

El Efecto Invernadero

INDICE

1.- Antecedentes	1
2.- Balance radiativo terrestre.....	2
3.- Gases invernadero.....	3
4.- Tratados internacionales.....	10
5.- Control del CO ₂	16
5.1.- Captura del CO ₂	16
5.2.- Almacenamiento de CO ₂	18
5.3.- Usos industriales del CO ₂	23

1.- Antecedentes

Además del vapor de agua, cuya concentración en la atmósfera es muy variable, ésta está constituida en más del 90% por gases cuya proporción (78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón) se ha mantenido constante desde mucho antes de la aparición del hombre sobre la Tierra. Aparte, existen otros gases, llamados "traza", que a pesar de su escasa concentración, juegan un papel vital en muchos procesos esenciales para la vida.

Uno de esos procesos es el llamado "efecto invernadero" o capacidad de la atmósfera para retener calor. Siempre ha existido el "efecto invernadero" y, gracias a él, es posible la existencia de vida en el planeta tal y como la conocemos.

Sin embargo, nos enfrentamos a la evidencia de que la actividad humana está conduciendo a un aumento en la concentración de muchos gases responsables de dicho efecto. El tema es extremadamente complejo, ya que implica a una gran cantidad de parámetros y sus fluctuaciones, por lo que existen discrepancias acerca de las consecuencias del aumento de dichas concentraciones; no obstante son cada vez más los científicos que consideran que un calentamiento global, a una velocidad sin precedentes en la historia de la tierra, debe considerarse como una "posibilidad real" y de consecuencias desastrosas para el sistema climático terrestre, que engloba a la atmósfera, hidrosfera, litosfera, criosfera y biosfera.

La preocupación por los problemas derivados del efecto invernadero no es reciente. En 1827, Fourier ya publicó un trabajo en el que abordaba el balance de calor en la atmósfera. Más tarde, Svante Arrhenius desarrolló una teoría en la que relacionó el clima con posibles cambios en la proporción de CO₂ presente en la atmósfera. En 1838, Callendar estudió la relación entre la producción artificial de CO₂ y su influencia en la temperatura, estudió la composición de la atmósfera en épocas pretéritas y apuntó la posibilidad de cierto impacto del CO₂ en la temperatura terrestre en el futuro.

Estas hipótesis se vieron parcialmente confirmadas a partir de la década de los 70, cuando se observa un aumento en la temperatura global de la superficie terrestre a lo largo de un período de 100 años, como resultado de las mediciones realizadas en las estaciones creadas al efecto en Hawai y el Polo Sur.

2.- Balance radiativo terrestre

El sistema climático terrestre recibe casi la totalidad de energía del sol. Este se comporta como un cuerpo negro a 6000 K. La radiación emitida por un cuerpo negro verifica la Ley de Stefan-Boltzmann, expresada de la forma:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

en donde, σ es la constante de Stefan-Boltzmann en $W/m^2 \cdot K^4$; A es el área del cuerpo en m^2 y T es la temperatura absoluta en K.

La longitud de onda que corresponde a la máxima intensidad de radiación, es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo. Por su parte, la radiación de un cuerpo negro se extiende a toda la gama de longitudes de onda, aunque la parte más importante se concentra en una banda moderadamente estrecha entre los 300 y 800 nm

La Tierra, con una temperatura media de unos 288 K, radia en onda larga más o menos entre los 5000 y 25000 nm. Esta radiación contribuye de forma importante al calentamiento de la atmósfera.

Entre los 7000 y 13000 nm, la atmósfera es bastante transparente y permite la disipación de energía radiativa al exterior. Esta zona sería totalmente transparente si la atmósfera sólo contuviese oxígeno y nitrógeno pero la presencia de otros gases dificulta la salida al exterior en esta zona conocida como "ventana atmosférica".

