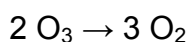
^{LV} Datos de la Fuerza Aérea Argentina. Comando de Regiones Aéreas. Servicio Meteorológico Nacional. Agujero de ozono antártico 2003. Boletín nº1.

3º.- La fotólisis.

Hasta ahora, hemos visto que la formación del vórtice, sella el continente y provoca la aparición de nubes PSC, donde se producen una serie de reacciones químicas que provocan la formación de depósitos de cloro, en forma de HCl, ClONO₂, y Cl₂. El tercer y último ingrediente en la formación del agujero de ozono, es la luz solar. En la primavera antártica, se rompe el vórtice y vuelve la luz, produciendo una serie de reacciones fotoquímicas, que conducen a la liberación de los depósitos de cloro, contenidos en las PSC. Estas reacciones, son las propuestas en la teoría de Molina ([2] a [6]):



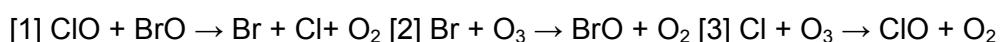
El efecto neto de todas estas reacciones, es el siguiente:



La luz, es un factor muy importante, y las reacciones que se producen en la estratosfera antártica, son también diferentes del día a la noche, tal como se pone de manifiesto en la figura 68, en donde se muestra el ciclo completo de las reacciones químicas de destrucción del ozono, desde su origen, los CFCs.

A este mecanismo de destrucción de ozono en la Antártida se le denominó el “paradigma del cloro”, fue identificado gracias a las observaciones de los satélites y aviones ER2 de la NASA y se cree que es el responsable en un 70% de la formación del agujero.

También el bromo, procedente de los halones, en menor medida, contribuye a este proceso destructivo, según las reacciones:



Con el mismo resultado neto, que en las reacciones anteriores: $2 \text{O}_3 \rightarrow 3 \text{O}_2$.

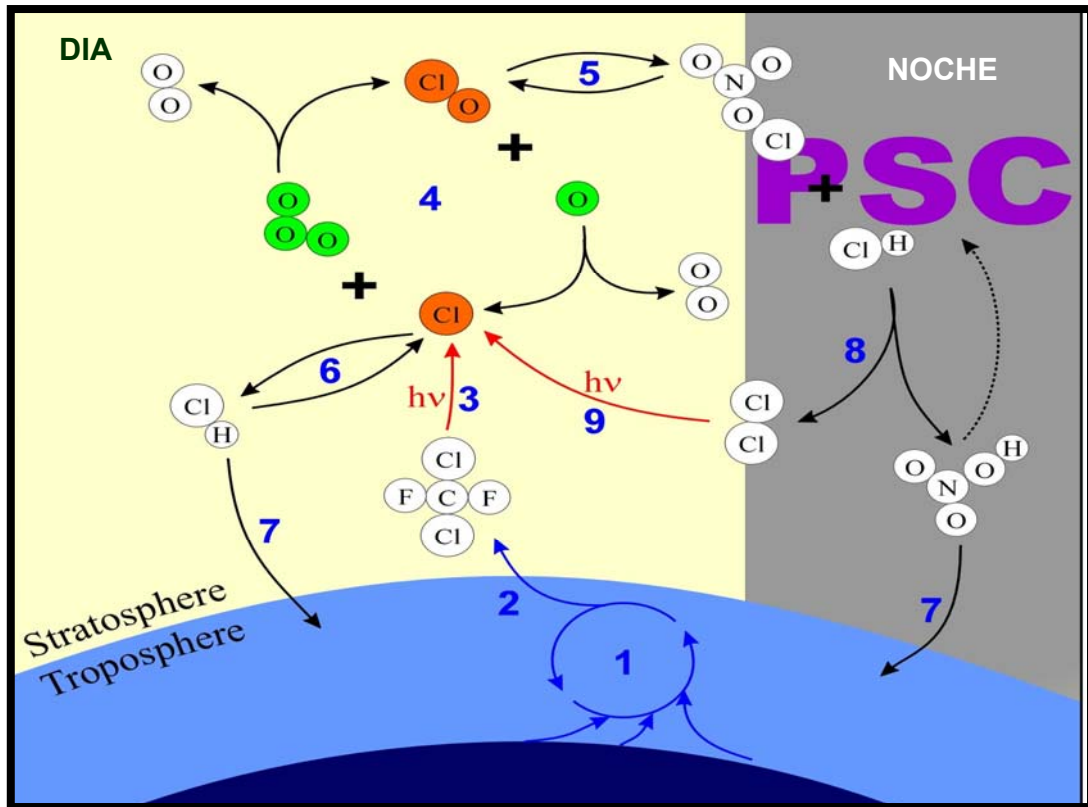


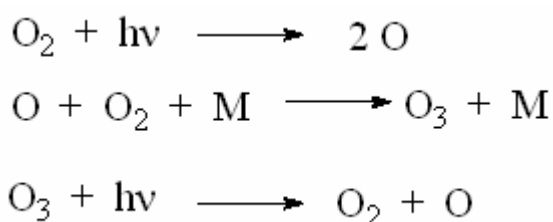
Figura 68.- Reacciones químicas que se establecen en la estratosfera antártica. Los CFCs, producidos en la troposfera (1), ascienden por la tropopausa ecuatorial (2) a la estratosfera. Allí, durante el día, se descomponen por la luz UV, dando lugar a un átomo de Cl (3). El Cl reacciona por una parte con O₃ para dar O₂ y ClO (4). El ClO, reacciona con el HNO₃ en las PSC (nubes estratosféricas), para dar lugar al ClONO₂, en una reacción de equilibrio químico (5). Además, el ClO reacciona con O, para dar lugar a O₂ y más Cl activo, para iniciar otra vez la reacción (4) de destrucción de O₃. El Cl por su parte, en la reacción de equilibrio (6), da lugar a HCl con el vapor de agua, y pasa a la troposfera (7). Durante la noche, el ClONO₂, formado en la reacción (5), reacciona con el HCl que existe en las PSC, para dar lugar a Cl₂ y HNO₃ (8). Este último, se transporta a la troposfera (7) o permanece en la PSC. Durante el día, el Cl₂ formado en la reacción nocturna (8), es dividido en dos átomos de Cl por reacción de fotólisis (9), y autoalimenta el ciclo de destrucción, a partir de la reacción (4). Estos ciclos autoalimentados, producen un gran efecto destructivo sobre las moléculas que actúan. Fuente: <http://ceiba.cc.ntu.edu.tw>.

3.4.- Los ciclos implicados.

Hemos visto la complejidad de las reacciones de destrucción del ozono estratosférico, tanto de una manera natural, como por acción antropogénica. Vamos a resumir estos ciclos, considerando las reacciones más importantes de los mismos.

🏠 El ciclo de Chapman.

Regula de una forma natural la concentración estratosférica de ozono:

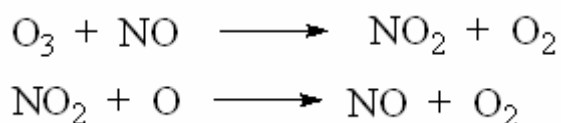


🏠 Reacciones de los óxidos de nitrógeno con el ozono estratosférico.

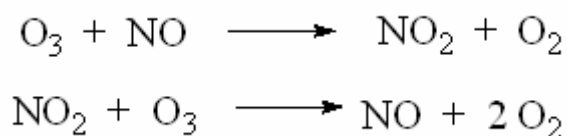
Los óxidos de nitrógeno presentes de forma natural en la estratosfera tienen un papel importante en este proceso, reaccionando con tantos átomos de oxígeno como moléculas de ozono para reducir la cantidad presente de ozono a su nivel nativo de 6 ppm.

Hay dos mecanismos implicados:

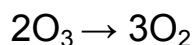
Mecanismo 1



Mecanismo 2



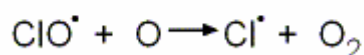
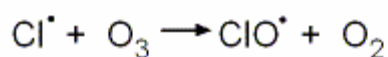
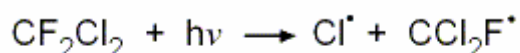
En ambos casos, el balance neto de la reacción es:



Éstos tres ciclos, eran las únicas reacciones que gobernaban la concentración de equilibrio del ozono desde la evolución de la atmósfera oxidante hace miles de millones de años.

☞ Reducción de la capa de ozono estratosférica por los CFCs.

Ciclo catalítico 1



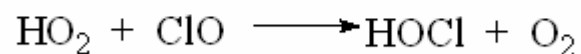
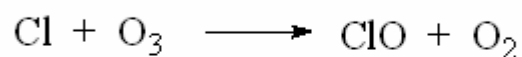
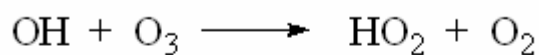
El resultado neto de las reacciones es: $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$

Este es un proceso catalítico en donde el átomo de cloro es regenerado para destruir otra molécula de ozono. Cada cloro generado por fotodescomposición de una molécula de CFC, destruye al menos 1.000 moléculas de ozono de promedio.

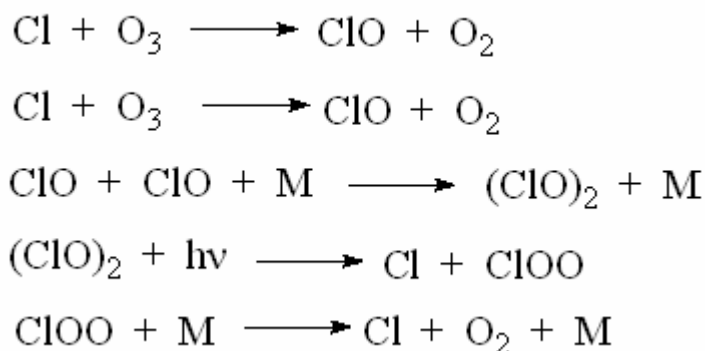
☞ Ciclos adicionales que destruyen al ozono estratosférico.

Además, hay otros tres ciclos adicionales, que vamos a estudiar a continuación.

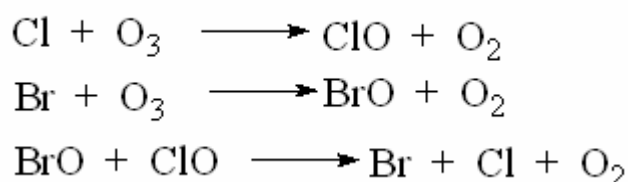
Ciclo catalítico 2



Ciclo catalítico 3



Ciclo catalítico 4

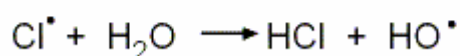
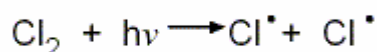
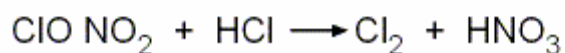
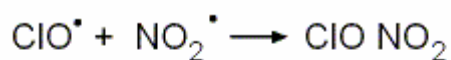


En todos ellos, el resultado neto es: $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$.

Estos cuatro ciclos son en fase homogénea y no resultan suficientes para explicar el agujero de ozono antártico.

Reacciones heterogéneas en la superficie de hielo que causan la disminución de ozono estratosférico.

Son las reacciones que justifican el agujero de ozono que se produce en la primavera antártica y que explican el alto contenido de HNO_3 , HCl y ClO que detectan los satélites espaciales en la estratosfera antártica. Como hemos dicho, solo son posibles en las nubes estratosféricas PSC, a temperaturas menores de -80°C , donde se forma este hielo, que produce las reacciones atmosféricas en fase heterogénea. El ciclo que resumimos a continuación, es el global e implica las reacciones que se forman en el vórtice y las finales de la primavera, con liberación del Cl .



3.5.- Los logros científicos en la lucha contra la destrucción de la capa de ozono.

1840-1996.

Son ejemplos de cómo la investigación básica, contribuye a inmensos beneficios sociales.

1840. Christian Friedrich Schönbein, identifica el ozono como un componente de la baja atmósfera y lo nombra.

1881. W.N. Hartley, identifica el ozono como la sustancia que absorbe la radiación UV del sol, en las longitudes de onda inferiores a 290 nm. Y demostró que también está presente primordialmente en altitudes altas.

1913–1932. C. Fabry y M Buisson demuestran que la concentración total de ozono en una columna vertical de la atmósfera puede ser medido y que es igual a 300 unidades dobson.

1924. G.M.B. Dobson crea un programa de mediciones continuas de ozono en Oxford con su nuevo espectrofotómetro.

1930. Sydney Chapman, explica cómo la luz del sol ataca la molécula de oxígeno en la atmósfera para generar ozono.

1957. Como parte del Año Geofísico Internacional cuatro de las cinco estaciones de investigación en la Antártida empiezan a hacer mediciones regulares de ozono.

1970. La serie de satélites Nimbus empiezan a hacer mediciones ozono.

1970. James Lovelock, usa su Detector de captura electrónica para medir los CFCs.

1973. Richard Stolarski y Ralph Cicerone descubren las reacciones del ciclo catalítico del cloro estratosférico.

1974. Mario Molina y Sherwood Rowland, descubren la implicación de los CFCs en la destrucción del ozono estratosférico.

1976. La National Academy of Sciences, en su informe ratifica las conclusiones de Rowland y Molina.

1976. La FDA y la EPA anuncian una retirada progresiva de los CFCs de los aerosoles.

1978. Se prohíben en Estados Unidos los CFCs en los aerosoles.

1984. Una investigación británica liderada por Joseph Farman detecta una pérdida de ozono sobre la Antártida de un 40 % durante la primavera en el hemisferio del sur.

1985. Datos del satélite de la NASA confirman la existencia del agujero en la capa de ozono sobre el antártico.

1987. Se firma el Protocolo de Montreal con una reducción mundial del 50 % de los CFCs.

1988. Un grupo de científicos presenta las conclusiones preliminares de un agujero en la capa de ozono sobre el Ártico.

1988. Los Estados Unidos ratifican el Protocolo de Montreal con un Voto unánime.

1995. A Sherwood Rowland, Mario Molina, y Paul Crutzen, se les otorga el Premio Nóbel para su trabajo de la Química Atmosférica del ozono.

1996. Prohibición completa de la producción industrial de CFCs.

3.6.- La teoría de los conos.

Aunque existe un amplio consenso internacional sobre la única responsabilidad de los CFCs como destructores de la capa de ozono, hay una minoría de científicos que no están de acuerdo con ello o plantean sus dudas.

En este sentido, se establece la teoría de que la destrucción de ozono, es un hecho natural debido a la formación de conos de sombra planetarios⁶⁹. Durante el invierno antártico, el Sol está muy al Norte del Ecuador, y existe un gran cono de sombra que envuelve a esta área, robándole así toda la radiación ultravioleta (figura 69). En esas condiciones, no hay producción de ozono y la molécula de oxígeno diatómica O_2 se hace muy estable, resultando la forma mayoritaria de oxígeno. Durante el invierno en el Hemisferio Norte sucede exactamente lo mismo, cuando la posición del Sol está muy al Sur del Ecuador. Además, hay que tener en cuenta, los círculos de iluminación, que provoca el Sol, durante intervalos de 12 h en todo el Planeta (figura 69).

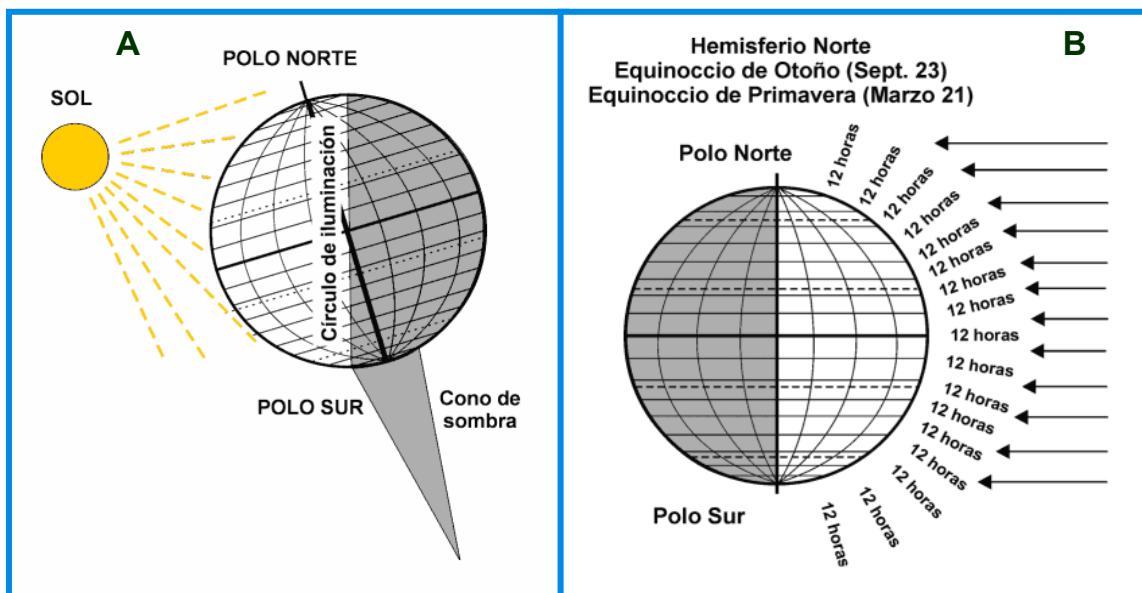


Figura 69.- (A). Cono invernal de sombra en el Hemisferio Sur, que afectaría a la Antártida. (B). Durante los equinoccios de otoño y primavera, el círculo de iluminación corta a todos los paralelos por la mitad, y los días y noches tienen igual duración en todas partes del mundo: 12 horas. Fuente: J. Kinisky. <http://mitosyfraudes.8k.com>.

Debido a los círculos de iluminación, durante la época del solsticio de Invierno del Hemisferio Norte (22 de Diciembre) el Polo Norte está envuelto en la oscuridad durante seis meses, durante los cuales la producción de ozono es nula. Lo mismo ocurre durante el solsticio de Verano del Hemisferio Norte (22 Junio), donde el Polo Sur está en total oscuridad durante seis meses, mientras que el Polo Norte está inclinado hacia el Sol, y tiene un día de seis meses de duración. Por consiguiente, durante ese tiempo, la producción de ozono es nula en el Polo Sur.

Resulta así, que los patrones de circulación polar de la Antártida y del Ártico son totalmente diferentes. En la Antártida, tiene tendencia a ser zonal, lo que impide el ingreso del ozono de las regiones más al norte. En el Hemisferio Norte, el patrón de circulación es mucho más meridional, expresado como ondas de Rossby, que con mucha frecuencia penetran bien profundamente en el Ártico, inyectando así suficiente cantidad de ozono.

De acuerdo a esta teoría, se pueden esperar grandes deficiencias de ozono durante el invierno y, especialmente, en los meses de primavera de ambas regiones polares, siendo esta más pronunciada en la Antártida, lo que desde luego no está en contradicción con la problemática generada por los CFCs, y puede ser una acción natural complementaria, que en cualquier caso resultaría insuficiente para interpretar la extensión y profundidad del agujero de ozono en la Antártida.

Una globalización de esta teoría, es la llamada teoría solar⁷⁰, que entiende que cada 11 años se produce un ciclo solar y los ciclos solares intensos deben hacer subir las concentraciones de NO_x por irradiación solar, lo que provocaría la destrucción del ozono. Este efecto, como hemos visto anteriormente es muy poco significativo, a nivel de la estratosfera antártica, ya que realmente es el cloro atómico el que destruye masivamente a la molécula de ozono, mientras que los NO_x producen compuestos de cloro, que por su estabilidad son incapaces de reaccionar con el ozono.

3.7.- El dilema del cloro. Fuentes de inyección de Cl en la Antártida.

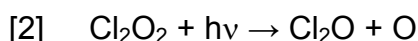
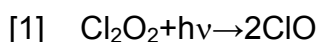
La constitución de depósitos de cloro y la acción destructora directa del átomo de Cl sobre el ozono, es la parte vital como hemos visto, de la formación del agujero de ozono, para la comunidad internacional que mayoritariamente respalda esta teoría. Pero hay científicos, que ponen en duda que la fuente de inyección de cloro en la Antártida sea provocada por los CFCs. De hecho, las fuentes de entrada de Cl en la atmósfera debidas a los CFCs, son insignificantes (0,0075 millones de T), comparadas con las del agua del mar (600 millones de T) o con los volcanes (36 millones de T)⁷¹.

Otra duda que se plantea, es sobre las medidas de Cl efectuadas sobre la vertical de la Antártida, ya que allí está presente el volcán Erebus⁷², ubicado a sólo 10 kilómetros de la estación McMurdo⁷³, donde se realizan importantes medidas de ozono. Este volcán, está en erupción constante y emite 1.000 toneladas de cloro diarias a la atmósfera, es decir 370.000 toneladas anuales de cloro, lo que representa casi la mitad de producción anual de CFCs en el mundo (cerca de 750.000 T)⁷⁴. Si además, se compara con la cantidad de cloro que se produciría de la disociación de los CFCs liberados a la atmósfera (7.500 T); el Erebus inyecta a la atmósfera 50 veces más cloro que toda la producción anual de CFCs del mundo. La erupción de volcanes, como El Chichón en 1982, que introdujo 40.000 T de HCl en la estratosfera o el Pinatubo (Filipinas) y Hudson (Chile) en 1991, son fuentes de cloro en la estratosfera.

Sin embargo, estas realidades no son incompatibles con la responsabilidad de los CFCs en la formación del agujero de ozono. Además, no se ha demostrado que esas fuentes de cloro de las erupciones volcánicas, resulten formas activas, mas bien al contrario son especies solubles y se reemiten a la tierra por el ciclo del agua. Desgraciadamente, la experiencia nos dice que los efectos destructores de las fuentes antropogénicas son muy superiores a las naturales, aunque su proporción sea mucho menor.

3.8.- Contestaciones a la teoría de Molina.

A pesar de todas las investigaciones realizadas atribuyendo a los CFCs la responsabilidad del agujero antártico, hay una minoría de científicos que dudan de que estos sean realmente responsables de la destrucción de la capa de ozono. Una de las principales teorías en contra de la responsabilidad de los CFCs es la de Eberstein, que presenta otro dilema, el de la formación del OCIO, esencial en la teoría de Molina. Sin la radiación UVC y por tanto sin luz solar, la reacción [5] de la teoría de Molina: $\text{Cl}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{OCIO}$, no sería posible. Sin embargo, la reacción de fotodisociación más probable, según Eberstein no es esa, debido a que no se consigue la mínima energía. Hay otros dos caminos de menor energía:



Por tanto, según este investigador, no habría presencia de átomos de Cl que pudieran reaccionar con el ozono y no se cerraría el ciclo destructor.

Lawrence, Clemitshaw y Apkarian en 1990, deducen que en el intervalo del espectro en que el OCIO atraviesa por una disociación unimolecular para producir $\text{Cl} + \text{O}_2$ su rendimiento cuántico es menor a 5×10^{-4} y que por tanto, un proceso con un rendimiento cuántico tan pequeño haría irrelevante a la fotoquímica del OCIO para la destrucción del ozono estratosférico.

Además, dentro del ciclo de destrucción del ozono, hay producción de moléculas que son capaces de bloquearlo⁷⁵, como el O_2 de las reacciones: $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$ y $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$, el cual formaría ozono: $\text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{O}_3$. El O atómico se produciría a partir de la reacción fotoquímica: $\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{O}$. El NO_2 también bloquea el ciclo, al reaccionar con el ClO: $\text{NO}_2 + \text{ClO} \rightarrow \text{ClONO}_2$. El propio ClO se disocia por acción de la luz UV de $\lambda > 230 \text{ nm}$ en Cl, que inicia el ciclo y O atómico que produce ozono en su choque con la molécula diatómica de oxígeno. Estas reacciones, en realidad son poco significativas, según demuestran los modelos.

Realmente, las contestaciones a la teoría de Molina han sido muchas y algunas duras en los 20 años posteriores a su postulación, pero es que sus afirmaciones involucraban entonces, a grandes multinacionales productoras de gases propelentes de aerosoles. Sin embargo, la evidencia de que la disminución de ozono en la Antártida es paralela al incremento en las concentraciones atmosféricas de CFCs está suficientemente demostrada y respalda por la Academia Sueca al galardonarle con el Nóbel de Química, lo que quizás haga parar la polémica.

4.- Los “microagujeros” de ozono.

También se producen disminuciones en la capa de ozono a nivel local, sobre la vertical de algunas regiones, que tienen carácter transitorio. A esta situación se le denomina “microagujero” de ozono⁷⁶. En la figura 70, se muestran unos ejemplos de estos.

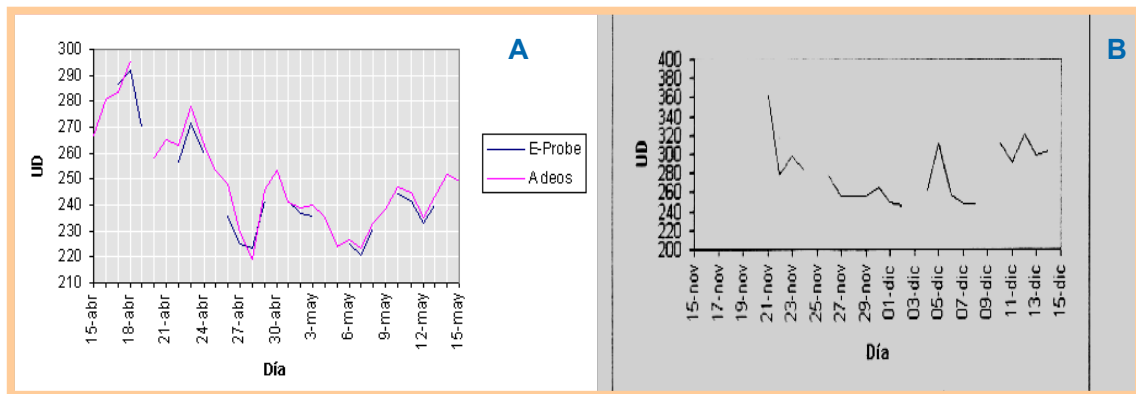


Figura 70.- (A). Gráfico de la columna total de ozono sobre la ciudad de Concepción (Argentina). Se observan microagujeros de ozono los días 27 de abril, 5 a 8 y 12 de mayo de 1997. Datos de los satélites Earth-Probe y Adeos. **(B).** Gráfico de la columna total de ozono sobre la ciudad de Madrid (España), con microagujeros el 22, 27 a 28 de noviembre y el 8 de diciembre de 1997. Datos del Earth-Probe. NASA. <http://www.nasa.gov>.

5.- La situación del agujero de ozono en el Ártico.

Las características del agujero de ozono en el Polo Norte, no han sido tan extremas como en el Polo Sur⁷⁷, tal como se puede deducir de los resultados de las observaciones de los satélites espaciales TOMS y que se muestran en la figura 71. La disminución de la capa de ozono en el Ártico, ocurre también en primavera como en el caso de la Antártida, pero que en este caso es en el mes de marzo y no en octubre (primavera antártica)⁷⁸. La situación actual es de estabilidad y no es tan preocupante como en el hemisferio sur, tal como podemos apreciar en el gráfico de la figura 72.

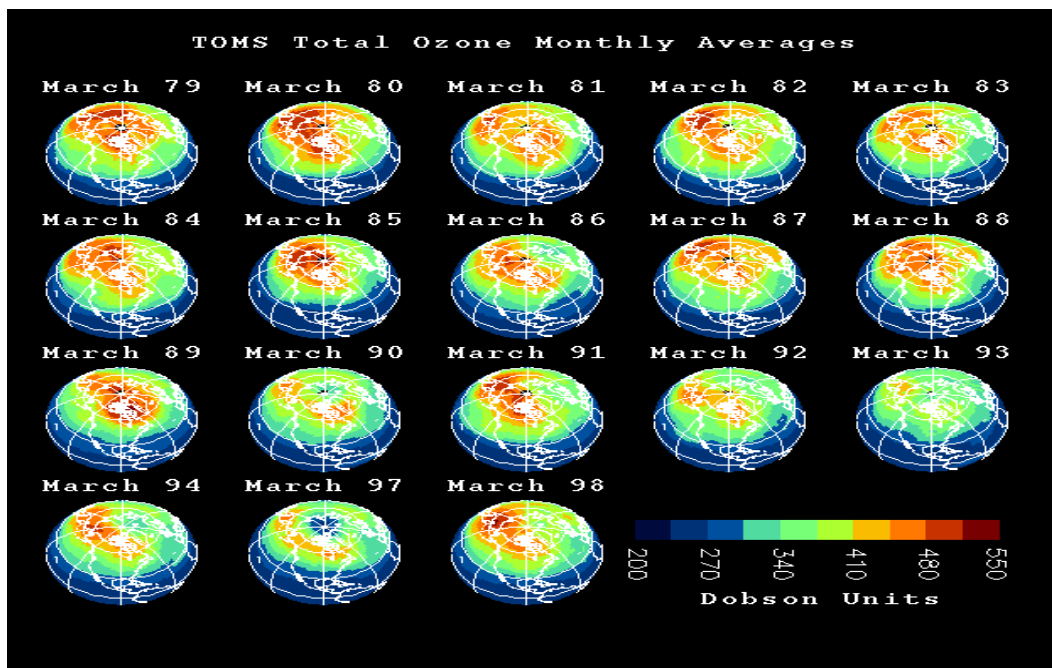


Figura 71.- Medidas TOMS del satélite Nimbus 7 en el mes de Marzo (mes donde ese producen los valores mínimos), desde 1979 a 1992 para el hemisferio norte. Los datos a partir del año 1993 son del Meteor 3 y Earth Probe. Los valores más bajos son los azules y los verdes y naranjas los más altos. Si los comparamos con los de la figura 56, para el hemisferio sur, podemos apreciar que la destrucción del ozono en el Ártico es mucho menor. Se observa que la escala de UD es en este gráfico a partir de 200, mientras que en el de la figura 56 es desde 100. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

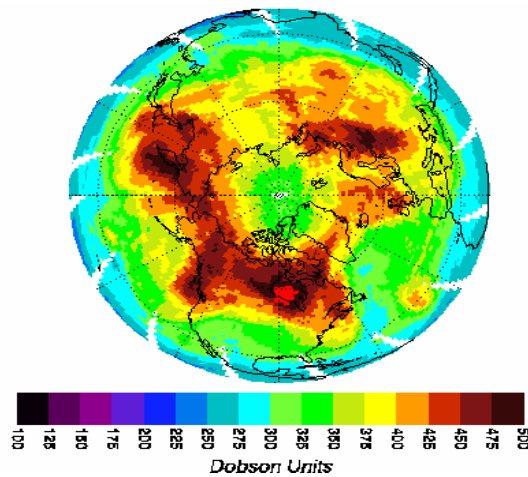


Figura 72.- Medidas del Earth-Probe TOMS, del ozono total en el hemisferio norte el 1 de abril de 2003. Los valores naranjas y rojos son las concentraciones más altas y los azules y verdes son los medios. No se observan bajos valores, que entrarían dentro de los colores violeta y negro. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

6.- Acciones Internacionales.

Se puede decir, que la presión de los grupos ecologistas fue decisiva en este caso para la retirada de los freones de los mercados internacionales, siendo el primer gran triunfo de aquellas organizaciones para frenar los efectos de un tipo de contaminación, provocada por el hombre.

La declaración final de Helsinki en el año 1989, recoge la responsabilidad de los freones y halones en la destrucción de la capa de ozono: “No cabe duda de que los CFCs 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 UV, debida a un adelgazamiento de dicha capa significaría la aparición a medio plazo de carcinomas de piel, cataratas y deficiencias genéticas. El medio ambiente natural sería víctima de males, como la pérdida de cosechas y la destrucción potencial de la cadena alimentaria del medio marino”.

Las primeras medidas internacionales para la protección de la capa de ozono, fueron las siguientes:

- **1976 Canadá.**

Eliminación del uso de los CFC11 y CFC12.

Prohibición de los CFCs en los sprays.

- **1978 Estados Unidos.**

Prohibición de los CFCs en sprays.

- **1980 CEE.**

Reducción del 30% de CFCs en los sprays.

- **1986 Creación del Comité de Tendencias del Ozono (12 países).**

Se calibran datos en todas las estaciones.

Se envían al Centro Mundial de Datos del ozono.

El resto de las acciones internacionales, de fechas posteriores, son consecuencia como hemos indicado de las presiones de los grupos ecologistas, con logros verdaderamente importantes en la lucha contra la contaminación global. Los principales hechos los resumimos a continuación.

 Convenio de Protección del Ozono. Viena. Marzo 1985.

Con solo 21 países firmantes, no se acuerdan plazos para reducir los contaminantes.

 El Protocolo de Montreal. Septiembre 1987⁷⁹.

Firmado por la CE y otros 36 países, es el paso más importante en la lucha contra la destrucción del ozono estratosférico.

Se acuerda la regulación de 5 freones y 3 halones, en base a:

- o Freones regulados.

- Consumo

- 1986. Congelación.

- 1994. Reducción 80%.

1999. Reducción de otro 50%.

- Producción

1989. Menos del 10% con respecto a 1986.

1994. Reducción 90%.

1999. Reducción de otro 65%.

- o Halones regulados.

- Consumo

1992. Niveles de 1986.

- Producción

1992. <10% con respecto a 1986.

 Convenio de Helsinki. Mayo 1989.

Firmado por 80 países, se acuerda eliminar por fases la producción y consumo de los CFCs controlados por el Protocolo de Montreal, lo antes posible y a lo más tardar en el año 2000, lo que se ha cumplido.

7.- Sustitutivos de los freones.

Acabar con los freones, supone terminar con los gases refrigerantes que nos suministran el frío necesario para nuestras neveras, congeladores, aires acondicionados, etc. Por tanto, era necesario el encontrar unos sustitutos para ellos, como así sucedió. Estos, son los HCFCs y HFCs^{LVI}; estos últimos no poseen átomos de Cl ni Br. Su síntesis es muy compleja, en comparación con la de los CFCs, como podemos ver en el esquema de la figura 73.

Hay que decir, que la sustitución de los CFCs es un hecho en los países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá y la UE, y otros países firmantes del

^{LVI} HCFCs= hidro-cloro-fluoro carbonos y HFCs= hidro--fluoro-carbonos.

Protocolo de Montreal, pero no lo es en China o en la India, por ejemplo, y debido a su gran cantidad de población, puede ser un hecho preocupante en el futuro.

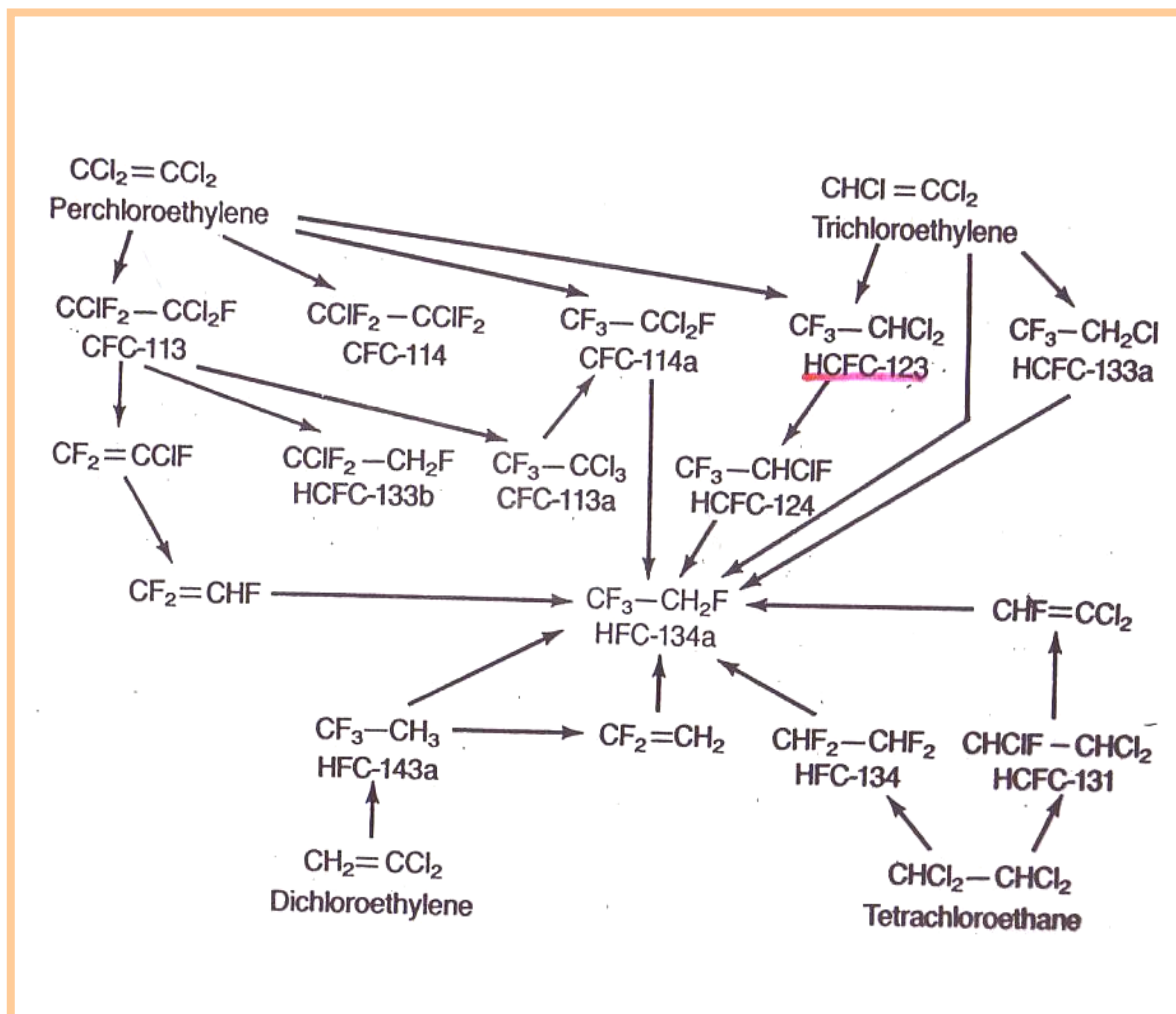


Figura 73.- Esquema de la síntesis química de uno de los sustituyentes de los CFCs, el HFC-134a de fórmula CF₃-CH₂F. Uno de sus precursores, también utilizado actualmente el HCFC-123, subrayado en rojo, se ha demostrado que tiene acción cancerígena en ratas. Fuente: <http://www.meteor.iastate.edu>.

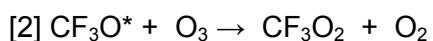
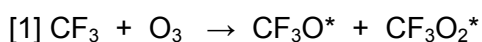
Actualmente, los equipos de aire acondicionado no contienen ya CFCs y se han sustituido por HCFC, y para el año 2010 deberán ser reemplazados por los HFCs, de hecho, en algunos países ya se está haciendo. En la Tabla XIV, se muestra el programa de sustitución de los CFCs en la UE.

Tabla XIV.- Sustituciones de los CFCs en la UE de los aires acondicionados. En el año 2010 los HCFCs (R-22) deberán estar completamente sustituidos por HFCs sin Cl.

Fuente: Winterthur. Abril 2001.

	Refrigerantes (freones)	Composición	Ejemplos	Política Europea (CEE)
Pasado	CFC Clorofluoro-carbono	Están totalmente halogenados, sin hidrógeno y con cloro	R-11 R-12 R-502	Completamente prohibidos. Parada de producción desde 1 de enero de 1995
Presente	HCFC Hidroclo-ro-fluorocarbono	No están totalmente halogenados, sin hidrógeno y con cloro	R-22	Reducción progresiva de producción hasta el año 2010 (algunos países, política más restrictiva)
Futuro	HFC Hidrofluoro-carbono	No están totalmente halogenados, sin hidrógeno y sin cloro	R-134a R-23 Serie R-400	Sustituyen a los CFC y HCFC. Son los refrigerantes permitidos para los equipos domésticos de aire acondicionado y frigoríficos

Estos sustituyentes, no están exentos de polémica; en primer lugar, los HCFCs, tienen Cl y en segundo lugar, algunas de las reacciones químicas atmosféricas que producen los HFCs, vía radicales, pueden dar lugar también a la destrucción de ozono:



Aunque si es cierto, que estos compuestos son menos estables que los CFCs y solo una pequeña fracción del 10% llega a la estratosfera⁸⁰.

Además, hay estudios científicos, que indican que los HCFCs han provocado severos casos de hepatitis aguda⁸¹, en contraste a los inofensivos para la salud, CFCs.

Deseamos pues, que no nos hayamos equivocado al suprimir la producción de CFCs y que estos sean realmente los responsables de la destrucción del ozono planetario. Como la vida media de algunos CFCs es de más de 100 años, el tiempo en que tardaremos en saberlo será largo; cuando estos desaparezcan de la atmósfera, lo que no ocurrirá antes del 2050, momento en que se debería recuperar el agujero de ozono, lo que así vaticina el Premio Nóbel Crutzen.

Para los halones, empleados para la extinción de incendios, no se han encontrado sustituyentes adecuados, ya que es difícil de igualar la combinación que presentan de baja reactividad y eficaz acción contra los incendios. Su producción cesó en el año 1994, pero no su comercialización, que está sometida a un riguroso control, mientras se buscan alternativas válidas, la principal de las cuales está centrada en el CF_3I , para sustituir al CF_3Br (halón 1301), al ser lo suficientemente pesado para extinguir fuegos. El enlace C-I, se rompe con facilidad por acción de la luz UV, en la propia troposfera, y su tiempo de vida es muy corto. Sin embargo, parece que su posible toxicidad y efecto corrosivo, puede ser un problema para su comercialización⁸².

8.- La asociación agujero de ozono con el cáncer de piel.

También existe un consenso internacional entre la correlación que existe de una mayor incidencia de la luz UV, debido a la disminución de la capa de ozono,^{83,84} y el aumento del cáncer de piel. Actualmente está establecido que por cada 1% de disminución del contenido de la columna de ozono, la incidencia de cáncer de piel aumenta del 1,2 al 1,5%. Aunque lo que cuenta es la dosis acumulada a largo plazo, no una sobre exposición instantánea.

Sin embargo, el melanoma maligno representa sólo el 4% de los tumores de piel, aunque tiene el 75% de la mortalidad de los cánceres de piel y representa el menor de los casos de tumores de piel asociados con la sobre exposición a los rayos solares⁸⁵, y aunque son claras las correlaciones positivas relativas a la incidencia de

melanoma maligno cutáneo con la exposición a la radiación ultravioleta, hay otros factores involucrados, ya que no se correlaciona bien con los gradientes de latitudes (es decir, con la insolación) en Australia y en Europa Central⁸⁶.

No obstante, este es uno de los temas que más preocupan en la vigilancia de la capa de ozono a nivel planetario, y tanto los satélites espaciales, como las estaciones de medida en tierra, realizan medidas de radiación UV, tal como vemos en las figuras 74 y 75, porque la mayor incidencia de la luz UV, no solo está asociada a los cánceres de piel, sino también al daño actínico, es decir a las lesiones cutáneas producidas por las radiaciones solares que llegan a la superficie terrestre y que es directamente proporcional al caudal electromagnético emitido por el Sol y la energía total transportada en cada intervalo de radiación UV. El caudal es mayor para la UVA, pero la energía lo es para la UVB y asociadas, producen eritema solar (mayor contribución de la UVB), según el grado de exposición, además de otros daños y reacciones alérgicas.

Por ello es que, la radiación UVB, ligada al ozono, se analiza para determinar las dosis eritemáticas (que producen eritema) diarias.

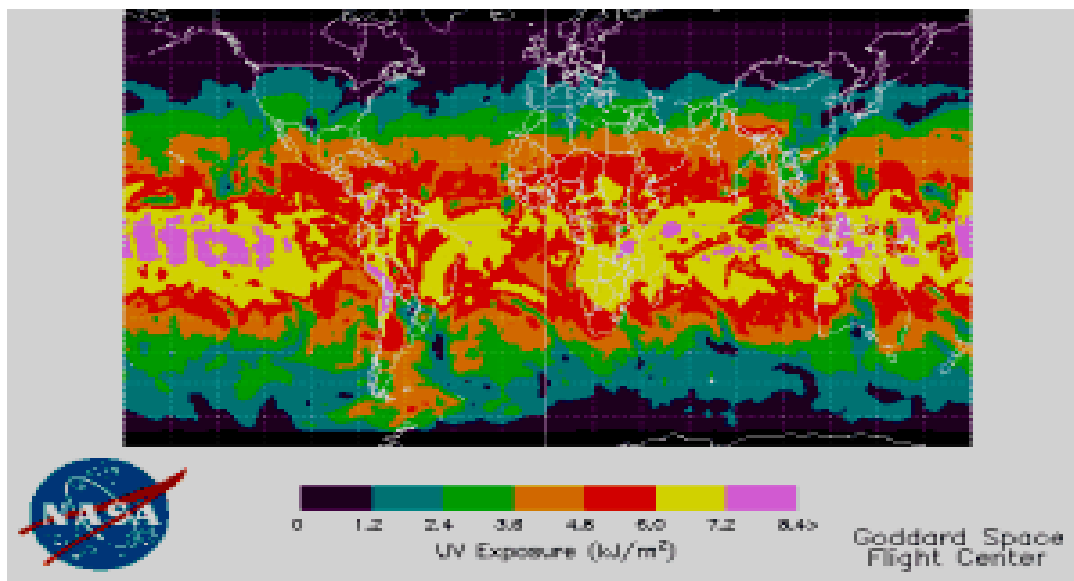


Figura 74.- Gráfico TOMS de la exposición eritemática de luz UV el 17 de Octubre de 2000. Datos del satélite Earth-Probe. Fuente: NASA. <http://www.nasa.gov>.

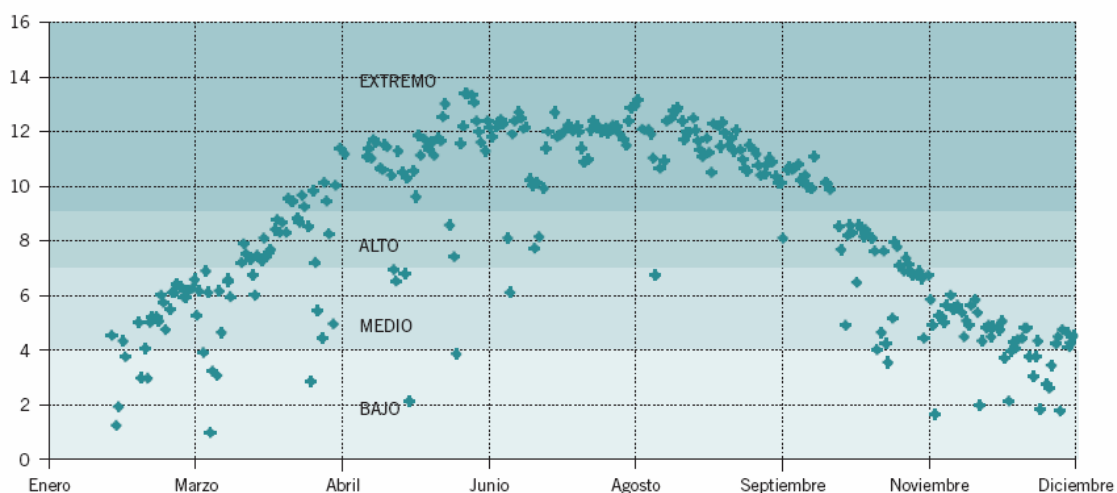


Figura 75.- Índice UV medido a mediodía desde el observatorio de Izaña (Tenerife) en el año 2000. Valores bajos de este índice sólo se registran en los meses de invierno (noviembre-enero). Se trata de valores normales para las condiciones geográficas y atmosféricas asociadas a este Observatorio. Fuente: Instituto Nacional de Meteorología. <http://www.inm.es>.