En el balance energético medio global para el sistema tierra/atmósfera, de 100 unidades de radiación emitida por el sol y que lleguen al entorno terrestre, 46 son absorbidas por el suelo, 6 reflejadas por el mismo suelo y otras 25 reflejadas por las nubes, mientras que 23 son absorbidas directamente por la atmósfera. Por su parte, de la radiación infrarroja emitida por la tierra, sólo una pequeña parte escapa al espacio, el resto es absorbido por el vapor de agua, nubes, CO_2 y otros gases "traza", y otra parte emitida nuevamente.



Fuente: UNEP- GRID- Arendal

La pérdida neta de energía por radiación infrarroja desde la superficie es, de hecho, más pequeña que la asociada con la evaporación del agua. Como la atmósfera es compresible, se enfría cuando se expande, que es lo que ocurre al disminuir la presión según nos alejamos de la superficie. Esta es la razón por la cual la atmósfera, en la región que radia al espacio es más fría que en la superficie y, por tanto, irradia menos calor del que debería.

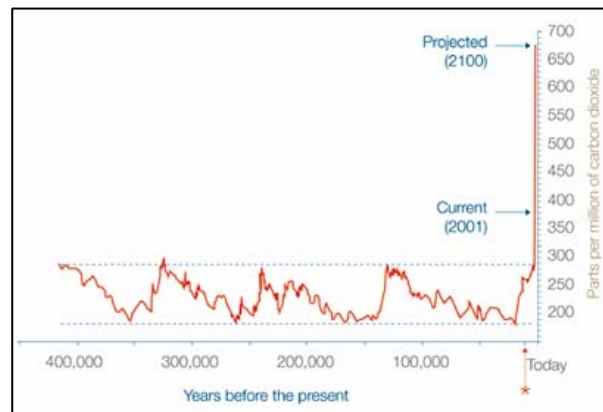
El llamado efecto invernadero es la tendencia de la atmósfera a ser transparente a la radiación solar de onda corta pero opaca a la radiación terrestre de onda larga. Suponiendo la misma reflectividad del sistema, la temperatura de la tierra sin el efecto invernadero sería de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. El aumento de temperatura hasta los $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, que permite la vida en el planeta se debe al efecto invernadero natural.

Este balance de radiación, base del sistema climático terrestre, es sensible a la acción del hombre mediante la variación de la composición del aire, modificación del suelo y otros efectos más complejos.

3.- Gases invernadero

El más importante gas invernadero es el **vapor de agua**, que es responsable de 2/3 partes del efecto invernadero total. Sin embargo, su concentración altamente variable en la atmósfera, la coexistencia de fases líquida y sólida y el paso de una a otra así como la formación de sistemas nubosos, da una complejidad especial a su modelización en los procesos climáticos.

El segundo gas más importante es el CO_2 , que es responsable de un 30% del efecto. Le siguen metano y óxido nitroso (N_2O) que contribuyen conjuntamente en un 3% al efecto invernadero. Los estudios realizados en los últimos años han permitido constatar un aumento de la concentración de dichos gases desde el comienzo de la industrialización, con variaciones causadas por cambios en las fuentes y sumideros.



Aumento de la concentración atmosférica mundial de CO_2 desde comienzos de la Revolución Industrial. Fuente: Co-operative Research Centre for Greenhouse Accounting, 2001

Después del vapor de agua, el CO_2 es, por su elevada concentración, el agente más activo en el efecto invernadero. Este gas es transparente a la radiación de onda corta pero absorbe muy bien entre los 12000 y 20000 nm. Se difunde bien en la atmósfera tanto vertical como horizontalmente, por lo que se reparte con cierta facilidad. No obstante, las mayores proporciones se encuentran junto al suelo, en áreas altamente consumidoras de carbono y sus derivados. Las dos fuentes antropogénicas más importantes son el uso de combustibles fósiles a través de la combustión y la deforestación, aunque otros procesos industriales como la fabricación de cemento y ciertas fermentaciones son fuentes de CO_2 .

La concentración media global de CO_2 en la atmósfera ha aumentado desde los 280 ppmv antes de 1800, a 315 en 1958 y 353 en 1990 con un pequeño gradiente de unas 3 ppmv en la concentración desde el Hemisferio Norte al Sur.

Además del aumento a lo largo del tiempo, se observa una variación de carácter anual: en invierno la concentración de CO_2 crece apreciablemente, mientras que en verano disminuye debido al aumento de la fotosíntesis vegetal y al menor uso de combustibles fósiles para calefacción. No obstante, el saldo anual es claramente favorable al incremento ya que, aunque las fuentes antropogénicas son relativamente pequeñas comparadas con las naturales, son responsables de un 0,5% de incremento anual.

La creciente concentración de CO_2 en la atmósfera indica que existe un desequilibrio entre las fuentes y sumideros, o almacenes, de CO_2 . La vida en la tierra está basada en el carbono que pasa a CO_2 , carbonatos y compuestos orgánicos. El CO_2 de la atmósfera se intercambia rápidamente con los ecosistemas terrestres y con la superficie oceánica. El sumidero o almacén terrestre acumula el CO_2 a través de la formación de suelo y tur-

ba, mientras que en los océanos, se almacena tras un lento intercambio entre aguas superficiales y profundas que dura unos 50-200 años y constituye la vía más importante de sumidero del CO₂. No obstante, es difícil especificar la vida total del CO₂ debido a su transferencia entre almacenes. Hay varios modelos para descubrir el comportamiento del CO₂ en el ciclo global del carbono que le asignan una vida aproximada de 120 años.

Finalmente, en el análisis del ciclo del carbono, es preciso tener en cuenta el "efecto nutriente", es decir que en una atmósfera rica en CO₂, será más fácil la fotosíntesis y, por ello, el crecimiento vegetal y la captura de CO₂. Evaluar este efecto no es, en absoluto, sencillo, pero se estima que una duplicación en el CO₂ podría suponer un aumento de la tasa instantánea entre el 30 y el 100%, dependiendo de las condiciones ambientales y del agua disponible.

El **metano (CH₄)** es el más abundante de los hidrocarburos en la atmósfera. Se genera por la estabilización biológica de la materia orgánica en ambiente anaerobio. La concentración de metano en la atmósfera ha aumentado desde los 0,8 ppmv de la era preindustrial a algo más de 1,70 ppmv en 1998; casi 0,1 ppmv mayor en el Hemisferio Norte que en el Sur. Las fuentes de tipo antropogénico se derivan fundamentalmente de la explotación de combustibles fósiles (minería del carbón, producción de petróleo y gas natural y fugas en los sistemas de distribución de gas natural), responsables de un 20% de las emisiones.

Existen otras fuentes antropogénicas, como las emisiones derivadas de los cultivos de arroz, y también otras de carácter natural, como los pantanos y tierras húmedas. En total representan más del 50% de las emisiones.

Los principales mecanismos de deposición de CH₄ incluyen reacciones químicas lentas y deposición seca. Es un gas poco reactivo y su vida media se estima en unos 12 años.

La contribución de las emisiones de CH₄ al efecto invernadero es complicada debido al papel desempeñado por otros contaminantes como el CO, NO_x, CO₂, ozono troposférico y el vapor de agua procedente de la oxidación fotoquímica del CH₄.

La concentración de **óxido nítrico N₂O** en la atmósfera ha aumentado desde 280-290 ppbv (partes por billón en volumen) en 1860 a unos 310 ppbv en 1988.

El principal sumidero para el N₂O es la fotólisis y reacciones con el oxígeno en la estratosfera, ya que en la baja atmósfera es esencialmente inerte. Una cantidad sustancial de N₂O se acumula en la atmósfera. Por otro lado, las reacciones biogénicas que liberan N₂O del suelo, son reversibles y pueden, por tanto, volver a captar N₂O.