El índice de radiación ultravioleta que se utiliza, aceptado internacionalmente, es el siguiente:

- ☀ **Entre 0 y 3,9:** Índice **bajo**; tiempo superior a 1 hora para que se produzcan quemaduras en la piel.
- ☀ **Entre 4 y 6,9:** Índice **moderado**; 30 minutos para que se produzcan quemaduras en la piel.
- ☀ **Entre 7 y 8,9:** Índice **alto**; 20 minutos para que se produzcan quemaduras en la piel.
- ☀ **Superior a 9:** Índice **extremo**; tiempo inferior a 15 minutos para que se produzcan quemaduras en la piel.

También se elabora otro índice, el MED o dosis eritematosa mínima requerido para desarrollar un eritema en piel no protegida, 24 h después de la exposición y que es función del tipo de piel.

9.- La vigilancia de la capa de ozono en España.

Desde el año 2000, el Instituto Nacional de Meteorología tiene seis estaciones para la vigilancia y observación de la capa de ozono (La Coruña, Madrid, Zaragoza, Murcia, Izaña y Santa Cruz en Tenerife), equipadas con espectrofotómetros Brewer (figura 76). En las estaciones de Madrid y Santa Cruz, se realizan sondeos semanales de distribución en columna (cantidad total de ozono que se encuentra en una columna de aire vertical por encima de una posición determinada desde el suelo), con globos sonda. Los datos que se obtienen, se envían al Centro Mundial de Datos de Ozono



(Canadá) y contribuyen a la confección de los mapas de espesor total de ozono en el hemisferio norte que, por encargo de la OMM, realiza diariamente la Universidad de Tesalónica de noviembre a marzo. Como ejemplo, en el gráfico de la figura 77 se muestran los datos correspondientes a la estación de Madrid, en el año 2000.

Figura 76.- Espectrofotómetro Brewer. Se puede utilizar en tierra o en globos sonda.

Fuente: <http://cloudbase.phy.umist.ac.uk>.

Estas estaciones de medida, forman parte de la red BAPMoN (Background Atmospheric Pollution Monitoring Network), inaugurada en España el 26 de marzo de 1985 (BOE n.º 143, 15 de junio de 1984) y se integran en la Red de Vigilancia Atmosférica Mundial (VAM, GAW/Global Atmospheric Watch), constituida por un total de trece estaciones a nivel planetario. Esta red, coordinada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es la encargada de la detección de posibles modificaciones en las características físico-químicas de la atmósfera de fondo.

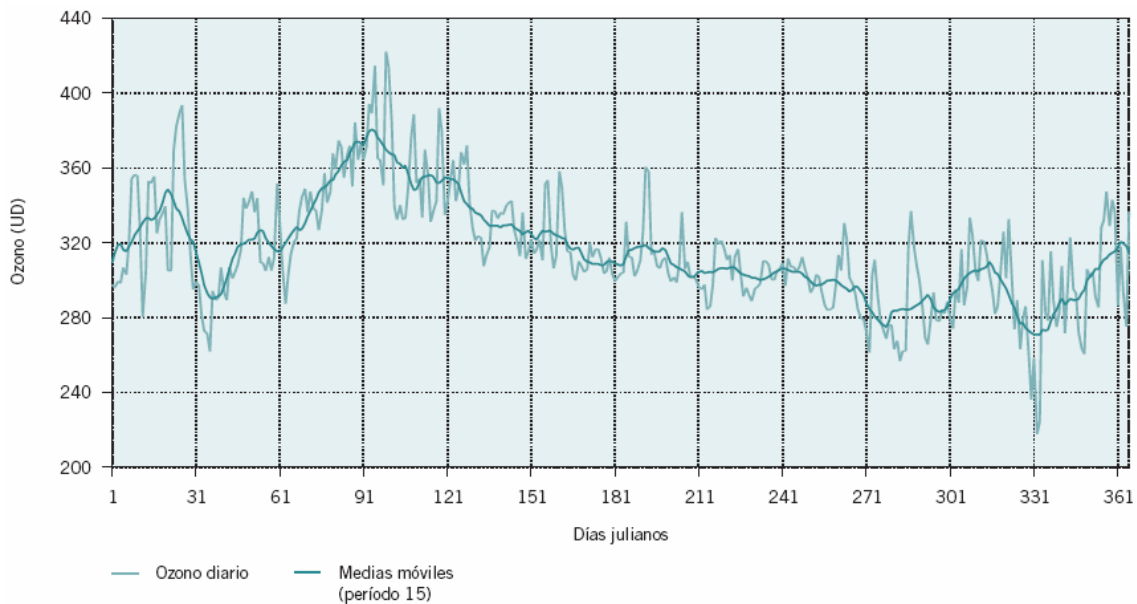


Figura 77.- Medidas de ozono total en columna de la estación de Madrid en el año 2000. Datos obtenidos con un espectrofotómetro Brewer. Se puede observar un máximo en primavera. Fuente: Instituto Nacional de Meteorología. <http://www.inm.es>.

CONCLUSIONES

La teoría de que el cloro, procedente de los CFCs, destruye la capa de ozono estratosférica y genera el llamado agujero de ozono de la Antártida, en conjunción con las PSC y la luz solar, es actualmente la aceptada por los Organismos Internacionales y cuenta con un amplio consenso dentro de la comunidad científica internacional.

Esta teoría, formulada en su origen por Molina, dejó una gran huella y debido a ella, se firmó el Protocolo de Montreal, que reguló la producción y comercialización de los CFCs, y las normativas comunitarias posteriores que establecieron plazos para su sustitución. Esa repercusión se trasladó también al mundo científico y por primera vez, la Academia Sueca concedió un Nóbel para trabajos de investigación relacionados con el medio ambiente, aunque tuvo que atravesar serias dificultades, ya que los galardonados con el Premio Nóbel de Química de 1995, Molina y Rowland, realizaron sus investigaciones exclusivamente en el laboratorio y no en la Antártida, donde en

ese momento no se tenía conocimiento del agujero de ozono. Fue necesario que la química medioambiental y la meteorología complementasen las predicciones de Molina; primero con la medición de las concentraciones estratosféricas de CFCs, y segundo con la evidencia demostrada en 1985, del agujero de ozono de la Antártida, con una disminución de la concentración de ozono del 35% con respecto al año 1958, paralela al incremento atmosférico de las concentraciones de CFCs.

Los sustitutivos de los CFCs, los HCFCs y HFCs, ya se están comercializando, relevando a los CFCs en sus usos, en especial en los acondicionadores de aire, frigoríficos y congeladores.

Todo ello, ha significado un gran triunfo de la ciencia, y de los grupos ecologistas, pero quien ha dado un paso de gigante es la humanidad, para resolver los problemas de contaminación a nivel global. Seamos optimistas, y confiemos en que a este primer paso, sigan otros aunque sea despacio, y que el próximo sea la disminución de las emisiones de los gases de efecto invernadero, que estudiaremos en el capítulo 5.

CAPÍTULO 2

LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DERIVADOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA Y SU CONTROL

1.- Definiciones.

En el capítulo anterior, hemos manejado los términos de contaminación y contaminante. Es tiempo de hacer una pausa, y ver lo que significan.

La ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en México, define la contaminación como: “La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico”.

El diccionario de la Real Academia Española, define el contaminar, como “alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos”.

Una definición científica de contaminación, es la dada por Bishop, que establece la contaminación del aire como: “La presencia en la atmósfera de uno o más elementos, en cantidad suficiente, de características o permanencia tales que causen efectos indeseables en el ser humano, las plantas, la vida animal o las construcciones y monumentos, o que interfieran con el esparcimiento del ser humano. Estos elementos pueden ser polvo, emanaciones, olores, humos o vapor”. En realidad, podemos simplificar la definición de contaminación atmosférica a: **“La presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza”^{XXVII}**.

^{XXVII} Ley 38/1972, de Protección del medio ambiente atmosférico. España. BOE del 16/12/72.

Consecuentemente, contaminantes serán aquellas sustancias que pueden dar lugar a riesgo o daño, para las personas o bienes en determinadas circunstancias.

2.- La composición del aire y los gases atmosféricos contaminantes.

El aire que respiramos está compuesto de una manera natural y masiva de nitrógeno y oxígeno, en las proporciones que se aprecian en la Tabla VI, donde se da la composición total del aire.

Tabla VI.- Composición natural del aire. Fuente: Diversos Tratados generales de Química.

COMPONENTE	%VOLUMEN	% PESO
NITRÓGENO	78,03	75,58
OXÍGENO	20,99	23,08
ARGÓN	0,94	1,28
DIÓXIDO DE CARBONO	0,035	0,053
NEÓN	0,0024	0,0017
OTROS GASES INERTES	0,0024	0,0017
HIDRÓGENO	0,00005	0,000004

Toda sustancia que altere esa composición del aire, se considera contaminante¹⁴. Los principales gases que contaminan el aire y que se consideran potencialmente tóxicos son: Ozono^{xxviii}, SO₂, CO, NO, y COVs^{xxix}. Algunos de estos últimos son carcinógenos, como el benceno y el butadieno.

^{xxviii} Referido a ozono troposférico.

^{xxix} Compuestos orgánicos volátiles.

3.- Tipos de contaminantes atmosféricos y sus fuentes.

Podemos clasificar a los contaminantes del aire, según sus fuentes, en:

- **Naturales.** Si provienen de fuentes naturales de contaminación.
- **Antropogénicos.** Si su origen es de una fuente antropogénica.

Los contaminantes naturales suelen estar en cantidades mayores que los de las actividades humanas, sin embargo los contaminantes antropogénicos representan la amenaza más significativa a largo plazo para la biosfera.

Las **Fuentes Naturales** de contaminación del aire son muy diversas e importantes y las resumimos en la Tabla VII.

Tabla VII.- Contaminación natural del aire. Fuente: Portal de Internet “Educación Ambiental”. Recursos naturales. Los contaminantes atmosféricos.

Fuente	Contaminantes
Volcanes	SO _x , partículas
Fuegos (forestales)	CO, CO ₂ , NO _x , partículas
Vendavales	Polvo
Plantas (vivas)	Hidrocarburos, polen
Plantas (descomposición)	Metano, sulfuro de hidrógeno
Suelo	Virus, polvo
Mar	Partículas de sal

Por su parte, las **Fuentes Antropogénicas**, se pueden clasificar, según su origen en^{xxx}:

- TRANSPORTE

Debida a los vehículos de motor, aviones, trenes, barcos y el consecuente manejo de los combustibles que utilizan.

- COMBUSTIÓN ESTACIONARIA

En hogares, comercios, energía industrial, incluyendo termoeléctricas.

- PROCESOS INDUSTRIALES

Como son los químicos, metalúrgicos, refinerías, papeleras, etc.

- OTRAS

Quemas agrícolas, basureros, incendios, fugas, derrames, etc.

Otra importante clasificación de los contaminantes atmosféricos en base a como son emitidos y a su formación, es en¹⁵:

- PRIMARIOS.

Son las sustancias contaminantes vertidas directamente a la atmósfera.

- SECUNDARIOS.

Al contrario de las anteriores no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la misma.

Los **contaminantes primarios**, provienen de muy diversas fuentes y dan lugar a un tipo de contaminación llamada **convencional**. Su naturaleza física y su composición química resultan muy variadas, pero podemos agruparlos atendiendo a su peculiaridad más característica, tal como su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (para los contaminantes gaseosos).

^{xxx} Clasificación de Peavy, 1986.

Los principales contaminantes primarios del aire, son: aerosoles, entre los que se incluyen las partículas sedimentables y en suspensión y los humos; SO_x , CO, NO_x , hidrocarburos (HCs) y ozono. También se incluyen como contaminantes primarios, a: otros derivados del azufre, halógenos y sus derivados, arsénico y sus compuestos, componentes orgánicos, partículas de metales pesados y ligeros y de sustancias minerales como el asbesto y amianto y sustancias radiactivas.

Es más difícil el establecer cuales son los contaminantes secundarios del aire, ya que las reacciones químicas que se establecen en la atmósfera son muy complejas, con catálisis en fases homogénea y heterogénea, con la formación de numerosos y a veces poco identificados compuestos. Por tanto, a veces se prefiere mas hablar de contaminación secundaria, entendida como la alteración producida por los contaminantes secundarios. Las tres principales perturbaciones de este tipo son: la contaminación fotoquímica, producida por las partículas y oxidantes fotoquímicos; la acidificación del suelo por las lluvias ácidas debida a sulfatos y protones y la destrucción del ozono estratosférico, debida fundamentalmente al cloro y al bromo formado a partir de reacciones atmosféricas con los freones y halones.

3.1.- Partículas.

Las partículas presentes en la atmósfera como contaminantes, se pueden clasificar en:

- Partículas suspendidas totales o PST.

Son las partículas que se mantienen flotando. Este término se corresponde con una amplia fuente de sustancias sólidas o líquidas, orgánicas o inorgánicas, dispersas en el aire, procedentes de fuentes naturales y antropogénicas. La definición de partículas se suele establecer en términos de la velocidad de depósito de las mismas. En este sentido, se denominan “partículas en suspensión” (PSS) a aquellas con diámetros desde $<0,1\mu$ hasta 30μ , que permanecen suspendidas durante horas o días.

Los compuestos constituyentes de las partículas varían mucho según las fuentes locales, pero en general, los principales componentes son el carbono, material alquitranado (hidrocarburos), material soluble en agua, como el sulfato de amonio, y material insoluble conteniendo pequeñas cantidades de hierro, plomo, manganeso y otros elementos, como por ejemplo, el polen.

Estas partículas se pueden filtrar por tamaños, dando lugar a las dos categorías siguientes:

- PM10 o partículas de fracción respirable.

Son partículas cuyo diámetro es menor o igual a 10μ .

Están compuestas de aerosoles, polvos, metales, productos de combustión, o bien microorganismos como protozoos, bacterias, virus, hongos y polen.

- PM2,5.

De diámetro menor o igual a $2,5\mu$. Un 40% de ellas son retenidas en los bronquios y en los alvéolos. Esta fracción no es emitida directamente a la atmósfera, sino que se forma en ésta como producto de reacciones fotoquímicas y procesos físicos.

Está compuesta de partículas finas y ultrafinas, provenientes del diesel o carbón y de metales, como Pb, Zn o Cu.

Otro tipo de partículas, son los humos negros. Se habla de “humos negros” en el caso de partículas con capacidad de tizar, refiriéndose sólo a la sustancia oscura característica de la combustión incompleta del carbón y de los hidrocarburos.

La contaminación por partículas puede causar muchos problemas de salud en el hombre; a corto y a largo plazo producen una disminución de la función pulmonar, lo que contribuye a la presencia de enfermedades crónicas respiratorias y a la muerte prematura. Se estima que el riesgo de morir tempranamente, aumenta en un 2-8% por cada incremento de 50 mg de PM10 en el aire. Además pueden causar cáncer, provocan la destrucción de plantas y corrosión de materiales, acumulo de suciedad, e

interfieren con la luz del sol al formar nubes contaminantes. En México, la Secretaría de Salud¹⁶ ha observado un exceso de mortalidad asociada a niveles elevados de contaminación por PST, en especial en la población mayor de 65 años. También, estudios realizados en el distrito federal demuestran que las partículas PM10 se asocian con una mayor presencia de síntomas respiratorios, así como con el desarrollo de crisis asmáticas^{xxxI}.

Las partículas que constituyen la fracción PM10, son poco estables y sedimentan rápidamente, mientras que las de la PM2,5, tienen una vida media muy larga y forman aerosoles muy estables.

Hay muchas acciones antropogénicas, que dan origen a la contaminación por partículas, de las que destacamos las siguientes: La destrucción de la vegetación, que a su vez causa la erosión del suelo. Los incendios, principalmente en las épocas de sequía. Algunos procesos industriales que generan gran cantidad de polvos. Las actividades humanas que requieren la quema de combustibles como carbón, leña y derivados del petróleo. Además, la inadecuada disposición de la basura y el fecalismo al aire libre, son también emisores de microorganismos, quistes, esporas, polen, etc., que pueden quedar adheridos al polvo.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario atacar estos problemas directamente para disminuir la contaminación de partículas suspendidas.

La revisión de las guías de calidad del aire de la OMS, así como la normativa europea, establecen límites referidos a PM10 y PM2,5, con especial importancia para estos últimos, por estar asociados con compuestos más tóxicos¹⁷. Así, la normativa europea establece unos niveles anuales límites de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el año 2005 y de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2010.

^{xxxI} Comisión Ambiental Metropolitana. México. 1996.

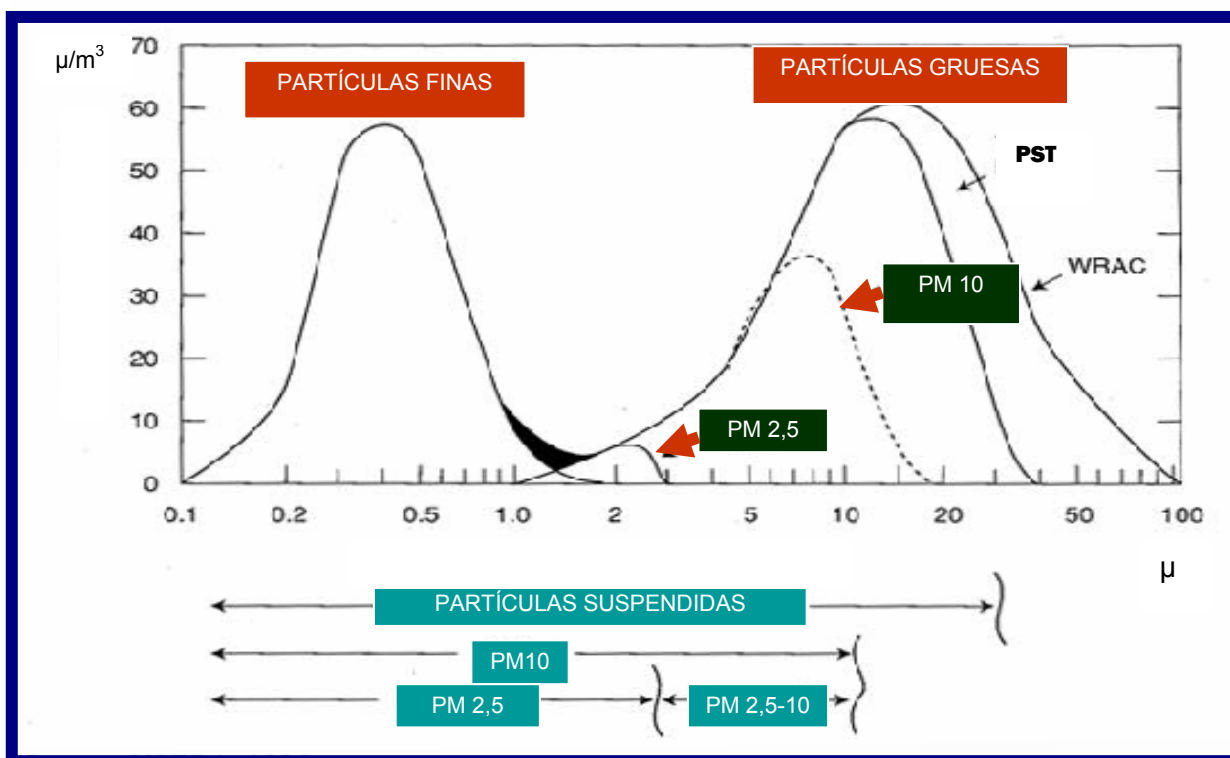


Figura 26.-Distribución logarítmica de las partículas según su masa. Las PST comprenden hasta un tamaño de 30 μ . La fracción PM10 hasta las 10 μ y la PM2,5 hasta las 2,5 μ . Si bien en el caso de las PM2,5 la distribución máxima de partículas está en las 2,5 μ , no sucede igual en la fracción PM10, que es de 8 μ . Las partículas finas, se sitúan entre las 0 y 2 μ , con un máximo a 0,4 μ , mientras que las gruesas están entre las 2 y 100 μ con un máximo alrededor de las 15 μ .

Según sus características físico-químicas, podemos agrupar a las partículas en dos tipos: partículas **finas** y partículas **gruesas**, que se distribuyen según su masa en el ambiente de los aerosoles, tal como se muestra en la figura 26, y donde se establecen las características de cada una de ellas en función de sus diámetros.

Las partículas finas están compuestas de gases y las gruesas de sólidos en forma de aerosol y gotitas. Las características de estos dos tipos de partículas, se muestran en la Tabla VIII, de donde cabe destacar el tiempo de vida y la distancia que recorren. Así, mientras las partículas finas tienen un tiempo de vida largo, de semanas, las gruesas solo duran minutos o algunas horas. De igual manera, las distancias que

recorren las partículas finas son muy superiores a las de las gruesas, resultando que las primeras pueden viajar de cientos a miles de kilómetros, mientras que las gruesas apenas viajan unas decenas de kilómetros o menos.

Tabla VIII.- Tabla comparativa entre partículas finas y gruesas. Fuente: OMS.

	Finas	Gruesas
Formado de	gases	sólidos/gotitas
Formado por	reacciones químicas; condensación; nucleación; evaporación nieblas y gotitas en las que se disuelven y reaccionan y gases.	disrupción mecánica (molido, trituración abrasión de superficies), evaporación de sprays y polvo en suspensión.
Compuesto de	SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , H^+ ; C; compuestos orgánicos, metales (Pb, Cd, Zn, Mn, Fe) y partículas unidas al agua.	polvo resuspendido; polvo de carbón; ceniza; óxidos metálicos de Si Al, Ti Fe; CaCO_3 ; NaCl; polen; esporas; fragmentos de planta/animales y basuras.
Solubilidad	muy solubles higroscópicas y deliquescentes.	muy insolubles no higroscópicas.
Fuentes	combustión carbones, aceites, gasolinas y madera; transformación atmosférica de NO_2 SO_2 y compuestos orgánicos Incluyendo especies biogénicas, procesos a altas temperaturas y fundiciones.	resuspensión de polvo de carbón industrial; polvo de camiones en carreteras; suspensión de polvo (carreteras no pavimentadas, minas); fuentes biológicas; construcción y demoliciones; combustión de aceite y carbón; spray solar.
Tiempo de vida	días a semanas	minutos a horas
Distancia recorrida	100s a 1000s km	<1 a 10s km

3.2.- Óxidos de azufre.

La principal fuente de emisión de óxidos de azufre, es la de los combustibles fósiles que contienen azufre, en especial el carbón. El principal compuesto de azufre que se lanza a la atmósfera es el dióxido de azufre¹⁸, el cual es un gas incoloro, que puede permanecer en la atmósfera entre 2 y 4 días, y durante ese tiempo, puede ser transportado a miles de kilómetros y transformarse en ácido sulfúrico, que precipita en

alguna otra región lejos de su origen, en forma de **lluvia ácida**^{xxxii}. Tanto el dióxido de azufre, como el ácido sulfúrico y los sulfatos, son irritantes de las mucosas del tracto respiratorio, pudiendo ocasionar enfermedades crónicas del sistema respiratorio, como bronquitis y enfisema pulmonar.

En una atmósfera con partículas suspendidas, el efecto dañino de los óxidos de azufre se incrementa, ya que el dióxido y el ácido sulfúrico paralizan los cilios del tracto respiratorio y de esta manera, las partículas de polvo penetran en los pulmones arrastrando también los compuestos azufrados, originando entonces graves daños, e incluso la muerte.

En las plantas, el SO₂, también ocasiona daños irreversibles en los tejidos, sobre todo en días soleados.

Por su parte, el ácido sulfúrico ataca los materiales de construcción como el mármol, la cantera, la cal y el mortero y muchos de los monumentos, edificios, esculturas e iglesias se han deteriorado por esta causa. Además, daña las telas, como el algodón, el lino, el rayón y el nylon. En las bibliotecas, las hojas de los libros se tornan amarillas. Los artículos de piel se resecan y los metales se corroen.

Las guías de la OMS de calidad del aire para Europa recomiendan no superar concentraciones medias diarias de 125 mg/m³ de SO₂, con máximos de 10 minutos de 500 mg/m³ y valores medios anuales de 50 mg/m³.¹⁹

3.3.- Monóxido de carbono.

Es un gas, difícil de detectar, ya que es inodoro e incoloro, que a bajas concentraciones, no produce efectos tóxicos, pero a elevadas si que puede afectar

^{xxxii} Es un ejemplo que engloba los dos tipos de contaminación. El SO₂, es el contaminante primario, pues es emitido directamente desde una fuente, y se transforma por reacciones químicas en el contaminante secundario, H₂SO₄, que origina una contaminación secundaria, la lluvia ácida.

seriamente el metabolismo respiratorio debido a la alta afinidad de la hemoglobina por éste compuesto (figura 27), de tal manera que las emisiones de CO en un área cerrada pueden causar la muerte por insuficiencia cardíaca.

La cantidad absorbida de CO aumenta con su concentración en el medio ambiente, con el tiempo de exposición y con la actividad física. Sin embargo, también la exposición a bajos niveles puede causar efectos nocivos, en personas sometidas a medicación, que consumen bebidas alcohólicas o se encuentran en lugares elevados y en especial los fumadores²⁰. En la Tabla IX, se muestran los efectos tóxicos del CO para el ser humano, cuando forma parte de la carboxihemoglobina.

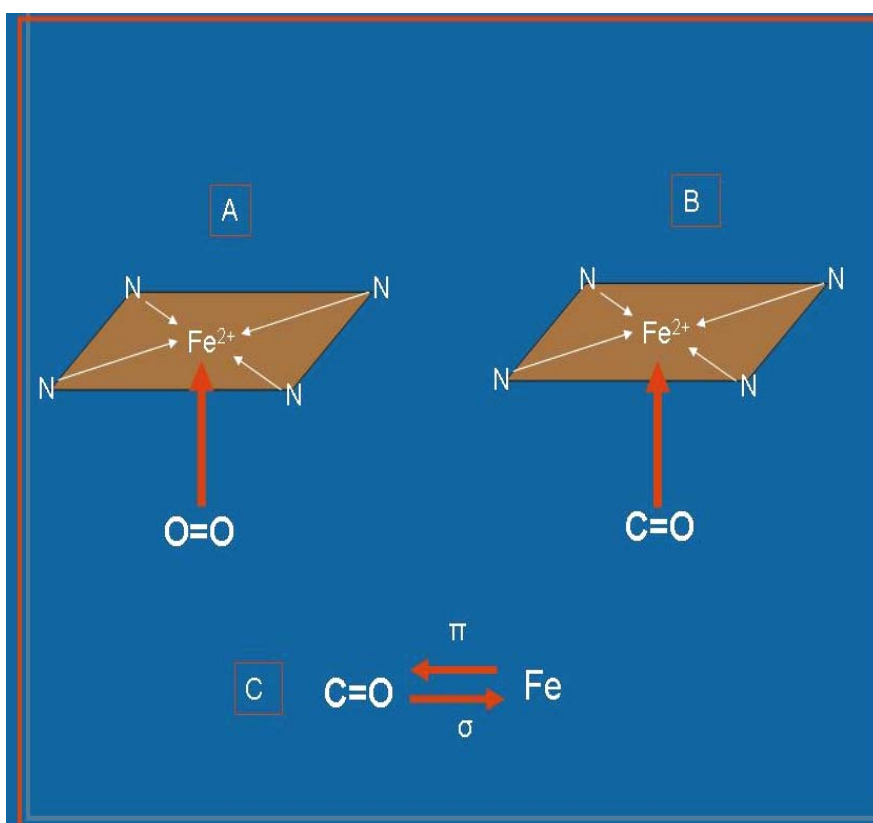


Figura 27.- Estructuras de (A). Oxihemoglobina y (B). Carboxihemoglobina. La alta afinidad por el CO por parte del átomo de Fe^{2+} de la hemoglobina, se debe (C) a la formación de un enlace sinérgico $\sigma \rightarrow \pi$, con la molécula de CO que es extraordinariamente fuerte, y que impide la activación de la molécula de O_2 .

Tabla IX.- Efectos tóxicos de la carboxihemoglobina para el hombre. Fuente: OMS.

% HbCO	EFFECTOS DEL CO EN LA SALUD
<1	Ninguno aparente.
1-2	Alteraciones en la conducta.
2-5	Efectos en el Sistema Nervioso Central: -incapacidad para determinar intervalos de tiempo. -fallos en la agudeza visual. -fallos en la discriminación de la brillantez.
>5	Cambios funcionales cardíacos y pulmonares.
10-80	Dolores de cabeza, fatiga, somnolencia, coma, fallo respiratorio y muerte.

El principal factor de aumento de la concentración de carboxihemoglobina, de entre todos los que hemos indicado anteriormente, es el tiempo de exposición, de tal manera que a la hora, con una concentración ambiental de 100 ppm de CO, la concentración en sangre es del 3,6% y a las 8 h, de casi un 13%, frente a un valor de referencia del 0,8%.

La fuente principal de emisión de monóxido de carbono, la constituye los motores de combustión interna, ya que los procesos industriales y la generación de energía, no emiten tanta cantidad de CO.

El CO se oxida rápidamente a CO₂ en atmósfera de O₂, por lo que sus mayores efectos tóxicos se manifiestan en atmósferas pobres de O₂ y en combustiones incompletas.

Para el monóxido de carbono, los valores máximos recomendados por la OMS son: concentraciones medias en 8 horas de 10 mg/m^3 y valores máximos horarios de 30 mg/m^3 .

3.4.- Óxidos de nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno conocidos son: N_2O , NO , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 ^{xxxiii} y también podemos considerar el radical $\text{NO}_3^\bullet$, que se forma en reacciones atmosféricas muy relacionadas con procesos de contaminación.

El dióxido de nitrógeno, NO_2 , es uno de los principales gases contaminantes atmosféricos²¹ ya que puede formar ácido nítrico y ácido nitroso, componentes de la lluvia ácida, por reacción con agua. Además, irrita los alvéolos pulmonares y puede llegar a ser mortal en altas concentraciones. El NO_2 es más abundante en interiores de viviendas y fábricas que en el exterior, en contraste por ejemplo, con otros gases contaminantes a nivel troposférico, como el ozono. Este hecho, se debe a que una fuente importante de este contaminante es la de las estufas de gas y los quemadores o calderas industriales. Los efectos tóxicos del NO_2 , dependen de su concentración ambiental, tal como se muestra en la Tabla X.

El óxido nítrico NO , puede unirse a la hemoglobina, de una manera semejante al CO , y reducir la capacidad de transporte de oxígeno de la proteína, aunque el efecto tóxico del NO es leve y no es tan preocupante como el del CO .

En general, los óxidos de nitrógeno, denominados NO_x , generan junto con los hidrocarburos, la llamada contaminación fotoquímica, cuyo principal componente por reacciones secundarias, es el ozono. Los óxidos de nitrógeno son producidos principalmente, por el transporte y por la utilización de combustibles en la industria y, generación de energía.

^{xxxiii} Son respectivamente: el óxido nitroso o monóxido de dinitrógeno N_2O , los monóxido NO y dióxido NO_2 de nitrógeno y los trióxido N_2O_3 , tetraóxido N_2O_4 , y pentóxido N_2O_5 de dinitrógeno.

Tabla X.- Concentraciones de NO₂ y alteraciones que producen en el ser humano.**Fuente: OMS.**

CONC. ppm	EFFECTOS
1-3	Concentración mínima detectable por el olfato.
13	Irritación de nariz, garganta y ojos.
25	Congestión. Enfermedades pulmonares.
100-1000	Puede ser mortal incluso con una exposición breve.

Las guías de la OMS de calidad de aire para Europa recomiendan no superar valores horarios de concentraciones de óxidos de nitrógeno de 200 mg/m³ y medias diarias entre 40 y 50 mg/m³.

3.5.- Hidrocarburos.

Es un contaminante importante, ya que muchos componentes de la gasolina y otros derivados del petróleo son hidrocarburos. Estos, mediante procesos fotoquímicos en la atmósfera, reaccionan con los óxidos de nitrógeno para formar nitrato de peroxiacetilo (PAN) y ozono, entre otros compuestos.

Algunos tipos de hidrocarburos son tóxicos, otros no y muchos de ellos no representan un problema para la salud, pero debido a que contribuyen a la formación de ozono, y por tanto son precursores de las nieblas fotoquímicas, se consideran como contaminantes a tener en cuenta en cualquier control de emisiones.

Además, los hidrocarburos aromáticos son agentes potencialmente cancerígenos. Existen estudios, que indican que algunos de estos hidrocarburos se forman durante la combustión incompleta de casi cualquier material orgánico, como son las grasas, carnes, café, azúcar, y el humo de cigarrillos.

El tráfico rodado y el transporte de mercancías, se considera la mayor fuente de emisión de hidrocarburos a la atmósfera, debido a la combustión incompleta en los motores de los vehículos. Las emisiones de evaporación en las maniobras de carga y descarga de combustible en gasolineras o en los grandes contenedores de almacenamiento, contribuyen también a la emisión de estos a la atmósfera.

3.6.- Ozono.

El ozono que se emite o genera a nivel troposférico^{xxxiv}, también es un gas contaminante y de efectos nocivos para el hombre, animales y plantas, tanto que se considera como un grave problema de salud en numerosas poblaciones, y su control cada vez es más exigente.

Es el principal oxidante fotoquímico presente en la atmósfera, además del nitrato de peroxiacetilo (PAN) y es un compuesto muy irritante del sistema respiratorio²², produciendo tos, flema, dolor al respirar e inflamación en el tejido pulmonar. Reduce la capacidad respiratoria, disminuye la capacidad mucociliar, y debilita las defensas naturales del aparato respiratorio, de tal manera, que las enfermedades respiratorias son más frecuentes en la población infantil expuesta al ozono. En la población adulta, provoca que la respiración sea más difícil durante el trabajo y el ejercicio, y causa irritación respiratoria general. Los síntomas de irritación, tienden a desaparecer en exposiciones repetitivas al ozono, pero esta “atenuación de la respuesta” no es algo positivo, ya que el hecho de que no haya reacciones a la exposición, no significa que el organismo se haya adaptado al mismo, existiendo evidencias que demuestran que la lesión pulmonar continúa, incluso durante la fase de atenuación^{xxxv}. La exposición al ozono de una forma continuada, origina un problema

^{xxxiv} También hay que tener en cuenta el ozono que llega a la troposfera desde la estratosfera por la tropopausa.

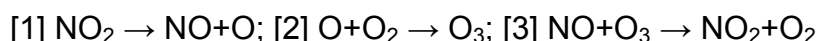
^{xxxv} Trabajos de Gong (1987).

adicional, y es el hecho de que los pulmones no terminan su crecimiento sino hasta que el individuo ha cumplido los 18 años. Los pulmones aún no desarrollados, pueden sufrir un daño temprano por exposición al ozono, y de esta forma puede aumentar el riesgo de contraer una enfermedad respiratoria en la vida adulta.

Para las plantas, también presenta efectos nocivos una exposición al ozono, con retrasos fundamentalmente en el crecimiento de hasta un 50%.

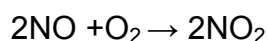
Las recomendaciones de las guías de la OMS de calidad de aire sitúan los valores promedios de ozono para 8 horas en 120 mg/m^3 .

En los meses de verano, es cuando las condiciones de formación de O_3 son más favorables, ya que son reacciones fotocatalíticas, y sus niveles aumentan en áreas rurales aisladas. Las reacciones químicas esquematizadas son las siguientes:²³

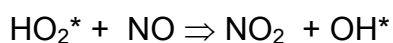


Existe un equilibrio dinámico en esta serie de reacciones cíclicas entre el O_3 , O_2 , O , NO_2 y NO , de formación y destrucción de ozono, que explica que las concentraciones medidas de ozono sean menores en el centro de las ciudades.

En las grandes urbes, es donde hay importantes emisiones de NO producidas por el tráfico rodado, que destruyen a la molécula de O_3 , según la reacción [3]. Sin embargo, en áreas rurales, las reacciones que producen NO_2 sin destruir O_3 alteran el equilibrio, provocando un aumento del O_3 :



Además, la oxidación de COVs por reacciones fotoquímicas, produce un aumento de radicales libres, capaces de convertir NO en NO_2 sin destruir al O_3 ²⁴:



En la figura 28, se muestran estas reacciones en un área rural.

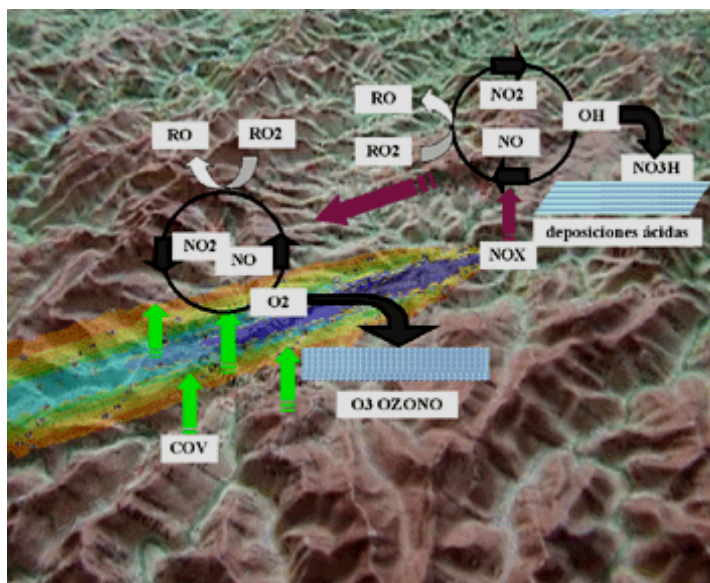


Figura 28.- Esquema de las reacciones de formación de ozono rural. Fuente: Contaminación por ozono en áreas rurales. <http://www.ecolixtesasturies.org>.

3.7.- Plomo.

El plomo es uno de los denominados contaminantes generales, ya que está presente en la atmósfera, aguas y alimentos, siendo sus fuentes más importantes las naturales, de tal manera que su presencia en las cadenas tróficas es muy elevada, con una distribución muy homogénea y por tanto resultando difícil que de alguna manera no entremos en contacto habitual con el.

Sus fuentes naturales más importantes son la erosión del suelo, y las emanaciones volcánicas. Además, es fácilmente biomovilizable desde sus minerales y por tanto, contamina con facilidad el medio biológico. Por otra parte, sus fuentes antropogénicas más importantes, que producen su emisión son: durante su extracción, fundición y refinación; en el procesamiento de minerales no ferrosos y en la combustión de combustibles fósiles, incluyendo su empleo como aditivos antidetonantes para gasolina^{xxxvi}. El plomo que se origina a partir de las combustiones

^{xxxvi} En forma de trietil y trimetil plomo.

de automóviles, se introduce con partículas de tamaño $\leq 1 \mu\text{m}$ en la región interna del pulmón, pasando a sangre. Una vez en ella, se distribuye entre todos los tejidos y órganos del cuerpo, como huesos, hígado, corteza y médula. De esta manera, los principales sistemas del cuerpo humano que se ven afectados por la intoxicación con plomo son: el hematopoyético, el renal, el sistema nervioso central y el periférico.

El plomo que se lanza a la atmósfera tiene una gran importancia como contaminante, debido a que es una fuente de exposición por inhalación para los seres vivos, y su absorción es mucho mayor que por vía digestiva. Además, al igual que otros contaminantes, llega a otras regiones por la acción del viento depositándose en el suelo, en el agua y en la vegetación.

Los primeros efectos tóxicos del plomo se ponen de manifiesto por la presencia de una anemia, debido a la interferencia que origina en la biosíntesis de la hemoglobina y que impide la fijación del hierro al anillo hemo. Si la concentración es elevada, la toxicidad puede generar encefalopatías graves.

4.- Vertidos de contaminantes a la atmósfera y su control.

Como hemos visto anteriormente, los contaminantes de origen industrial y urbano, que se vierten directamente a la atmósfera, pueden ejercer una acción directa o, mediante reacciones químicas, dar lugar a otros contaminantes, que producen una contaminación secundaria.

Por ello, hay que manejar una serie de conceptos, directamente relacionados con su control y que vamos a definir a continuación.

4.1.- Conceptos de emisión e inmisión.

Se define la **emisión**, como el proceso de vertido de un contaminante a la atmósfera, mientras que la **inmisión** es la concentración de contaminantes, una vez emitidos, transportados y dispersados en ella. El hecho, es que en un punto determinado se produce una concentración de cada contaminante, que se expresa como la cantidad de contaminante por metro cúbico de aire y se conoce como **nivel de**

inmisión. La unidad más empleada en los países europeos para medir la concentración es el microgramo por metro cúbico: $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la 29, hemos elaborado un esquema que simplifica estos conceptos.

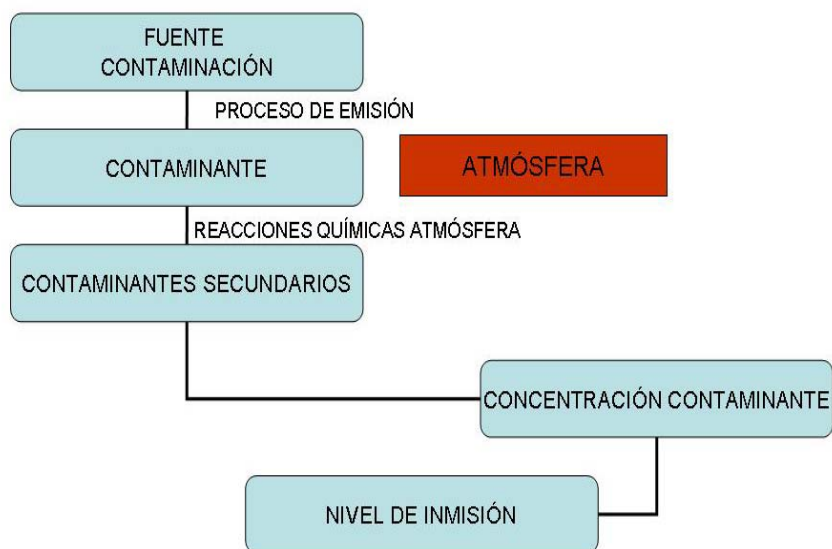


Figura 29.- Esquema representativo del proceso de emisión y nivel de inmisión. La fuente de contaminación inicia un proceso de emisión de un contaminante a la atmósfera. Por reacciones químicas, se originan contaminantes secundarios. La concentración atmosférica de cada uno de estos contaminantes es el nivel de inmisión, que es lo que se controla en las ciudades.

4.2.- Control de la contaminación.

El control de la contaminación atmosférica, se puede realizar en los dos niveles; emisión e inmisión. El control de la emisión de contaminantes se realiza mediante **inventarios de emisiones**, en zonas regionales amplias o a nivel nacional, mientras que los niveles de inmisión, se suelen efectuar a nivel urbano o nacional con **estaciones automáticas** de medida. De esta forma, los inventarios de emisiones controlan exclusivamente a los contaminantes primarios, con el objetivo de fijar cual es

la fuente de emisión, mientras que los niveles de inmisión, lo hacen para los dos tipos de contaminación, la primaria y la secundaria.

4.2.1.- Los inventarios de emisiones.

Como hemos indicado, los inventarios de emisiones están destinados a realizar un análisis exhaustivo de los contaminantes primarios en una determinada zona, para obtener una información precisa de las fuentes de contaminación, y controlar las emisiones, buscando soluciones en base a la elaboración de estrategias para paliar la contaminación en una determinada área. Su objetivo es fundamentalmente, encontrar una relación entre la emisión de contaminantes y la fuente productora.

Para ello, primero hay que determinar el tipo de fuentes que se deben controlar en un inventario de emisiones. Estos, clasifican las fuentes de emisión, según su origen, en²⁵:

- Fuentes fijas.

Son de origen industrial.

- Fuentes móviles.

Debidas al tráfico rodado.

A su vez, los inventarios, también dividen las fuentes de emisión, según su importancia, en:

- SUPERFICIALES

Se componen en general de diversas unidades emisoras que, por su reducida significación individual o por la forma en que se presenta su información de base (desglose por unidades territoriales), han de tratarse de forma agregada sobre una determinada área geográfica.

- GRANDES FOCOS PUNTUALES

Son aquellos que, por su significación para el inventario en cuanto a volumen de emisiones, deben tratarse de forma individualizada.

Los contaminantes que se analizan en un inventario de emisiones son los siguientes: SO₂, NO_x, COVs, CH₄, CO y CO₂.

En la Comunidad de Madrid, se ha hecho un inventario de emisiones de este tipo, dentro del proyecto Corine-Aire de la CE.^{xxxvii} Los resultados de este, se pueden resumir en los siguientes datos:

- Emisiones de SO₂.

Son poco importantes, siendo la distribución por sectores de estas emisiones la más repartida.

La combustión comercial, residencial e institucional, la industria y el transporte son los principales contribuyentes.

- Emisiones de COVs y NO_x.

Son considerables.

El sector del transporte es la principal fuente.

- Emisiones de CH₄.

Son importantes.

El sector responsable es el de tratamiento y la eliminación de residuos.

- Emisiones de CO y CO₂.

Son las emisiones más altas de la Comunidad.

En el caso del CO, las emisiones proceden fundamentalmente del transporte, mientras que las de CO₂ tienen un origen más repartido sectorialmente: la combustión comercial, residencial e institucional, el transporte y, en menor medida, los procesos industriales y la naturaleza, son sus principales fuentes.

^{xxxvii} El proyecto Corine-Aire de la CE se inició en el año 1985. Tiene en cuenta como focos emisores: el transporte, la industria, las combustiones de origen comercial, residencial e institucional, tratamiento y eliminación de residuos y las fuentes de origen natural.

El programa Corine-Aire, tiene una metodología para elaborar el inventario de emisiones, que identifica los grandes focos puntuales de emisión, y que sirve de eficaz guía en estos análisis de contaminantes (Tabla XI).

Tabla XI.- Criterios de identificación de grandes focos puntuales. Fuente: Programa Corine-Aire de la UE.

SECTOR	CRITERIO
Centrales Térmicas	Todas las centrales de tipo convencional que tengan una capacidad térmica mayor o igual a 300 MW, con independencia del combustible que utilicen.
Refinerías de petróleo	Todas las plantas de refino de petróleo.
Ácido sulfúrico	Todas las plantas, incluidas las instalaciones para la reducción de las emisiones de SO ₂ en las industrias de metalurgia no-férrea o de cualquier otro tipo.
Ácido nítrico	Todas las plantas.
Plantas integrales de hierro y acero	Las plantas que tengan una capacidad de producción mayor de 3 millones de toneladas por año.
Pasta de papel	Todas las plantas con capacidad de producción mayor de 100.000 toneladas por año de pasta (9% de condición materia seca, preparada para su utilización y envío).
Pintado de vehículos	Todas las plantas con una capacidad en sus líneas de pintado mayor de 100.000 vehículos por año, o volumen equivalente.
Aeropuertos	Los aeropuertos con más de 100.000 ciclos de aterrizajes-despegues (LTO) por año. Dentro del ciclo LTO no se incluye el tráfico a alturas superiores a los 3.000 pies.
Cualquier foco cuyas emisiones de	SO ₂ , NO _x y COV sean mayores de 1.000 toneladas por año; o CO ₂ sean mayores de 300.000 toneladas por año.

A nivel regional, se tienen en cuenta estos parámetros, pero a nivel nacional hay que globalizarlos. Por ello, aquí son importantes aquellos contaminantes que tienen efectos sobre el medio ambiente planetario. Estos, resultan ser:

- SO₂. Es un indicador de la contaminación.
- NO_x. Como precursores del ozono e indicador de contaminación.
- N₂O. Como indicador del cambio climático y precursor de los COVs e indicador de la contaminación.
- CH₄. Otro de los indicadores del cambio climático.

- CO. Otro precursor del ozono.
- CO₂. Considerado el gran responsable del cambio climático.
- NH₃. Incluido para modelos de transporte-dispersión para el estudio de contaminación transfronteriza en las lluvias ácidas.

Un resumen de los resultados de estos inventarios, en España, para el periodo 1980-1996, se muestra en las figuras 30 y 31.

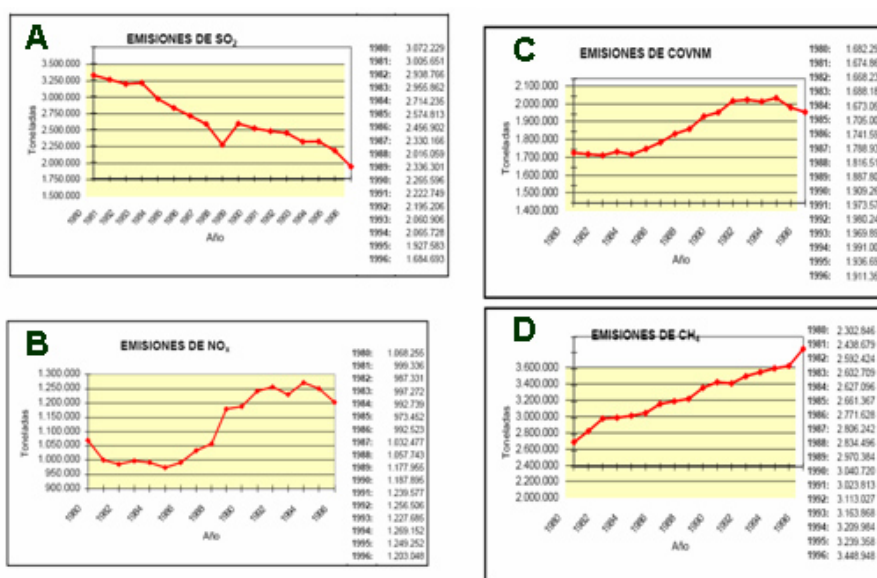


Figura 30.- Evolución de las emisiones de SO₂ (A), NO_x (B), COVs (C) y CH₄ (D) en España para el periodo 1980-1996. Fuente: Programa Corine-Aire de la UE. CCAA Madrid.

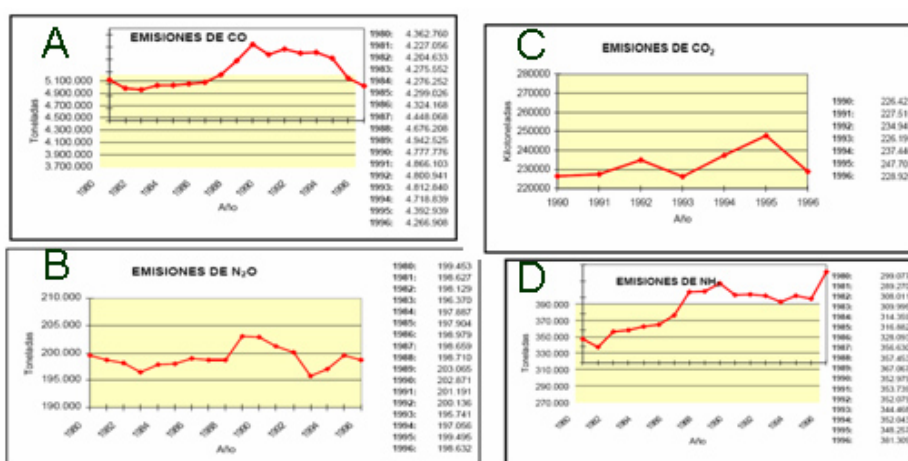


Figura 31.- Evolución de las emisiones de CO (A), CO₂ (B), N₂O (C) y NH₃ (D) en España para el periodo 1980-1996. Fuente: Programa Corine-Aire de la UE. CCAA de Madrid.

Una vez realizado el recuento de contaminantes y focos de emisión, es preciso analizar los resultados. Para ello, se recurre a los llamados **métodos de estimación de emisiones**. Estos métodos, están basados en distintas metodologías, cada una de las cuales cuenta con sus ventajas e inconvenientes. Los principales métodos que actualmente se utilizan son los siguientes:

- Métodos basados en datos de emisiones medidas.

En estos métodos, se parte de la observación directa de la variable de interés que es la emisión. Se utilizan en relación sobre todo a los grandes focos puntuales, excluidos los aeropuertos.

- Métodos basados en balances de materiales.

Basado en un balance simple de materiales, realiza un balance completo.

- Métodos basados en modelos funcionales estadísticos: modelización correlación.

Se basan en los resultados de trabajos previos de estimación de relaciones funcionales o de correlación entre ciertas variables físico-químicas y las emisiones de determinadas actividades.

- Métodos basados en factores de emisión: factores y variables de actividad.

Son los de uso más generalizado en la elaboración de inventarios; es considerado siempre como la opción de reserva (*factores por defecto*) y se aplica únicamente cuando se carece de otra alternativa más precisa para la estimación de las emisiones de una actividad.

4.2.2.- Redes de estaciones automáticas de medida de la contaminación.

Se utilizan en las ciudades para el control de la contaminación urbana. Un modelo a seguir, es la Red de Vigilancia del Excmo. Ayuntamiento de Madrid, fundada en el año 1968, que pertenece al Departamento de Calidad Ambiental, del Área de Medio Ambiente y acreditado como una de las más solventes tradiciones en la medida de contaminantes.

Los contaminantes atmosféricos, que se controlan dependen de las ciudades, pero siempre hay unos, denominados “**contaminantes criterio**”, cuya medida es obligada. Los “contaminantes criterio” son aquellos que se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llama así, porque fueron objetos de estudios de evaluación publicados en documentos de criterios de calidad del aire. En el ámbito internacional, se establece como contaminantes criterio los siguientes: monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono, plomo y partículas.

En las ciudades, estos contaminantes atmosféricos, tienen relaciones entre sí, y manifiestan una serie de tendencias; así, cuando las concentraciones de NO_x y de ozono permanecen constantes o aumentan, el resto descienden^{xxxviii}. Las concentraciones de SO_2 y de las partículas aumentan cuando se intensifican las combustiones. Los NO_x y el ozono aumentan como consecuencia del incremento del tráfico y los COVs aumentan su concentración cuando hay fuentes industriales.

Actualmente Madrid capital, cuenta con una red de control de la contaminación, compuesta de 25 estaciones totalmente automáticas, además de otras dos en el extrarradio, tal como se ve en la figura 32.

Las estaciones, efectúan medidas de las concentraciones atmosféricas de los siguientes contaminantes: dióxido de azufre, partículas en suspensión, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, benceno, tolueno, hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles y ácido clorhídrico. Además, las estaciones cuentan con instrumentos meteorológicos, para medir la radiación UV, temperatura, humedad relativa, presión, velocidad y dirección del viento, factores muy importantes estos últimos para el estudio de la dispersión de los contaminantes. También se miden los niveles sonoros.

^{xxxviii} Estudios de la OMS. 1992.

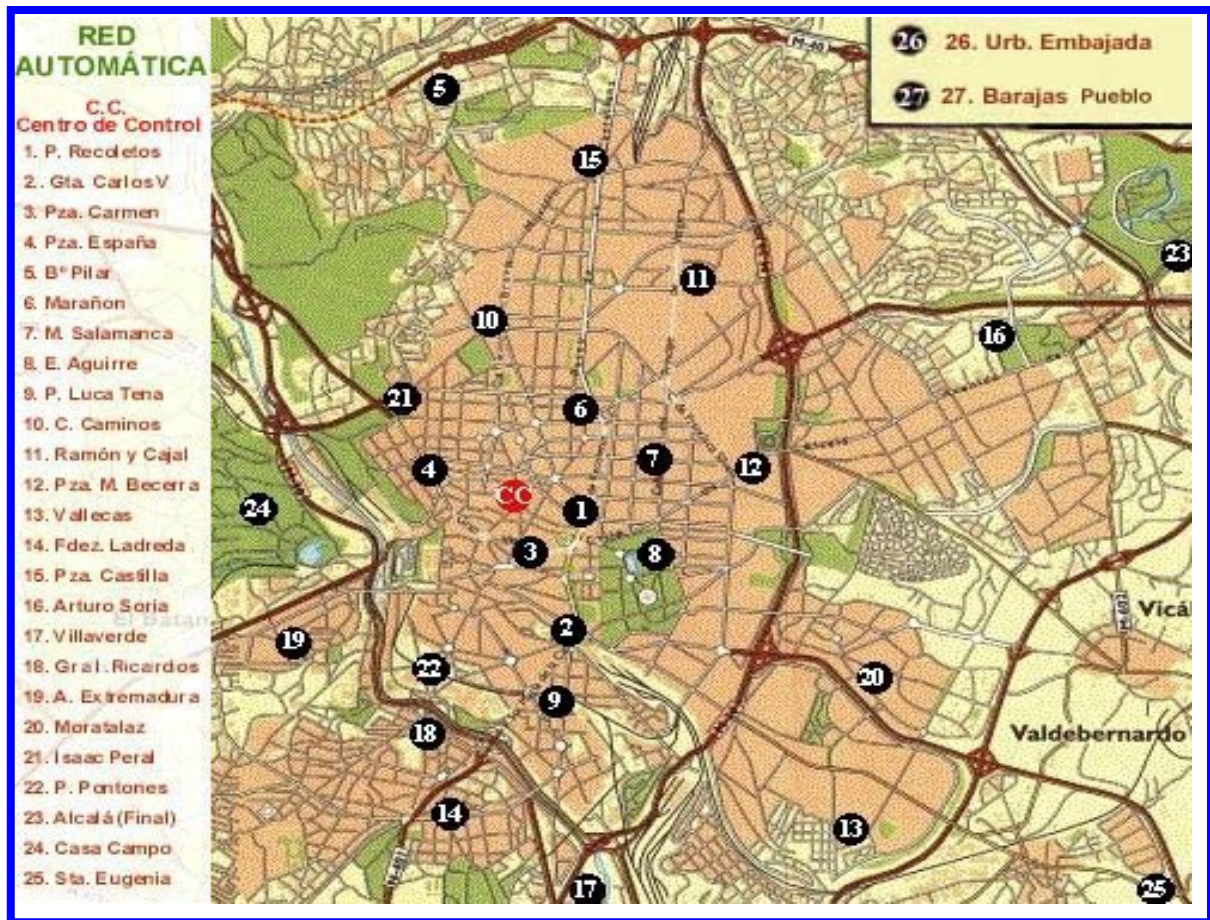


Figura 32.- Red automática de medida de la contaminación en Madrid capital. CC es el puesto central de control. Las estaciones están numeradas del 1 al 25 en el mapa, además de otras dos del extrarradio. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.

No todas las estaciones se encuentran equipadas para la totalidad de las medidas mencionadas. Como ejemplo, podemos citar la estación remota del madrileño Pº de Recoletos, que es la número 1 y que solo mide los siguientes parámetros: concentraciones de SO_2 , PM_{10} , NO , NO_2 , NO_x , CO y de ozono, además de la precipitación de lluvia.

Las estaciones están equipadas con dos compartimentos, uno para albergar las botellas de gases necesarias para los instrumentos de medida, y otro que contiene la instrumentación analítica y el material informático. Un esquema de una estación

remota del Ayuntamiento de Madrid con todos sus componentes, lo podemos ver en la figura 33.

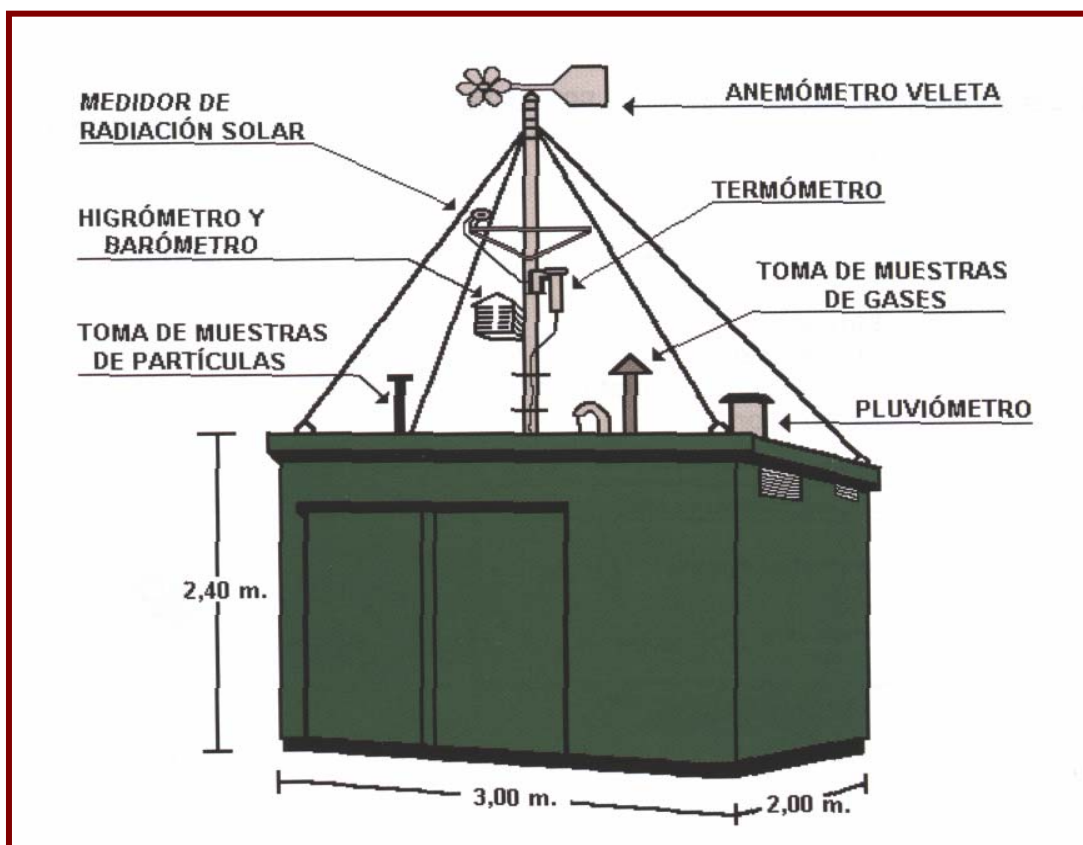


Figura 33.- Esquema de una de las estaciones de medida del Ayuntamiento de Madrid. Las estaciones remotas poseen dos compartimentos: un compartimento de botellas, destinado a albergar las botellas de gases necesarios para la calibración y funcionamiento de los equipos y un compartimento principal donde se encuentran los racks que soportan los analizadores, mesa de trabajo, generador de aire cero, equipo de comunicaciones, tratamiento de datos, etc. Fuente: Ayuntamiento de Madrid. <http://www.munimadrid.es>.

El equipamiento mínimo de analizadores es el de partículas en suspensión (PM₁₀); Dióxido de Azufre; Monóxido de Carbono; Ozono; Óxidos de Nitrógeno e Hidrocarburos. Además, todas ellas cuentan de sensores para medir: Temperatura;

Presión Atmosférica; Humedad Relativa; Velocidad y dirección del viento; Lluvia; Lluvia ácida; Radiación Ultravioleta y Ácido Clorhídrico (figura 33).

Las concentraciones diarias de estas medidas, en tiempo real, son almacenadas en un ordenador central, que analiza los resultados. La estación central está basada en una red RDSI y está dotada de un sistema de gestión de llamadas telefónicas que mediante 8 líneas de teléfono, recibe los datos de las estaciones remotas^{xxxix}. También cuenta con una sala-auditorio para 25 personas, dotada de recursos y superficie suficientes para recibir la visitas de grupos escolares, universitarios, postgraduados, etc. El esquema de funcionamiento de la estación central se muestra en la figura 34.

Los resultados de estas medidas, son expuestos en los paneles de información que el Ayuntamiento ha dispuesto en las calles de Madrid, con tres niveles, bajo, medio y alto, tal como vemos en la figura 35.

Las estaciones remotas no se ubican de una manera arbitraria, sino que obedecen a tres criterios de medidas:

- Tráfico. Miden la influencia del tráfico rodado. Se ubican en calles de intensa circulación.
- Industrial. Se ubican en zonas semiindustrializadas o en polígonos industriales.
- De fondo. Se ubican en zonas residenciales de escaso tráfico y no industrializadas y son de carácter referencial.

Como ejemplo, en la 36 mostramos las concentraciones medias medidas en toda la red para el SO₂, desde el año 1991 al 2001, tanto anuales como mensuales.

^{xxxix} El sistema tiene capacidad para gestionar al menos 32 líneas.

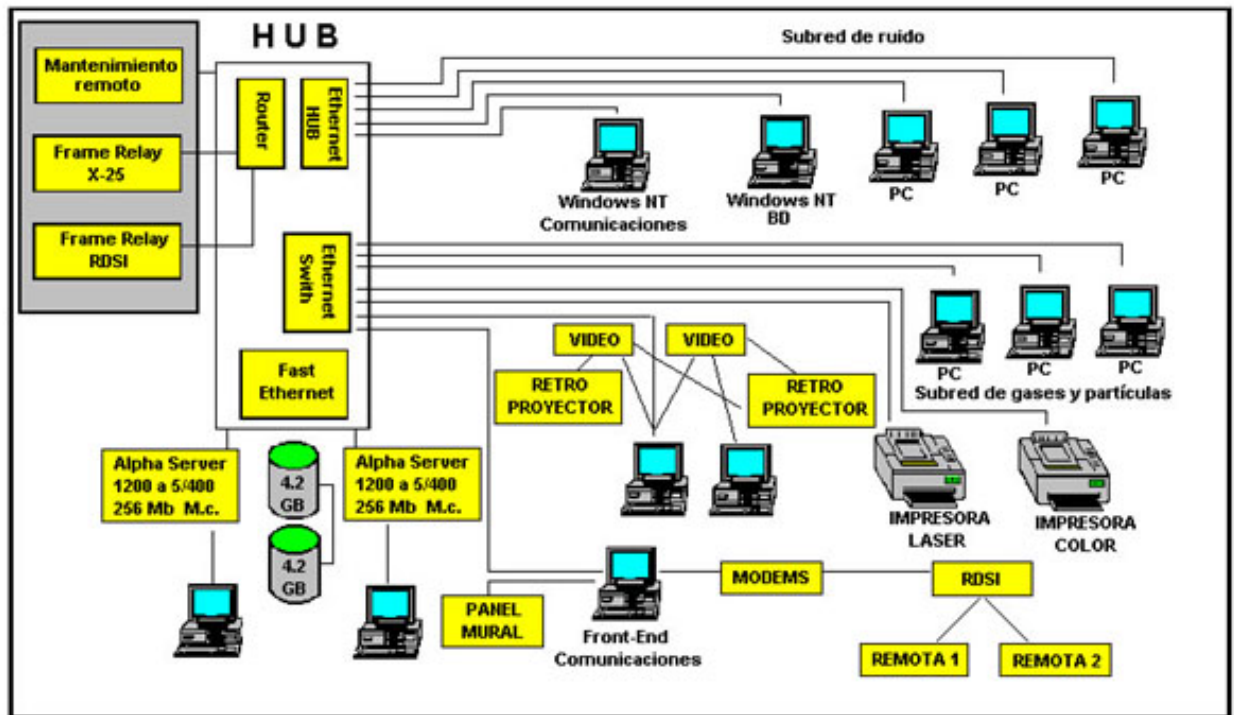


Figura 34.- Esquema de funcionamiento de la estación central de recogida de datos de la red automática del Ayuntamiento de Madrid. Fuente: Ayuntamiento de Madrid. <http://www.munimadrid.es>.



Figura 35.- Uno de los paneles informativos situados en las calles de Madrid que informa sobre los niveles de benceno. Fuente: Ayuntamiento de Madrid. <http://www.munimadrid.es>.

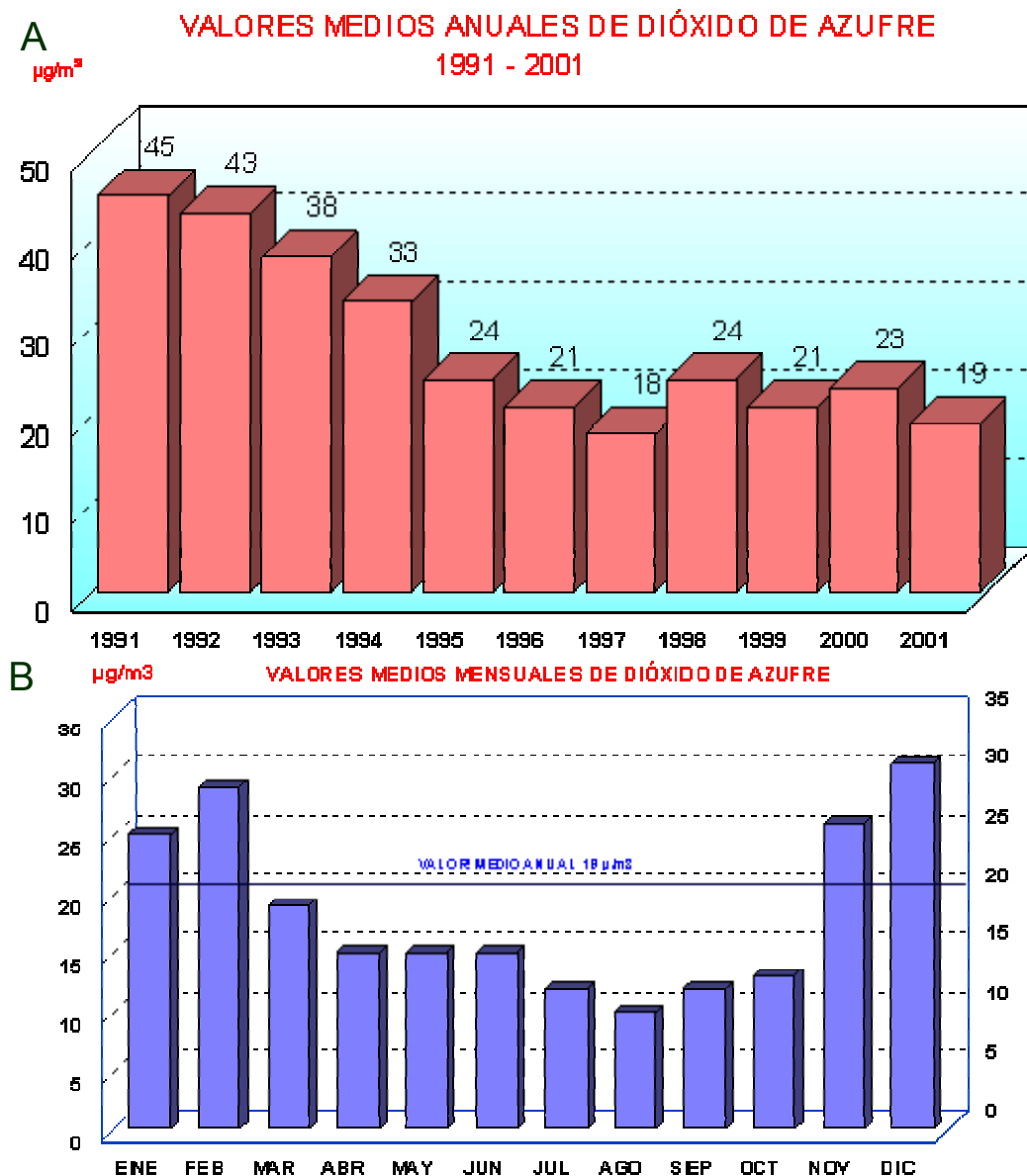


Figura 36.- Valores medios anuales (A) de la red automática del Ayuntamiento de Madrid para el SO_2 y (B) mensuales. Se aprecia una disminución anual desde el año 1991 en las concentraciones de SO_2 , debido a la supresión progresiva de las calefacciones de carbón, principal fuente urbana de este contaminante. Por meses, se aprecia que los invernales, de mayor consumo de los combustibles para las calefacciones, son los de más elevada concentración. Fuente: Ayuntamiento de Madrid. <http://www.munimadrid.es>.

La Comunidad de Madrid, por su parte dispone también de una Red Automática, con nueve estaciones, ubicadas en Alcalá de Henares, Alcorcón, Alcobendas, Fuenlabrada, Móstoles, Getafe, Leganés, Torrejón y Coslada.

Un problema que se plantea en las grandes urbes, es la dificultad de evaluar el nivel de exposición de una persona cuando camina o conduce en medio del tráfico, como se deduce de los estudios realizados en México DF, que demuestran que las concentraciones encontradas en microambientes, como en las banquetas^{XL} de calles de tráfico intenso, o en el interior de vehículos, son mayores que las concentraciones detectadas en las estaciones de medida.

La Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica en el ámbito regional, está integrada en el Programa EMEP (European Monitoring Evaluation Programme), nacido del Convenio de Ginebra sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia, y en la Red BAPMoN (Background Air Pollution Monitoring Network), del Programa para la Vigilancia de la Atmósfera Global, de la Organización Meteorológica Mundial. La gestión y explotación de ambas redes, que miden la contaminación de fondo en áreas rurales^{XLI} son realizadas, conjuntamente por el Ministerio de Medio Ambiente (Instituto Nacional de Meteorología y la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental) y el Ministerio de Sanidad y Consumo (Instituto de Salud Carlos III).

En el ámbito mundial, hay una gran preocupación por el establecimiento de estas Redes de Vigilancia, y ya desde hace décadas, en muchos países se han puesto en marcha, promovidos por Organizaciones Internacionales, Gubernamentales o privadas. La OMS, ha organizado durante la última década, el Sistema de Información de la Gestión de la Calidad del Aire (AMIS), con presencia a nivel mundial y que brinda información global para la gestión racional de la calidad del aire, incluyendo modelos de calidad, elaboración de inventarios de emisiones y todo lo relacionado con las redes de vigilancia de la contaminación atmosférica.

^{XL} Banqueta es equivalente a acera de la calle, paso a lo largo de la fachada de las casas.

^{XLI} La que puede existir alejada de los focos de emisión.

En 1967, la OPS (Organización Panamericana de la Salud), a través del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), crea la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire, conocido por REDPANAIRE, que en 1973 contaba con más de 80 estaciones, distribuidas en 14 países, lo que supuso un gran avance en el control de la contaminación, en los países del Caribe y América Latina, pues ningún país de la OPS conocía la magnitud real de sus problemas. Sin embargo, en una encuesta reciente de la OPS, sólo diez países tienen redes de control de la contaminación, nueve tenían desarrollados inventarios de emisiones y solo seis, habían establecido estándares de calidad del aire. A este respecto, cabe destacar, el esfuerzo realizado por México, que cuenta con inventarios de emisiones en la Zonas Metropolitanas del Valle de México, Guadalajara, Monterrey, Toluca, y Ciudad Juárez. Asimismo, se realiza un control de inmisiones de la ciudad de México, donde se ha establecido un índice de contaminación, el **IMECA** (Índice Metropolitano de Calidad del Aire), en el que se representa con un valor de 100 puntos, el límite considerado como satisfactorio. Igualmente, todos los días, a través de la radio, la televisión, los periódicos y algunas pantallas colocadas en los principales cruces, se informan de las condiciones del aire, que mide constantemente la denominada Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).

Además de las Redes de Vigilancia, se establecen otros controles en el ámbito supranacional. Por ejemplo, los científicos del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, han contribuido al desarrollo y pruebas de un sensor, que permite hacer un mapa de la contaminación del aire urbano en toda Europa. En el proyecto MACBETH de la CE, se utilizaron estos sensores para medir los niveles de benceno en seis ciudades europeas, incluyendo Copenhague en el Norte y Atenas en el Sur, demostrando que las concentraciones de benceno, van aumentando según se baja hacia el Sur de Europa. Los niveles de benceno son diferentes a causa del tiempo, del estilo de vida, de la estructura de la ciudad y de la densidad del tráfico.

Las técnicas analíticas, que se utilizan para determinar los niveles de inmisión de los principales contaminantes objeto de control en las redes de vigilancia, se resumen en la Tabla XII.

Tabla XII.- Principales métodos analíticos para medir niveles de inmisión de contaminantes atmosféricos. Fuente: Centro de Nacional de Sanidad Ambiental. Instituto de Salud Carlos III. Madrid.

<i>Contaminante</i>	<i>Muestreo manual</i>	<i>Muestreo automático</i>
Humos negros	Reflectometría	----
Partículas	Gravimetría (Alto volumen)	Atenuación radiación TEOM (balanza inercial)
SO ₂	Thorina (Técnica Patrón) Pararosanilina	Fluorescencia UV
NO ₂	----	Quimiluminiscencia
CO	----	Absorción infrarrojo no dispersivo
O ₃	----	Absorción UV

Las medidas de los contaminantes en el aire, aunque se realicen de forma continua, se expresan en promedios, dependiendo de los objetivos que se planteen. En relación con la exposición crónica, se utilizan promedios anuales, de 24 horas, o de ocho horas para los contaminantes con mayor oscilación a lo largo del día (CO y O₃). Los promedios diarios, pese a haber sido los más utilizados, ya sólo se aplicarán en la futura normativa europea a las partículas y al SO₂. En relación con las exposiciones agudas se utilizan los valores máximos horarios o, incluso, de 30, 15 o 10 minutos.

CONCLUSIONES

La contaminación atmosférica es un problema Universal, ya que los contaminantes primarios que se emiten en grandes cantidades desde las fuentes industriales o urbanas, pueden ser transportados por las corrientes de aire y/o se convierten en contaminación secundaria por reacciones químicas atmosféricas, y pueden ejercer sus efectos nocivos muy lejos de su foco de emisión. Por tanto, ni siquiera las regiones que carecen de una industria importante, pueden librarse de esta problemática.

El principal factor para la luchar contra los contaminantes atmosféricos, es conocer el origen del problema, la fuente emisora, a partir de los inventarios de emisiones y la concentración de aquellos en la atmósfera, es decir el nivel de inmisión. Esta cuestión, está bien desarrollada en los países industrializados, como Canadá, Estados Unidos, Japón o la UE, con redes de vigilancia de la contaminación atmosférica, pero en algunos países en vías de desarrollo o no desarrollados, no hay una conciencia real del problema, sobre todo porque tienen que controlar una contaminación transfronteriza, que no producen y no están en igualdad de oportunidades. La Agenda 21, en su artículo 9.25, dice que “la contaminación transfronteriza tiene efectos nocivos para la salud de los seres humanos y otros efectos perjudiciales en el medio ambiente, como la pérdida de árboles y bosques y la acidificación de masas de agua” y para que exista un universal control de los contaminantes, insta en el artículo 9.28 a los gobiernos al nivel que corresponda, a establecer y/o fortalecer acuerdos regionales para la lucha contra la contaminación atmosférica transfronteriza y cooperar, en particular con los países en desarrollo, en las esferas de la observación y la evaluación sistemáticas, la construcción de modelos y el desarrollo e intercambio de tecnologías para la limitación de las emisiones procedentes de fuentes móviles y fijas de contaminación atmosférica.

Pero, con solo información de la concentración atmosférica de contaminantes, no se resuelve el problema. Para combatir la contaminación, hacen falta otras herramientas, empezando por la educación y la gestión ambiental. La Educación Ambiental, debe ser en cualquier caso, una importante herramienta de trabajo, en esta lucha. La toma de conciencia de estos problemas desde la infancia, resulta fundamental. En este sentido, cabe destacar la edición para niños de la Agenda 21, titulada "Misión Rescate: Planeta Tierra", editada en varios idiomas, cuyo tercer capítulo, "Lograr que suceda" es muy significativo. Acciones importantes de fomento de la Educación Ambiental a nivel mundial, son llevadas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en colaboración con la UNESCO. En España, el Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM), situado en Valsaín (Segovia), es el organismo responsable en este ámbito. El Aula de Naturaleza "El Robledo" del CENAM, es un ejemplo del desarrollo de los programas y actividades en educación ambiental y el programa VOLCAM, de la Caja de Ahorros del Mediterráneo es un buen exponente de actividades del voluntariado ambiental.

Por su parte, la gestión de la calidad del aire, muy relacionada con el control de los contaminantes atmosféricos, comprende las actividades vinculadas con la protección y mejoramiento de la calidad del aire y requiere el cumplimiento de las siguientes etapas: Preparación de los criterios de salud ambiental y establecimiento de normas de calidad del aire; institución de normas para la emisión de contaminantes de fuentes específicas, y por último, la implementación y operación de sistemas de control. La elaboración de un Plan de Saneamiento Integral es un exponente típico de la gestión ambiental.

Con todos estos instrumentos, podemos establecer normas reguladoras sobre las fuentes de emisión, que ayuden a resolver, o al menos mejorar la calidad del aire que respiramos, obligando a las empresas contaminantes a una regulación de sus emisiones. En ello, nos va nuestra salud y la protección del medio ambiente.

“Los niños son las víctimas principales del subdesarrollo y la degradación del medio ambiente. En todos los países del mundo, ricos y pobres, son ellos los primeros en sufrir las consecuencias de la pobreza, la desnutrición, la enfermedad y la contaminación”.

Boutros Boutros-Gali

Secretario General de la ONU. 1992-1996

CAPÍTULO 4

LA LLUVIA ÁCIDA

1.- Concepto y clasificación de la lluvia ácida.

En primer lugar, hay que decir que la lluvia ácida es un tipo de contaminación atmosférica secundaria. Se llama lluvia ácida a toda precipitación con $\text{pH} < 5,5$.

De una manera natural, el gas CO_2 presente en la atmósfera, se disuelve en el vapor de agua de las nubes, donde es muy soluble, y constituye una disolución ligeramente ácida que, cuando se produce la precipitación en forma de lluvia, disuelve con facilidad algunos minerales del suelo. Sin embargo, el pH de la lluvia, en por ejemplo, los Estados Unidos (figura 78), se encuentra entre 4 y 5, lo que no se puede justificar por la reacción: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$, que se produce cuando el CO_2 gas, se disuelve en agua, y que da lugar a un pH entre 5,5 y 5,7, que es el que podemos denominar pH “natural” de la lluvia.

La lluvia ácida puede producirse por precipitación, en el ciclo del agua, o bien por una simple deposición seca. En realidad, hay dos tipos de lluvia ácida, según su sedimentación:

SEDIMENTACIÓN HÚMEDA.

Es el contaminante que desciende con la lluvia y que arrastra también partículas y gases barridos del aire por las gotas de lluvia.

SEDIMENTACIÓN SECA.

Es el material que llega al suelo por gravedad durante los intervalos secos, y que incluye partículas, gases y aerosoles.

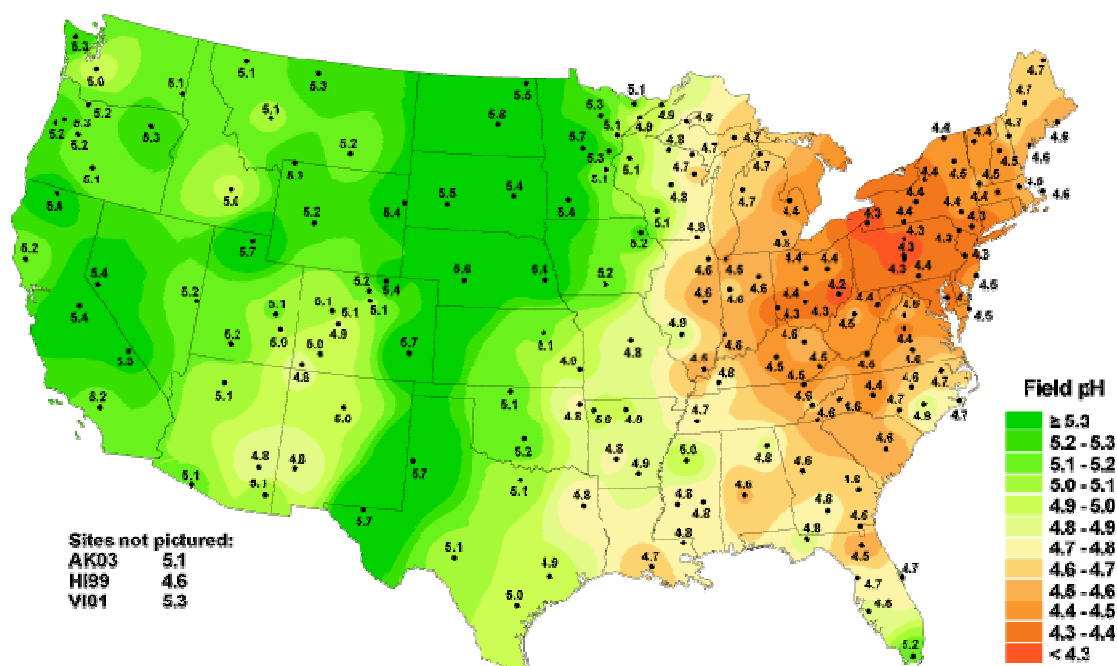


Figura 78.- Medidas de pH de las deposiciones de lluvia ácida en Estados Unidos. Los valores en rojo son los más bajos. Como se puede apreciar la costa este es la más afectada por la lluvia ácida. Fuente: EPA. <http://www.epa.gov>.

Esta diferencia, en cuanto a la deposición, resulta muy significativa, ya que la sedimentación húmeda, dentro del ciclo del agua, puede ocurrir a cientos de kilómetros de la fuente de contaminación, mientras que la seca, se produce “in situ”, con grave deterioro del ecosistema cercano a la fuente contaminante.

Debido a ello, los contaminantes que pueden ser arrastrados por los vientos predominantes a lo largo de cientos, incluso miles de kilómetros, trasladan la contaminación a lugares muy alejados de la fuente de contaminación. Este fenómeno se conoce como el transporte de largo alcance de contaminantes aéreos (TLACA).

2.- Antecedentes.

En realidad, la lluvia ácida se conoce desde hace tiempo, pero se asociaba a emanaciones volcánicas. En el siglo XX, en Sudbury (Ontario, Canadá) existía la minería de sulfuros más grande del mundo, lo que provocaba una gran emisión de SO_2

a la atmósfera. Los habitantes de esa región, hacia 1920, notaron que el entorno de esa ciudad se volvió extraño: "los árboles desaparecen y el suelo se queda desnudo", las aguas del río Sudbury empezaron a llevar importantes cantidades de metales pesados, sulfuros, Al^{3+} , Fe^{3+} , y H_2S y el ecosistema quedó gravemente dañado, con pérdida de grandes masas de vegetación; el medio se volvió abiótico y el suelo sufrió fuertes erosiones. La superficie afectada superó el medio millón de hectáreas. Se intentó su recuperación, y los costos de ella fueron mayores que los beneficios de una mina, que como hemos dicho, era la más grande del mundo.

En Europa también se empezaron a notar efectos similares. En Noruega, en la década de 1970, los lagos empezaron a contaminarse y algunas especies de peces morían. Lo mismo ocurrió en Finlandia, donde también se vieron afectados los suelos, así como por un debilitamiento forestal, sobre todo en las coníferas cuyas hojas amarilleaban y caían.

Pero como hemos indicado anteriormente, la lluvia ácida se puede producir en sitios alejados de la fuente de contaminación, y ser "exportada" a otros países. Así, las lluvias ácidas de los Adirondacks y del sur de Quebec, parecen tener origen en los estados industriales del litoral oriental de Estados Unidos, como Nueva York, Massachussets y Maryland. Las provincias marítimas de Canadá sin embargo, sufren los efectos de las emisiones del litoral oriental de Estados Unidos y, también está demostrado que más del 10% de la lluvia ácida que cae en el noreste de los Estados Unidos proviene de fuentes canadienses.

A este respecto, en Suecia se dieron cuenta que Alemania emitía gran cantidad de SO_2 a la atmósfera y que acidificaba su suelo. Los efectos perjudiciales de esta lluvia ácida se manifestaron de pleno en Noruega, cuyas emisiones propias de SO_2 son muy bajas ($<3,7$ kg/ha en S), mientras que en la fuente productora, Alemania, con valores de 30 a 60 kg/ha, los daños eran menores o inexistentes.

3.- Contaminantes primarios de la lluvia ácida.

La pregunta es ¿qué contaminantes son los responsables de la lluvia ácida? Pues bien, en este caso no hay dudas ni polémicas; lo son los óxidos de azufre y de nitrógeno, como contaminantes primarios. Los compuestos de azufre son responsables de dos tercios del total de la lluvia ácida, y las principales causas de la acidificación tanto del suelo como de las aguas. Sin embargo, esta acción puede ser mayor, ya que los compuestos de nitrógeno son absorbidos por las plantas y no producen acidificación y de esta manera, la contaminación real producida por los compuestos de azufre es superior a los dos tercios antes mencionados.

3.1.- Los compuestos de azufre.

El principal contaminante de azufre, y por tanto el mayor responsable de la lluvia ácida es el $\text{SO}_2^{\text{LVII}}$. El dióxido de azufre es un gas incoloro, que puede permanecer en la atmósfera entre 2 y 4 días. Durante este tiempo, puede ser transportado a miles de kilómetros y transformarse en ácido sulfúrico^{LVIII}, el cual precipita en alguna otra región lejos de su origen, en forma de lluvia ácida.

Las fuentes de emisión antropogénicas del SO_2 , son fundamentalmente las combustiones de petróleo y carbón. La concentración de azufre en el crudo varía de acuerdo a la procedencia del mismo y puede ser de décimas en % a 2-3% en peso. En el carbón, las variaciones son mucho más amplias.

La fuente natural por excelencia de emisión de SO_2 son los volcanes.

Además del SO_2 , hay que tener en cuenta otras dos especies de azufre, el H_2S y los sulfatos. Las dos formas gaseosas, el SO_2 y H_2S se intercambian en el llamado ciclo del azufre, que mostramos en la figura 79.

^{LVII} Contaminante primario.

^{LVIII} Contaminante secundario.

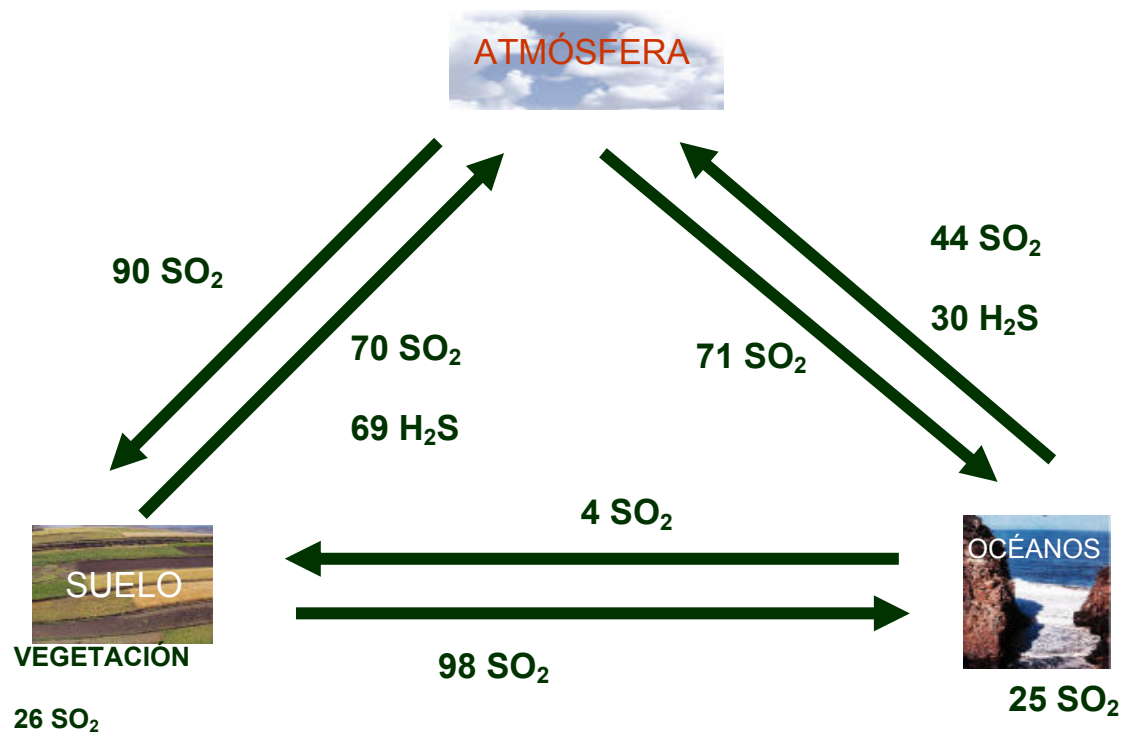


Figura 79.- El ciclo del azufre. Datos en $T \cdot 10^6$. A nivel de suelo, se lanzan a la atmósfera los gases contaminantes SO_2 y H_2S . El H_2S se oxida a SO_2 , que se suma al anterior. El SO_2 total se disuelve en las gotas de agua y por el ciclo del agua, llega a los océanos, donde se acumula ($25 T \cdot 10^6$ expresado en SO_2) o es emitido otra vez a la atmósfera por evaporación, en forma también de H_2S , una vez transformado por las bacterias correspondientes. El ciclo del agua hace que también llegue SO_2 al suelo desde la atmósfera, que se intercambia y acumula con el que proviene de la hidrosfera ($26 T \cdot 10^6$ de almacenaje expresado en SO_2), en la vegetación.

Las emisiones por especie contaminante de azufre y la procedencia según sus fuentes, lo podemos ver en la figura 80, junto con la formación de los compuestos de azufre que acidifican el agua de lluvia.