A pesar del amplio rango de las estimaciones, parece claro que la combustión estacionaria de combustible (incluido el carbón), es una de las fuentes más pequeñas.

Otra fuente importante, relacionada con los combustibles fósiles, son las emisiones a partir de fuentes móviles (la instalación de catalizadores que retienen contaminantes como el NO_x, conducen al aumento de las emisiones de N₂O).

El **ozono (O₃)** es un gas muy activo en el efecto invernadero. De todo el contenido en la atmósfera, el 90% se encuentra en la baja estratosfera, en la capa llamada ozonósfera, y el 10% restante en la troposfera.

El ozono estratosférico se produce fundamentalmente por fotodisociación del oxígeno seguida de reacciones catalíticas de los átomos de oxígeno con el oxígeno diatómico. El O₃ troposférico se deriva parcialmente del transporte de O₃ desde la estratosfera y otra parte de reacciones químicas entre CH₄, NO_x, CO e hidrocarburos no metánicos.

Parece que la concentración de O₃ en la estratosfera ha descendido, mientras que ha aumentado dicha concentración en la troposfera.

El O₃ absorbe con gran facilidad la radiación infrarroja y, mediante procesos muy complejos, la ultravioleta. Por otro lado, el tiempo de vida del O₃ en la atmósfera varía ampliamente con la altitud (desde horas en la estratosfera superior a meses en la inferior, o bien horas o días en la troposfera).

Los **HCF's, PFC's y SF₆** tienen una enorme influencia sobre el efecto invernadero y son de origen netamente antropogénico. No se conocen sumideros significativos de estos gases, cuya estabilidad en la troposfera es muy elevada. Las emisiones de estas sustancias se relacionan con su uso comercial o por ser un residuo de ciertos procesos industriales. Algunos campos de aplicación de HCFC's y PFC's incluyen la industria de la refrigeración y aire acondicionado, dispositivos para el control de incendios, aerosoles, disolventes de limpieza, propelentes de espuma, equipos de esterilización, disolventes para la elaboración de revestimientos, adhesivos y tintas. El SF₆ se utiliza en la industria como elementos aislante, como trazador en la detección de vertidos y otras aplicaciones electrónicas.

Limitándonos a las emisiones de origen antropogénico, el carbón es el responsable del 61% de las emisiones de azufre (**SO₂**) (en 1980), y si se incluyen todas las fuentes, el carbón contabiliza entre el 35-57%. En el Hemisferio Norte, el 84% de las emisiones totales de azufre se derivan de actividades humanas, mientras que en el Hemisferio Sur, la combustión de biomasa es la fuente principal de azufre.

Existe gran incertidumbre a cerca de las formas de azufre que se emiten y sus proporciones relativas, ya que el ciclo biogeoquímico del azufre es muy poco conocido frente al que resulta de actividades humanas. Dichas emisiones varían ampliamente en el tiempo y en el espacio, no obstante parece que la mayor parte de emisiones de compuestos volátiles de azufre tienen lugar como SO₂ de volcanes, aunque también se encuentran presentes cantidades apreciables de DMS (dimetil sulfato) de los océanos, COS (carbonil sulfato) y H₂S. La mayoría de compuestos de azufre tienen una vida corta y la atmósfera.

Una vez en la atmósfera, pueden oxidarse fundamentalmente a ácido sulfúrico o a sulfato amónico en forma de aerosol, mediante reacciones que tienen lugar tanto en fase líquida como gas y/o en superficies de sólidos. El grado de conversión está ligado a la intensidad de la radiación ultravioleta solar, presencia de oxidantes y/o precursores de éstos, humedad y presencia de nubes y nieblas, lo que conduce a un amplio espectro de tasas de reacción. Generalmente dichas tasas de conversión son mayores en verano y durante el día.