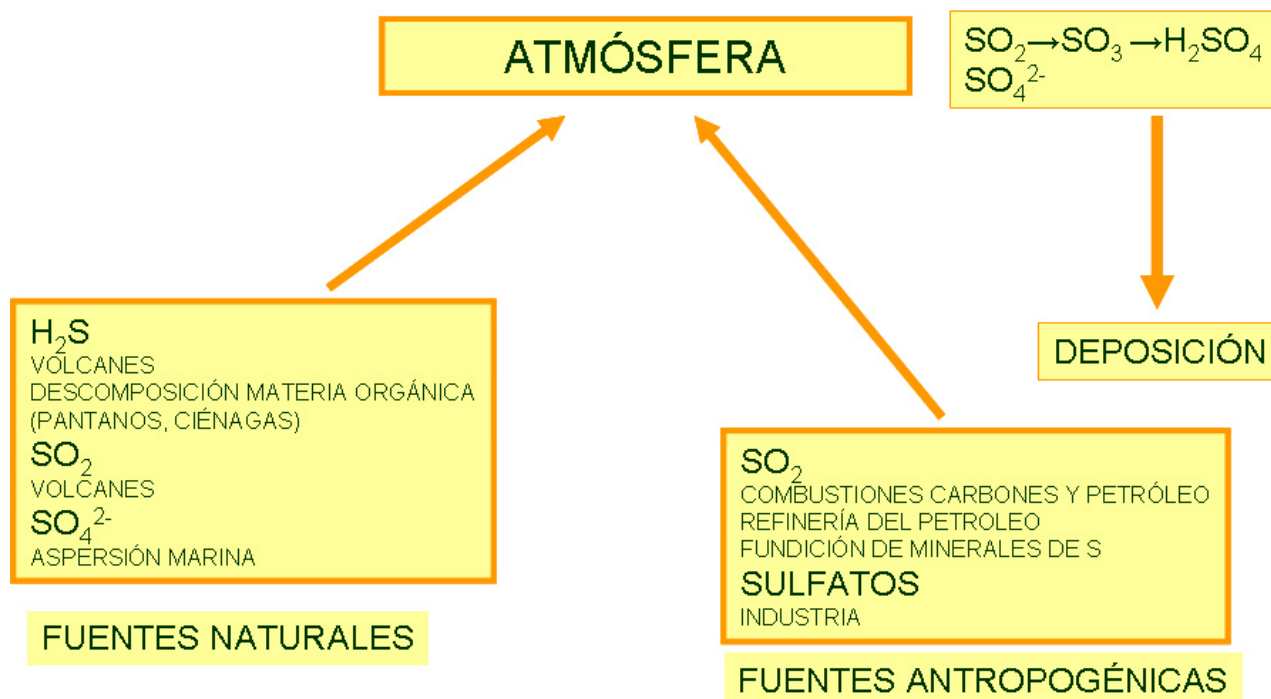
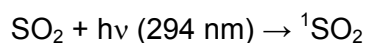


Figura 80.- Fuentes naturales y antropogénicas de inyección de compuestos de azufre a la atmósfera. El H_2S es oxidado en la atmósfera a SO_2 y el total de SO_2 , se oxida a SO_3 , que reacciona con el agua de las nubes y forma H_2SO_4 . Este, junto a los SO_4^{2-} , que están en forma de aerosoles, precipitan en forma seca o húmeda, para producir lluvia ácida.

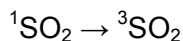
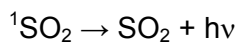
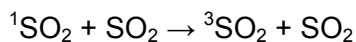
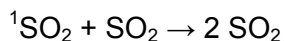
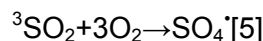
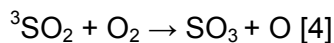
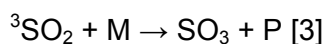
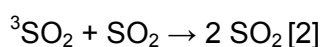
Las reacciones de los compuestos de azufre, que se producen en la atmósfera no son tan simples como las mostradas en la figura 80. Si bien, es cierto que la mayoría del SO_2 , se utiliza para la formación de H_2SO_4 , no es el único proceso que se establece. Hay reacciones en fase gaseosa y otras en fase acuosa, que implican procesos de fotocatalisis, tal como vemos a continuación:

1º.- Reacciones en fase gaseosa.

Implican reacciones de catálisis fotoquímica con formación de estados excitados de la molécula de SO_2 , en dos estados: singulete 1SO_2 y triplete 3SO_2 :



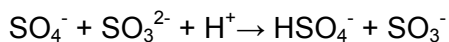
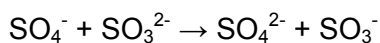
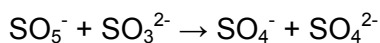
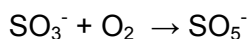
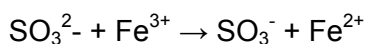
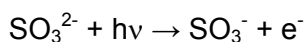
Estos estados excitados, a su vez reaccionan de la siguiente manera:

Estado singlete**Estado triplete**

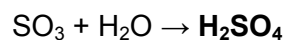
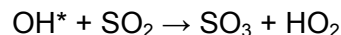
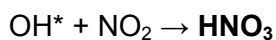
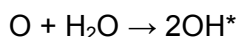
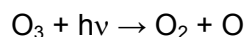
La formación de un átomo de O en la reacción [4] del estado triplete y de un radical $\text{SO}_4^\bullet$, en la [5], implican dos reacciones de formación de ozono, al reaccionar con la molécula de oxígeno diatómica:

**2º.- Reacciones en fase acuosa.**

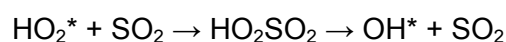
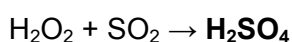
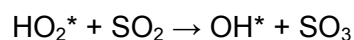
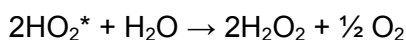
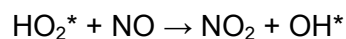
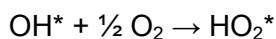
Algunas de ellas implican catálisis metálica y son las siguientes:



La reacción principal, sin catalizador es: $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$, que produce finalmente H_2SO_4 mediante la reacción $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$, pero hay algunas macropartículas y gases presentes en el aire, que catalizan la reacción y producen ácido sulfúrico por otra vía, entre ellas la del ozono, que también produce ácido nítrico, por reacción con los óxidos de nitrógeno. Estas reacciones, también son catalizadas, fundamentalmente por la luz UV. Las reacciones, que provoca el ozono, para la producción de ácido sulfúrico, son las siguientes:



Por su parte, el OH radical, también puede producir ácido sulfúrico, por otra vía:



Las emisiones de estos compuestos de azufre debido a fuentes antropogénicas, son enormes. Unos 30 millones de toneladas expresadas en azufre, son emitidas solo en Europa anualmente, frente a los 16 millones de toneladas de azufre que lo son por Estados Unidos y 75 millones de toneladas anuales en todo el Planeta. La mayoría de esta cantidad (80%) proviene de la combustión de crudo y carbón y el 20% restante proviene del resto de los procesos industriales^{LIX}. Sin embargo, esta cantidad puede aumentar considerablemente en los próximos años, cuando se industrialicen países como China, ya que esta contaminación es fundamentalmente debida a la industria y a la utilización de la energía.

En la Tabla XV, se muestran las fuentes de óxidos de azufre SO_x , desglosadas por sectores de contaminación. En ella, podemos apreciar que la fuente más importante de contaminación es la de los combustibles fósiles, en especial el carbón, resultando las fuentes móviles mucho más moderadas.

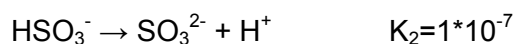
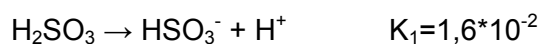
^{LIX} Expresado en $\text{T} \cdot 10^6$ de SO_2 , el carbón representa 102, el petróleo 28,5, la metalurgia del Pb 1,5, la del Cu 12,9 y del Zn 1.3, para un total de $146 \text{ T} \cdot 10^6$ de SO_2 .

Tabla XV.- Fuentes desglosadas de SO_x (SO₂ y SO₃). La fuente más importante es la combustión de productos energéticos, con el 73,5%, y dentro de esta, el carbón, representa el 60,5%. Los procesos industriales son también una fuente a tener en cuenta con el 22% del total. Fuente: <http://www.monografias.com>. Tema de la lluvia ácida.

FUENTE	Porcentaje del Total anual de emisiones de SO _x	
Transporte	2,4	
- Vehículos motorizados (gasolina)		0,6
- Vehículos motorizados (diesel)		0,3
- Vehículos marinos		0,9
- Uso del combustible de motor para fines distintos del transporte		0,3
- Ferrocarriles		0,3
Combustión de productos energéticos (fuentes estacionarias, plantas de energía, calefacción industrial, etc.)	73,5	
- Carbón		60,5
- Aceite combustible (combustóleo)		13,0
Procesos industriales	22,0	
Eliminación de Desechos Sólidos	0,3	
Diversos	1,8	

En la utilización de la energía, el azufre contenido en los combustibles fósiles, se oxida a SO₂: $S + O_2 \rightarrow SO_2$, ocurriendo un proceso similar en la metalurgia, a partir de minerales sulfurados, como la galena: $2PbS + 3O_2 \rightarrow 2PbO + 2SO_2$.

Afortunadamente, nuestro Planeta tiene mecanismos para regular el contenido de óxidos de azufre en la atmósfera, mediante un intercambio con los océanos. Las reacciones, que se producen en estos, implican su depósito en forma de sulfitos:



Los factores que influyen en este proceso de intercambio son múltiples, lo que hace difícil evaluar la capacidad total de intercambio. Entre estos factores, hay que destacar los siguientes:

pH. El pH océano es de 8, donde hay un predominio de las especies iónicas, lo que representa un factor muy favorable, ya que la retirada de SO_2 implica el paso por esas especies.

Presiones parciales. Hay que tener en cuenta las presiones en las fases líquida y gaseosa, que es un factor limitante.

Temperatura. Una menor temperatura, implica una mayor solubilidad, lo que es un factor favorable. Por tanto, la retirada de SO_2 será mayor en aguas polares.

Flujo laminar de los océanos. Los océanos tienen una pequeña capa superficial en forma de película de 10-200 μ , donde se producen las reacciones de intercambio y que depende de la velocidad de los vientos, el oleaje, estado mar, etc.

Flujo turbulento.

El factor de flujo es el de mayor incertidumbre. En el flujo laminar, el agua se mueve lentamente a lo largo de un canal liso y sigue trayectorias en línea recta paralelas a las paredes del canal, mientras que en el flujo turbulento, la velocidad de flujo se incrementa, o el canal se vuelve irregular. El movimiento laminar se rompe y el agua en contacto con el canal retrasa su movimiento por fricción, mientras que el resto tiende a moverse a lo largo como antes. En consecuencia el agua se desvía de sus cursos rectos en una serie de vueltas y remolinos, lo que dificulta las predicciones.

3.2.- Los compuestos de nitrógeno.

Los contaminantes primarios nitrogenados de la lluvia ácida, son fundamentalmente los óxidos NO y NO₂, gases paramagnéticos muy reactivos, que se forman en casi cualquier tipo de combustión. Actualmente en Europa, se lanzan a la atmósfera 20 millones de toneladas de NO₂ anuales; esta cantidad se va a incrementar en los próximos años, debido a que los procesos técnicos que mejoran las combustiones, cada día más empleados en la UE y otros países desarrollados, controlan las emisiones de óxidos de azufre y otros contaminantes, pero a su vez incrementan las de óxidos de nitrógeno, y de esta forma va creciendo su importancia como acidificantes del medio ambiente, además de su participación en otros tipos de contaminación secundaria. Las fuentes de contaminación de estos óxidos se dan en la Tabla XVI.

También ciertos tipos de fertilizantes y abonos son fuente de compuestos nitrogenados contaminantes, que pueden ser liberados en forma de amoníaco⁸⁷. Este hecho, en principio causa un aumento en el pH de las lluvias (menos ácidas), como es de esperar de una base, aunque débil, como el NH₃, pero este efecto se neutraliza cuando es metabolizado por microorganismos en los suelos o absorbido por los árboles. Además, las grandes cantidades de contaminantes de nitrógeno provocan una sobre fertilización de los suelos, de efectos muy dañinos, ya que la mayoría de las plantas se adaptan a una deficiencia de nitrógeno, pero cuando se produce el fenómeno opuesto, aparecen daños en la vegetación. Por otra parte, estos compuestos causan problemas secundarios como en la potabilidad de las aguas y los fenómenos de eutrofización^{LX}. Además, los nitratos, presentes en los fertilizantes, acidifican los suelos y provocan la liberación de elementos tóxicos como el aluminio.

^{LX} Incremento de sustancias nutritivas en el agua dulce y lagos que provoca un exceso de fitoplacton.

Tabla XVI.- Fuentes de emisión de NO_x. Las principales son las de los vehículos de gasolina (32%) y las fuentes estacionarias de combustión de productos energéticos (48,5%). Dentro de estas últimas, el gas natural y el carbón, son las principales fuentes productoras de óxidos de nitrógeno. Fuente: <http://www.monografias.com>. Tema de la lluvia ácida.

FUENTE	Porcentaje del Total anual de emisiones de NO _x	
Transporte	39.3	
- Vehículos motorizados (gasolina).		32.0
- Vehículos (diesel).		2.9
- Ferrocarriles.		1.9
- Uso de combustible de motor para fines distintos del transporte.		1.5
- Vehículos marinos.		1.0
Combustión de Productos energéticos (Fuentes estacionarias – Plantas de energía, calefacción de Espacios Industriales)	48.5	
- Gas Natural		23.3
- Carbón		19.4
- Combustóleo		4.8
- Madera		1.0
Procesos Industriales (plantas de Ácido Nítrico, etc.)	1.0	
Eliminación de desechos sólidos	2.9	
Diversos (incendios forestales, quema agrícola, etc.)	8.3	

Todos estos procesos, se pueden esquematizar en el llamado ciclo del nitrógeno, que se muestra en la figura 81.

Este ciclo, puede perturbarse, debido a un aumento en la concentración de nitratos en el suelo por deposición en las lluvias ácidas, que produce daños en los bosques de hojas perennes, ya que disminuye la señal biológica que prepara a los árboles para el invierno, lo que aumenta el estrés y provoca la destrucción de los bosques, al ser mas sensibles a las plagas⁸⁸.

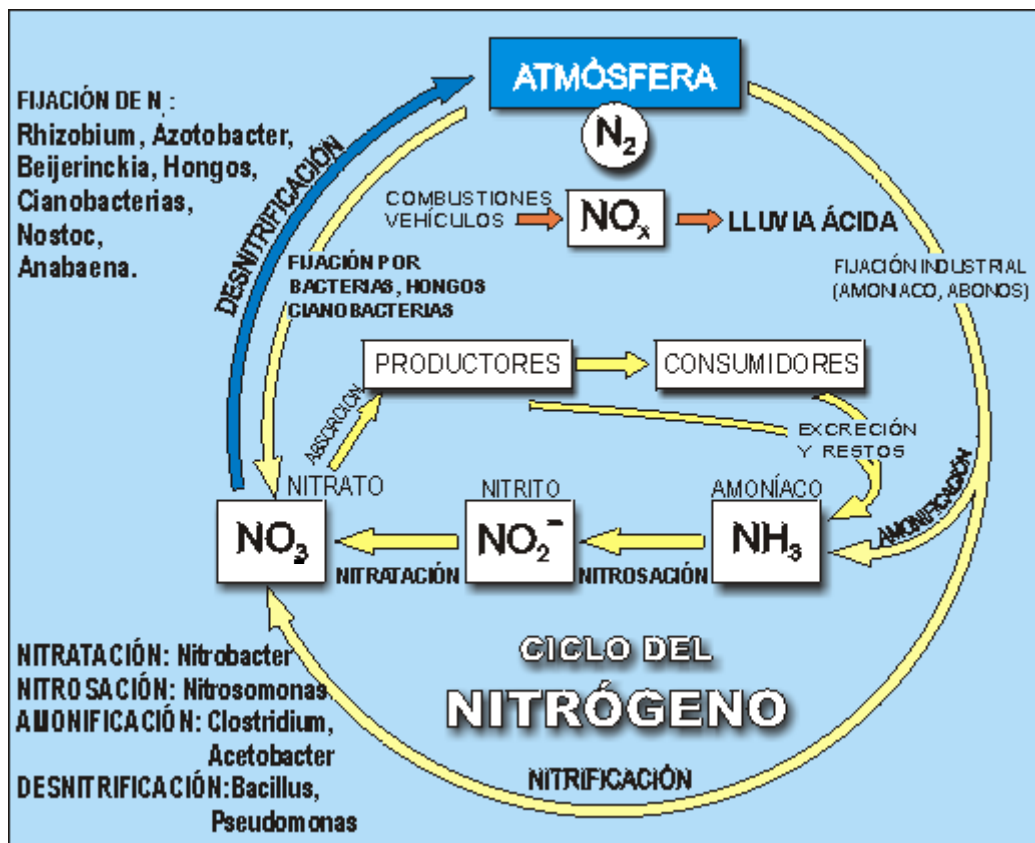


Figura 81.-Ciclo del nitrógeno. Las combustiones, principalmente de los vehículos, producen NO_x , que son lanzados a la atmósfera, donde se transforman en ácido nítrico, componente secundario de la lluvia ácida. La industria del amoníaco y los abonos nitrogenados, proveen de NH_3 al suelo, el cual se transforma en NO_2^- (nitrito) y NO_3^- (nitrato). El N_2 del aire, también es transformado por bacterias en forma de NH_3 , siendo esta una fuente natural de amoníaco en el suelo. Fuente: <http://platea.pntic.mec.es>.

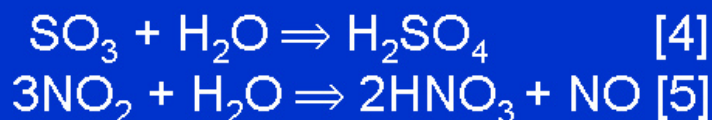
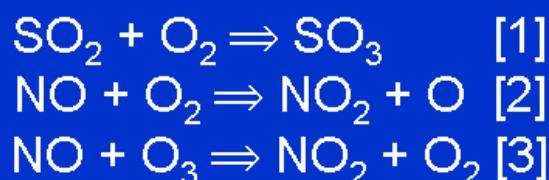
El óxido nítrico NO, se forma en el aire mediante la reacción de oxígeno con el nitrógeno: $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$. Esta misma reacción, se produce a altas temperaturas durante el uso de combustibles fósiles. El dióxido, NO_2 se forma por la reacción del NO con el O_2 del aire, sin necesidad de catalizadores: $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$. Finalmente, el dióxido, reacciona con el agua para dar lugar a ácido nítrico:



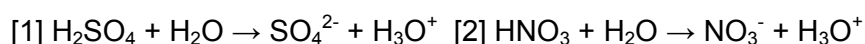
4.- Contaminantes secundarios de la lluvia ácida.

La contaminación secundaria de la lluvia ácida, implica la formación de ácidos fuertes, contaminantes secundarios, dentro de las nubes y la posterior precipitación de estos en forma disociada.

Las reacciones, que se producen por parte de los contaminantes primarios, para dar lugar a estos ácidos, las hemos ido viendo en el desarrollo de esta monografía, pero es el momento del agruparlas ahora en las siguientes 5 reacciones, que se producen en la atmósfera, dentro de las nubes:



Las reacciones [1] y [2] pueden ser catalizadas por los contaminantes troposféricos, como el ozono. Una vez formados los óxidos SO_3 y NO_2 , reaccionan fácilmente con la humedad atmosférica para formar los ácidos sulfúrico y nítrico [4] [5], los cuales permanecen muy disociados en la atmósfera, como ácidos fuertes que son, y precipitan con la neblina, la lluvia o la nieve:



Por tanto, las especies químicas, que realmente precipitan y son componentes de la lluvia ácida son tres iónicas: SO_4^{2-} ; NO_3^- y $\text{H}_3\text{O}^{+\text{LXI}}$, anión nitrato, sulfato y el hidrogenión o bien el protón (H^+), respectivamente.

^{LXI} Esta especie se define normalmente como el protón H^+ , aunque realmente en disolución acuosa no tiene existencia como tal, y está en forma de H_3O^+ o hidrogenión; son equivalentes.

5.- Efectos contaminantes de la lluvia ácida.

En las figuras 82 y 83 se muestran los ciclos en los ecosistemas de la producción de lluvia ácida, sus efectos y las especies producidas y movilizadas.

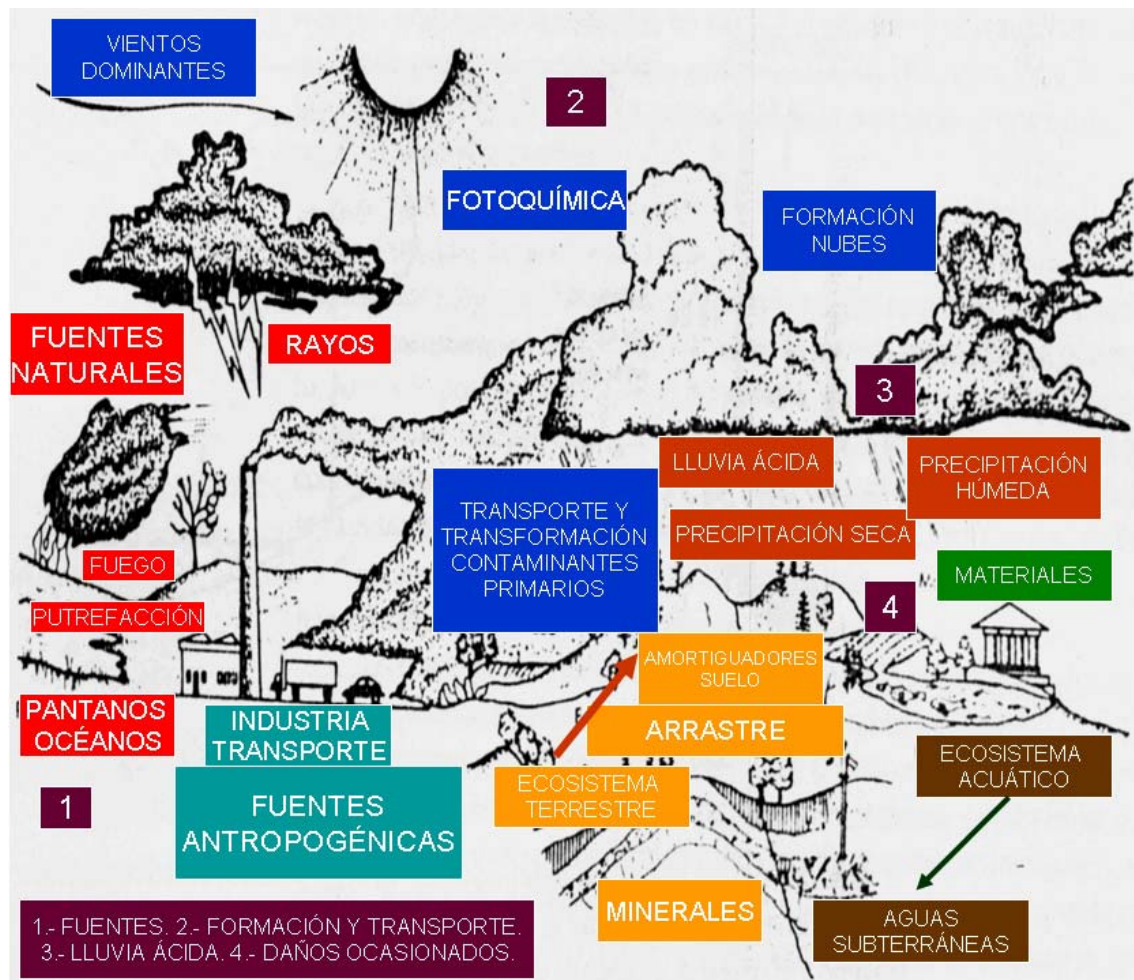


Figura 82.- Ciclo de la lluvia ácida en los ecosistemas. 1.-Se inicia con la emisión de sus contaminantes primarios (SO_x y NO_x), desde sus fuentes naturales (en rojo) y antropogénicas (verde azulado). 2.- Se forman los contaminantes secundarios (H_2SO_4 y HNO_3) en las nubes y todos ellos se transportan (azul). 3.- La lluvia ácida precipita (granate) en forma de lluvia (húmeda) o seca y causa 4.- Los daños en materiales (verde), ecosistema acuático (marrón) y suelo (ocre). Fuente: Modificado de <http://www.monografias.com>. Tema de la lluvia ácida.

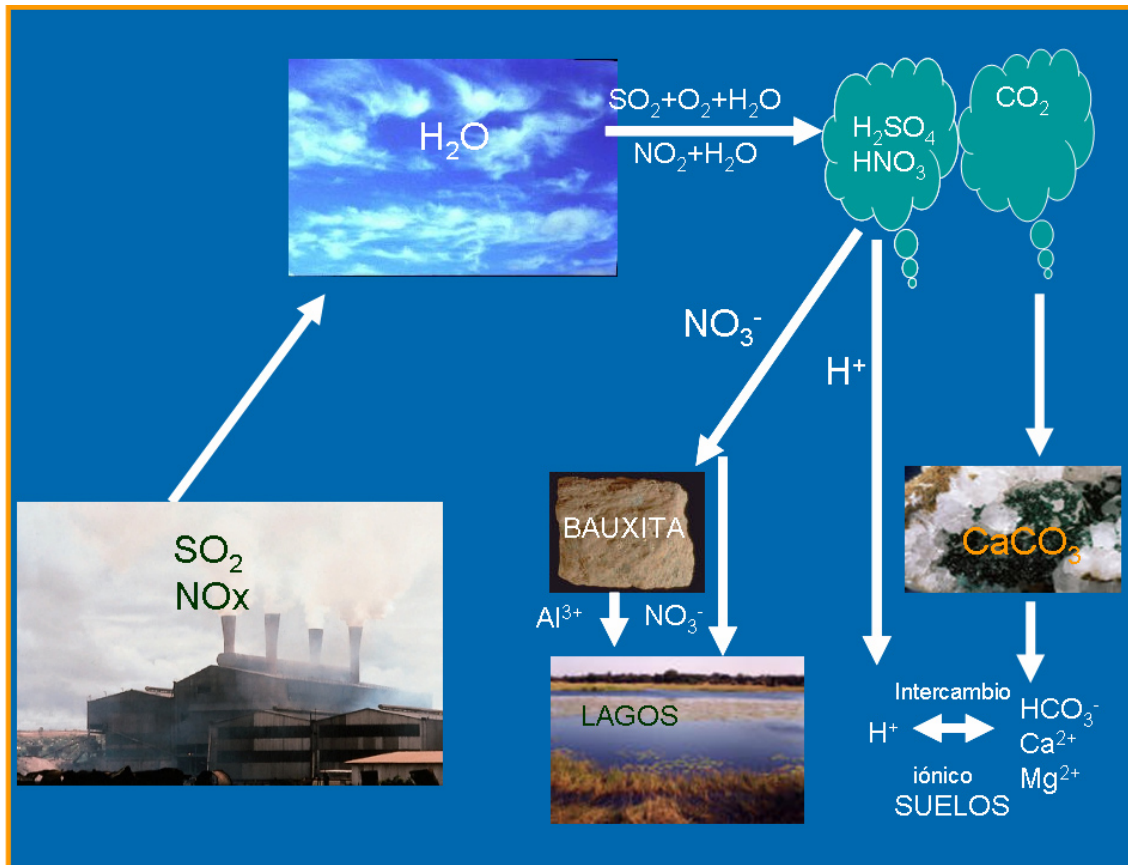


Figura 83.- Ciclo de las especies químicas de la contaminación por lluvia ácida y efectos químicos que producen. Una vez formados los ácidos en las nubes, estos precipitan en formas iónicas. El nitrato, NO_3^- , por las escorrentías pasa directamente a contaminar los lagos produciendo eutrofización, pero también moviliza al Al^{3+} , desde sus minerales, el cual ejerce efectos contaminantes en los lagos. El H^+ , que proviene de la ionización de los dos ácidos (H_2SO_4 y HNO_3) se intercambia en el suelo con bionutrientes, como el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , que han sido movilizados desde sus minerales por medio del CO_2 atmosférico, y de esta manera se empobrece el suelo de bionutrientes, a la vez que se acidifica.

Estos ciclos, producen un incremento de los niveles de aluminio y otros metales tóxicos en las aguas en contacto con los suelos acidificados, y llegan hasta los lagos, produciendo efectos negativos en su ecosistema. Un índice de contaminación de un lago, es el incremento en la concentración de Al^{3+} . Además, hay una pérdida de bionutrientes, como el calcio, magnesio y potasio, por intercambio iónico con el H^+ ; y

disminución del pH del suelo, que no solo es a nivel superficial, ya que la acidificación se extiende a profundidades de 1 metro o más, lo que provoca la desaparición de bacterias y otras especies que descomponen la materia animal o muerta, con más pérdidas de bionutrientes. Se producen daños en la vida acuática, piscícola y en la vegetal. Por otra parte, se deteriora el patrimonio construido con piedra caliza, lo que constituye el llamado “mal de la piedra”, según la reacción: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. El carbonato de calcio se transforma en sulfato de calcio (yeso), que es disuelto por el agua y se desmorona la piedra al tener un volumen mayor⁸⁹. Finalmente, también se corroen los materiales de construcción metálicos.

5.1.- Efectos de la lluvia ácida sobre el suelo y su capacidad de amortiguación.

La acidez no neutralizada por los árboles entra en el suelo y se filtra, movilizándose por escorrentía. A su paso, reduce los nutrientes al variar su ciclo y moviliza elementos tóxicos, en especial el Al^{3+} , soluble a $\text{pH} < 4,2$ e incrementa la movilidad de metales pesados. Además, provoca variaciones en la composición y estructura de la microflora y la microfauna⁹⁰.

Entonces, ¿a qué equivale la acidificación? La respuesta es a una disminución del pH y de la saturación en bases, junto a un aumento en la proporción de H^+ y Al^{3+} en los complejos de intercambio⁹¹.

La cuestión es que los suelos, pueden neutralizar la acidez de la lluvia ácida, en factores que dependen del ecosistema del suelo, pero no todos los suelos tienen la misma capacidad de neutralización.

Este punto ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones, ya que se puede predecir hasta donde puede el suelo neutralizar los efectos contaminantes de la acidez de la lluvia ácida.

Científicamente, a este termino, se le denomina **capacidad de amortiguación**. El suelo tiene una capacidad de amortiguación, que está directamente relacionada con

su capacidad de intercambio. Se puede decir, que McFee (1980) fue el primero en analizar esta capacidad de amortiguación, y para ello utilizó la capacidad de cambio catiónico (CCC) como principal criterio de diagnóstico de la sensibilidad de los suelos frente a agentes ácidos y estableció una escala de sensibilidad, de la siguiente manera⁹²:

Sensibles; aquellos suelos con una CCC menor de 6,2 cmol/kg en los 25 cm superficiales.

Ligeramente sensibles; los de CCC entre 6,2 y 15,4 cmol/kg.

No sensibles; aquellos con CCC superior a 15,4 cmol/kg.

En 1986, Reuss y Johnson, establecen tres tipos de sensibilidad de los suelos: a la pérdida de bases; al descenso del pH y a la solubilización de aluminio.

Posteriormente, se introduce un parámetro básico para poder analizar la capacidad de amortiguación de un suelo, la llamada **carga crítica de acidez (CCA)**. La carga crítica de acidez de un ecosistema es: "el nivel máximo de compuestos acidificantes aportados, que no causan cambios químicos que perjudiquen a largo plazo la estructura y funcionamiento del mismo". Representa un nuevo concepto, inventado para calcular cuanta acidificación puede recibir un ecosistema sin que se produzcan daños ecológicos. La determinación de las cargas críticas de modo cartográfico permite delimitar las zonas con exceso de contaminación, evaluar su origen y tomar decisiones que corrijan los daños. Además de los factores de tipo atmosférico, de localización y tecnológicos que influyen en la distribución de la cantidad de lluvia ácida recibida, los suelos presentan importantes diferencias de sensibilidad a este tipo de impactos según los mecanismos de amortiguación que presenten.

Las cartografías de cargas críticas, han supuesto un gran avance en la lucha contra la lluvia ácida. En la figura 84, podemos ver la cartografía de CCA de Europa.

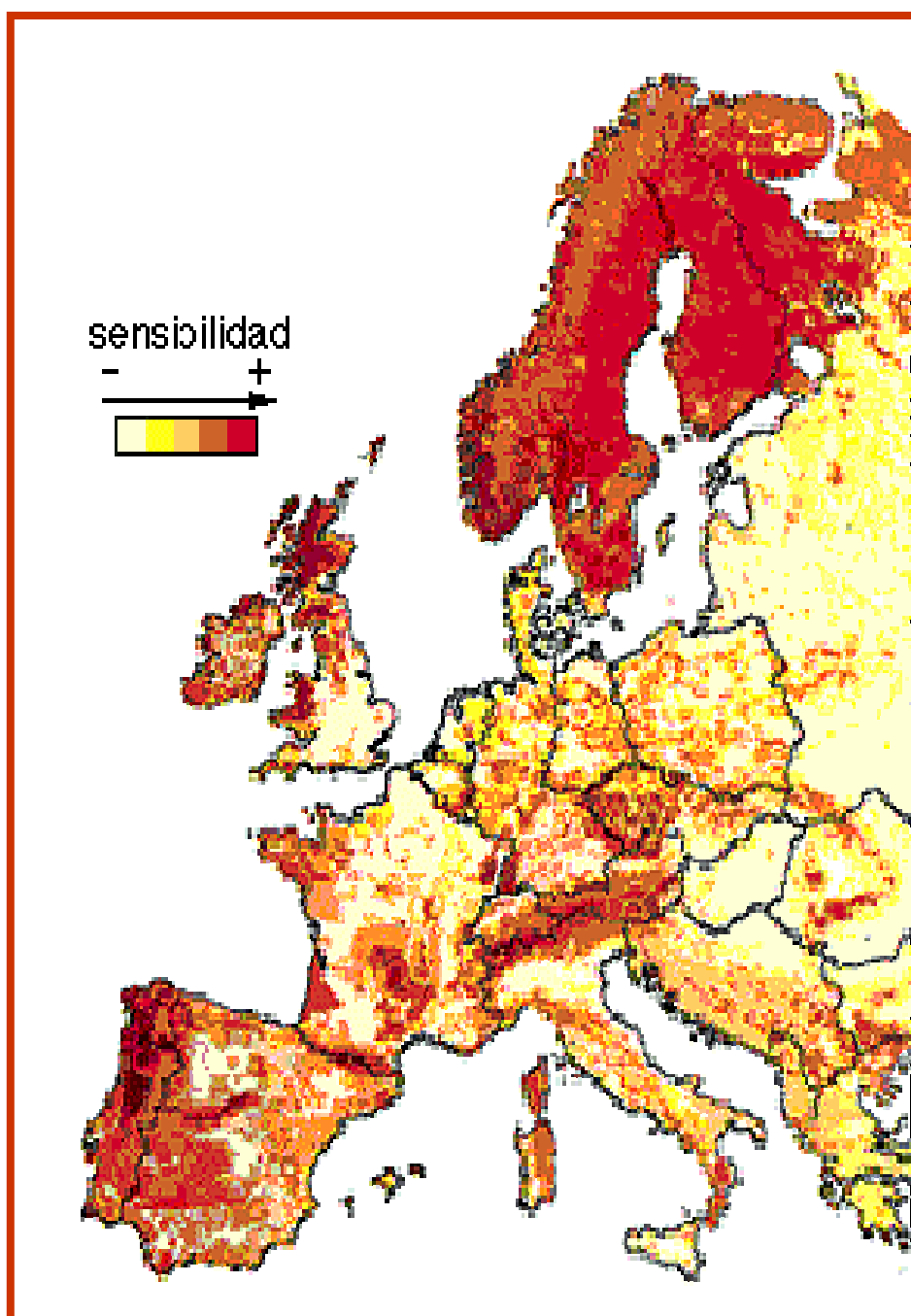


Figura 84.- Cartografía CCA de Europa. Los suelos más sensibles a la acidificación se representan en rojo y los menos en amarillo y blanco. Se aprecia una zona muy sensible en Noruega y Suecia y en el Noroeste de España. Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

En los mapas CCA, se estudia la sensibilidad de los suelos a la acidificación, que depende del grado de acidez del suelo y que es función del tipo de material y

minerales presentes en el mismo. Así, se establecen 5 categorías de suelo, tal como vemos en la Tabla XVII.

Tabla XVII.- Grados de acidez de los suelos en función del tipo de material original y los minerales presentes en el suelo. Q=Cuarzo, Fp=Feldespatos potásico, M=Moscovita, Pl=Plagioclasa, B=Biotita, A=Anfiboles, Pi=Piroxenos, E=Epidota, O=Olivino. Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

Tipo	Minerales	Tipo de roca	Acidez total kmol H ⁺ /km ² /año	S kg/ha/año
1	Q, Fp	Granitos, cuarcitas	<20	<3
2	M, Pl, B(5%)	Granitos, gneis	20-50	3-8
3	B, A(5%)	Dioritas, grauwacas, esquistos, gabros	500-100	8-16
4	Pi, E, O(<5%)	Gabros, basaltos	100-200	16-32
5	Carbonatos	Calizas, margas	>200	>32

La CCA, a su vez depende de los factores, que se muestran en la Tabla XVIII.

Además, como es habitual en la cinética de todos los mecanismos de amortiguación, interviene la temperatura, de tal manera que los procesos de amortiguación de la acidez deben ser más eficientes hacia el sur, mientras que por el contrario, en el norte, las áreas de suelos incipientes, de escasa profundidad, con climas fríos y abundancia de masas de agua cerradas (lagos) serán las que pueden verse afectadas incluso con pequeñas aportaciones acidificantes.

Las CCA se pueden establecer tanto para el SO₂, como para los NO_x y NH_x. A estos últimos se les denomina nitrógeno acidificador. Un ejemplo de mapa cartográfico de cargas críticas para este último, lo tenemos en la figura 85.

Tabla XVIII.- Factores que hacen que aumente o disminuya la CCA. La carga crítica viene dada por la acidez total expresada en kmol de H^+ por kilómetro cuadrado año. Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

Factor	CCA DISMINUYE	CCA AUMENTA
Precipitación	Alta	Baja
Vegetación	Coníferas	Caducifolias
Altitud/Pendiente	Alta	Baja
Textura	Arenosa gruesa	Fina
Espesor efectivo	Somero	Espeso
Adsorción SO_4^{2-}	Baja	Alta
Aportes catiónicos	Baja	Alta

El modelo de cálculo más utilizado para determinar la CCA, es el de balance de masas simple. Considera una situación de equilibrio estacionario, en donde se trata de conservar el estado ácido-base del suelo manteniendo el pH y el grado de saturación de bases dentro de un intervalo que no sea tóxico para las raíces y permita un adecuado aporte nutritivo, lo que se consigue a $pH > 4,0$ ó $4,4$, con un CCC $< 85\%$ de insaturación y una relación Al^{3+}/Ca^{2+} en la disolución $< 1,5$ meq.

Los valores de emisiones de contaminantes primarios de la lluvia ácida, utilizados para el cálculo de los modelos de CCA en Europa, se muestran en la Tabla XIX.

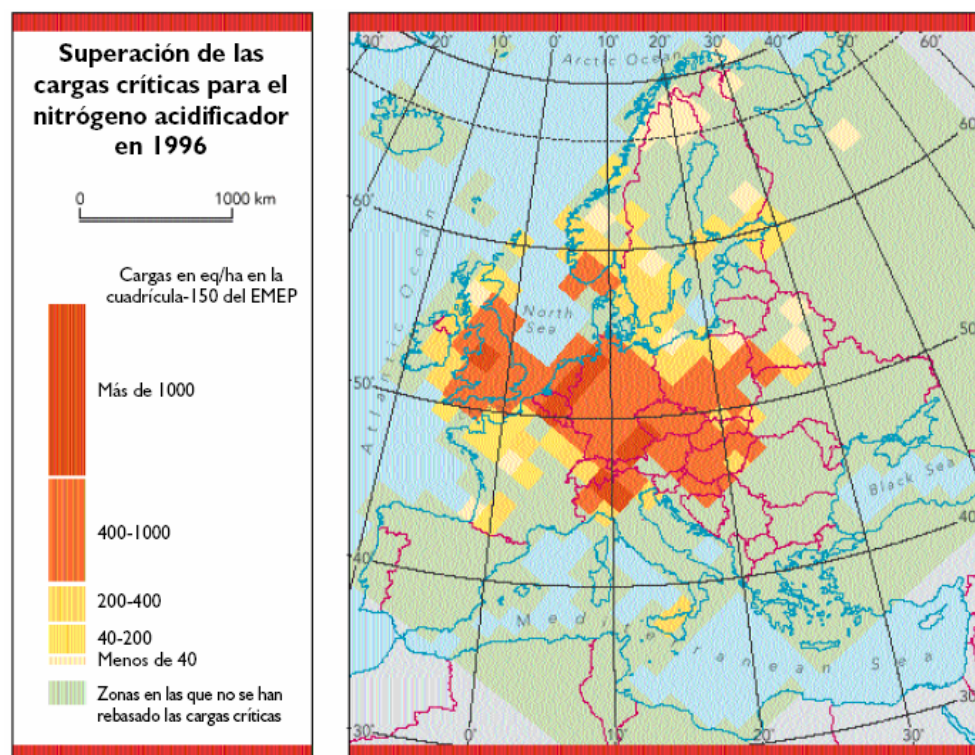


Figura 85.- Superación de las cargas críticas en Europa en 1996 para NO_x y NH_x (nitrógeno acidificador). Cargas en eq/ha. Las áreas en que no se han superado las CCA están en verde. Las áreas en rojo son de alta superación de las CCA. Fuente: EMEP.

Tabla XIX.- Valores utilizados de emisiones de SO_x , NO_x , y NH_x en la elaboración de los modelos de cargas críticas en Europa. Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

País	SO_x (como SO_2)			NO_x (como NO_2)			NH_x (como NH_3)		
	1000T	Kg/m ²	Kg/hab	1000T	Kg/m ²	Kg/hab	1000T	Kg/m ²	Kg/hab
Albania	50	1,7	28,3	9	0,3	5,0	24	0,8	13,6
Alemania	6302	17,7	79,4	3734	10,5	47,1	622	1,7	8,7
Austria	104	1,2	13,6	207	2,5	27,0	85	1,0	11,1
Bélgica	418	13,7	42,0	299	9,8	30,1	94	3,1	9,5
Bulgaria	1030	9,3	114,6	56	0,5	6,3	147	1,3	16,3
Checo y Eslovaq.	2774	21,7	177,3	950	7,4	60,7	200	1,6	12,8
Dinamarca	254	5,9	49,5	252	5,8	49,1	129	3,0	25,1
España	3118	6,2	80,1	950	1,9	24,4	273	0,5	7,0
Finlandia	278	0,5	55,7	282	0,9	56,5	43	0,1	8,6
Francia	1272	2,3	22,6	1761	3,2	31,3	841	1,5	14,9
Grecia	500	3,8	49,8	746	5,7	74,3	112	0,8	11,1
Holanda	254	8,1	17,1	552	13,3	37,1	254	6,1	17,1
Hungría	1084	11,7	103,7	249	2,7	23,8	151	1,6	14,4
Irlanda	182	2,6	51,9	93	1,3	26,5	139	2,0	39,6
Italia	2410	8,0	41,9	1700	5,6	29,5	426	1,4	7,4
Luxemburgo	12	4,6	31,7	16	6,2	42,2	6,2	2,3	15,9
Noruega	66	0,2	15,6	226	0,7	53,3	41	0,1	9,6
Polonia	3910	12,5	102,8	1480	4,7	38,9	478	1,5	12,6
Portugal	208	2,3	20,1	132	1,4	12,8	55	0,6	5,3
Reino Unido	3734	15,3	65,0	2606	10,7	45,3	478	2,0	8,3
Rumania	1800	7,6	77,5	390	1,6	16,8	350	1,5	15,1
Suecia	210	0,5	24,6	382	0,8	44,8	62	0,1	0,2
Suiza	68	1,6	10,2	189	4,6	28,3	61	1,5	9,1
URSS	9318	0,4	32,2	4190	0,2	14,5	3180	0,1	11,1
Yugoeslavia	1650	6,4	70,0	480	1,9	20,4	235	0,9	10,0
Total	41006	1,5	56,4	22025	0,8	30,3	8486	0,3	11,7

Estos modelos, no obstante presentan ciertos parámetros de incertidumbre; en primer lugar porque el modelo es estacionario y simplista, con lo que plantea una indecisión en la validez de los niveles críticos, además plantea problemas de mala calidad de los datos iniciales o insuficiencia de la información básica.

A pesar de ello, el modelo puede establecer la realidad del problema de acidificación de los suelos de Europa y predecir el futuro, con cierta aproximación, tal como vemos en las figuras 86 y 87, donde se muestran la deposición total de azufre y las cartografías de los modelos presentes y futuras, del estado de los bosques de Europa⁹³. La evolución de las emisiones de SO_2 y NO_x , responsables de los efectos nocivos sobre la vegetación, hasta el año 2010, lo podemos ver en el gráfico de la figura 88.

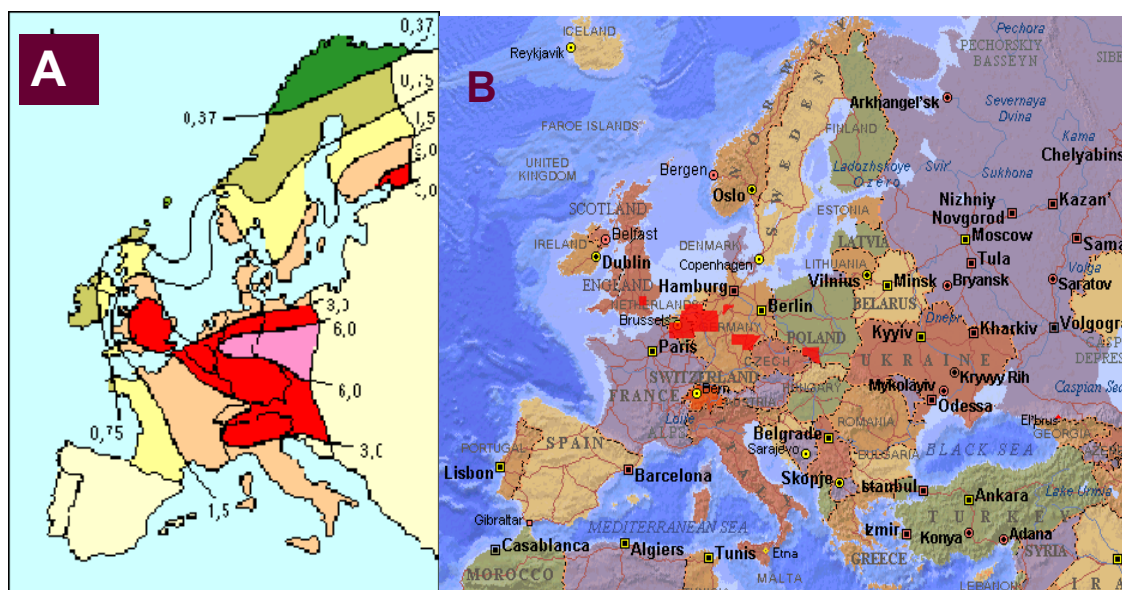


Figura 86.- (A). Distribución de la deposición total de azufre según la CE en 1987 ($\text{g/m}^2/\text{año de S}$). En rojo los valores mayores. (B). Estado actual de acidificación en los bosques de Europa, según el modelo cartográfico. En rojo, los bosques afectados.

Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

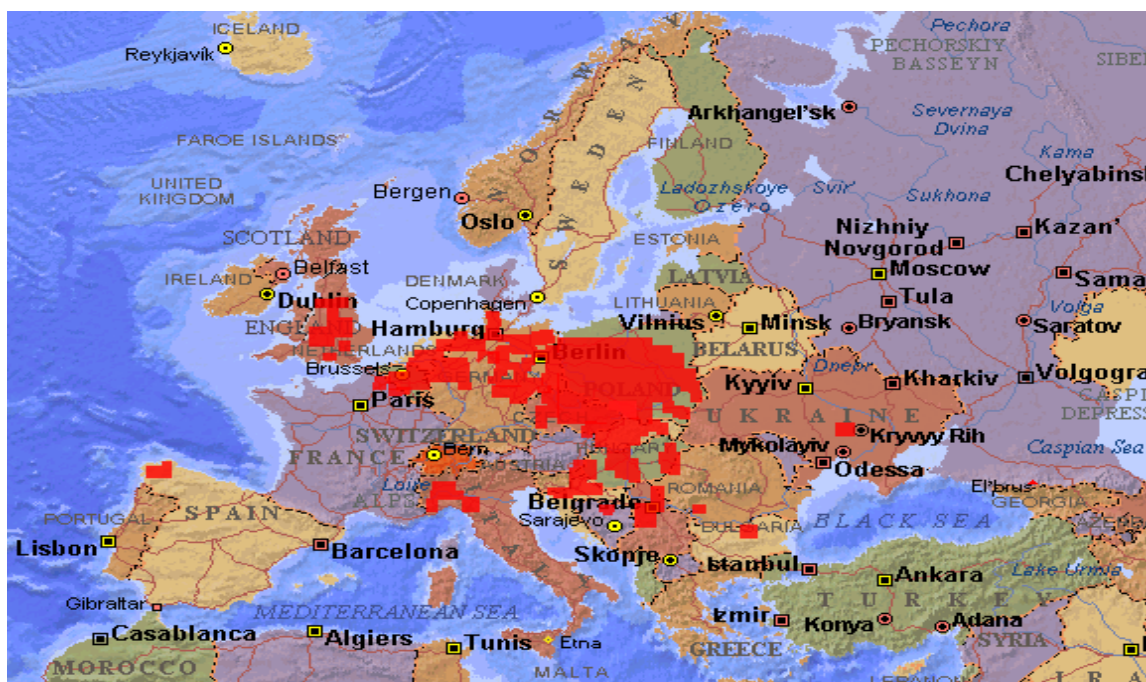


Figura 87.- Modelo cartográfico de cómo se extendería la acidificación de suelos de bosque en Europa en el 2010, incluso si se emplearan tecnologías correctoras de la acidificación. En rojo los bosques afectados. Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

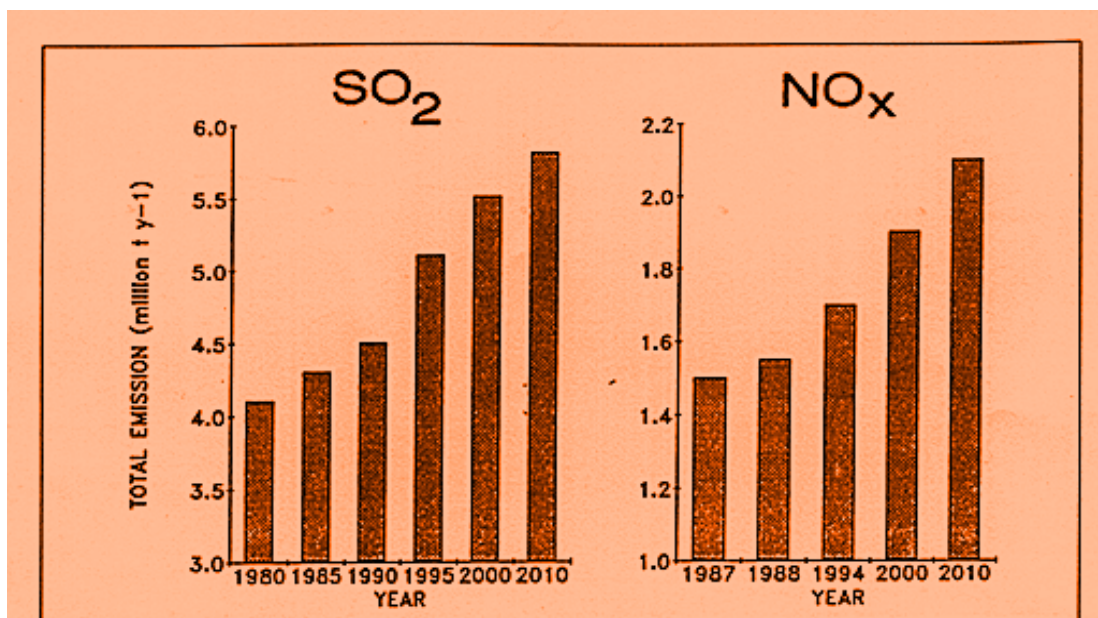


Figura 88.- Evolución prevista de las emisiones de SO₂ y NO_x hasta el año 2010. La distribución de ambos contaminantes es creciente hasta el 2010. Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>.

5.2.- Efectos de la lluvia ácida sobre el agua y los sistemas acuáticos.

Es un problema que reviste mayor gravedad que el del suelo, debido a su menor capacidad de neutralización en comparación con aquel. El agua que escurre de los suelos acidificados, una vez precipitada en forma de lluvia ácida, causa la acidificación de arroyos, ríos y lagos, alterando el equilibrio de los iones presentes en el agua y aumentando el contenido en aluminio y demás metales pesados^{LXII}. Las precipitaciones de lluvia ácida, disuelven los metales contenidos en el suelo y los sedimentos de las cuencas hidrográficas y van separando partículas de materiales solubles, descargando estos metales en los lagos y cursos de agua. De esta forma, la acidificación de las aguas continentales produce una disminución de la llamada capacidad de neutralizar la acidez (CNA), de las aguas. La pérdida de la CNA, se ha asociado a un cambio de pH de hasta 1,5 unidades, con variaciones extremas de 2-3 unidades de pH (Conferencia de Estocolmo, 1982). Los lagos y las corrientes de agua, están menos protegidos contra la acidificación que el suelo y las aguas subterráneas, siendo en los lagos donde primero se notaron los efectos del aumento de ácidos (Conferencia de Estocolmo, 1982).

Las aguas húmicas, en las que la acidez viene regulada por ácidos orgánicos, no se ven afectadas por este proceso.

Sobre los sistemas acuáticos, el efecto más importante de la lluvia ácida es el descenso de las poblaciones de peces, situación especialmente perjudicial para la pesca deportiva y con repercusiones indirectas de tipo económico en el sector del turismo.

Además, se produce una reducción de ciertos grupos de zooplancton, algas y plantas acuáticas; se trastorna la cadena alimenticia global de los lagos y causa desequilibrios ecológicos. Hay estudios, que han demostrado que la trucha y el salmón

^{LXII} Trabajos de Rscoil, (1984).

del atlántico son particularmente sensibles a los niveles bajos de pH, los cuales interfieren con sus procesos reproductivos y dan origen a deformaciones en su esqueleto.

5.3.- Efecto contaminante del aluminio.

Las altas concentraciones de aluminio en las aguas acidificadas por efecto de la lluvia ácida, suelen ser el agente tóxico que mata a los peces y quizás a otras biotas sensibles, como los crustáceos del plancton.

En los lagos alcalinos o casi neutros el aluminio está presente en altas concentraciones, pero en forma de compuestos insolubles en los sedimentos de ríos y lagos. Sin embargo, y a medida que el pH baja, el aluminio comienza a disolverse, al formarse la especie iónica Al^{3+} y una vez en disolución, incluso a bajas concentraciones (0,1-1 mg/L) es muy tóxico para diversas formas de vida acuática. A estas concentraciones, hay que sumar además, las del Al^{3+} que es arrastrado en los procesos de intercambio del NO_3^- en el suelo, producidos por la lluvia ácida. Los estudios realizados en la Cornell University por Baker y Schofield en 1980, demuestran que la toxicidad máxima del Al^{3+} para los peces tiene lugar alrededor de pH 5,0, pero que incluso a valores de pH menores, sigue siendo muy tóxico.

6.- Estaciones de medida y control de la lluvia ácida.

El control de la lluvia ácida en los distintos países, se lleva a cabo mediante dos tipos de estaciones, que ya hemos citado anteriormente:

- Estaciones locales.

En Europa, están incluidas dentro del Programa Corine-Aire de la UE, miden: SO_2 ; NO_x y partículas.

- Estaciones transfronterizas.

En Europa, están agrupadas en la red EMEP (European monitoring and evaluation programme), derivado del Convenio de Ginebra.

Además, existe una red internacional de medida de la contaminación transfronteriza, denominada BAPMoN (background air pollution monitoring network) de la organización meteorológica mundial.

Se mide: SO_2 ; NO_2 ; SO_4^{2-} (aerosol), pH, nitratos, amonio, calcio, cloruros, potasio sodio y magnesio, y mediciones meteorológicas.

En España, existe una red de vigilancia, de la contaminación atmosférica residual o de fondo, que pretende satisfacer los objetivos de los programas EMEP y CAMP (Comprehensive atmospheric monitoring programme), resultante del Convenio de Oslo y París. Funciona en España desde 1983, y está actualmente formada por 10 estaciones de medida, situadas en Noia (La Coruña), Niembro (Asturias), Cabo de Creus (Gerona), Roquetes (Tarragona), Logroño (La Rioja), Campisábalos (Guadalajara), San Pablo de los Montes (Toledo), Zarra (Valencia), Barcarrota (Badajoz) y Víznar (Granada).

Las mediciones obtenidas por estas estaciones permiten determinar los niveles de contaminación residual o de fondo en una región, así como evaluar el transporte desde fuentes emisoras situadas a grandes distancias de ellas.

Como ejemplo, mostramos las medidas realizadas en el año 1999 por estas estaciones para los contaminantes en el aire, en la Tabla XX y para los de la lluvia en la Tabla XXI.

Los valores más importantes para evaluar la posible contaminación por lluvia ácida, son los correspondientes al SO_2 , que se muestran en el gráfico de la figura 89.

La tendencia de concentraciones atmosféricas de SO_2 , en estos últimos años es a la baja. En el año 2002, el valor medio más bajo registrado por las estaciones EMEP en España, fue en diciembre ($1,1 \text{ mg/m}^3 \text{ SO}_2$) y el más alto en febrero ($2,1 \text{ mg/m}^3$), resultando valores comprendidos dentro de las normativas de la UE.

Tabla XX.- Valores medios de las estaciones de medida de la red EMEP/CAMP en España para el año 1999 para contaminantes atmosféricos. Fuente: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio del Medio Ambiente.

Red EMEP/CAMP	Valores medios del año 1999 (método manual)							
	Datos de concentración de contaminantes gaseosos y aerosoles en el aire							
	GASES		AEROSOL					
ESTACIÓN	SO ₂	NO ₂	SO ₄ ⁼	NH ₄ ⁺	H ⁺	PST	HNO ₃ + NO ₃ ⁻	NH ₃ + NH ₄ ⁺
	µgS/m ³	µgN/m ³	µgS/m ³	µgN/m ³	neq/m ³	µg/m ³	µgN/m ³	µgN/m ³
NIEMBRO	1,8	2,3	1,49	0,77	0,37	29	0,48	1,67
BARCARROTA	1,2	3,0	1,05	0,56	0,50	29	0,25	1,28
NOIA	1,4	2,7	1,10	0,71	0,14	16	0,27	0,67
CABO DE CREUS	1,3	3,3	1,51	0,55	0,37	42	0,26	0,97
VIZNAR	0,9	3,6	1,08	0,61	0,21	42	0,46	1,72
CAMPISÁBALOS	1,3	3,5	0,69	0,39	0,52	15	0,20	0,98
LOGROÑO	1,5	3,2	1,97	0,66	0,64	28	0,40	0,62
ROQUETES	1,2	3,3	1,31	0,56	0,30	35	0,79	1,16
SAN PABLO	1,4	3,0	0,71	0,58	0,50	20	0,26	0,13
ZARRA	0,9	3,6	0,98	0,38	0,34	24	0,39	1,89

Tabla XXI.- Valores medios de las estaciones de medida de la red EMEP/CAMP en España para el año 1999 para contaminantes de lluvia. Fuente: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio del Medio Ambiente.

Red EMEP/CAMP	Valores medios del año 1999 (método manual)											
	Datos de concentración de contaminantes en agua de lluvia											
	PRECIPITACIÓN DIARIA											
	ESTACIÓN	PH	SO ₄ ⁼	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	H ⁺	K ⁺	Cond.
		mgS/l	mgN/l	MgN/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µeq/l	mg/l	µS/cm	
NIEMBRO	5,08	1,53	0,66	0,54	5,42	0,61	0,68	8,6	16,82	0,27	55,1	
BARCARROTA	6,20	0,85	0,50	0,39	1,16	0,22	1,27	1,8	1,24	0,33	23,8	
NOIA	5,51	0,66	0,25	0,16	1,72	0,20	0,29	2,7	6,03	0,11	20,8	
CABO CREUS	6,68	6,38	1,11	0,62	38,65	4,79	7,21	88,0	0,30	2,06	291,3	
VÍZNAR	6,57	1,18	0,74	0,28	0,46	0,37	2,14	1,2	0,31	0,22	42,9	
CAMPISÁBALOS	6,13	0,59	0,43	0,37	0,30	0,10	0,98	0,9	1,35	0,11	14,9	
LOGROÑO	6,39	0,90	0,58	0,78	0,41	0,11	1,40	1,0	0,66	0,16	22,3	
ROQUETES	6,77	1,65	1,15	0,75	0,94	0,42	1,06	2,3	0,21	0,18	46,3	
SAN PABLO	6,15	0,71	0,34	0,34	0,38	0,07	0,57	0,8	1,07	0,10	13,9	
ZARRA	6,97	1,11	0,86	0,47	0,96	0,43	5,23	1,7	0,15	0,17	42,2	

En general, los valores que se obtienen en España de concentraciones atmosféricas de SO₂, son bajos, con alguna excepción (figura 89). Debido a estos valores obtenidos, se puede decir que España no tiene problemas de lluvia ácida, por

lo menos en cuanto a la contaminación de fondo, porque la producción de SO_2 si es importante. Como ejemplo, podemos decir que Huelva emite 105.000 T/año de SO_2 , Cartagena 80.545 T/año, Madrid 31.571 T/año y Avilés 24.280 T/año.

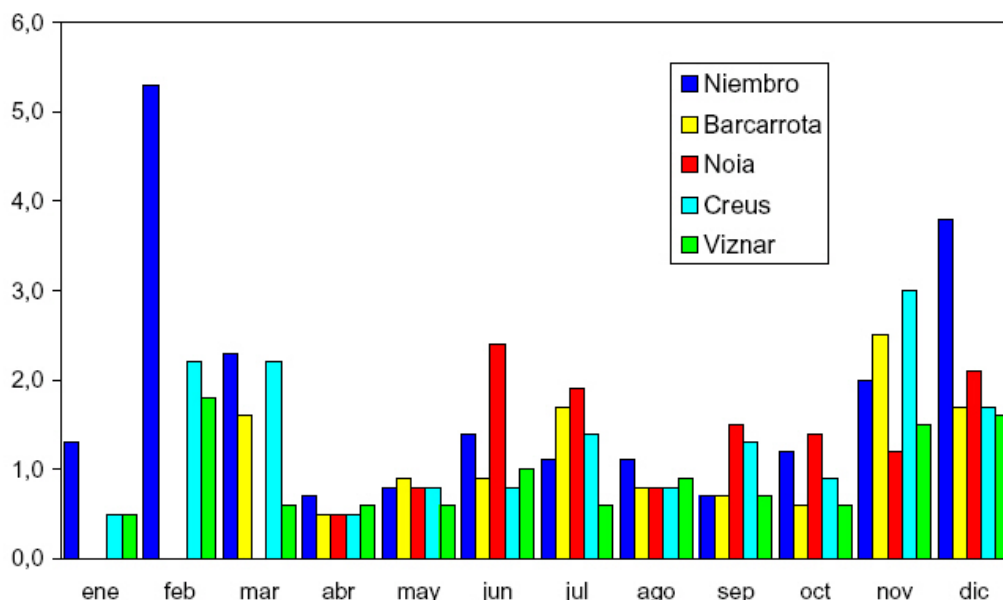


Figura 89.- Valores medios mensuales de algunas de las estaciones de medida (señaladas en la leyenda), de SO_2 en $\mu\text{gS}/\text{m}^3$, para el año 1999. Fuente: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio del Medio Ambiente.

Hay Comunidades Autónomas, que poseen sus propias estaciones de medida, como es el caso de Cataluña, que funcionan desde 1992, y que tienen sensores que miden el pH de la lluvia. Los resultados de estas, arrojan valores medios de pH de lluvia en Barcelona, de 4,57, en la Sierra de Prades de 4,4 y en el Macizo de Montseny de 4,7. A pesar de estos bajos valores de pH, que manifiestan la presencia de lluvia ácida, no se producen sus devastadores efectos.

En España, como veremos en el próximo apartado, los efectos de la lluvia ácida, se deben fundamentalmente a la deposición seca en los alrededores del foco emisor.

7- Las centrales térmicas como focos emisores de óxidos de azufre y productores de lluvia ácida.

Las centrales térmicas, son el primordial foco de emisión de los contaminantes primarios de la lluvia ácida y las principales responsables de este tipo de contaminación. En España, la central térmica que lanza más SO_2 a la atmósfera es la de Puentes (As Pontes) de La Coruña, cuya foto vemos en la figura 90.



Figura 90.- Central térmica de As Pontes (La Coruña), con emisiones superiores a las 600.000 T/año de SO_2 . Fuente: <http://www.arrakis.es/~analor/espana.htm>.

En la figura 91, mostramos en un mapa, la distribución regional de las centrales térmicas en España.

Las emisiones de estas centrales de SO_2 , en el año 1995, se detallan en la Tabla XXII. Actualmente, la emisión más importante de este contaminante, corresponde en cuanto a Comunidades, a las centrales térmicas de la Comunidad de Castilla-León, que podemos ver en la Tabla XXIII.



Figura 91.- Mapa de distribución de las centrales térmicas en España, según emisiones de SO₂. En total hay 47 centrales, distribuidas de la siguiente manera: LA CORUÑA-3; ASTURIAS-4; PAIS VASCO-3; BARCELONA-5; CASTELLÓN-1; MURCIA-1; ALMERÍA-2; MÁLAGA-2; TENERIFE-5; LAS PALMAS-5; CÁDIZ-4; HUELVA-1; CÓRDOBA-1; CIUDAD REAL-2; TOLEDO-1; TERUEL-2; ZARAGOZA-1; PALENCIA-1 Y LEÓN-3.

Tabla XXII.- Emisiones de SO₂ de las principales centrales térmicas de España. Fuente: <http://es.geocites.com/ecored20007termicas5.html>.

CENTRAL	LOCALIDAD	COMBUSTIBLE	SO ₂ T/año
PUENTES	LA CORUÑA	LIGNITO	632.766
ANDORRA	TERUEL	LIGNITO	407.353
MEIRAMA	LA CORUÑA	LIGNITO	188.181
ACECA	TOLEDO	FUEL	2.204
SANTURCE	VIZCAYA	FUEL	1.496
SOTO RIBERA	ASTURIAS	HULLA	30.105
LA ROBLA	LEÓN	HULLA	32.274

Tabla XXIII.- Emisiones de SO₂ y NO_x en T y energía producida en GW/h, de las centrales térmicas de Castilla-León en los años 2000 y 2002. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

Central	Energía producida		
	2000	2002	% +
Anllares	2.500	2.838	13,5
Compostilla	7.575	7.722	1,9
La Robla	4.703	4.508	-4,2
Velilla del Río Carrión	3.232	3.378	4,5
CC.TT. Castilla y León	18.010	18.446	2,4
CC.TT. ESPAÑA	85.257	89.932	5,5
% sobre España	21,1	20,5	-2,9
Central	Dióxido de azufre (SO ₂)		
	2000	2002	% +
Anllares	20.517	20.396	-0,6
Compostilla	65.534	87.730	33,9
La Robla	70.644	56.297	-20,3
Velilla del Río Carrión	27.011	23.430	-13,3
CC.TT. Castilla y León	183.706	187.853	2,3
CC.TT. ESPAÑA	943.497	1.084.356	14,9
% sobre España	19,5	17,3	-11,0
Central	Óxidos de nitrógeno (NO _x)		
	2000	2002	% +
Anllares	15.170	17.155	13,1
Compostilla	38.360	39.403	2,7
La Robla	23.607	25.950	9,9
Velilla del Río Carrión	11.595	14.414	24,3
CC.TT. Castilla y León	88.732	96.922	9,2
CC.TT. ESPAÑA	260.326	278.109	6,8
% sobre España	34,1	34,9	2,2

Una vez establecida la responsabilidad de las centrales térmicas, como principales fuentes productoras de lluvia ácida, se hace preciso buscar soluciones para evitar su contaminación.

Puesto, que el problema es la cantidad de azufre que contienen los combustibles fósiles que utilizan las centrales térmicas, y que en su combustión producen SO₂, como dijimos en el capítulo 1, se han buscado soluciones que eliminen el azufre del combustible. A estos métodos se denominan de **desulfuración**, y se pueden agrupar en los siguientes:

Desulfuración del combustible.- Consiste en la eliminación del S del carbón antes de su combustión por lavado del S inorgánico. La problemática que presenta este método es que no elimina el S orgánico, pero aún así produce la supresión de un total del 30 al 35% de S, con una disminución de las emisiones cifradas en un 20-25%

Desulfuración durante la combustión, por tratamiento con calizas, según la reacción: $\text{SO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4$. El problema de este método es que no se puede instalar en plantas en funcionamiento; solo en plantas nuevas y de baja potencia.

Procesos de desulfuración de gases.- Denominados FGD (flue-gas desulfurization), son derivados de los anteriores, pero se pueden instalar en plantas en funcionamiento. Extraen directamente el SO_2 de los gases emitidos. Disminuyen las emisiones en un 85 a 95% y tienen muchas ventajas por lo que son los más empleados. Un esquema de su funcionamiento se muestra en la figura 92.

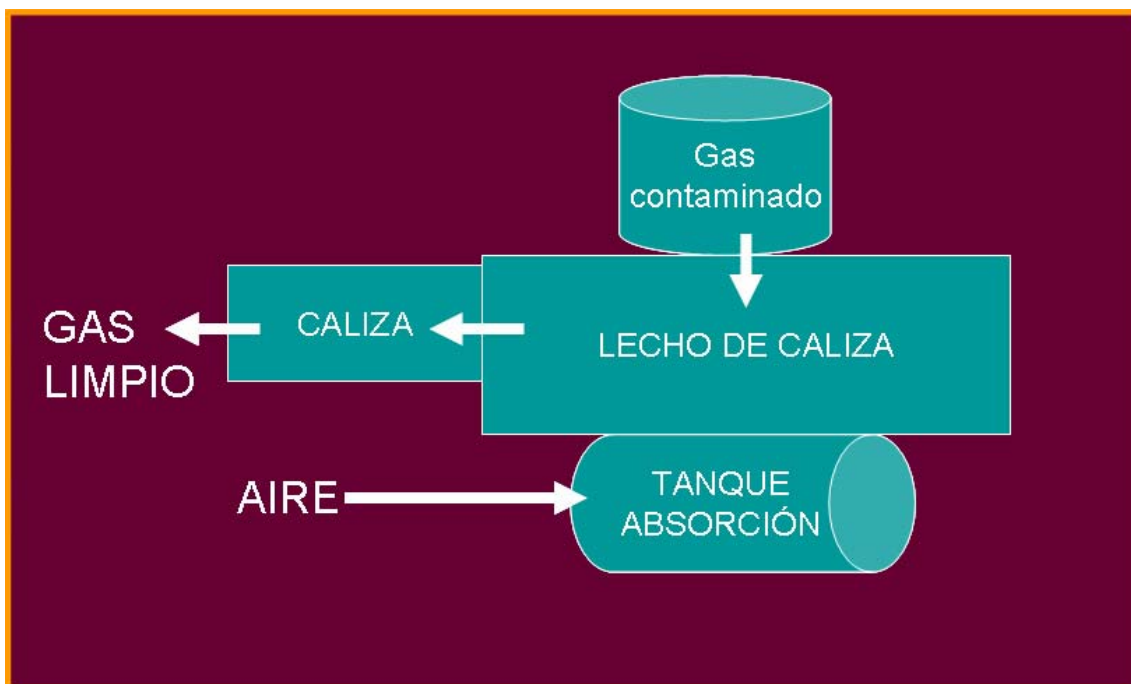


Figura 92.- Esquema de funcionamiento del método FGD. El gas contaminado penetra en un lecho de caliza, donde se producen las reacciones: [1] $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HSO}_3^- + \text{H}^+$; [2] $\text{HSO}_3^- + \text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$; [3] $\text{SO}_4^{2-} + \text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{CaSO}_4$ (yeso) + $2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$. Debajo del lecho de caliza hay un tanque de absorción, donde penetra el aire necesario en la reacción [2] y rocía de agua. De esta manera sale el gas limpio de SO_2 .

Este método ha sido empleado, con gran éxito por ENDESA⁹⁴ en su central térmica de Andorra (Teruel). Se había responsabilizado a esta central de la lluvia ácida que devastó las masas forestales de la comarca levantina de Els Ports y parte de la turolense de El Maestrazgo, y aunque algunos estudios afirmaban que esta responsabilidad era compartida por los complejos petroquímicos de Pinatubo y Marsella, debido a las particularidades de la circulación de la atmósfera en la zona, la empresa decidió instalar los sistemas anticontaminantes FGD, y dedicar 2.000 millones de pesetas a un plan de recuperación económica en los municipios afectados por la deforestación. Las pruebas de lavado de gases en la unidad de desulfuración han constatado que se ha **reducido en un 95%**⁹⁵ la contaminación generada por esa central térmica. La inversión realizada por la empresa en este sistema ha sido del orden de 25.000 millones de pesetas. El proceso genera una gran cantidad de yeso, que puede ser empleado por las empresas constructoras y permite el aprovechamiento de los lignitos de la cuenca turolense, caracterizados por su alto contenido en azufre. Cada uno de los tres grupos de combustión de la central se conecta a un complejo de lavado que, tras efectuar la limpieza de los gases, devolverá a éstos a la chimenea, con unas emisiones ya no contaminantes.

La situación anterior hacía inviable la continuidad de la central. La nueva planta de desulfuración de Andorra es una de las más importantes de Europa por volumen de inversión y capacidad de lavado, y la más avanzada en el ámbito tecnológico.

Otra forma de reducir la contaminación de las centrales térmicas, es la construcción de **centrales térmicas de ciclo combinado**⁹⁶. En la figura 93, se muestra un esquema de funcionamiento de este tipo de centrales, comparado con una central térmica convencional. Las centrales de ciclo combinado están compuestas por: Una o más turbinas a gas, que representan 2/3 de la generación total de la planta; una o más turbinas a vapor, que representan 1/3 de la generación total de la planta, uno o más HRSG (chimenea recuperadora de calor), que realiza la evaporación del agua,

para inyectarla en forma de vapor en la turbina a vapor y debe haber tantos como turbinas a gas; estación medidora y reductora de la presión del gas natural, más la tubería de la central; sistema de control basado en microprocesadores para la central; estanque de almacenamiento para el combustible de respaldo (petróleo, diesel) y sistema de refrigeración, si es que la zona donde se instalará la planta no cuenta con refrigeración natural (agua de mar, pozos profundos, etc.)⁹⁷.

Las centrales térmicas que utilizan carbón desgasificado, denominadas CCGI (ciclo combinado de gasificación integrada), son las más empleadas dentro de esta tecnología, ya que el carbón sigue siendo barato. En Puertollano (España), estará en funcionamiento la mayor central del mundo de este tipo, y es solamente uno de los diversos proyectos que están también en curso en los Estados Unidos, Europa y Japón⁹⁸. En una central combinada de este tipo, se obtiene a partir del carbón, un sustituto del gas natural, que se quema después en un esquema de ciclo combinado, produciendo electricidad, lo que constituye una buena solución tecnológica para producir energía eléctrica a partir del carbón, con alto rendimiento y escasas emisiones contaminantes. Sin embargo, el alto coste de este sistema, congeló su desarrollo hasta que las presiones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales térmicas centraron otra vez el interés por esta tecnología.

En los últimos años, se ha desarrollado otra tecnología muy prometedora, las **centrales térmicas con biomasa** como combustible. En España, existe el proyecto de dos centrales, en Burgos y Huesca, que emplearían como combustible el cardo (*cynara cardunculus*). Para la generación de electricidad a una población de 60.000 habitantes, se necesitarían 105.000 T de cardos por año, que generarían 91,2 GW/h. La provisión de cardos sería autóctona, convenciendo a los agricultores de la zona para que los cultiven, con la compensación económica correspondiente⁹⁹.

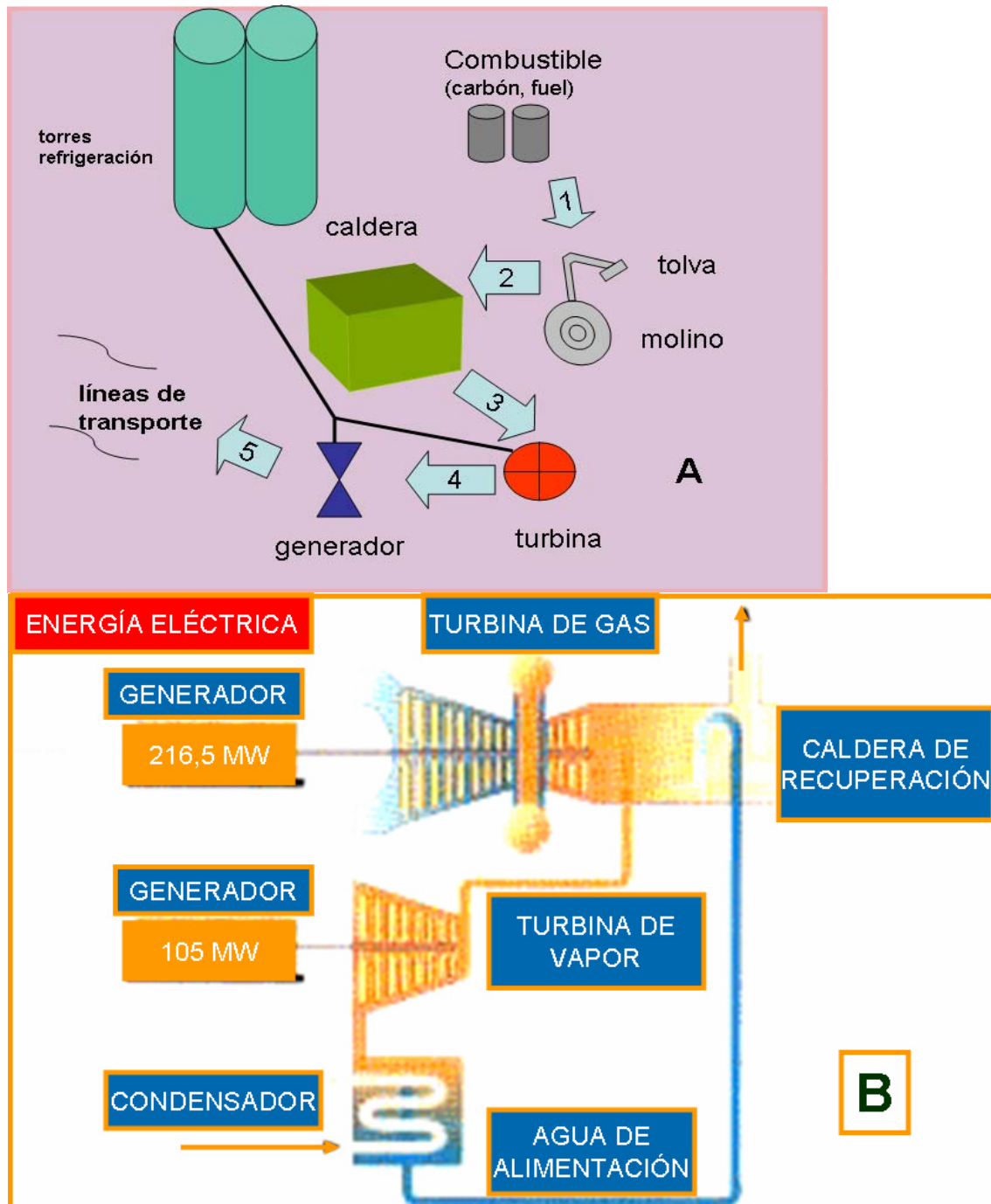


Figura 93.- (A). Esquema simple de una central térmica convencional. (B). Esquema simple de una central de ciclo combinado. Es un ciclo de potencia basado en el acoplamiento de dos ciclos producidos por una turbina de vapor y una turbina de gas. El calor no utilizado en uno se emplea como fuente de calor del otro. El impacto ambiental es menor, con reducción en las emisiones de SO_2 y NO_x . Fuentes: (A) Propia. (B). Modificado de <http://www.cipres.cec.uchile.cl>. Esquemas de funcionamiento completos se ofrecen en la sección de material complementario.

8.- Acciones Internacionales.

Las principales acciones internacionales, conducentes al control de la lluvia ácida son las siguientes:

El Convenio de Ginebra de 1979 y sus protocolos.

Es un convenio sobre contaminación transfronteriza a gran distancia, que entró en vigor el 16 de marzo de 1983. Es programático y de escaso contenido. Sin embargo, de ahí surge el “Programa concertado de seguimiento y evaluación del transporte a gran distancia de los contaminantes atmosféricos en Europa”, denominado EMEP, que ya hemos mencionado y que proporciona información diaria de las concentraciones y deposiciones de los contaminantes atmosféricos mediante una red de más de noventa estaciones de control del dióxido de azufre y sustancias afines, situadas en veinticuatro países.

Protocolo de Sofía de 1988.

Relativo a la lucha contra las emisiones de NO_x o sus flujos transfronterizos.

Protocolo de Ginebra de 1984.

Establece un mecanismo encargado de la financiación del EMEP.

Protocolo de Helsinki de 1985.

Se comprometen las partes a reducir sus emisiones anuales de dióxido de azufre o sus flujos transfronterizos, al menos en un 30% antes del año 1993, tomando como referencia para el cálculo de las reducciones el nivel de emisiones del año 1980.

Protocolo de Ginebra de 1991.

Relativo a la lucha contra las emisiones de compuestos orgánicos volátiles o sus flujos transfronterizos.

Protocolo de Oslo de 1994.

De reducción adicional de las emisiones de dióxido de azufre, reguladas por el protocolo de Helsinki.

CONCLUSIONES

En este problema de contaminación no hay posturas encontradas. Está claro quienes son los contaminantes que generan la lluvia ácida, SO_2 y NO_x como primarios y H^+ , SO_4^{2-} y NO_3^- , NH_x , como secundarios, y quién es el principal foco emisor, las centrales térmicas, además de la producida por otras fuentes en la combustión de hidrocarburos que llevan azufre y nitrógeno¹⁰⁰.

Como siempre, el control de los contaminantes es fundamental, para obtener la información necesaria, y para ello se utilizan redes automáticas de medida, bien locales englobadas en el Programa Corine-Aire o transfronterizas, dentro del Programa EMEP.

A partir de los datos de las estaciones de medida, resulta diáfano que las lluvias ácidas son fundamentalmente de carácter transfronterizo y que provocan importantes daños en el suelo y en las aguas continentales.

Hay diferentes sensibilidades de los suelos para un mismo contaminante, que se puede medir con el método de la CCA. En los países nórdicos los suelos tienen bajo poder amortiguador frente a la acidez, de tal manera que el pH de los suelos baja rápidamente y se liberan grandes cantidades de aluminio, que va a los ríos. En los países mediterráneos, por el contrario, sus suelos fuertemente protegidos frente a la acidez, dada la abundancia de materiales carbonatados, son capaces de neutralizar el impacto de las lluvias ácidas.

Se hace preciso actuar sobre la fuente de emisión, bien construyendo nuevas centrales térmicas de ciclo combinado o de biomasa, menos contaminantes, o implantando tecnologías de desulfuración en las centrales térmicas en funcionamiento, como se ha realizado con gran éxito en la de Andorra.

Por último, aunque solo sea por motivos de reducción del gasto sanitario, también se debe reducir la contaminación por SO_2 . En China han evaluado los costos y beneficios, calculando la relación entre contaminación atmosférica y mortalidad,

provocada por enfermedades respiratorias en Beijing¹⁰¹. Del análisis, se desprende que eliminando anualmente 100 toneladas de SO₂ de la atmósfera de Beijing podría salvarse una “vida estadística”. Considerando que eliminar una tonelada de SO₂, resulta muy barato, ya que costaría unos US\$3, realmente los beneficios superan a los costos.

“El mundo es para el hombre una tienda de campaña levantada un instante para albergarle un día”.

Castelar

CAPÍTULO 5

EL EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

1.- El efecto invernadero “natural”.

La atmósfera terrestre es transparente a la radiación solar incidente, y aunque una pequeña fracción de esa radiación se refleja al espacio, la mayoría llega hasta la superficie terrestre, donde es absorbida y emitida a la atmósfera, transformada en radiación térmica infrarroja. Por otra parte, la atmósfera contiene gases que no son transparentes a la radiación infrarroja y como consecuencia, la absorben y la reemiten a la superficie terrestre, provocando que esta se caliente más de lo que lo haría sin la presencia de aquellos gases atmosféricos, que denominamos de efecto invernadero, y a su consecuencia el “efecto invernadero natural”¹⁰². En la figura 94, se muestra un esquema explicativo de este proceso.

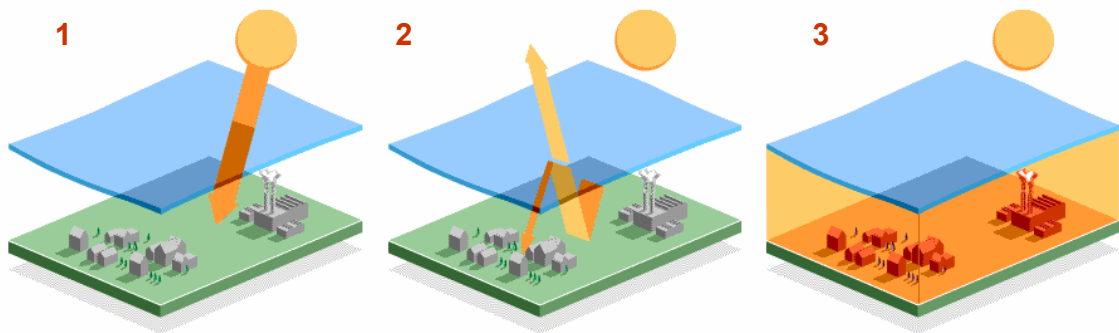


Figura 94.- (1). La luz solar incide en la superficie terrestre. (2). Esta es absorbida y reemitida en forma de radiación infrarroja. Parte de esta radiación, escapa de la Tierra, pero otra es absorbida por los gases atmosféricos de efecto invernadero, que la reemiten a la superficie terrestre. (3). Como consecuencia se produce un calentamiento, a nivel troposférico, que por analogía, se denomina “efecto invernadero”. Este es un proceso “natural”. Fuente: BBC Mundo. Cambio climático. <http://www.bbc.co.uk>.

Gracias a este efecto natural de retención del calor de algunos gases atmosféricos, la temperatura media en la Tierra es de unos 15°C, de lo contrario, las condiciones serían muy extremas para los habitantes del Planeta, ya que la temperatura media bajaría a los -18°C; resultando pues, 33 °C mayor que si no existieran esos gases, por lo que el llamado efecto invernadero natural, es beneficioso para la Vida en el Planeta.

Se le llama efecto invernadero por similitud, porque en realidad la acción física por la que se produce es totalmente distinta a la que sucede en el invernadero de plantas.

2.- Gases de efecto invernadero.

Los gases atmosféricos más importantes, con capacidad de absorción de la radiación infrarroja son: **CO₂; CFCs; CH₄ (metano); N₂O (óxido nitroso) y el vapor de agua.**

La efectividad de estos gases para contribuir al calentamiento global depende de su tiempo de vida en la atmósfera, y de sus interacciones con otros gases y con el vapor de agua.

Las fuentes de procedencia de estos gases, así como su concentración atmosférica, se dan en la Tabla XXIV.

El metano realiza un papel moderado de efecto invernadero, mientras que la acción principal del N₂O y de los CFCs es la de destrucción de la capa de ozono; el vapor de agua tiene poco efecto, aunque su concentración es la mayor de todos los gases de efecto invernadero, debido al ciclo del agua, ya que al aumentar su concentración, se condensa y precipita en forma de lluvia, con lo que se mantiene constante. Por tanto, como vamos a ver a continuación, el papel protagonista del efecto invernadero se le asigna al CO₂.

Tabla XXIV.- Fuentes, concentración atmosférica y papel desempeñado por los gases atmosféricos de efecto invernadero que absorben la radiación infrarroja. Fuente: OMS.

GAS	PROCEDENCIA	PROCESOS ANTROPOGÉNICOS	CONCENTRACIÓN	PAPEL
METANO	PANTANOS, ESTIÉRCOL, GRISÚ, BACTERIAS ANAEROBIAS	16-210 MT/AÑO	S.XIX 1,5 ppm 1985 1,64 ppm	MODERADOR
N₂O	DESNITRIFICACIÓN BACTERIAS SUELO Y AGUAS	AUMENTO 0,3% ANUAL (ABONOS)	310 ppb	EFFECTO CATALÍTICO DESTRUCCIÓN OZONO
CFCs	SOLO ANTROPOGÉNICO	1,15MT/AÑO	CFC11-0,22ppb CFC12-0,38ppb ↑5% ANUAL	DESTRUCCIÓN OZONO
VAPOR DE AGUA	CICLO DEL AGUA		3-30 VECES MAYOR CO₂ LIMITACIÓN CONDENSACIÓN VAPOR	EFFECTO POCO SIGNIFICATIVO
CO₂	COMBUSTIONES	COMBUSTIBLES FÓSILES	20.000 T/AÑO HACE 150.000 AÑOS (CLIMA ACTUAL)- 270ppm HACE 20.000 AÑOS- 200 ppm 1800-275 ppm 1985 345 ppm RITMO ANUAL CRECIMIENTO-1 ppm	MUY SIGNIFICATIVO

Hemos dicho, en el apartado anterior, que el efecto invernadero es bueno para el Planeta. El problema no es el efecto “natural” de los gases que producen ese efecto, sino que lo es el aumento de estos en la atmósfera, producido por las actividades humanas. En efecto, a comienzos del siglo XX y debido a la quema de grandes masas de vegetación para ampliar las tierras de cultivo, o en los últimos decenios de dicho siglo, por el uso masivo de combustibles fósiles, como el petróleo, carbón y gas natural, para obtener energía y los procesos industriales, han provocado que la concentración media de CO₂ se haya incrementado desde unas 275 ppm antes de la

revolución industrial, a 315 ppm cuando se empezaron a usar las primeras estaciones de medida exactas en 1958 y hasta 361 ppm en 1996. En la figura 95, se muestra un gráfico de la evolución de las concentraciones atmosféricas del dióxido de carbono, desde el año 900.

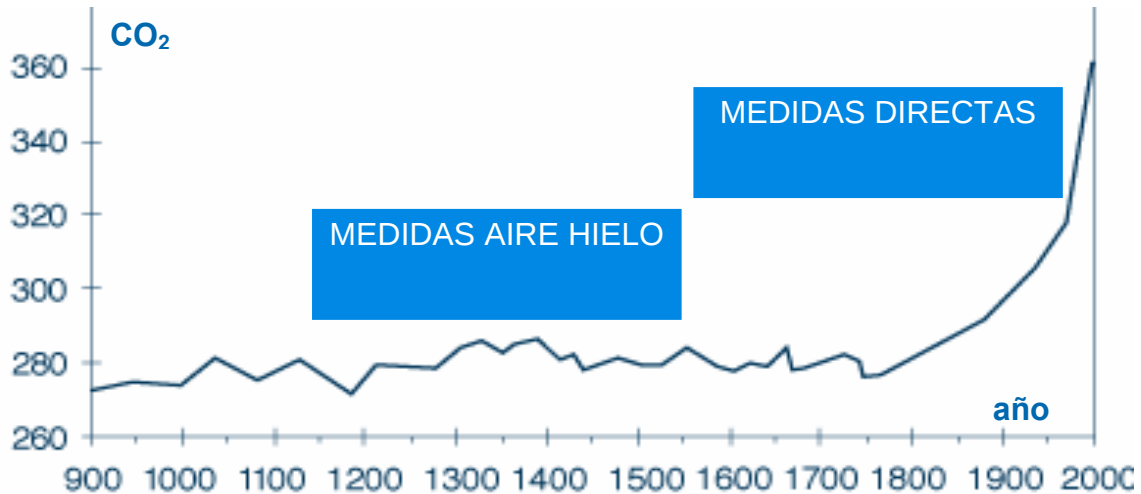


Figura 95.-Evolución histórica de las concentraciones de CO₂. Desde el año 1958, se utilizan medidas atmosféricas directas. Las anteriores, se realizan sobre muestras de aire antiguo, atrapado en el hielo de los polos, fundamentalmente de la Antártida.

Fuente: <http://www.fisica.uson.mx>.

En cuanto a los otros gases, los niveles de metano se han doblado en los últimos 100 años, ya que en 1800 su concentración atmosférica era de aproximadamente 8 ppmv y, en 1992 de 17 ppmv, mientras que la cantidad de óxido nitroso, se incrementa en un 0,25% anual. Por otra parte, la concentración de CFCs, de origen exclusivamente antropogénico, era de 2,7 ppmv en 1980 y de 4 ppmv en 1990 (datos del PNUMA, 1992), aunque se supone decrecerán, ya que están siendo sustituidos por los HCFCs y HFCs como hemos visto en el capítulo 3.

3.- El potencial de calentamiento global.

La efectividad del efecto invernadero de los gases atmosféricos, que son capaces de generarlo, se mide con un indicador llamado el potencial de calentamiento

global (PCG). Este factor en el dióxido de carbono, es inferior al resto (Tabla XXV), pero su contribución real es la mayor, tal como apreciamos en la Tabla XXVI.

Tabla XXV.-Potencial de calentamiento global PCG, para un intervalo de 100 años, de los gases de efecto invernadero. La referencia es el CO₂ que se le asigna por convenio el valor 1. Fuente: Libro electrónico “Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente”.

Gas	PCG
CO₂	1
CH₄	11
N₂O	270
CFC-11	3400
CFC-12	7100
HCFC-22	1600
HFC-134	1200

Tabla XXVI.- Contribución real en % al calentamiento global de los gases de efecto invernadero. Fuente: Libro electrónico “Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente”.

GAS	%
CO₂	76
CFCs	5
METANO	13
N₂O	6

El dióxido de carbono tiene mayor concentración atmosférica, que los demás gases de efecto invernadero, con la excepción del vapor de agua^{LXIII}, y eso hace que sea el principal contribuyente al calentamiento por efecto invernadero, pero el hecho que el CH₄ tenga un PCG once veces mayor que el del CO₂ explica el porqué de que aunque sea mucho menos abundante que el CO₂ en la atmósfera (1,71 frente a 361 ppmv, en 1996), también puede contribuir significativamente al calentamiento global¹⁰³.

En realidad, el hecho de que las emisiones de CO₂ puedan causar el calentamiento de la Tierra, fue descrito por Arrhenius hace más de 100 años, pero la evidencia experimental no se establece hasta el año 1950, y cada vez hay mas convicción de que la composición de la atmósfera ha cambiado desde el comienzo de la revolución industrial y que la velocidad de cambio es actualmente mucho mayor.

La combustión de los combustibles fósiles que lanzan CO₂ a la atmósfera, es el origen del problema del calentamiento global. En España, las emisiones de CO₂ aumentaron en un 38% en el periodo comprendido entre 1990-2002, siendo la Comunidad de Andalucía, la de mayor aumento (46,18%). Todo ello, provocado por un enorme incremento en el consumo de la energía, como podemos deducir de los siguientes datos: en 1990, el consumo de energía en España, fue de 90,6 MTep, en el 2002 de 132,16 MTep, con un aumento del 46%, con respecto al año 1990, y se prevé que en el 2010 el consumo sea de 168 MTep, con un incremento del 3% anual, por lo que en definitiva se aumentará en un 64 % el consumo de energía desde el año 1990 al 2010. En el mismo sentido, crecen las emisiones de CO₂, desde las 227 MT en 1990 a las 323,5 MT en el 2002, con un incremento del 42,27%, y aunque actualmente las emisiones de CO₂ están reguladas por el Protocolo de Kioto, que España firmó, no hay signos de disminución de las emisiones, sino más bien lo contrario.

^{LXIII} Hemos visto que la concentración de vapor de agua está limitada al ciclo del agua y no contribuye significativamente al efecto invernadero.

4.- El ciclo del dióxido de carbono.

El CO_2 , se emite a la atmósfera bien por fuentes naturales, como las emanaciones volcánicas, la respiración de la biomasa vegetal, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica del suelo, o por fuentes antropogénicas, que son las más importantes, con una media de 6.000 MT/año, debidas a la combustión de los combustibles fósiles, sobre todo del carbón y el petróleo. Un gráfico del ciclo del CO_2 , se muestra en la figura 96, mientras que la producción y pérdida de CO_2 , dentro del mismo, se puede ver en la figura 97.

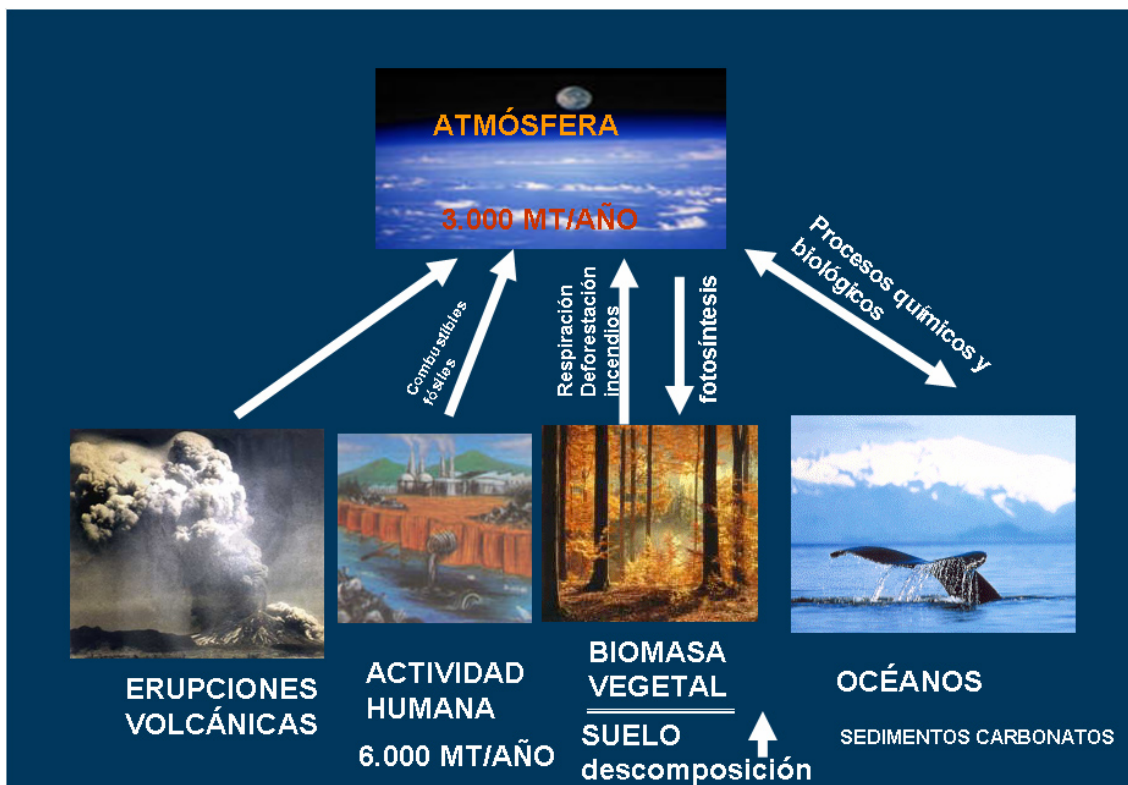


Figura 96.- Ciclo del CO_2 . Las fuentes naturales (erupciones volcánicas biomasa vegetal y descomposición de materia orgánica del suelo) y las antropogénicas (combustiones), lanzan a la atmósfera dióxido de carbono, que se acumula a razón de unas 3.000 MT/año, a pesar de que hay un intercambio con la biomasa vegetal y los océanos que absorben parte del CO_2 atmosférico.

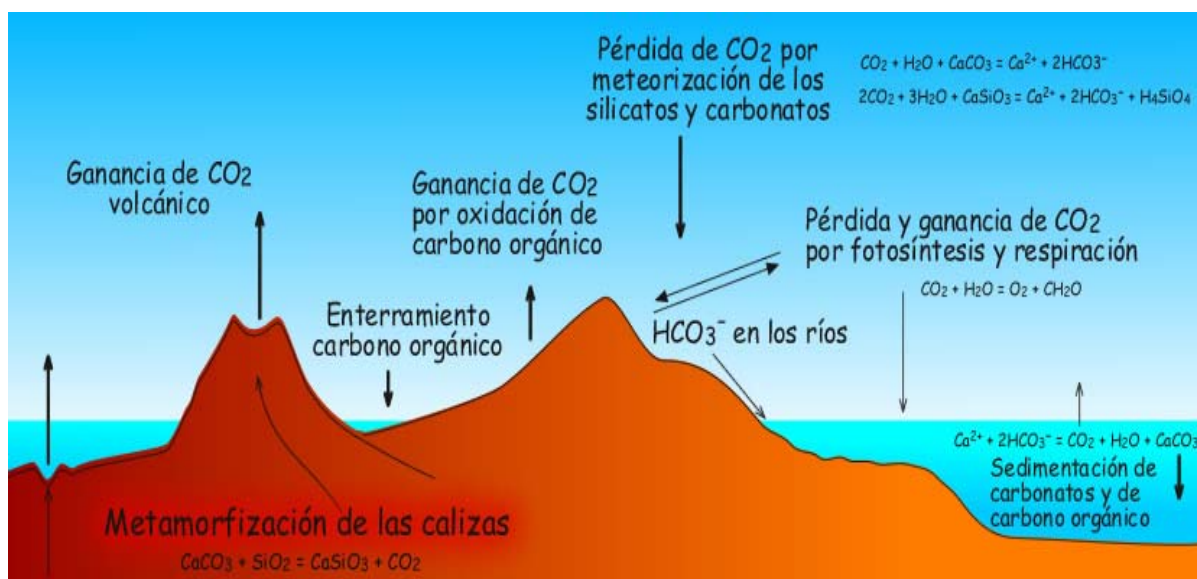
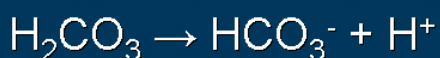


Figura 97.- Producción y pérdida de dióxido de carbono en su ciclo. 1.- Ganancia de CO₂:
a) en la metamorfización de las calizas $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$; b) en la sedimentación de carbonatos y de carbono orgánico en los ríos, se produce CO₂, que por evaporación se emite a la atmósfera $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3$; y c) ganancias directas de CO₂ volcánico, por oxidación de carbono orgánico y respiración de la biomasa vegetal. 2.- Pérdidas de CO₂: meteorización de silicatos y carbonatos $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ y $2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$; y la fotosíntesis $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{CH}_2\text{O}$. Además en los océanos se retira CO₂ en forma de calizas, como después veremos. Fuente: <http://www.homepage.mac.com>.

Dentro del ciclo del CO₂, tiene gran importancia el intercambio que se produce entre la atmósfera y los océanos de este gas, y que supone una efectiva retirada del dióxido de carbono de aquella, en forma de carbonato cálcico (calizas), con la consecuente regulación del efecto invernadero del CO₂ y por tanto también del calentamiento global. El problema, es que el CO₂ es ácido y disminuye el pH de las aguas superficiales, con la consecuencia de extinciones de peces y una merma en los recursos pesqueros¹⁰⁴. Este proceso, es similar al estudiado en el apartado del ciclo del SO₂ dentro del capítulo anterior, aunque en este caso, las reacciones que se establecen, son:



$$K_1 = 4,47 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$$

$$K_2 = 5,62 \cdot 10^{-11} \text{ mol/L}$$

La dependencia de estas reacciones químicas, son las mismas que las estudiadas en el ciclo del SO_2 , con especial atención a los factores de flujos laminar y turbulento de los océanos. En las aguas continentales, con exceso de bicarbonato, debido a la meteorización de carbonatos y silicatos, se produce también un flujo de emisión de CO_2 a la atmósfera, (figura 98), como establecimos por otra parte anteriormente (ver figura 97).

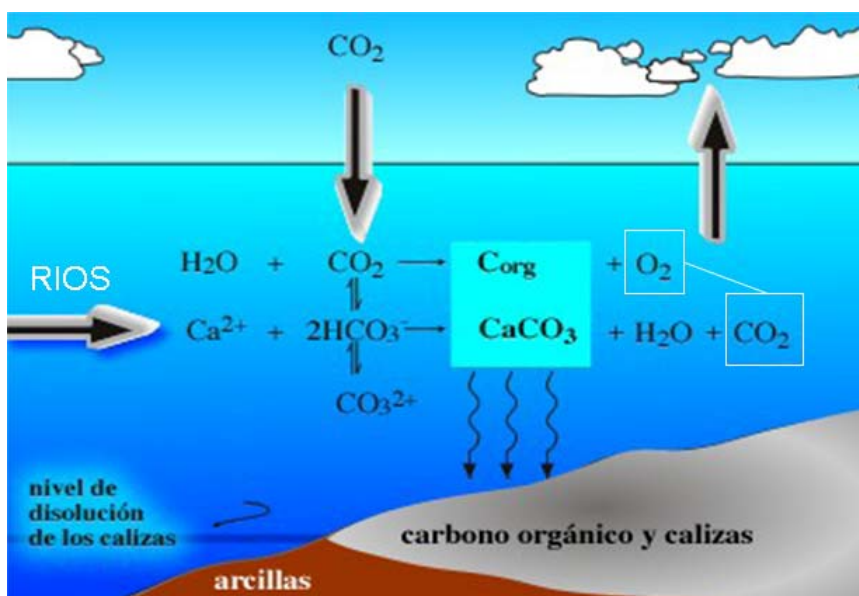


Figura 98.- Reacciones de retirada y emisión de dióxido de carbono en las aguas continentales. El CO_2 atmosférico, reacciona con el agua para dar C orgánico que sedimenta $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Corg} + \text{O}_2$, y además en su reacción con el agua, produce también bicarbonatos, que por otra parte ya están presentes por el proceso de meteorización y que al oxidarse a carbonatos sedimentan como calizas. En esta última reacción se forma CO_2 , que se reemite a la atmósfera: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \downarrow$. Fuente: <http://www.homepage.mac.com>.

Los océanos han absorbido ya un 48% del CO₂, emitido por la industria y los vehículos, desde el año 1800. El Atlántico Norte ha acumulado el 23% de toda la contaminación de CO₂, aunque solo representa el 15% de la superficie marítima^{LXIV}.

Otro factor importante, de retirada de dióxido de carbono en su ciclo, es la absorción por parte de la biomasa vegetal, tal como se observa en la figura 99.

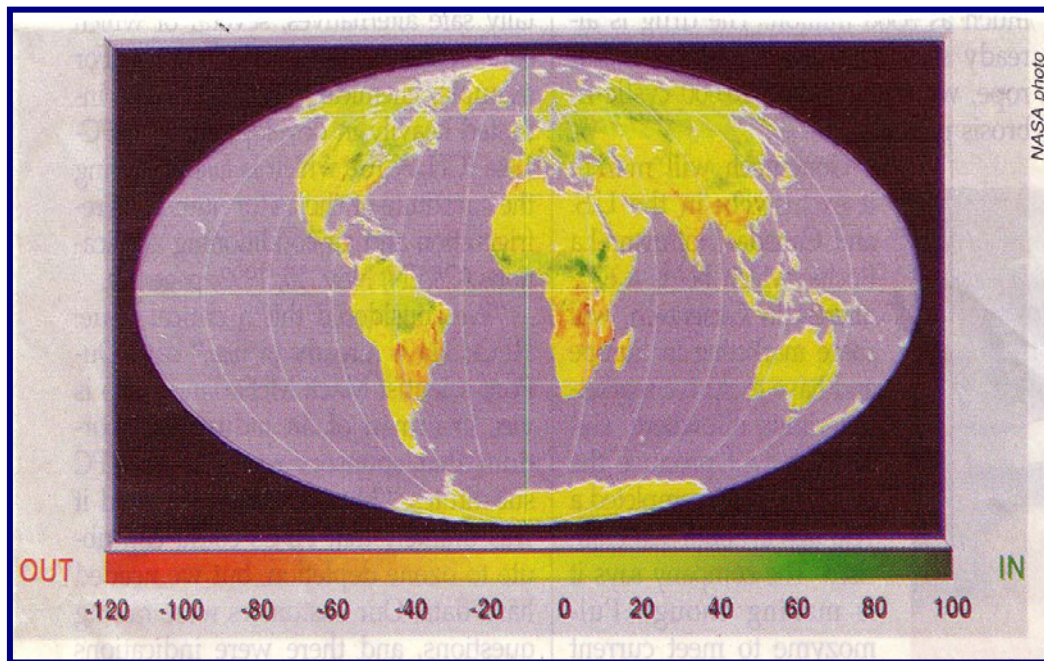


Figura 99.- Absorción de CO₂ por la biomasa vegetal, en g/m²/mes de junio. Verde.- Representa fijación o absorción. Rojo.- Liberación. Amarillo.- No intercambio o pequeña cantidad atrapada. Fuente: NASA.

La conservación de la biomasa vegetal es pues vital, ya que representa una importante regulación del CO₂ atmosférico y del calentamiento global, resultando un verdadero desastre la deforestación por tala de árboles o incendios.

^{LXIV} Este trabajo acaba de ser publicado en Science. Informa: La Vanguardia Digital. 16-7-2004.

5.- El cambio climático.

Hay un consenso internacional, de que se está produciendo un cambio climático a nivel global, debido a un aumento del efecto invernadero, consecuencia de la actividad humana, principalmente como hemos dicho por la utilización de los combustibles fósiles como fuente de energía.

En la declaración final de la reunión de Nordwijk de 1989, se decía: “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”.

Los efectos producidos por el previsible cambio climático, no serían iguales en todas las regiones del Planeta, por ejemplo el clima sería más húmedo cerca del Ecuador, y más seco cuanto más al norte, lo que comprendería gran parte de Europa, Estados Unidos, o Canadá, todo ello debido a una distribución irregular de las temperaturas, que traería consigo una alteración del movimiento de las masas de aire del Planeta, que actualmente es más o menos regular¹⁰⁵.

Por otra parte, los efectos no serían negativos en todas las regiones. En general, saldrían beneficiadas las regiones de latitud media-alta, que tendrían inviernos menos fríos. Sin embargo, el sur de Norteamérica y de Europa, así como las zonas tropicales sufrirían más calor, sequías o quizá desertización. Las zonas septentrionales de Norteamérica y Asia experimentarían un calentamiento de hasta un 40% superior a la media; aunque en realidad, las previsiones apuntan a que las consecuencias serán peores donde hay más pobreza.

En cualquier caso, el riesgo es que un cambio de clima que se prevé muy rápido, entre 50 y 100 años, trastorne gravemente los ecosistemas y las condiciones de vida, con alteración de las corrientes marítimas, que tienen una importante función reguladora del clima. De esta forma, los fenómenos meteorológicos extremos, como los ciclones o el fenómeno de El Niño, podrían hacerse más acusados y frecuentes. Además, todo el Planeta acusaría la subida del nivel de los mares¹⁰⁶, en especial zonas bajas como Nueva York o Bangla Desh.

5.1.- Los modelos climáticos.

Para predecir los cambios climáticos que se avecinan, se utilizan los llamados modelos climáticos, consistentes en algoritmos matemáticos, que sobre un determinado escenario, son capaces de prever situaciones futuras.

Los primeros modelos, eran monodimensionales y solo tenían en cuenta el parámetro altitud. Trabajaban con flujos radiactivos de la luz solar incidente, con la radiación infrarroja emitida, con un albedo terrestre del 30% y con el contenido de CO₂ atmosférico existente en ese momento. Posteriormente, surge el llamado modelo bidimensional de Manabe, que considera ya dos parámetros, la altitud y latitud. El modelo trabaja con equilibrios radiactivos, movimientos de convección y por primera vez, con la suposición de una duplicación del CO₂ atmosférico. Actualmente, se emplean modelos tridimensionales, denominados MCGA (modelo de circulación general de la atmósfera), que considera los tres parámetros: altitud, latitud y longitud, además de suponer la duplicación del contenido actual de CO₂.

Los inconvenientes generales que presentan estos modelos, son: no tienen en cuenta el intercambio atmósfera océano; los cálculos son realizados en puntos muy distantes; no se contemplan los fenómenos climatológicos locales y además, en algunos modelos no se tiene en cuenta el efecto invernadero del vapor de agua. También se le achaca a estos modelos, que ignoran la capacidad que tienen los seres

vivos para adaptarse al medio cambiante, por ejemplo, las plantas tienen la capacidad de adaptar su productividad de CO_2 y de O_2 en función de la concentración atmosférica del entorno, aunque esas variables tienen ciertos límites.

Sin embargo, y a pesar de todos estos inconvenientes, el trabajo con modelos MCGA, ha resultado ser una buena metodología de trabajo para predecir situaciones climatológicas futuras, en un escenario donde el CO_2 se duplica, con relación a las concentraciones actuales. Estos modelos, se van perfeccionando y enriqueciendo con nuevos datos aportados por los satélites espaciales, por lo que cada vez resultan mas fiables.

Los científicos comenzaron a partir de 1979, a trabajar con la posibilidad de un aumento al doble en la concentración del CO_2 atmosférico y dedujeron que este hecho, supondría un calentamiento medio de la superficie de la Tierra de entre 1,5 y 4,5 °C. No obstante, estudios más recientes sugieren que el calentamiento se produciría mas rápidamente sobre tierra firme que sobre los mares y que se configuraría con retraso respecto al incremento en la concentración de los gases con efecto invernadero, de tal manera que al principio, los océanos más fríos tenderán a absorber una gran parte del calor adicional retrasando el calentamiento de la atmósfera y, sólo cuando los océanos lleguen a un nivel de equilibrio con los más altos niveles de CO_2 se producirá el calentamiento final irreversible. Como consecuencia de este retraso provocado por los océanos, los científicos no esperan que la Tierra se caliente en esos 1,5-4,5 °C previstos, sino que en la actualidad se predice un calentamiento de 1,0 a 3,5 °C para el año 2100.

La evidencia del calentamiento global es clara; los estudios más recientes indican que en los últimos años se está produciendo un aumento de la temperatura media de la tierra de algunas décimas de grado, concretamente de 0,6 °C en los últimos 130 años, aunque dada la enorme complejidad de los factores que afectan al clima es muy difícil saber si este ascenso de temperatura entra dentro de la

variabilidad natural, es decir debida a factores naturales o si es debida al aumento del efecto invernadero provocado por la actividad humana.

Por ello, y con el fin de analizar la relación entre las diversas variables y los cambios climáticos es por lo que se usan los modelos climáticos, que actualmente son modelos computacionales de una enorme complejidad. Es significativo que todos ellos, predicen una relación directa entre el incremento en la temperatura media del Planeta y el aumento de las concentraciones de gases con efecto invernadero.

Estos modelos, predicen un enfriamiento de la atmósfera que aumenta con la altitud, lo que es favorable para la regeneración de la capa de ozono estratosférica, como ya hemos indicado anteriormente, y un recalentamiento a nivel troposférico entre 3,5 y 4,2 °C, que producirá un calentamiento superficial a latitudes elevadas, siendo máximo en invierno y mínimo en verano. El recalentamiento troposférico, dará lugar también a una reducción en la amplitud del ciclo anual de temperaturas. Además, el intercambio con el océano será muy intenso, lo que ocasionará un recalentamiento de la baja atmósfera.

Hay modelos, que afinan mas las condiciones del cambio y predicen una fusión de la barrera de hielo de la antártida occidental, con desprendimiento de témpanos al ritmo de 1km/año; un aumento del nivel agua a razón de 1,4 mm anuales, lo que provocará inundaciones costeras; el régimen de precipitaciones será desigual, con bandas centradas a 40 ° N y 10 ° S, donde se producirán menores precipitaciones y por tanto sequía, mientras que las bandas centradas a 10 ° N y 20 ° S, tendrán un aumento en las precipitaciones, con inundaciones frecuentes; el balance hídrico de los suelos será deficitario; se ocasionará una fusión precoz de las nieves y la consiguiente reducción en la acumulación de aquellas; una evaporación intensa, con disminución de los cultivos, resultando suelos secos en primavera y otoño; y un aumento en la duración de la intensidad de las sequías en el interior de los continentes.

5.2.- Los escenarios climáticos. Líneas evolutivas.

Actualmente, los modelos computacionales, trabajan con escenarios climáticos, a partir de unas líneas evolutivas, que describen mundos futuros. Las líneas evolutivas, son¹⁰⁷:

Línea A1.

La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

Se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica, que van desde la utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI) a la utilización de fuentes de energía de origen no fósil (A1T), pasando por la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B), entendiéndose por “equilibrada” la situación en la que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares.

Línea A2.

La línea evolutiva y familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son: la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el

crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

Línea B1.

La línea evolutiva y familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientadas a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

Línea B2.

La línea evolutiva y familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en la A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1, y aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional

Los escenarios, que resultan de aplicar estas líneas evolutivas son 40 en total, 35 de los cuales contienen todos los datos de los gases de efecto invernadero (GEI) para forzar los cambios climáticos y abarcan las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinarán las emisiones futuras de GEI y azufre. De esta manera, cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. Una de las aplicaciones interesantes de estos

escenarios, es la predicción de las emisiones de los GEI, según la línea evolutiva empleada (figura 100).

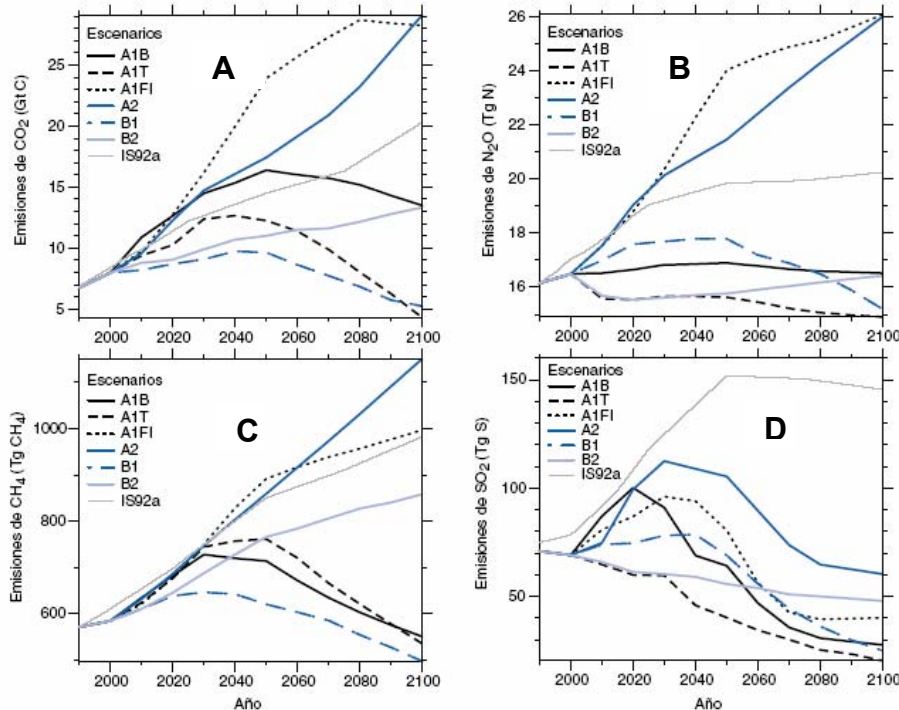


Figura 100.- Emisiones antropogénicas previstas para el año 2100 de (A) CO₂, (B) N₂O, (C) CH₄, (D) SO₂, dentro de seis escenarios ilustrativos: A1B (línea continua negra), A2 (línea continua azul), B1 (línea discontinua azul), B2 (línea continua azul clara), A1FI (línea punteada negra), A1T (línea discontinua negra) e IS92a (línea gris). El escenario peor es el A2, excepto para las emisiones de SO₂. El escenario IS92a, que ya no es utilizado, se muestra a modo comparativo. Fuente: <http://www.grida.no>.

5.3.- Simulaciones climáticas con la duplicación del CO₂.

Este es el aspecto más interesante de los modelos computacionales, su capacidad de predecir situaciones climáticas, suponiendo la duplicación del CO₂ en un periodo de 100 años. En la figura 101, se muestra una simulación de este tipo, para pronosticar el cambio de temperaturas en los océanos y en la atmósfera. Además, en la figura 102, se puede ver la disminución en el grosor de los casquetes polares vaticinada por los modelos y en la figura 103, el aumento global de la temperatura en la Tierra.

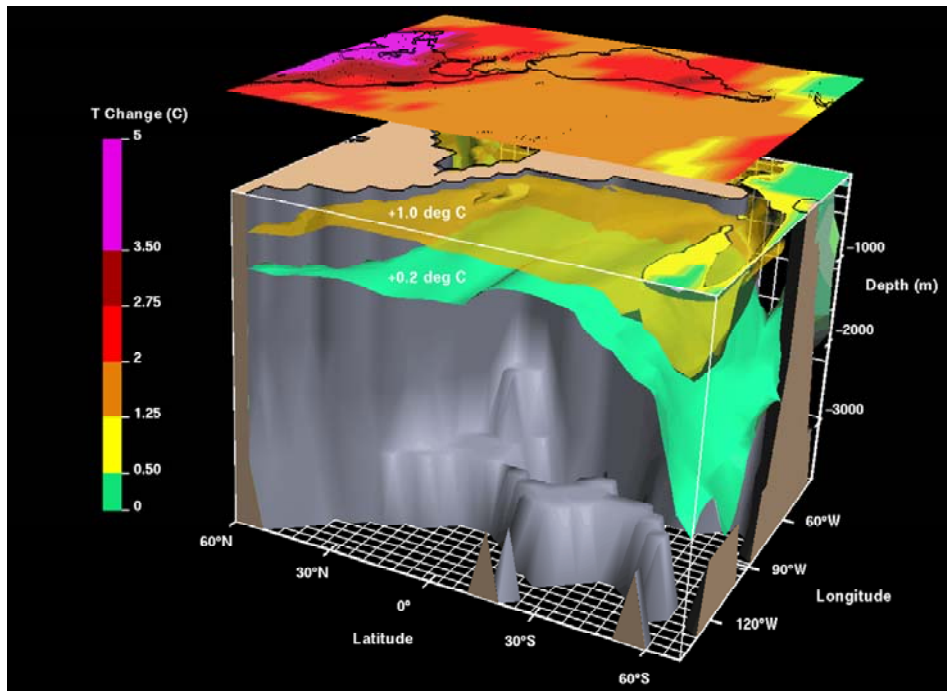


Figura 101.- Cambio en las temperaturas de la atmósfera y océanos, según un modelo climático en 3D. Las aguas profundas de los océanos, muy frías, apenas sufrirían incremento (+ 0,2 °C), mientras que las superficiales, mas calientes, aumentarían en 2 °C. En cuanto a la atmósfera, el incremento dependería de las zonas, según la escala situada en la leyenda izquierda del gráfico, con mayores aumentos en Canadá y Norte de Estados Unidos (5 °C). Fuente: NOAA. <http://www.gfdl.noaa.gov>.

Actualmente, se han puesto muchas esperanzas en el trabajo con el modelo antártico. El Antártico y el océano circundante controlan muchos de los parámetros climáticos del mundo. Los científicos trabajan para entender como los acontecimientos que ocurren en ese continente podrían afectar al clima global. Se toman muestras de las profundidades de las placas de hielo, para obtener los parámetros climatológicos del pasado e ir comparándolos con los presentes. De esta forma, podemos saber con buenas probabilidades de acierto las expectativas sobre la climatología antártica en particular, y sobre la global del planeta en general. Con el transcurso del tiempo se tendrán muchos más elementos de análisis, al disponer de un mayor número de datos estadísticos sobre efectos pasados.

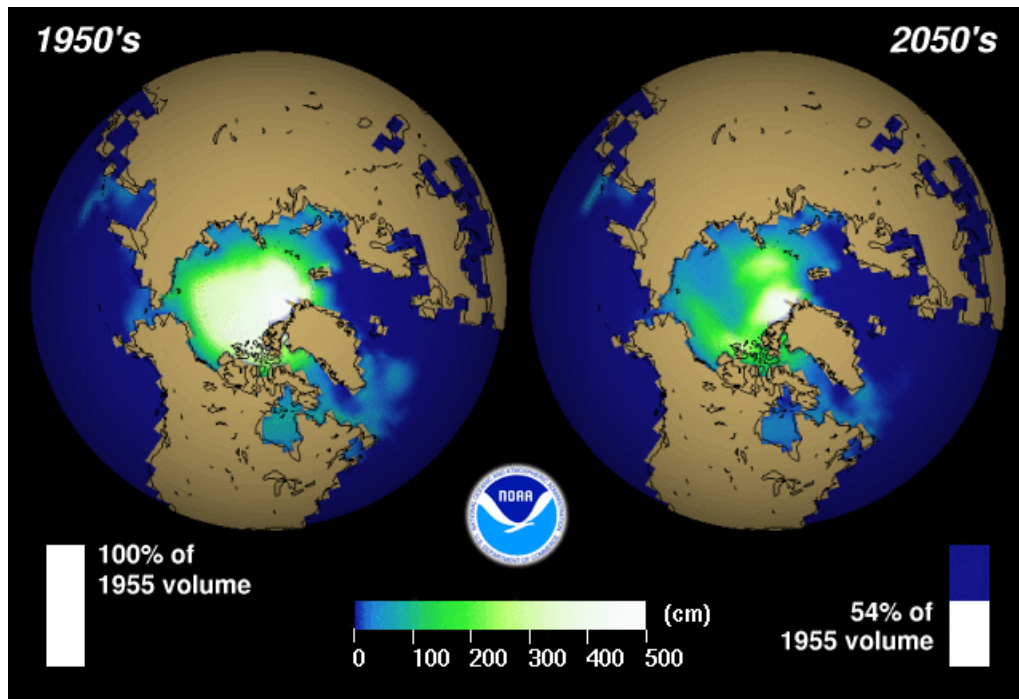


Figura 102.- Disminución en el grosor de los casquetes polares del hemisferio norte, comparando la década de 1950 con la del 2050. La merma es del 54% en volumen.

Fuente: NOAA. <http://www.gfdl.noaa.gov>.

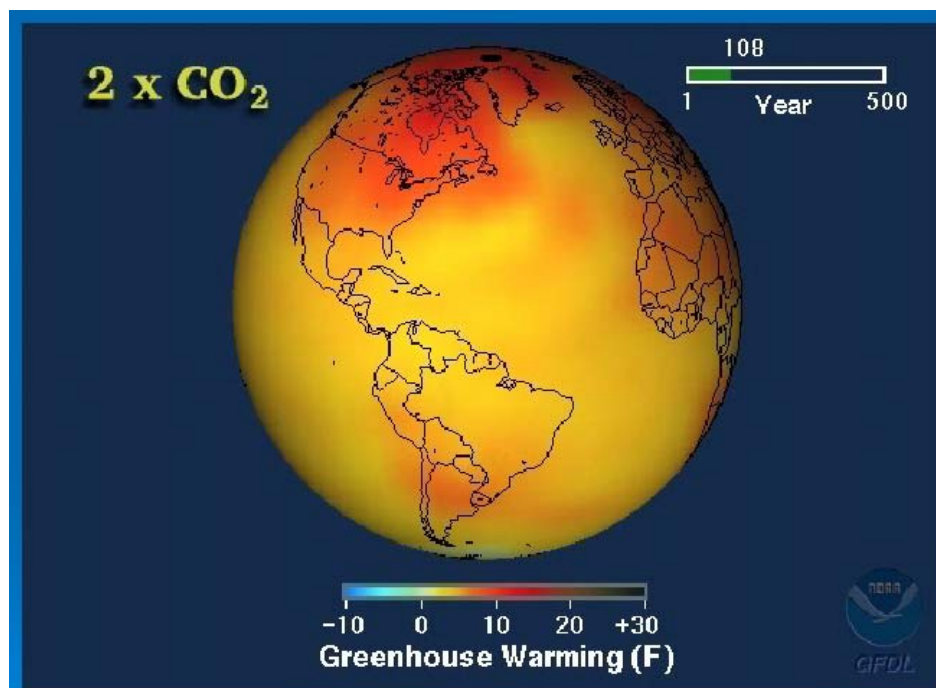


Figura 103.- Aumento de la temperatura terrestre en 108 años, en grados F. Las zonas en rojo son las de mayor incremento. Fuente: NOAA. <http://www.gfdl.noaa.gov>.

5.4.- La situación en España.

La situación actual es la siguiente: En cuanto al régimen de temperaturas, la media anual sobre la Península Ibérica se ha incrementado en cerca de 1,6 °C durante el último siglo. Los años más calurosos de ese siglo, ocurrieron en 1989, 1995 y 1997. El aumento de temperatura, ha sido mayor en verano, cerca de 2 °C y menor durante el invierno, alrededor de 1,4 °C. En cuanto al régimen de precipitaciones, la Península Ibérica que recibe aproximadamente un tercio de su precipitación durante el periodo invernal de diciembre a febrero, ha visto incrementada la precipitación en invierno alrededor de un 15% durante el siglo XX, principalmente en el norte de España, pero con algunas sequías invernales severas en años recientes, por ejemplo en los inviernos de 1988/89, 1991/92 y 1992/93. Esta situación, la podemos observar en el gráfico de la figura 104.

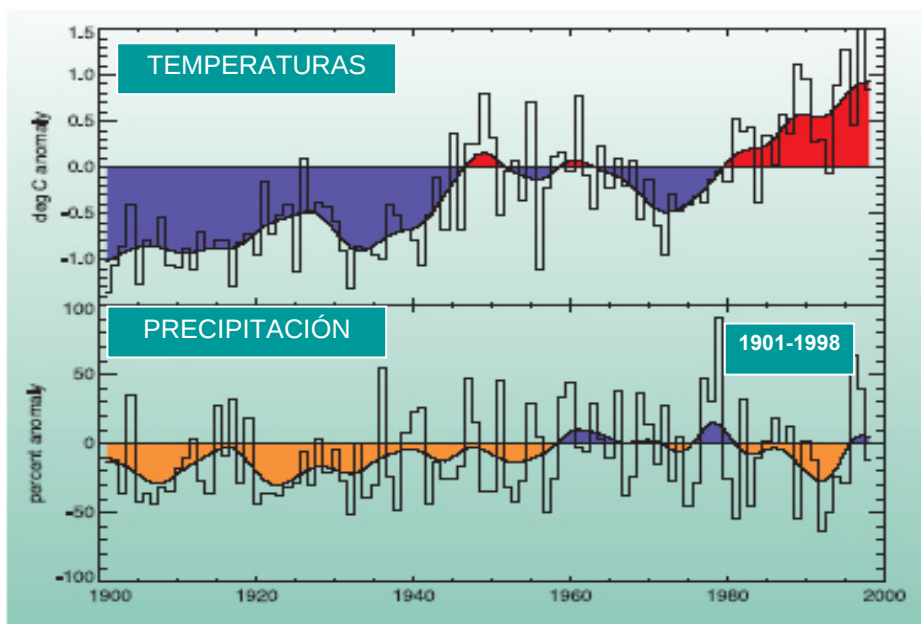


Figura 104.- Evolución de las temperaturas y las precipitaciones en España durante el siglo XX. Los cambios son con respecto al promedio de los valores climáticos 1961-1990 de +13,1°C y +257 mm respectivamente. Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk>.

Este aumento de las temperaturas, junto a la disminución de la humedad relativa, son los dos factores principales del aumento de los incendios forestales en la Península Ibérica.

Pero, veamos ahora el futuro del aumento de temperaturas, según las predicciones de los modelos, siguiendo las trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero, en los escenarios B1, B2, A1 y A2 y suponiendo unas emisiones de CO₂ en el año 2100 de un -4%, para el escenario mejor el B1 y, de un +320 %, para el A2, el peor, comparadas con el año 2000. Los resultados se ven en la figura 105.

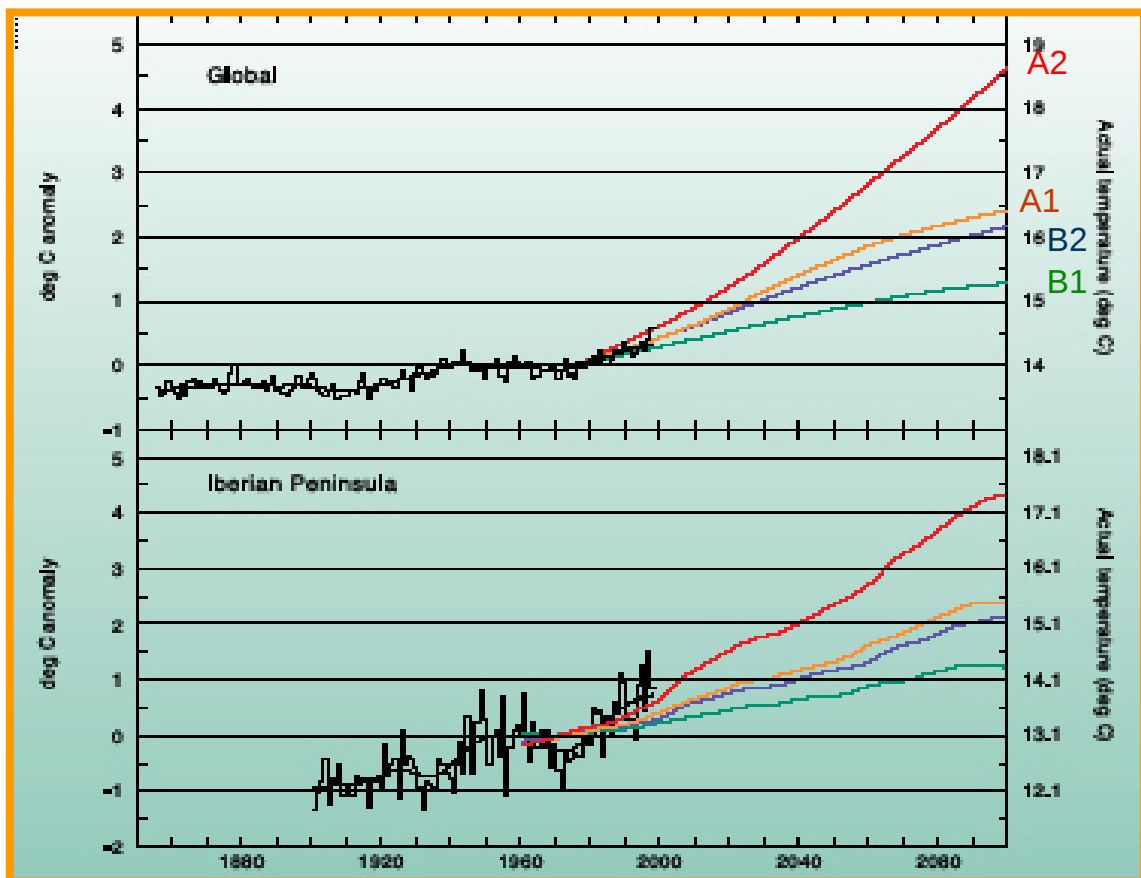


Figura 105.- Aumento de las temperaturas en la Península Ibérica (gráfico inferior) y a nivel global (gráfico superior) hasta el año 2100, según los escenarios A2 (rojo), A1 (naranja), B2 (azul) y B1 (verde). El escenario peor es el A2, que coincide con el de mayor aumento de concentración de CO₂. Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk>.

En cifras, podemos ver las previsiones de aumento de temperaturas y del nivel del mar, previstas por los escenarios A1, A2, B1 y B2, en consonancia con el incremento en las concentraciones atmosféricas de CO₂, en la Tabla XXVII.

Tabla XXVII.- Previsiones de aumentos de temperaturas y del nivel del mar en la Península Ibérica, con el incremento atmosférico del CO₂. Se toma como referencia el valor atmosférico medio del año 2000 de 370 ppmv. Los escenarios son el A2 de concentraciones altas de CO₂, los A1 y B2, medias y el B1 de bajo contenido en CO₂. La mayor concentración de CO₂ es proporcional a los incrementos de temperatura y nivel del mar. Los valores de los años, se corresponden con las décadas de cada uno de ellos.

Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk>.

DÉCADA											
1980*	1990*		2020			2050			2080		
Temp °C	Temp °C		CO ₂ ppmv	Temp °C	Nivel del Mar cm	CO ₂ ppmv	Temp °C	Nivel del Mar cm	CO ₂ ppmv	Temp °C	Nivel del Mar cm
0.13	0.28	B1-bajo	421	0.6	7	479	0.9	13	532	1.2	19
0.13	0.28	B2-med	429	0.9	20	492	1.5	36	561	2.0	53
0.13	0.28	A1-med	448	1.0	21	555	1.8	39	646	2.3	58
0.13	0.28	A2-alto	440	1.4	38	559	2.6	68	721	3.9	104

La pregunta es, ¿a qué se enfrentan las generaciones futuras? En la Península Ibérica, la respuesta nos la da el gráfico de la figura 106, donde se aprecia el cambio de temperaturas en las tres décadas ensayadas, 2020, 2050 y 2080, con los escenarios anteriores. Como vemos, el aumento de temperatura es progresivo por décadas, y dependen del escenario considerado. En el peor de los casos, la temperatura se incrementaría en la década 2080 en casi 6 °C, siendo bastante similar en toda la Península Ibérica.

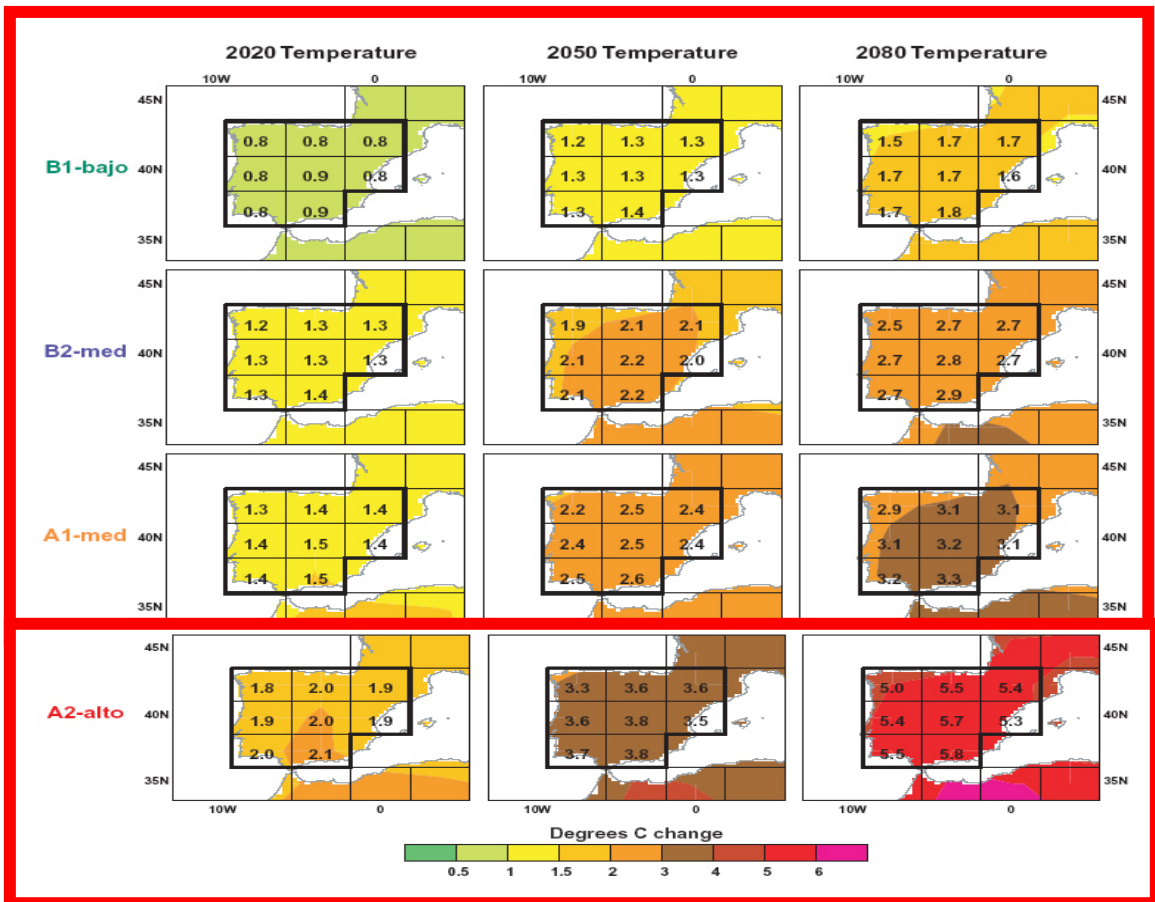


Figura 106.- Cartografía de los incrementos de temperatura en la Península Ibérica para los escenarios A1, A2, B1 y B2, en las décadas 2020, 2050 y 2080. Los valores indican inicialmente, un mayor calentamiento hacia el Sureste, pero conforme se incrementa la concentración de CO₂, los datos son altos y similares. Los colores rojos y violáceos son los mayores. Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk>.

Las conclusiones a las que llegan los modelos son que la Península Ibérica¹⁰⁸ se calentará en el futuro a la misma velocidad que la temperatura global promedio; que aún en el escenario B1-bajo, el calentamiento en los próximos 100 años será mayor que el experimentado durante el último siglo y en el escenario A2-alto el calentamiento será tres veces más rápido que el observado. Además, el calentamiento será un poco mayor sobre el sudeste de España que sobre las regiones costeras del atlántico y Portugal y será mayor en verano que en invierno.

En cuanto a las precipitaciones (figura 107), cuando se realiza un promedio anual, los escenarios sugieren que la precipitación disminuirá sobre la Península Ibérica en alrededor de un 5% para el escenario B1-bajo y de un 15% para el escenario A2-alto. Sin embargo, hay una diferencia entre el invierno y las otras tres estaciones, ya que el invierno será más húmedo, mientras que las otras tres estaciones se volverán más secas, especialmente la estación veraniega.

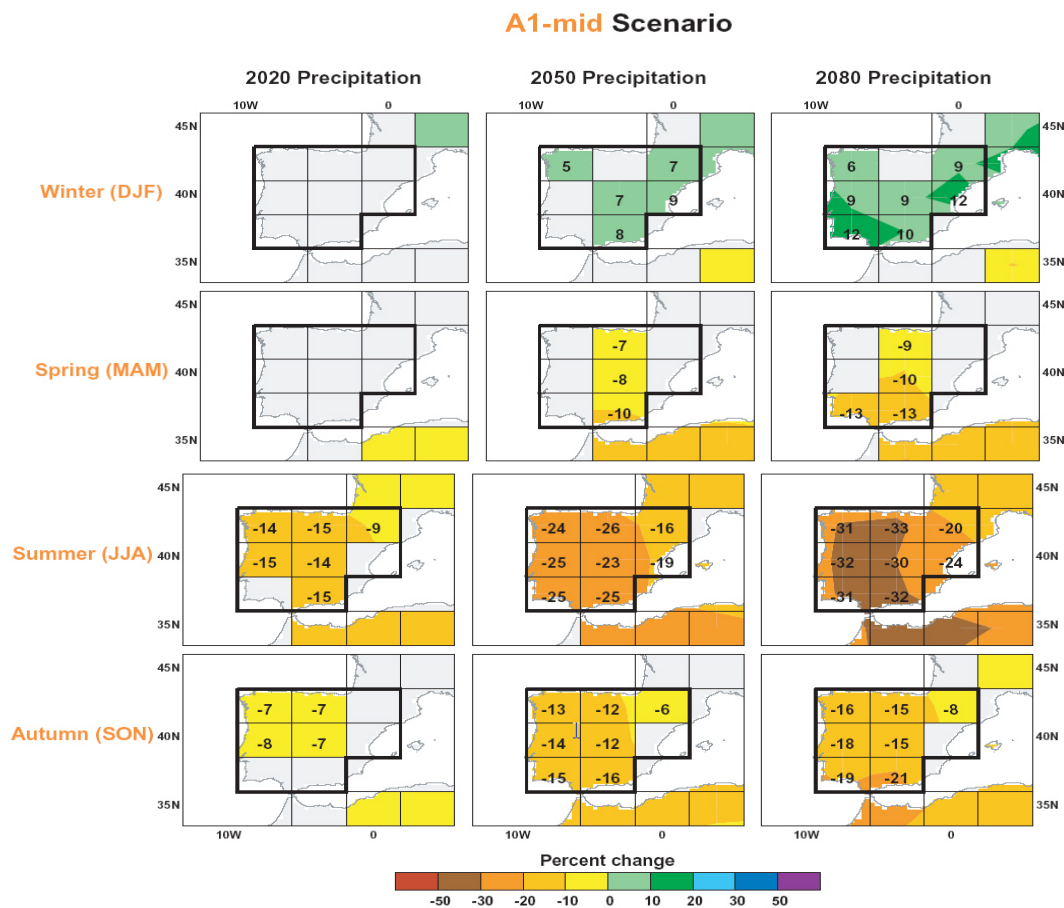


Figura 107.- Evolución de las precipitaciones en la Península Ibérica en el escenario A1, para las décadas 2020, 2050 y 2080, y para las cuatro estaciones del año: invierno, primavera, verano y otoño (de arriba abajo). Se observan descensos en el nivel de precipitaciones, más acusados en verano y otoño e incrementos moderados en invierno.

Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk>.

Además informes, como el encargado por la Comisión de las Comunidades Europeas, hecho público a finales del 2000, dice que los efectos adversos del cambio climático serán notablemente mayores en los países del sur que del norte de Europa. Concretamente los veranos extremadamente cálidos serán el doble de frecuentes, y hasta cinco veces más en el Sur de España. El agua disponible disminuirá en un 25%, con la consiguiente reducción del potencial agrícola y dificultades de suministro urbano. Se espera también un aumento notable de los incendios forestales y la extensión de la desertificación.

Estos cambios, traerán efectos negativos sobre la biodiversidad de las especies. Por ejemplo, en el Parque de Doñana¹⁰⁹, es de esperar una mayor desecación de las tierras húmedas en la región, debido al aumento de la temperatura entre 1,4 °C y 3,8 °C y a la reducción en la precipitación anual de entre 5 y 10 % para la década de 2050. Hay que tener en cuenta, que la altitud del parque oscila entre 0 (nivel del mar) y 40 m y que el nivel del mar ha aumentado alrededor de unos 20 cm durante el último siglo, por lo que las elevaciones futuras de aquel pueden amenazar más a aquellas áreas remanentes de tierras húmedas debido a la inundación por agua salada. Los escenarios sugieren mayores elevaciones del nivel del mar de entre 20 a 110 cm para finales de siglo y todo ello amenaza a la conservación de este importante hábitat de aves migratorias.

La pérdida del hábitat de bosques y tierras húmedas como resultado del cambio climático, amenaza la supervivencia del lince ibérico, por la desaparición de sus dos recursos alimenticios, los conejos y patos.

Vista la problemática, cabe preguntar, si estamos mejorando la situación. La respuesta es que, muy al contrario, empeora. El CO₂ que actualmente emite España, casi triplica el límite fijado en el Protocolo de Kioto. España, es el país industrializado donde mas han aumentado las emisiones de CO₂ y se aleja cada vez más de cumplir con sus compromisos en esta materia, ya que frente a un 15% de aumento en el 2003,

con respecto al año 1990, previsto en el Protocolo de Kioto para nuestro país, se ha incrementado en un 40,43%¹¹⁰.

La evaluación de los desastres del reciente verano de 2003 que pasará a la historia de Europa, España y especialmente de Andalucía, como un anticipo de lo que puede suponer el cambio climático global, con sus secuelas de olas de calor, muertes directas por hipertermia, miles de muertos por agravamiento de otras dolencias, incendios forestales, y una prolongada sequía de más de cuatro meses que terminó bruscamente con tormentas, el fenómeno de la gota fría e inundaciones, con graves daños a la agricultura y las infraestructuras, nos puede hacer reflexionar sobre la necesidad de cumplir el Protocolo de Kioto. Según el gobierno de España murieron 104 personas directamente a causa de la ola de calor¹¹¹.

5.5.- La situación en México.

Hemos visto la situación futura en España, pero en otros países no es mejor. Por ejemplo, en México, donde la preocupación por el medio ambiente es una de sus principales políticas, existe una gran inquietud por el cambio climático. Según el Instituto Nacional de Ecología de México¹¹², la superficie no apta para el cultivo del maíz pasaría del 60% a aproximadamente el 75% del territorio del país, mientras que la superficie medianamente apta para este cultivo se reduciría del 33% a entre el 8% y 22%. Además, cerca del 50% de la cobertura vegetal del país sufriría modificaciones, siendo los bosques pertenecientes a los climas templados los más afectados.

En cuanto a la desertificación, las áreas con valores de vulnerabilidad bajo serían equivalentes al 2,5% de su territorio y se situarían principalmente en las planicies costeras de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche. El 0,2% presentaría un valor muy alto en algunas pequeñas áreas situadas en las zonas áridas y semiáridas, pero el 96,9% de la superficie del país sería susceptible en grado moderado y alto.

Las zonas costeras, también vendría afectadas, de tal manera que en las zonas de mayor vulnerabilidad, la influencia marina se llegaría a percibir hasta 40 y 50 km. tierra adentro, por ejemplo en el caso del río Mezcapala-Usumacinta.

5.6.- Márgenes de error de los modelos.

El margen de error de los primitivos modelos era de hasta un $\pm 60\%$ con respecto al valor medio, debido a la incertidumbre de las previsiones de partida, la estimación de la densidad de CO₂ en la atmósfera,^{LXV} y la dificultad de imaginar cómo responderá el ecosistema al incremento de gases de efecto invernadero^{LXVI}.

Estos márgenes de error de los modelos, que actualmente son mucho menores, nos suscitan algunas dudas. El principal problema es que para predecir qué efecto sobre la temperatura terrestre tiene la acción humana, habría que saber lo que ocurriría si no hubiera intervención del hombre. Sin embargo, no hay manera de observar directamente tal cosa, ya que no se puede aislar las influencias humanas de los demás factores que actúan sobre el clima. Además, no se conoce todavía bien la influencia de las nubes y su interacción con la radiación y los aerosoles¹¹³.

Lo único que cabe es desarrollar modelos teóricos del comportamiento de la atmósfera, introducir en ordenadores todos los datos disponibles y dejar que los programas calculen. Los resultados serán más o menos aproximados, según la perfección de los modelos, que no olvidemos, son solo simulaciones.

^{LXV} En el 2.100 puede oscilar entre 540 y 970 partes por millón, por lo que el margen de error es de un 28%.

^{LXVI} Por ejemplo, el segundo informe IPCC (Panel intergubernamental para la evaluación científica del cambio climático, organismo que estudiamos a continuación), preveía que el nivel medio de los mares subiría, a consecuencia del calentamiento, 15-95 cm; mientras que el tercer informe ajusta la previsión a 14-80 cm. Una banda de error que es muy grande.

No obstante, a medida que han avanzado los estudios, se han ido perfeccionando, de modo que las estimaciones son cada vez más fiables, en especial con relación a tres factores: el vapor de agua, la dinámica de los hielos marítimos y la circulación de calor en el océano.

Recientemente, se ha desarrollado por climateprediction.net el mayor modelo informático del clima jamás realizado, llevado a cabo usando una porción del tiempo disponible de más de 4.700 ordenadores personales a lo largo del mundo, con pleno consentimiento de sus propietarios. Desde su comienzo oficial en septiembre de 2003, ha simulado más de un millón de años de evolución del clima terrestre, generando un cúmulo de datos que los científicos están comenzando a analizar¹¹⁴.

La segunda pregunta es doble: ¿Hay de qué preocuparse? ¿Vale la pena poner en peligro el crecimiento económico? La respuesta es sí. Es verdad, que el margen de error de los modelos es grande, sobre todo en previsiones a largo plazo (100 años), y pueden equivocarse, resultando escenarios mejores que los que marcan sus predicciones, pero también pueden ser peores.

Además, hay otros motivos. Algunas épocas de la era Mesozoica (225-65 millones años BP) han sido de las más cálidas de las que tenemos constancia fiable. En ellas la temperatura media de la Tierra era unos 5 °C más alta que la actual. En los últimos 1,8 millones de años, ha habido varias extensas glaciaciones alternándose con épocas de clima más benigno, similar al actual. En las interglaciaciones la diferencia de temperaturas medias de la Tierra entre una época glacial y otra como la actual es de sólo unos 5 o 6 °C. Diferencias tan pequeñas en la temperatura media del Planeta son suficientes para pasar de un clima con grandes casquetes glaciares extendidos por toda la Tierra a otra como la actual. Modificaciones relativamente pequeñas en la atmósfera, que cambien la temperatura media unos 2 o 3 °C podrían originar transformaciones importantes y rápidas en el clima y afectar de forma muy importante a la Tierra y a nuestro sistema de vida.

Según el IPCC (Panel intergubernamental para la evaluación científica del cambio climático), el calentamiento es ya bastante seguro para que los gobiernos deban intervenir.

Si es cierto que los escépticos, en cambio, dicen que sería más prudente y más barato adaptarse a la subida de temperaturas, si ocurre. Pero, en cualquier caso, reducir el uso de combustibles fósiles puede estar justificado por otras razones, y una de peso, es que serviría para aliviar la contaminación urbana y global y además, disminuir la dependencia del petróleo.

Pero, no se trata de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a toda costa, sino de conseguirlo sin perjuicio del desarrollo y el nivel de vida, ya que una política de energía limpia no tiene porqué ser incompatible con los beneficios económicos. Así la empresa petrolífera BP Amoco, se ha convertido en el primer fabricante mundial de placas solares, invirtiendo en energía renovable.

6.- Acciones Internacionales.

Tal como hemos visto en los capítulos anteriores, la comunidad internacional se moviliza ante estos problemas medioambientales, pero así como en otras cuestiones, la respuesta ha sido bastante contundente, no ocurre lo mismo en este caso, ya que hay implicaciones de progreso económico muy importantes. No hay que olvidar, que la disminución de las emisiones de CO₂, contienen implícitas la reducción en la utilización de las fuentes de energía de origen fósil, de las que depende la industria para su desarrollo.

No obstante, se han desarrollado programas y protocolos, para intentar frenar el cambio climático provocado por las emisiones antropogénicas de CO₂. Pero, como venimos diciendo, lo fundamental es la información, y la mejor disponible está en el denominado "Panel intergubernamental para la evaluación científica del cambio climático" (IPCC), que patrocinado conjuntamente por la Organización Mundial de

Meteorología (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA), lo constituyen cientos de científicos de 25 países.

El primer informe del IPCC, en el año 1990, establecía que: “Las actividades humanas están aumentando sustancialmente las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero. Los estudios empíricos y de modelización indican que doblar la concentración de CO₂ incrementaría la temperatura media global de la superficie terrestre de 1,5 a 4,5 °C y elevaría el nivel del mar entre 0,2 a 0,8 m, excluyendo la fusión del hielo de los casquetes polares, pero incluyendo el efecto de los aerosoles. Las velocidades históricas de esta elevación han sido entre 3 y 10 veces menores. La media global de la temperatura del aire ha subido de 0,3 a 0,6 °C en los últimos 100 años^{LXV}. Las velocidades de calentamiento están entre 0,12 a 0,26 °C por década (incluyendo los efectos de los aerosoles). Históricamente la velocidad máxima de este incremento era de 0,1 °C”.

El informe presentado por este organismo en el año 2001, dice: “Durante el siglo XXI, la temperatura media en la superficie del planeta aumentará entre 1,4 °C y 5,8 °C, debido a los gases de efecto invernadero liberados por el hombre”.^{LXVI}

Las conclusiones de este organismo científico, que asesora a la Convención de Cambio Climático, son rotundas y establecen que el cambio climático está en marcha y está causado por las emisiones a la atmósfera derivadas de actividades humanas. El 60% del aumento del efecto invernadero está originado por el CO₂, y en los últimos 20 años, tres cuartas partes de las emisiones antropogénicas de este gas se debieron al uso de combustibles fósiles. Según el IPCC comienzan a manifestarse ya los efectos del cambio climático en ciertas regiones, en fenómenos como la retirada de los glaciares a altitudes mayores, o la menor duración del hielo en ríos y lagos.

^{LXVI} Esto representa un notable incremento respecto a la estimación del segundo informe (1995), que predecía una subida de 1-3,5 °C.

Las previsiones de impactos que ha avanzado el IPCC abarcan desde el aumento de fenómenos climáticos extremos, como ciclones, lluvias torrenciales y olas de calor con sus incendios incontrolables y sequías extremas, a otros que provocaran cambios irreversibles a gran escala. Estos efectos catastróficos, a los que se refieren los científicos tienen en principio una baja probabilidad de ocurrir durante el presente siglo, pero no pueden descartarse, ya que una alteración de la corriente termohalina de circulación oceánica podría hacer que la costa atlántica de Europa se helara en invierno; y la fusión de los hielos de Groenlandia y parte de la Antártida sumergirían grandes superficies de tierra¹¹⁶.

En el último informe del IPCC, se dan datos globales de los niveles de temperaturas y precipitaciones desde 1976 al 2000 (figura 108).

La preocupación internacional por el cambio climático, se puede decir que arranca con la resolución 43/53 de la ONU de 6 de diciembre de 1989, donde se reconoce que el cambio climático es un interés común, (“is a common concern of mankind”) en tanto en cuanto es condición esencial para el mantenimiento de la vida en la Tierra.

Los principales hitos internacionales para frenar las emisiones de CO₂ y el cambio climático, han resultado ser son las siguientes:

Conferencia mundial sobre el clima. Ginebra. 1990.

En su declaración final subrayaba la conveniencia de negociar cuanto antes, bajo los auspicios de Naciones Unidas, un convenio marco sobre el cambio climático, formulando significativas recomendaciones que reflejaban un consenso de base sobre ciertos elementos que más tarde, se convertirían en señas de identidad del futuro convenio.

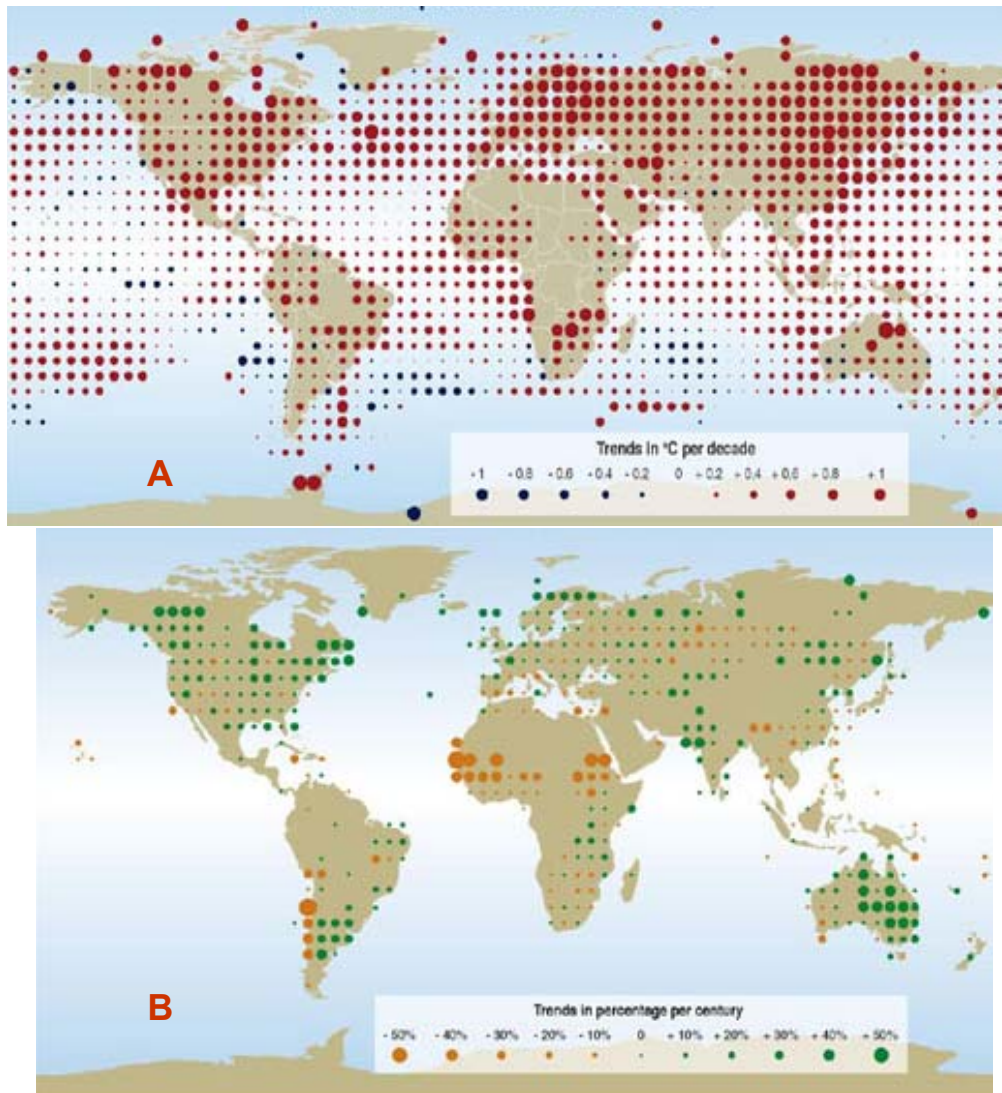


Figura 108.- (A). Niveles de aumento (puntos rojos) o disminución (puntos azules) de las temperaturas (°C) en la superficie de la Tierra en el periodo 1976-2000. (B). Niveles de incremento (puntos verde) o disminución (puntos naranja) de la precipitación en %, en el periodo 1976-2000. Fuente: IPCC.

Convenio marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. 1992.

El objetivo de este convenio era lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir

que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible. Fue firmado por 153 países, incluida la UE.

Protocolo del Convenio marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Kioto. 1997.

Aunque controvertido e incumplido por alguno de los países firmantes, es el avance más importante para intentar reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las partes, países desarrollados, en proceso de transición a una economía de mercado y la comunidad europea, asumen el compromiso de reducir, individual o conjuntamente, entre los años 2008 y 2012, por lo menos un 5% de las emisiones antropogénicas de seis gases de efecto invernadero.

El anexo B del protocolo establece las reducciones asignadas individualmente a cada una de las partes, pudiéndose destacar que Australia puede aumentar sus emisiones un 8% y Noruega un 1%, mientras que la UE y sus estados miembros deben reducir un 8%, los Estados Unidos un 7%, Japón y Canadá un 6% y otros países en porcentajes más bajos.

La cuarta conferencia de las partes, celebrada en Buenos Aires del 2 al 13 de noviembre de 1998 congregó una participación muy amplia, pero dejó en evidencia los difíciles problemas que todavía subsisten y las distancias que habrá que superar para que el protocolo de Kioto entre en vigor y sus disposiciones se apliquen efectivamente.

La UE considera esta problemática prioritaria, en su V y VI Programa de acción para el medio ambiente, además de la creación de la Agencia Europea del Medio Ambiente.

También hay proyectos concretos de retirada del CO₂ atmosférico, mediante la aplicación del proyecto europeo Recopol, destinado a desarrollar la técnica de almacenamiento del dióxido de carbono en los filones de carbón¹¹⁷. La iniciativa se sitúa en la cuenca minera de la Alta Silesia, en Kaniow, cerca de Kattowitz, Polonia. El

experimento debe probar qué cantidad de gases de efecto invernadero pueden almacenarse en los filones y de esta manera quedar literalmente enterrados. Si este proyecto tiene éxito las regiones mineras de Europa podrían convertirse en depósitos de CO₂, ya que las vetas de carbón presentan una amplia superficie interna sobre la que se depositan los gases. A causa de esta característica el carbón es capaz de almacenar gran cantidad de gas, muestra de lo cual es el material gaseoso que se encuentra de forma natural en los yacimientos. De esta forma, el proyecto Recopol investigará hasta qué punto puede sustituirse ese gas natural por el CO₂ originado en la actividad humana.

También en Alemania se realizan pruebas de acopio a presión del dióxido de carbono. En Ketzin^{LXVIII}, al noroeste de Berlín, el Centro de Investigación Geológica de Potsdam desarrolla el proyecto CO2SINK, patrocinado por la Comisión Europea y otras instituciones. Los científicos, bajo la dirección del profesor Günter Borm, investigarán la posibilidad de acumular el gas en depósitos subterráneos. Se pretende así, inyectar unas 30.000 T de CO₂ en una capa freática de arenisca situada a una profundidad de unos 700 m, localizada gracias a los datos obtenidos en perforaciones y análisis sísmicos. Este manto tiene un espesor de unos 80 m y se encuentra encerrado en una doble bóveda natural de material rocoso, arcillas y yeso. En este proyecto, lo que en realidad se trata es de enterrar el CO₂ procedente de la quema de biomasa de la central de Ketzin en el subsuelo, y por tanto una cuestión clave es el análisis del impacto sobre los probables moradores microbianos del subsuelo

Se puede concluir que en este caso, existe un consenso de que la humanidad¹¹⁸ se encuentra confrontada a un problema de supervivencia cuya única solución implica reajustes que afectan a los modos de producción y consumo de la sociedad post-industrial, pero que también, la armonización de las exigencias de la

^{LXVIII} Es una central eléctrica de biomasa.

ecología y de la economía para el logro del desarrollo sostenible se muestra aquí en toda su crudeza.

7.- Anomalías climáticas.

Hay ciertas anomalías del clima, que han sido objeto de estudio por su implicación en el cambio climático o que pueden ser consecuencia del mismo. Entre estas, vamos a destacar dos: el fenómeno de “El Niño” y el oscurecimiento global.

7.1.- El fenómeno de “El Niño”.

Llamado así, porque aparece por Navidad en las costas de Perú y del Ecuador, es un fenómeno natural, que se produce desde hace unos 18.000 años y que se explica en la figura 109, aunque actualmente se denomina “El Niño” a un comportamiento anómalo de este fenómeno, que produce graves consecuencias climáticas y que se supone relacionado con el calentamiento global del Planeta. A la situación inversa a “El Niño”, se le denomina “La Niña”, que también causa considerables alteraciones en el clima. Si bien es cierto que aún no se conoce con exactitud el comportamiento anómalo de “El Niño”, los estudios realizados hasta ahora permiten definirlo en base a sus pautas y los efectos que ha producido en los años en que se ha presentado. Así pues, se puede definir en forma sintética, como la presencia de aguas anormalmente más cálidas por un período mayor de 4 meses, con hundimiento del termoclina (nivel del mar que separa las aguas superficiales de mayor temperatura y menor densidad de las aguas profundas y más densas), y que tiene su origen en el Pacífico Central Ecuatorial, debido al debilitamiento de los vientos del Este o a su reemplazo por los vientos del Oeste, dando lugar a un fenómeno muy intenso, que puede durar hasta 20 meses, habiéndose observado además un calentamiento muy rápido y por varios meses antes del inicio del fenómeno, que puede superar los 4 °C, tal como se muestra en la figura 110. Poco tiempo después las aguas cálidas llegan hasta Alaska y el Sur de Chile¹¹⁹.

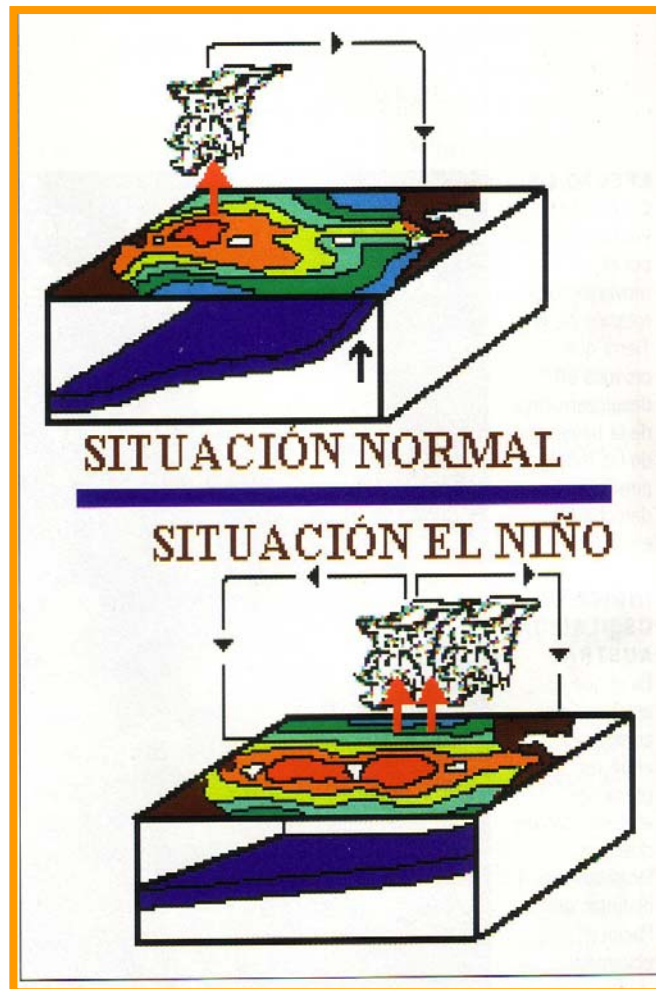


Figura 109.- En la situación “normal” del fenómeno (arriba), los vientos empujan el agua superficial del Océano hacia el Oeste desde las costas de Perú y Ecuador hasta Indonesia. Esto se compensa con afloramiento de aguas profundas, muy ricas en fitoplancton. En Indonesia, confluyen los vientos del O con los alisios y provoca lluvias torrenciales. En altura el aire se mueve hacia el Este y desciende al Pacífico central y oriental con tiempo seco. En la situación anómala de “El Niño” (abajo), hay una relajación del flujo atmosférico. La presión de la costa americana es menor que la de Indonesia. Los alisios colapsan en la costa americana y se invierte la situación. Lluvias torrenciales en Ecuador y Perú y tiempo seco en Indonesia. Se eleva la temperatura del mar en las costas centroamericanas con la aparición de intensos huracanes, que afectan a sitios remotos como Hawaii. Fuente: J. Massons y J. Camps, Mundo Científico, 187, 59-65, 1998.

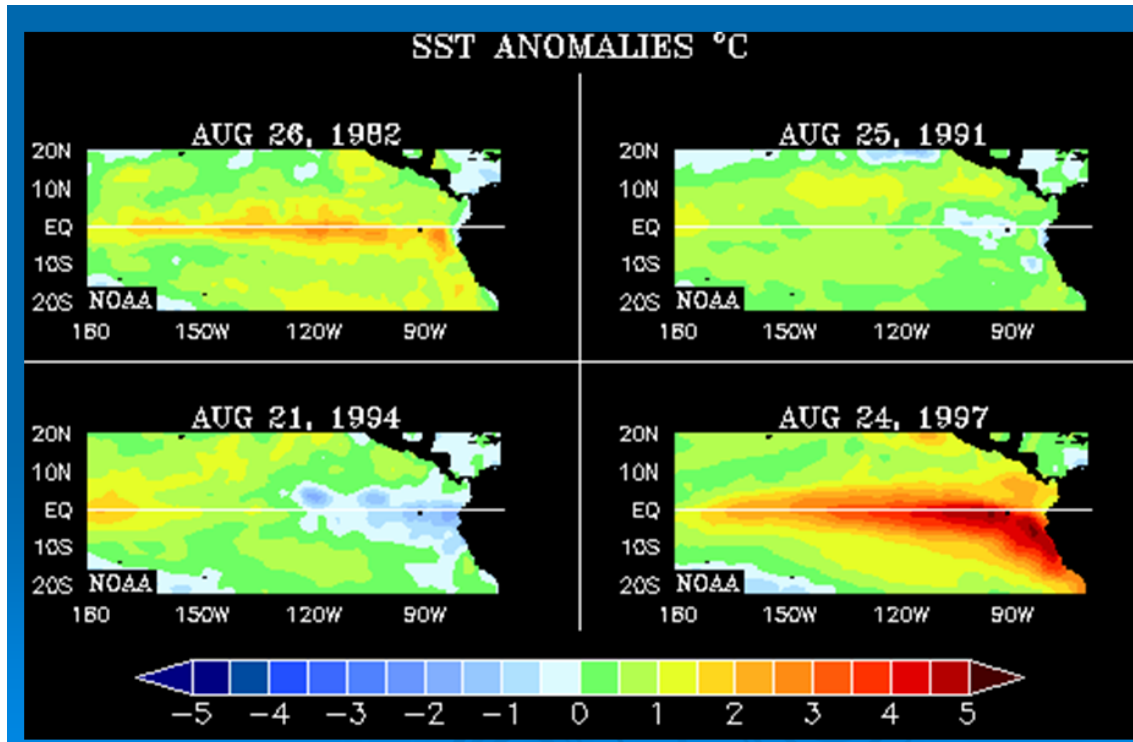


Figura 110.- Aumento de la temperatura del Pacífico en el mes de Agosto de 1982, 1991, 1994 y 1997. El año 1997 de fuerte subida de la temperatura, entre 4 y 5 °C, hubo un “Niño” intenso de carácter catastrófico. También en 1982 se registró un fuerte “Niño” desencadenado sobre todo por la erupción de “El Chichón”. Fuente: NOAA.

El fenómeno de “El Niño”, es muy difícil de pronosticar y a pesar de los intentos realizados, hasta el momento no se ha encontrado un mecanismo de predicciones válidas, ya que hay años, de fuerte calentamiento del océano en verano, que no traen como consecuencia un fenómeno acusado de “El Niño”, como era de prever, y otros indicadores, tampoco han resultado válidos.

7.2.- El oscurecimiento global.

Investigaciones recientes, demuestran que los niveles de radiación solar que alcanzan la superficie terrestre se han reducido en un 10% en Europa desde 1960.^{LXIX}

^{LXIX} Trabajos de Ohmura. Instituto Federal de Tecnología. Suiza. 1985.

En los últimos 50 años se ha reducido un 3% por década los niveles de radiación solar; desde 1958 a 1992, a un ritmo anual del 0,23-0,32% (Stanhill y Cohen. 2001).

Este hecho, traerá repercusiones en el cambio climático y en la fotosíntesis. En efecto, los datos de evaporación del agua y los de oscurecimiento son concordantes. A una menor evaporación, le corresponde una también menor luz solar sobre la superficie del agua, según Faquhar, especialista en clima de la Universidad. Nacional de Australia, y que es atribuible a la contaminación atmosférica, en especial a las partículas de sulfatos y como resultado, los periodos nubosos son mas oscuros.

8.- Otras predicciones.

Como sucede en el tema de los CFCs, hay investigadores que no están de acuerdo con el consenso internacional sobre el tema, que en este caso es el calentamiento global producido por el incremento de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico.

Así, Robert Essenhigh, especialista en contaminación industrial de la Universidad de Ohio, dice que la acumulación atmosférica de CO₂ no es una causa, sino un efecto más del calentamiento global que se da en el Planeta por razones naturales y cíclicas, resultando que el aumento de CO₂ se debe al aumento de temperatura y no al revés y el incremento de medio o 1 grado es algo bastante natural.

Por otra parte, Millán Muñoz¹²⁰, físico e ingeniero aeronáutico, director del Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, dice que después de miles de años de periodo interglaciar, los cambios que congelan el mundo son bruscos, repentinos. “No hay una teoría unánime sobre lo que está ocurriendo y no sería improbable, según algunos estudios publicados recientemente, que entremos en una glaciación brusca. Las condiciones particulares de España hacen que aquí se noten antes y más los efectos anómalos del cambio climático, especialmente en el mediterráneo. Por

ejemplo, en Inglaterra la masa de aire se renueva 2 ó tres veces al día, mientras que en el mediterráneo tarda 7 ó 10 días en renovarse”.

La próxima era glacial comenzará cuando el océano ártico se abra^{LXX} y se mantenga abierto por el aumento de temperatura, con la consiguiente parada de la corriente del Golfo^{LXXI}, aunque también es posible que se abra y cierre varias veces. Cuando la capa de hielo se extienda, las temperaturas caerán y así entraremos en la era del hielo, que ocurriría entre 5 y 50 años.

Aunque no es probable que entremos aún en una edad de hielo, si es cierto que el hielo otoñal del ártico se ha reducido en un 40% respecto a la década 1970, según los expertos de la ONU, que creen que seguirá minorando, pero ese efecto no tiene porqué abrir el ártico, ya que el hielo funciona como un espejo para la luz del sol, de tal manera que sus rayos no pueden ser absorbidos y se vuelven a reflejar de nuevo al espacio y por eso los polos están siempre fríos; pero si los polos se abren por el deshielo, los rayos solares se absorben y se produce el calentamiento que tenemos ahora. Cuando las capas de hielo se expanden, vuelven a funcionar de nuevo como un espejo del sol y el calor no se absorbe y se enfría otra vez, pero al mismo tiempo, la expansión de hielo hace que el ártico no se cierre del todo.

En su mayoría, las voces disidentes, creen que el calentamiento es natural y precede a una era glacial¹²¹ y que el aumento de temperatura y el consiguiente deshielo producirán el enfriamiento de Europa debido a la parada de la corriente del golfo que calienta el Atlántico norte, habiendo comenzando ya las anomalías climáticas desde hace unos 15 años.

^{LXX} Es un mar congelado que sólo se resquebraja un poco al sur en el verano polar.

^{LXXI} La corriente del Golfo calienta al Atlántico Norte. Si esta corriente se para, los hielos avanzarían hacia el sur a una velocidad considerable y es muy probable que el norte de Europa, hasta la latitud de Burgos, quedase cubierta de hielo

Se apoyan, en el hecho de que hace unos 11.000-13.000 años, en un largo proceso cataclísmico de glaciación que se conoce como *la "joven dryas"*, el CO₂ también iba en aumento y, sin embargo las temperaturas bajaron, sobre todo en Europa, porque la corriente del golfo se detuvo durante 1.000 años y el norte de Europa y América se congelaron.

Además, hay algunos informes de organismos internacionales contradictorios, como el de un estudio de la WMO (World Meteorological Organization) de 1985, en el que dice que "las emisiones humanas suponen sólo un 7% del total de gases de efecto invernadero" y en las estadísticas de la ONU de 1995, ese porcentaje de CO₂ sería aún menor, de un 5%, aunque estas incertidumbres son normales en este caso, debido a todas las variables que se manejan y como dijimos anteriormente, los efectos de contaminación antropogénica son más efectivos que los producidos por fuentes naturales, pero es que además en este caso hay pruebas científicas de la intervención humana, tal como demuestra el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) y que veremos en la siguiente sección.

9.- La intervención humana en el calentamiento global.

Las investigaciones del IPCC, son concordantes con la responsabilidad de la era industrial en el calentamiento global. Para ello, utilizan como indicadores, las concentraciones atmosféricas de CO₂, N₂O, CH₄ y aerosoles de sulfatos. La introducción de las medidas de estos últimos, que complementan a la de los gases de efecto invernadero, representa un gran progreso en los modelos climáticos para proveer de simulaciones mas completas sobre la "señal" del cambio climático inducido por los humanos, logrando así estimaciones más realistas del llamado "forzamiento radiativo" antropogénico,¹²² que demuestra la intervención humana en el calentamiento global. Es por ello, que los modernos satélites espaciales, incluyen las medidas de aerosoles en su equipamiento.

Es evidente, que existe un ruido de fondo, debido a la variabilidad natural del clima y que las fuentes antropogénicas, se sumarán a ella. No obstante, los modelos intentan distinguir entre la influencia de las fuentes naturales y las antropogénicas. Los estudios realizados por el IPCC van en ese camino, y demuestran que hay un “forzamiento radiativo” positivo (incremento de radiación) sobre el clima originado por el hombre, que empieza en el año 1750 aproximadamente y que se manifiesta con toda su crudeza durante la época industrial (figuras 111 y 112).

En el gráfico de la figura 111, se estudia el “efecto radiativo” de tres gases de efecto invernadero: CO_2 , CH_4 y N_2O , donde podemos apreciar que el aumento en la concentración atmosférica de estos, se corresponde con un aumento en el “forzamiento radiativo”, que se mide en Wm^{-2} (Watts por metro cuadrado).

Los gases de efecto invernadero desde mediados del siglo XVIII, han ocasionado un “forzamiento radiativo” positivo sobre el clima, lo que origina el calentamiento terrestre y demás alteraciones climáticas.

Este incremento de radiación solar, que llega a nivel de suelo, actualmente es de $2,45 \text{ Wm}^{-2}$, de los que 2,42 corresponde a los gases de efecto invernadero, repartidos en: CO_2 1,56; CH_4 0,47; N_2O 0,14 (ver figura 111), y CFCs-HCFCs $0,25 \text{ Wm}^{-2}$. Es decir, que el mayor efecto de forzamiento es el del CO_2 . Por otro lado, el valor de los CFCs-HCFCs, en realidad es menor, ya que en la destrucción de la capa de ozono estratosférica que realizan, ocasionan un efecto contrario, es decir un “forzamiento radiativo” negativo (lo que origina enfriamiento), con lo que su contribución neta es del orden de $+0,1 \text{ Wm}^{-2}$. Al contrario, el aumento de ozono troposférico, como contaminación secundaria en reacciones fotoquímicas de los NO_x e hidrocarburos, provocan un “forzamiento radiativo” positivo. Los aerosoles de origen antropogénico, sin embargo, producen un “forzamiento radiativo” negativo, cifrado en unos $0,5 \text{ Wm}^{-2}$. La diferencia entre estos últimos y los gases de efecto invernadero, es que la vida media atmosférica de los aerosoles es muy baja, y debido a ello los

“forzamientos radiativos”, se ajustan rápidamente a las emisiones, lo que no sucede con los gases de efecto invernadero, que pueden permanecer en la atmósfera desde décadas a siglos.

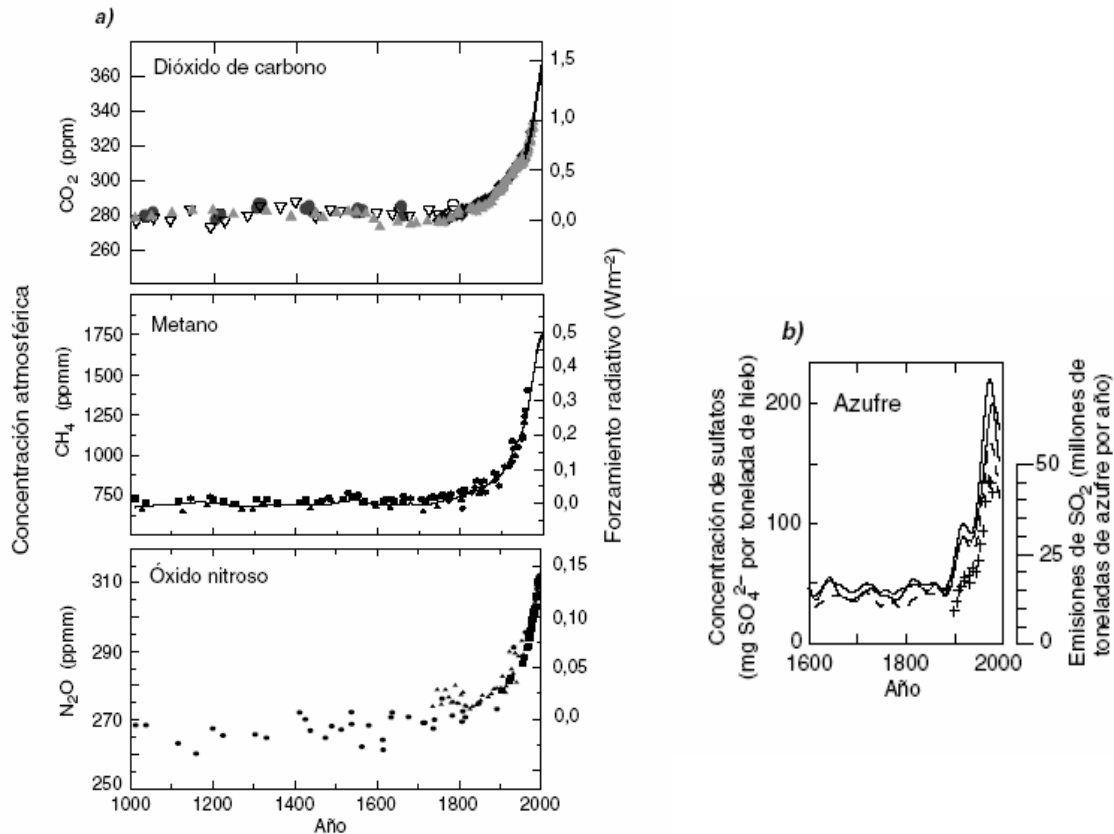


Figura 111.- Registros de los cambios en la composición de la atmósfera. a) Concentraciones atmosféricas de CO_2 , CH_4 y N_2O en los últimos 1.000 años. Los datos de muestras de hielo y neviza en varios emplazamientos en la Antártida y Groenlandia (indicados con símbolos diferentes) se complementan con los datos de muestras atmosféricas directas en los últimos decenios (indicados mediante la línea del CO_2 e incorporados a la curva que representa el promedio mundial de CH_4). El forzamiento radiativo estimado de esos gases se indica en la escala a la derecha. **b)** Concentración de sulfatos en varias muestras de hielo de Groenlandia, después de eliminar los efectos episódicos de las erupciones volcánicas (líneas) y emisiones totales de SO_2 procedentes de fuentes en Estados Unidos y Europa (cruces). “Forzamiento radiativo”: CO_2 1,56; CH_4 0,47; N_2O 0,14 en el año 2000.. Fuente: Tercer Informe IPCC. Figura 8.

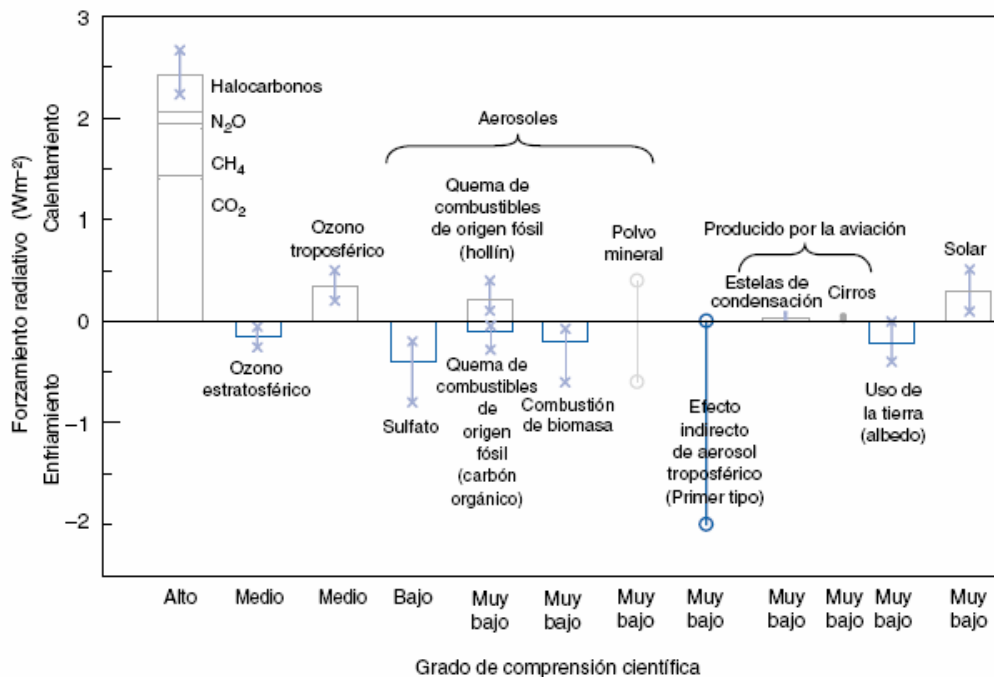


Figura 112.- Forzamientos radiativos (Wm^{-2}) medios anuales mundiales debidos a varios agentes en el período desde la era preindustrial (1750) hasta el presente (finales de los años noventa; alrededor de 2000). La altura de la barra rectangular denota un valor central o la mejor estimación, en tanto que su ausencia denota que no es posible calcular una mejor estimación. Las líneas verticales situadas sobre las barras rectangulares con delimitadores “x” indican una estimación del margen de incertidumbre, provocado en su mayor parte por la dispersión en los valores publicados del forzamiento. Una línea vertical sin barra rectangular y con delimitadores “o” denota un forzamiento para el cual no puede darse ninguna estimación central, debido a grandes incertidumbres. Se otorga un índice de “grado de comprensión científica” a cada forzamiento, con niveles alto, medio, bajo y muy bajo, respectivamente. Esto representa el juicio subjetivo acerca de la fiabilidad del cálculo del forzamiento, que implica factores tales como los supuestos necesarios para evaluar el forzamiento, el grado de conocimiento de los mecanismos físicos/químicos que determinan el forzamiento y las incertidumbres que rodean el cálculo cuantitativo del forzamiento. Los gases de efecto invernadero (GEI) bien mezclados se agrupan juntos en una sola barra rectangular, mostrando las contribuciones medias individuales debidas al CO_2 , el CH_4 , el N_2O y los halocarbonos. La quema de combustibles de origen fósil se divide en componentes “hollín” y “carbón orgánico”, con su mejor estimación y alcance separados. El signo de los efectos debidos al polvo mineral es una incertidumbre. El forzamiento indirecto debido a los aerosoles troposféricos no se comprende bien. Lo mismo ocurre con el forzamiento debido a la aviación, por sus efectos sobre las estelas de condensación y las nubes cirros. Sólo se tiene en cuenta aquí el “primer” tipo de efecto indirecto debido a los aerosoles, como aplicable en el contexto de las nubes líquidas. El “segundo” tipo de efecto es conceptualmente importante, pero los cálculos cuantitativos simulados inspiran muy poca confianza. El forzamiento vinculado a los aerosoles estratosféricos procedentes de erupciones volcánicas es muy variable a lo largo del período y no se tiene en cuenta para este diagrama. Los gases de efecto invernadero y el ozono troposférico son los principales responsables del forzamiento positivo del clima (calentamiento), mientras que el ozono estratosférico, los aerosoles de sulfatos, la quema de biomasa y el albedo lo son del forzamiento negativo (enfriamiento). La quema de carbón produce los dos efectos, aunque con balance positivo. Fuente: IPCC. Tercer Informe 2001. La base científica. Extraído de la figura 9.

Resulta también significativo, que las temperaturas en la superficie de la Tierra, hayan ido aumentando en un periodo corto, que corresponde precisamente a la revolución industrial, tal como vemos en la figura 113.

Además, las temperaturas observadas desde el año 1860 hasta el 2000, son bastante concordantes con las que predicen los modelos, por lo que puede ser que no haya mucho espacio para dudar de ellos, y puede que sus previsiones a más largo plazo sean mas precisas de lo que en principio, se podría creer (figura 114).

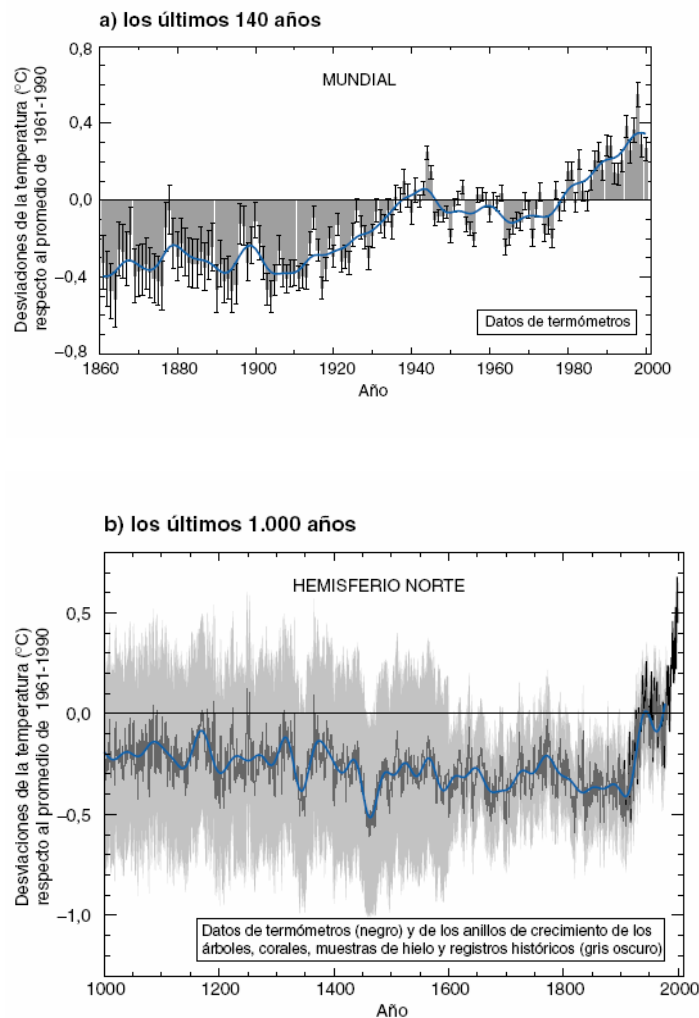


Figura 113.- Variaciones en las temperaturas de la superficie terrestre, a) en los pasados 140 años y b) en los últimos 1000 años en el hemisferio norte. El incremento de temperaturas se produce coincidiendo con la época industrial. Fuente: IPCC.

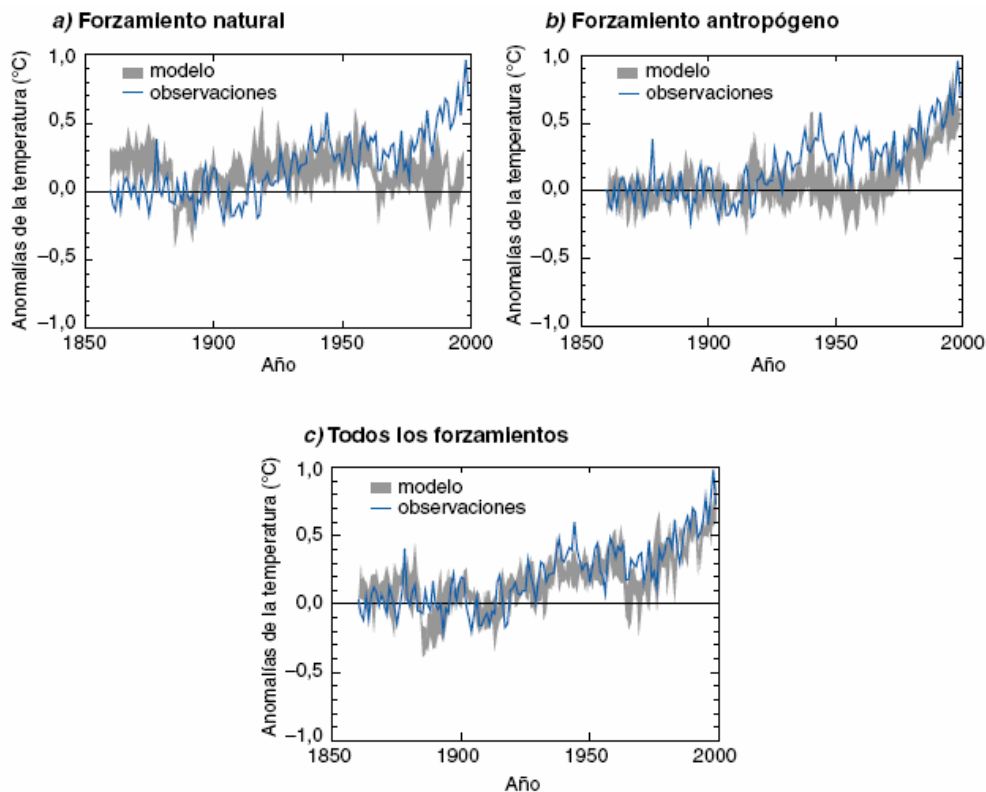


Figura 114.- Comparación entre las temperaturas observadas (en rojo) y las predicciones de los modelos (en gris), desde el año 1860. Un modelo climático puede utilizarse para simular los cambios de temperatura que se producen por causas naturales y antropógenas. Las simulaciones que representa la banda en a) se hicieron sólo con forzamientos naturales (variación solar y actividad volcánica). Las simulaciones de la banda en b) se hicieron con forzamientos antropógenos (gases de efecto invernadero (GEI) y una estimación de los aerosoles de sulfatos) y las simulaciones que recoge la banda en c) se efectuaron con forzamientos naturales y antropógenos. En b) puede verse que la inclusión de forzamientos antropógenos proporciona una explicación verosímil de una parte importante de los cambios de temperatura observados en el último siglo, pero la mejor correspondencia con las observaciones se logra en c), al incluir tanto los factores naturales como los antropógenos. Estos resultados muestran que los forzamientos incluidos son suficientes para explicar los cambios observados, pero no excluyen la posibilidad de que hayan intervenido también otros forzamientos.

Fuente: IPCC. Tercer informe. 2001.

También se demuestra por otra parte, que en durante el periodo industrial, el nivel del mar ha ido aumentando progresivamente, alcanzando sus valores máximos en el año 2001, fecha del último informe del IPCC. En el gráfico de la figura 115, se muestra esta evolución, desde hace 300 años, observando que los valores relativos, se mantienen constantes hasta la década de 1950, y que desde entonces han ido incrementándose.

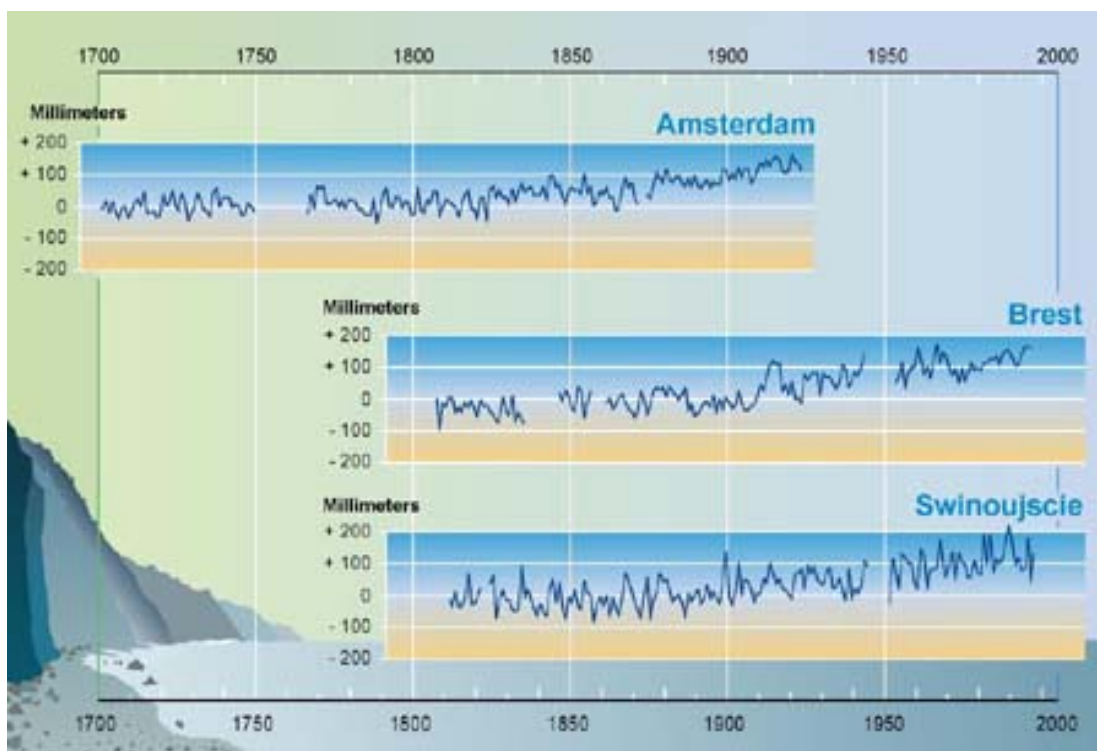


Figura 115.- Valores relativos del nivel del mar desde hace 300 años en tres diferentes ciudades costeras. Fuente: IPCC.

CONCLUSIONES

Cada vez hay menos dudas, de que el cambio climático se está ya produciendo. El análisis de datos meteorológicos del pasado siglo, por décadas, evidencian cambios significativos en el clima, afectando irregularmente a las regiones. La temperatura media terrestre, ha aumentado en algunas décimas de grado con

máximos de calentamiento en latitudes medias en invierno y primavera, y con descensos en el Atlántico norte. El nivel del mar se ha incrementado en algunos centímetros. La precipitación se ha acrecentado en latitudes altas del hemisferio norte y han disminuido en otras; fenómenos como “El Niño”, se han intensificado y se han elevado la frecuencia de huracanes, tornados, etc.

Las incertidumbres son todavía muchas, por ejemplo, si la Tierra se torna más calurosa, habrá probablemente más nubes y eso supondrá que se refleje una cantidad de luz al espacio suficiente como para que la Tierra se enfríe de nuevo, y porque no, causar más lluvia y puede que caiga más nieve, lo que haría que vuelva de nuevo a formarse capas de hielo en las regiones polares y a disminuir el nivel de los mares. Este ejercicio científico, se puede hacer con otros aspectos del cambio climático.

Los modelos climáticos, cada vez más perfeccionados y potentes, intentan resolver estas dudas, y realizar una valoración real y efectiva de la contribución de las fuentes naturales y antropogénicas al cambio climático y es probable que en pocos años obtengamos respuestas precisas. Pero no hay porqué esperarlas.

En mi opinión, este es el gran reto de contaminación atmosférica, que se nos plantea en el presente siglo, y que afectará a las generaciones futuras. La cuestión es que si las previsiones se cumplen, y la visión catastrofista de los modelos es cierta, podemos estar ante un problema de supervivencia de nuestra especie, y por tanto urge atajarlo, ya que no va a importar si el problema es provocado por nosotros mismos o es un proceso natural, porque al final, como en la fábula, nos va a dar lo mismo que sean “galgos o podencos”.

Puede ser cierto, que el cambio climático que estamos viviendo, tenga un origen natural, pero también lo es que la intervención humana lo fuerza con las emisiones de gases de efecto invernadero, en especial el CO₂, y si bien sobre el primero no podemos actuar, si sobre lo que nosotros producimos, y no tenemos que resignarnos a observar simplemente como sucede. Hay que frenar las emisiones de

CO₂ y de los demás gases de efecto invernadero antes de que ocurra el desastre. Para ello, y de momento, tenemos dos herramientas, la Agenda 21 como guía y el Protocolo de Kioto como obligación. Desarrollemos la primera y cumplamos con la segunda, para frenar la catástrofe que se nos avecina. Según los pronósticos de los modelos, todavía el cambio no es irreversible y estamos a tiempo para evitarlo. Seamos sensatos y cumplamos con nuestra obligación de dejar un Mundo mejor a las generaciones que nos sucederán. Como dije, en mi discurso de recepción en la Real Academia Nacional de Farmacia: “Ninguna especie en este Planeta ha progresado tanto como el ser humano. Estemos orgullosos de ello, pero reconozcamos lo que la Naturaleza nos ha dado y reconciliémonos con Ella, no sea que tome y acepte nuestro reto.”

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ D. Elsom. La contaminación atmosférica. Madrid: Cátedra; 1990.
- ² Directiva 2001/77 CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de electricidad. 27-septiembre-2001.
- ³ Control de emisiones. 2004. <http://www.ecoloxistesasturies.org>.
- ⁴ DERSA. Desarrollos de Energías renovables S.A. 2004. <http://www.dersa.es>.
- ⁵ B. J. Scanavino. Energía mareomotriz. 2004. <http://www.monografias.com>.
- ⁶ Energía mareomotriz. 2001. <http://www.ambientum.com>.
- ⁷ M. Ortega. Portal de Internet "En Buenas Manos". Energías renovables. 2004. <http://www.energias-renovables.com>.
- ⁸ Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. <http://miliarium.com>
- ⁹ Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. República Argentina. 2004.
- ¹⁰ P. J. Crutzen. Biomass Burning as a Source of Atmospheric Gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl, and COS, Nature, 15, 253-256, 2004.
- ¹¹ E. G. Ercoreca. Madri+d. Noticias. 2004. <http://www.madrimasd.org>.
- ¹² Madri+d. Noticias. 2004. <http://www.madrimasd.org/globalidi/noticia.asp>.
- ¹³ Madrid+d. Noticias. 2004. <http://www.madrimasd.org/globalidi/noticia.asp?id=15937>.
- ¹⁴ P. Warneck, Chemistry of the Natural Atmosphere, vol. 41: International Geophysics Series. New York. Academic Press. 1988.
- ¹⁵ J. R. Bernal, Contaminación del aire, U.N., Bogotá. 1972.
- ¹⁶ Secretaria del Medio Ambiente del D. F. México. <http://www.sma.df.gob.mx>.
- ¹⁷ K. R. Spurny, Atmospheric particulate pollutants and environmental health, Arch Environ Health, 5, 415-416. 1996.
- ¹⁸ World Health Organization. Sulphur oxides and suspended particulate matter. Environ Health Criteria 8. Geneve, 1979.

-
- ¹⁹ World Health Organization. Update and revision of the air quality guidelines for Europe. Copenhagen, 1995.
- ²⁰ Calidad del aire de interiores. 2000. <http://www.tabaquismo.freehosting.net>
- ²¹ World Health Organization. Oxides of Nitrogen. Environmental Health Criteria 4. Geneve, 1977.
- ²² EPA. United States Environmental Protection Agency, Lo que usted necesita saber acerca del ozono y su salud, 2000. <http://www.epa.gov/oar/oaqps>.
- ²³ D. J. Mckee. Tropospheric ozone: human health and agricultural impacts, Boca Raton, Lewis publishers. 1993.
- ²⁴ Ryerson. Observations of Ozone Formation in Power Plant Plumes and implications for Ozone Control Strategies, Science, 292, 5517, 2001.
- ²⁵ J. Sanz. La contaminación atmosférica. Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Bilbao, 1991.
- ²⁶ Libro electrónico Ciencias de la Tierra y del medio ambiente. Atmósfera e hidrosfera. 2004. <http://www1.ceit.es>.
- ²⁷ Antártida, ecología. El ozono; teoría, destrucción, consecuencias. 2004. http://www.iespana.es/natureduca/ant_eco_ozonoteoria.htm.
- ²⁸ C. Ballaré. Ciencia Hoy. Los clorofluorcarbonos y el ozono estratosférico un problema global. Efectos de la radiación ultravioleta sobre las plantas. 2004. <http://www.ciencia-hoy.retina.ar/hoy36/clorofl2.htm>.
- ²⁹ J. R. Herman, P. K. Bhartia, J. Ziemke, Z. Hamad, D. Larko, UV-B increases (1979-1992) from decreases in total O₃, Geophys. Res. Lett, 23, 16, 2117, 1996.
- ³⁰ J. E. Rosenfield, M. R. Schoeberl, A computation of stratospheric heating rates and the diabatic circulation for the Antarctic Spring, Geophys. Res. Lett., 13, 12, 1339-1342, 1986.
- ³¹ S. Chapman, A Theory of Upper-Atmospheric Ozone, Memoirs of the Royal Meteorological Society, 3, 103-125, 1930.

-
- ³² Ozone remote sensing. 2004. <http://marine.rutgers.edu>.
- ³³ Atmospheric Chemistry data&resources. 2004. <http://daac.gsfc.nasa.gov>.
- ³⁴ Ciencias antárticas. Las bases científicas. 2004. <http://www.iespana.es/natureduca>.
- ³⁵ Globo sonda. 2004. <http://vppx134.vp.ehu.es/met/html/diccio/globoson.htm>.
- ³⁶ H. Tai, J. W. Wilson, D. L. Maiden, Atmospheric Ionizing Radiation (AIR) ER-2 Preflight Analysis National Aeronautics and Space Administration. Angley Research Center. Hmpton, Virginia 23681-2199. 1998.
- ³⁷ K. J. Gleason. Stratospheric ozone. Monitoring and research in NOAA. 2001. <http://www.ozonelayer.noaa.gov/action/tovs.htm>.
- ³⁸ M. R. Schoeberl, A. J. Krueger, P. A. Newman, The morphology of Antarctic total ozone as seen by TOMS, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 12, 1217-1220, 1986.
- ³⁹ R. S. Stolarsky, A. J. Krueger, M. R. Schoeberl, R. D. McPeters, P. A. Newman, J. C. Alpert, Nimbus-7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease, *Nature*, 322, 808-810, 1986.
- ⁴⁰ R. B. Rood, Global ozone minima in the historical record, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 12, 1244-1247, 1986.
- ⁴¹ Fuerza Aérea Argentina. Servicio Meteorológico Nacional. Gacetillas Meteorológicas, 15, 1, 2003.
- ⁴² R.G.W. Norrish, R.P. Wayne. The photolysis of ozone by ultraviolet radiation. The photolysis of ozone mixed with certain hydrogen-containing substances. *Proc. Roy. Soc. London, A* 288, 361, 1965.
- ⁴³ J. Hampson, Chemiluminescent emission observed in the stratosphere and mesosphere, *Les problèmes météorologiques de la stratosphère et de la mésosphère*, p. 393. Presses universitaires de Francia, Paris, 1965.
- ⁴⁴ P. J. Crutzen, Thesis, 1968.
- ⁴⁵ P.J. Crutzen, My life with O₃, NO_x and other YZO_x. Nobel lecture. 1995.

-
- ⁴⁶ D.D. Davis, Recent kinetic measurements on the reactions of O(3p), H and HO₂, Second Conference on CIAP, p. 126, DOT-TSC-OST-73-4, 1973.
- ⁴⁷ P.J. Crutzen, The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, Q. J. R. Meteorol. Soc., 96, 320-325, 1970.
- ⁴⁸ M. Nicolet, Nitrogen oxides in the chemosphere, J. Geophys. Res., 70, 679-689, 1965.
- ⁴⁹ Chemcases: refrigerants.CFCs and the ozone layer. 2004. <http://chemcases.com>.
- ⁵⁰ T. Nichols. Productos químicos antropogénicos: CFCs. 2004. <http://www.meteor.iastate.edu>.
- ⁵¹ El fraude de la capa de ozono. 2004. <http://mitosyfraudes.8k.com>.
- ⁵² P. Fabian, R. Borders, G. Gömer, The Vertical Distribution of Halocarbons in the Stratosphere, Atmospheric Ozone, Publicación del Simposio Cuatrienal del Ozono, Sept. 1984.
- ⁵³ P. Fabian, R. Borders, S.A. Penkett, Halocarbons in the Stratosphere, Nature, 24, 733-735, 1981.
- ⁵⁴ E. R. Reiter, Stratospheric-Tropospheric Exchange Processes, Reviews of Geophysics and Space Physics. 13, 4, 459-474, 1975.
- ⁵⁵ M. J. Molina, Polar ozone depletion (Nobel Lecture), Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 35, 1778-1785, 1996.
- ⁵⁶ S. Rowland. Cambio Climático. Pérdida de ozono y calentamiento global. 2004. <http://www.ambiental.net/noticias/CambioClimaticoRowlandEntrevista.htm>.
- ⁵⁷ L. V. Orce. Ciencia Hoy, 2, 9, 41-49, 1990.
- ⁵⁸ M. J. Molina y F. S. Rowland, Stratospheric sink for chlorfluoromethanes-chlorine atomic catalysed destruction of ozone, Nature, 249, 810-812, 1974.
- ⁵⁹ F. S. Rowland, Chlorofluorocarbons and the Depletion of Stratospheric Ozone, American Scientist, 77, 1-2, 36-45, 1989.

-
- ⁶⁰ F. S. Rowland, M. Molina, Chlorofluoromethanes in the Environment, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 13, 1, 1-35, 1975.
- ⁶¹ L. T. Molina, M. J. Molina, *J. Phys. Chem.*, 91, 433, 1987.
- ⁶² Archivos curriculares de la naturaleza. 2004. <http://www.nalejandria.com/archivos-curriculares/ciencias/nota-002.htm>.
- ⁶³ J. C. Farman, B. G. Gardiner, D.J. Shankin, Large losses of total ozone in Antarctica reveals seasonally ClOx/NOx interaction, *Nature* 315, 207, 1985.
- ⁶⁴ P. Canzaini. 1996. <http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/tpopte/1996/ozono.html>.
- ⁶⁵ P. Hamill, O. B. Toon, R. P. Turco, Characteristics of polar stratospheric clouds during the formation of the Antarctic ozone hole, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 12, 1288-1291, 1986.
- ⁶⁶ E. Vömel, D. J. Hofmann, S. J. Oltmans, J. M. Harries, Evidence of mid-winter chemical ozone destruction over Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 17, 2381, 1995.
- ⁶⁷ G. R. Talamoni. El "agujero de ozono" antártico. 2004. <http://www.ambiente-ecologico.com/revist26/ozono26.htm>.
- ⁶⁸ Revista del aficionado a la meteorología, 9, marzo 2003. <http://www.meteored.com>.
- ⁶⁹ J. Kinisky. 21st century Science&technology, 10-11, 1998.
- ⁷⁰ E. Ferreira. <http://mitosyfraudes.8k.com/Ozo/desinforNASA.html>.
- ⁷¹ D. A. Johnston, Volcanic Contribution of Chlorine to the Stratosphere: More Significant to Ozone Than Previously Estimated, *Science*, 209, 491-493, 1980.
- ⁷² P. R. Kyle, K. Meeker, D. Finnegan, Emission Rates of Sulfur Dioxide, Trace Gases and Metals from Mt. Erebus, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 17, 2125-2128, 1990.
- ⁷³ McMurdo Station. <http://www.nsf.gov/od/opp/support/mcmurdo.htm>.
- ⁷⁴ R. Maduro, R. Schauerhammer, *The Holes in the Ozone Scare*, 21st Century Science Associates, Washington, D.C. 1992.
- ⁷⁵ E. Ferreyra. 2004. <http://mitosyfraudes.8k.com/articulos-3/CloroCatalitico.html>.

-
- ⁷⁶ Ozone mini-holes. 2004. <http://www.xs4all.nl/~josvg/KNMI/hole1999/hole-np.html>.
- ⁷⁷ B.G. Levi, Ozone Depletion at the Poles: The Hole Story Emerges, *Physics Today*, 41, 17-21, 1988.
- ⁷⁸ Northern Hemisphere ozone values. 1999. <http://www.xs4all.nl>.
- ⁷⁹ Secretaría del Protocolo de Montreal. Chief Officer Montreal Trust Building, 1800 McGill College Avenue Montreal, Quebec Canadá. H3A3J6.
- ⁸⁰ Entrevista a Mario Molina. 1998. <http://www.serpiente.dgsca.unam.mx>
- ⁸¹ J. Kinisky. Los agujeros de ozono son un fenómeno natural. 2004. <http://mitosyfraudes.8k.com/articulos/OzonoNatural.html>.
- ⁸² T. Spiro, W. Stigliani. *Química Medioambiental*. 2ª ed. Pearson Prentice Hall. Madrid. 2004.
- ⁸³ J.B. Kerr, C.T. McElroy, Evidence for Large Upward Trends of Ultraviolet-B Radiation Linked to Ozone Depletion, *Science*, 262, 1032, 1993.
- ⁸⁴ J. Scotto, Global Stratospheric Ozone and UVB Radiation, *Science*, 239, 1111-1112, 1988.
- ⁸⁵ Council on Scientific Affairs, American Medical Association, Harmful Effects of Ultraviolet Radiation, *Journal of the American Medical Association*, 262, 3, 380-384, 1989.
- ⁸⁶ V. Beral, H. Shaw, S. Evans, G. Milton, Malignant Melanoma and Exposure to Fluorescent Lighting at Work, *Lancet*, 7, 290-293, 1982.
- ⁸⁷ Área de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias. UNEX. Gestión y conservación del suelo. 2004. <http://www.unex.es/edafo/GCSL3DegFisQuim.htm>.
- ⁸⁸ Programa de Cooperación Internacional para la Evaluación y el seguimiento de los efectos de la Contaminación Atmosférica en los bosques (ICP Forests) de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE). <http://www.mma.es>.
- ⁸⁹ La contaminación del suelo. 2004. <http://www.uclm.es>.

-
- ⁹⁰ Contaminación del suelo. Tema 17. Contaminación por lluvia ácida. Efectos. 2004. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema17/efectos.htm>.
- ⁹¹ Programa de la lluvia ácida. EPA. 2004. <http://www.epa.gov>.
- ⁹² Contaminación del suelo. Tema 17. Contaminación por lluvia ácida. Carga crítica. 2004. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema17/cgcrit.htm>.
- ⁹³ Estado de los bosques en Europa. Informe ejecutivo 2003. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Comisión Europea. ISSN 1020-5942. Alemania.
- ⁹⁴ Nota de prensa de ENDESA. División Corporativa de comunicación. Zaragoza, 19 marzo 2001.
- ⁹⁵ Boletín Informativo del Medio Ambiente. Noviembre, 1998.
- ⁹⁶ A. Kawauchi, F. Hirose, M. Musahi. High efficiency advanced combined cycle power plants. Hitachi review. 46, 121-128, 1997
- ⁹⁷ Centrales de ciclo combinado. 2004. <http://cipres.cec.uchile.cl/~aarcila/index2.html>.
- ⁹⁸ A. Soria, P. Russ. Ciclo combinado de gasificación integrada: Centrales térmicas de carbón respetuosas con el medio ambiente para el suministro energético del futuro 2004. <http://www.jrc.es/iptsreport/vol09/spanish/Ene2S096.htm>.
- ⁹⁹ I. G. Mardones. El País. 25 abril 2000. <http://www.monsanto.es>.
- ¹⁰⁰ Contaminación del suelo. Tema 17. Contaminación por lluvia ácida. Introducción. 2004. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema17/introd.htm>.
- ¹⁰¹ X. Xu, J. Gao, D. Dockery, Y. Chen, Air Pollution and Daily Mortality in Residential Areas of Beijing, China, Archives of Environmental Health, 49, 4, 216–221, 1994.
- ¹⁰² BBC Mundo. Cambio climático. 2004. <http://www.bbc.co.uk>.
- ¹⁰³ Libro electrónico. Ciencias de la Tierra y del Medio ambiente. Cambio climático y efecto invernadero. 2004.
- ¹⁰⁴ J. Corbella. Madri+d. Noticia 16-7-2004. <http://www.madrimasd.org>.
- ¹⁰⁵ Antártida. Efecto invernadero. 2004. <http://www.iespana.es/natureduca>.

-
- ¹⁰⁶ Madri+d. Noticias. 15-6-2004. <http://www.madrimasd.org>.
- ¹⁰⁷ Cambio Climático 2001. la base científica. Resumen técnico. IPCC. 2001.
- ¹⁰⁸ M. Hulme, N. Sheard, Escenarios de Cambio Climático para la Península Ibérica, Unidad de Investigación Climática, Norwich, Reino Unido, 6, 1999.
- ¹⁰⁹ M. Hulme, N. Serrad. Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia, Norwich. <http://www.cru.uea.ac.uk>.
- ¹¹⁰ C. Álvarez. Madri+d. Noticias. 11-5-2004. <http://www.madrimasd.org>.
- ¹¹¹ J.Santamarta.http://www.iepe.org/econoticias/092003/10092003mundo_efecto_invernadero.htm. 2003.
- ¹¹² J. Martínez, A. Fernández, Comunicaciones Nacionales de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.
- ¹¹³ Cambio climático: Previsiones e incertidumbres. Aceprensa. 6-12-2000.
- ¹¹⁴ T. Palucha. Madri+d. Noticias. 2004. <http://www.madrimasd.org>.
- ¹¹⁵ El Medio ambiente en Europa. Segunda evaluación. Capítulo 2. Cambio climático p.37. European Environment Agency.
- ¹¹⁶ Rebelión Ecología. 2001. <http://www.rebelion.org/ecologia/meteo220301.htm>.
- ¹¹⁷ H. Broker. Madri+d. Noticias. 21-5-2004. <http://www.madrimasd.org>.
- ¹¹⁸ El Medio Ambiente en Europa. Segunda evaluación. Capítulo 2. Medio Ambiente europeo p. 38. European Environment Agency.
- ¹¹⁹ Fenómeno El Niño. Documental Piura. 2004. <http://usuarios.lycos.es/regionpiura/>.
- ¹²⁰ M. Muñoz, Conferencias en la Fundación Complutense.. Contaminación atmosférica y cambio climático. Un reto en el siglo XXI. La situación en el Sur de Europa.
- ¹²¹ Reportaje exclusivo calentamiento global. 2004. <http://satansm.com/report1.htm>.
- ¹²² La Ciencia del cambio climático. 2004. <http://www.fisica.uson.mx>.

OTRA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- (1) P.J. Crutzen, I. E. Galbally, C. Brühl, 1984: Atmospheric effects from post-nuclear fires. *Climatic Change* 6, 323-364.
- (2) J.T. Kiehl, C. Brühl, T. Yamanouchi, 1985: A parameterization for the absorption due to the near infrared bands of CO₂. *Tellus* 37B, 189-196.
- (3) C. Brühl, P.J. Crutzen, 1988: Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentrations due to man's activities, estimated with a one-dimensional coupled photochemical climate model. *Climate dynamics*, 2, 173-203.
- (3) P.J. Crutzen, C. Brühl, U. Schmailzl, F. Arnold, 1988: Nitric acid haze formation in the lower stratosphere: a major contributing factor to the development of the Antarctic "ozone hole". In: *Aerosols and Climate* (Eds. P.V. Hobbs y M.P. McCormick), DEEPAK.
- (4) C. Brühl, P.J. Crutzen, 1989: On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B radiation. *Geophys. Res. Lett.* 16, 703-706.
- (5) C. Brühl, P.J. Crutzen, 1990: Ozone and climate changes in the light of the Montreal Protocol: a model study. *Ambio*, 19, 293-301.
- (6) T. Peter, C. Brühl, P.J. Crutzen, 1991: Increase in the PSC-formation probability caused by high-flying aircraft. *Geophys.Res.Lett* 18, 1465-1468.
- (7) P.J. Crutzen, R Müller, C. Brühl, T. Peter, 1992: On the potential importance of the gas phase reaction $\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{ClO} \rightarrow \text{ClOO} + \text{CH}_3\text{O}$ and the heterogeneous reaction $\text{HOCl} + \text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}$ in ozone hole chemistry. *Geophys.Res.Lett.* 19, 1113-1116.
- (8) C. Brühl, 1993: Einfluss von Vulkanen auf das atmosphärische Ozon. *UWSF-Z.Umweltchem. Ökotox.* 5, 102-111.
- (9) C. Brühl, 1993: The impact of the future scenarios for methane and other chemically active gases on the GWP of methane. *Chemosphere*, 26, 731-738.
- (10) J. Lelieveld, P.J. Crutzen, C. Brühl, 1993: Climate effects of atmospheric methane. *Chemosphere*, 26, 739-768.

-
- (11) J.P. Pinto, C. Brühl, A.M. Thompson, 1993: The current and future environmental role of atmospheric methane: model studies and uncertainties. In: *Atmospheric Methane: Sources, Sinks, and Role in Global Change*. (Ed. M.A.K. Khalil), Springer, Berlin.
- (12) P.J. Crutzen, C. Brühl, 1993: A model study of atmospheric temperatures and the concentrations of ozone, hydroxyl, and some other photochemically active gases during the glacial, the preindustrial holocene and the present. *Geoph. Res. Lett.*, 20, 1047-1050.
- (13) P. J. Crutzen, J. Lelieveld, C. Brühl, 1994: Oxidation processes in the atmosphere and the role of human activities: observations and model results. In: *Environmental Oxidants*. (Ed. J.O. Nriagu, M.S. Simmons), Wiley, New York (Series: Advances in environmental science and technology, 28).
- (14) C.M. Roehl, D. Boglu, C. Brühl, G.K. Moortgat, 1995: Infrared band intensities and global warming potentials of CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, C₅F₁₂, and C₆F₁₄. *Geophys. Res. Lett.* 22, 815-818.
- (15) P.J. Crutzen, J. U. Grooss, C. Brühl, R. Müller, J. M. Russell III, 1995: A reevaluation of the ozone budget with HALOE UARS data: no evidence for the ozone deficit. *Science*, 268, 705-708.
- (16) C. Brühl, S.R. Drayson, J.M. Russell II, P.J. Crutzen, J.M. McInerney, P.N. Purcell, H. Claude, H. Gernandt, T.J. McGee, I.S. McDermid, M.R. Gunson, 1996: Halogen Occultation Experiment ozone channel validation. *J. Geophys. Res.*, 101, 10217-10240.
- (17) R. Müller, P.J. Crutzen, J.U. Grooss, C. Brühl, J.M. Russell II, A.F. Tuck, 1996: Chlorine activation and ozone depletion in the Arctic vortex: observations by the Halogen Occultation Experiment on the Upper Atmosphere Research Satellite. *J. Geophys. Res.* 101, 12531-12554.

-
- (18) P. Bergamaschi, C. Brühl, C.A.M. Brenninkmeijer, G. Saueressig, J.N. Crowley, J.U. Grooss, H. Fischer, P.J. Crutzen, 1996: Implications of the large carbon kinetic isotope effect in the reaction $\text{CH}_4 + \text{Cl}$ for the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of stratospheric CH_4 . *Geophys. Res. Lett.* 23, 2227-2230.
- (19) R. Müller, P.J. Crutzen, J.U. Grooss, C. Brühl, J. M. Russell III, H. Gernandt, D.S. McKenna, A. Tuck, 1997: Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-96. *Nature* 389, 709-712.
- (20) R. Müller, J.U. Grooss, D.S. McKenna, P.J. Crutzen, C. Brühl, J.M. Russell III, A. Tuck, 1997: HALOE observations of the vertical structure of chemical ozone depletion in the Arctic vortex during winter and early spring 1996-1997. *Geophys. Res. Lett.* 24, 2717-2720.
- (21) C. Brühl, P.J. Crutzen, J.U. Grooss, 1998: High-latitude, summertime NO_x activation and seasonal ozone decline in the lower stratosphere: Model calculations based on observations by HALOE on UARS. *J. Geophys. Res.* 103, 3587-3597.
- (22) C. Brühl, K. Carslaw, T. Peter, J. U. Grooss, J. M. Russell III, R. Müller, 1998: Chlorine activation and ozone depletion in the Arctic vortex of the four recent winters using a trajectory box model and HALOE satellite observations. In: *Atmospheric Ozone, Proceedings of the XVIII Quadr. Ozone Symp. 1996* (Eds. R. Bojkov y G. Visconti), L'Aquila, 675-678.
- (23) J.U. Grooss, C. Brühl, Th. Peter, 1998: Impact of Aircraft Emissions on Tropospheric and Stratospheric Ozone Part I: Chemistry and 2-D Model Results. *Atm. Environ.* 32, 3173-3184.
- (24) M. Dameris, V. Grewe, I. Köhler, R. Sausen, C. Brühl, J.U. Grooss, B. Steil, 1998: Impact of Aircraft NO_x -Emissions on Tropospheric and Stratospheric Ozone Part II: 3-D model results. *Atm. Environ.* 32, 3185-3199.
- (25) M. Dameris, V. Grewe, R. Hein, C. Schnadt, C. Brühl, B. Steil, 1998: Assessment of the future development of the ozone layer. *Geophys. Res. Lett.* 25, 3579-3582.

-
- (26) B. Steil, M. Dameris, C. Brühl, P.J. Crutzen, V. Grewe, M. Ponater, R. Sausen, 1998: Development of a chemistry module for GCMs: first results of a multi-annual integration. *Ann. Geophys.* 16, 205-228.
- (27) C. Brühl, P.J. Crutzen, 1999: Reductions in the anthropogenic emissions of CO and their effect on CH₄. *Chemosphere: Global Change Science* 1, 249-254.
- (28) R. Müller, J. U. Grooss, D. S. McKenna, P. J. Crutzen, C. Brühl, J.M. Russell III, L.L. Gordley, J.P. Burrows, A. Tuck, 1999: Chemical ozone loss in the Arctic vortex in the winter 1995-96: HALOE measurements in conjunction with other observations. *Ann. Geophys.* 17, 101-114.
- (29) C. Brühl, P. J. Crutzen, 2000: NO_x-catalyzed ozone destruction and NO_x activation at midlatitudes to high latitudes as a main cause of the spring to fall ozone decline in the Northern Hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 105, 12163-12168.
- (30) P.K. Patra, S. Lal, V. Sheel, B.H. Subbarya, C. Brühl, R. Borchers, P. Fabian, 2000: Chlorine partitioning in the stratosphere based on in situ measurements. *Tellus* 52B, 934-946.
- (31) C. Brühl, U. Pöschl, P.J. Crutzen, B. Steil, 2000: Acetone and PAN in the upper troposphere: impact on ozone production from aircraft. *Atm. Environ.*, 34, 3931-3938.
- (32) B. Steil, C. Brühl, P.J. Crutzen, E. Manzini, 2000: A MA-GCM with interactive chemistry (MAECHAM4-CHEM), simulations for present, past and future. *Proceedings Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo 2000, NASDA*, 221-222.
- (33) R. Hein, M. Dameris, C. Schnadt, C. Land, V. Grewe, I. Köhler, M. Ponater, R. Sausen, B. Steil, J. Landgraf, C. Brühl, 2001: Results of an interactively coupled atmospheric chemistry-general circulation model: Comparison with observations, *Ann. Geophys.* 19, 435-457.
- (34) C. Brühl, B. Steil, E. Manzini, 2001: Feedback processes between chemistry and meteorology with focus on lower stratospheric polar vortices, simulations with a coupled GCM. In: *Proceedings SPARC Assembly, 2000, Mar del Plata*.

-
- (35) P.J. Crutzen, C. Brühl, 2001: Catalysis by NO_x as the main cause of the spring to fall stratospheric ozone decline in the Northern Hemisphere. *J. Phys.Chem.* 105-A, 1579-1582.
- (36) G. Saueressig, J.N. Crowley, P. Bergamaschi, C. Brühl, C.A.M. Brenninkmeijer, H. Fischer, 2001: ¹³C and D kinetic isotope effects in the reactions of CH₄ with O¹D and OH: New laboratory measurements and their implications for the isotopic composition of stratospheric methane, *J. Geophys. Res.* 106, 23127.
- (37) W. Junkermann, C. Brühl, D. Perner, E. Eckstein, T. Trautmann, B. Früh, R. Dlugi, T. Gori, A. Ruggaber, J. Reuder, M. Zelger, A. Hofzumahaus, A. Kraus, F. Rohrer, D. Brüning, G. Moortgat, A. Horowitz, J. Tadic, 2002: Actinic radiation and photolysis processes in the lower troposphere: effects of clouds and aerosols. *J. Atmosph. Chem.* 42, 413-441.
- (38) J. Austin, D. Shindell, S. R. Beagley, C. Brühl, M. Dameris, E. Manzini, T. Nagashima, P. Newman, S. Pawson, G. Pitari, E. Rozanov, C. Schnadt, T. G. Shepherd, 2002: Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2, 1035-1096.
- (39) E. Eckstein, D. Perner, Ch. Brühl, T. Trautmann A new actinic flux 4p-spectroradiometer: Instrument design and application to clear sky and broken cloud conditions, 2002: *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2, 1939-1977.
- (40) B. Steil, C. Brühl, E. Manzini, P.J. Crutzen, J. Lelieveld, P.J. Rasch, E. Roeckner, K. Krüger, 2003: A new interactive chemistry climate model. I: Present day climatology and interannual variability of the middle atmosphere using the model and 9 years of HALOE/UARS data. *J. Geophys. Res.*, 108, D9, 4290.
- (41) K. Tourpali, C. J. E. Schuurmans, R. van Dorland, B. Steil, C. Brühl, 2003: Stratospheric and tropospheric response to enhanced solar UV-radiation: a model study. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 5, 1231.

-
- (42) R. Kormann, H. Fischer, M. de Reus, M. Lawrence, Ch. Brühl, R. von Kuhlmann, R. Holzinger, J. Williams, J. Lelieveld, C. Warneke, J. de Gouw, J. Heland, H. Ziereis, H. Schlager, 2003: Formaldehyde over the eastern Mediterranean during MINOS: Comparison of airborne in-situ measurements with 3D-model results. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 3, 1303-1331.
- (43) M. K. van Aalst, M. M. P. van den Broek, A. Bregman, C. Brühl, B. Steil, G. C. Toon, S. Garcelon, G. M. Hansford, R. L. Jones, T. D. Gardiner, G. J. Roelofs, J. Lelieveld, P. J. Crutzen, 2003: Trace gas transport in the 1999/2000 Arctic winter: comparison of nudged GCM runs with observations. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 3, 2465-2497.
- (44) G. P. Ayers, R. W. Gillett, J. M. Cainey, A. L. Dick. Chloride and Bromide Loss from Sea-Salt Particles in Southern Ocean Air, 2002: *J. Atmos. Chem.*, 33, 299–319.
- (45) M. Boy, M. Kulmala, 2002: Nucleation events in the continental boundary layer: Influence of physical and meteorological parameters. *Atmos. Chem. Phys.*, 2, 1–16.
- (46) G. P. Brasseur, J. J. Orlando, G. S. Tyndall, editors. *Atmospheric Chemistry and Global Change*. Oxford University Press, New York, Oxford, 1999.
- (47) L. J. Carpenter, W. T. Sturges, S. A. Penkett, P. S. Liss, B. Alicke, K. Hebestreit, U. Platt, 1999: Short-lived alkyl iodides and bromides at Mace Head, Ireland: Links to biogenic sources and halogen oxide production. *J. Geophys. Res.*, 104, 1679–1689.
- (48) O. R. Cooper, J. L. Moody, D. D. Parrish, M. Trainer, T. B. Ryerson, J. S. Holloway, G. Hubler, F. C. Fehsenfeld, S. J. Oltmans, M. J. Evans, 2001: Trace gas signatures of the airstreams within North Atlantic cyclones: Case studies from the North Atlantic Regional Experiment (NARE '97) aircraft intensive. *J. Geophys. Res.*, 106, 5437–5456.
- (49) M. de Reus, F. Dentener, A. Thomas, S. Borrmann, J. Strom, J. Lelieveld, 2000: Airborne observations of dust aerosol over the North Atlantic Ocean during ACE 2:

Indications for heterogeneous ozone destruction. *J. Geophys. Res.*, 105, 15263–15275.

(50) G. B. Ellison, A. F. Tuck, V. Vaida, 1999: Atmospheric processing of organic aerosol. *J. Geophys. Res.*, 104, 11633–11641.

(51) D. J. Erickson, C. Seuzaret, W. C. Keene, S. L. Gong, 1999: A general circulation model based calculation of HCl and ClNO₂ production from sea salt dechlorination: Reactive Chlorine Emissions Inventory. *J. Geophys. Res.*, 104, 8347–8372.

(52) B. J. Finlayson-Pitts, J. N. Pitts, Jr. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press Inc, 1999.

(53) A. M. Fridlind, M. Z. Jacobson, 2000: A study of gas-aerosol equilibrium and aerosol pH in the remote marine boundary layer during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1). *J. Geophys. Res.*, 105, 17325–17340.

(54) S. Ghosal, A. Shbeeb, J. C. Hemminger, 2000: Surface Segregation of Bromine doped NaCl: Implications for the Seasonal Variations in Arctic Ozone. *Geophys. Res. Letters*, 27, 1879–1882.

(55) M. Z. Jacobson, *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press, 1999.

(56) P. Jungwirth, D. J. Tobias, 2000: Surface Effects on Aqueous Ionic Solvation: A Molecular Dynamics Simulation Study of NaCl at the Air/Water Interface from Infinite Dilution to Saturation. *J. Phys. Chem. B*, 104, 7702–7706.

(57) P. Jungwirth, D. J. Tobias, 2001: Molecular Structure of Salt Solutions: A New View of the Interface with Implications for Heterogeneous Atmospheric Chemistry. *J. Phys. Chem. A*, 105, 10468–10472.

(58) E. M. Knipping, M. J. Lakin, K. L. Foster, P. Jungwirth, D. J. Tobias, R. B. Gerber, D. Dabdub, B. J. Finlayson-Pitts, 2000: Experiments and Molecular/Kinetics Simulations of Ion-Enhanced Interfacial Chemistry on Aqueous NaCl Aerosols. *Science*, 288, 301–306.

-
- (59) H. R. Pruppacher, J. D. Klett. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic Pub., Dordrecht/Boston/London, 1997.
- (60) A. R. Ravishankara, 1997: Heterogeneous and Multiphase Chemistry in the Troposphere. *Science*, 276 , 1058–1065.
- (61) J. H. Seinfeld, S. N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Weinheim, 1998.
- (62) Y. J. Yoon, Brimblecombe, 2002: Modelling the contribution of sea salt and dimethyl sulfide derived aerosol to marine CCN. *Atmos. Chem. Phys.*, 2 , 17–30.
- (63) X. Zhu, J. M. Prospero, F. J. Millero, D. L. Savoie, and G. W. Brass, 2002: The solubility of ferric ion in marine mineral aerosol solutions at ambient relative humidities. *Mar. Chem.*, 38 , 91–107.