La fuente natural más importante de emisión de **NOx** son las pérdidas del sistema terrestre a la atmósfera. Las fuentes antropogénicas surgen principalmente de la combustión de combustibles fósiles, fundamentalmente en motores de combustión interna, que se estiman en unas 2,5 veces mayores que las emisiones naturales, debido a la combinación del nitrógeno con el oxígeno del aire a las temperaturas a las que tiene lugar la combustión. El NO formado reacciona con el oxígeno del aire, de forma incompleta, produciendo NO₂, dando lugar a la mezcla conocida.

El primer efecto contaminante que producen los óxidos de nitrógeno es la llamada "niebla fotoquímica", debido a la mezcla de gases que se forma en los niveles bajos de la atmósfera cuando los rayos del sol actúan sobre estos compuestos de nitrógeno y otros hidrocarburos no metánicos. Los NOx son precursores en varias reacciones químicas de oxidación, alterando la composición de la atmósfera, siendo al ozono el principal producto de dichas reacciones fotoquímicas.

Los sumideros del NOx atmosférico son la deposición seca y húmeda en la superficie. Aproximadamente el 90% se deposita como HNO₃, después de la reacción del NO₂ con radicales hidroxilo, mientras que el 10% restante se deposita como NOx.

Aunque existen discrepancias entre expertos de distinta índole acerca de que exista un calentamiento de la atmósfera a consecuencia del realce del efecto invernadero, una cuestión si parece clara: en qué momento, la cantidad presente de gases invernadero en la atmósfera modificará el clima, de manera que las consecuencias tengan una repercusión significativa.

GEI	Fórmula química	Concentración pre-industrial (ppbv)	Concentración en 1998 (ppbv)	Régimen de crecimiento en los 90 ppbv/año	Tiempo de permanencia en la atmósfera (años)	GWP
Dióxido de carbono	CO ₂	278000	36000	1500 ppbv/año	5-200	1
Metano	CH ₄	700	1745	7,0 ppbv/año	12	21
Óxido nítrico	N ₂ O	270	316	0,8 ppbv/año	114	310
CFC-11	CClF ₃	0	0,268	-1,4 pptv/año	45	6200-7100
HFC-23	CFCl ₃	0	0,014	0,55pptv/año	260	1300-1400
Perfluorometano	CF ₄	0,040	0,080	1pptv/año	50000	6500
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	0	0,0042	0,24pptv/año	3200	23900

Nota:

GEI: Gases de efecto invernadero

GWP: Global warming potential (Potencial de calentamiento global)

ppbv: partes por billón en volumen; pptv: partes por trillón en volumen

GWP

El potencial de calentamiento global (GWP) es un índice que establece el efecto de calentamiento global relativo de una molécula determinada, con respecto al CO₂ (que se utiliza como referencia) en un periodo de tiempo determinado (IPCC, 2001). Para un periodo de 100 años, el GWP se define mediante la siguiente ecuación:

$$GWP = \frac{\int_0^{100} a_i c_i(t) dt}{\int_0^{100} a_{co2} c_{co2}(t) dt}$$

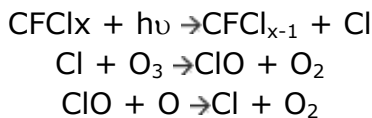
En donde a_i es la intensidad radiativa del gas i , c_i es la concentración del gas i en el tiempo t , a_{co2} es la intensidad radiativa del CO₂ y c_{co2} es la concentración de CO₂ en el tiempo t .

ODP

Como se ha comentado en párrafos anteriores, la energía radiante que recibe la tierra, principalmente del sol, tiene longitudes de onda comprendidas aproximadamente entre 200 y 4.000 nm; las más cortas, designadas de modo general como *ultravioletas* son perjudiciales para la mayoría de los organismos vivientes en nuestro planeta. La radiación atraviesa la capa de ozono de mayor densidad, situada entre los 25 y los 30 km de altitud, en la que se concentra el 90% del ozono atmosférico; el ozono absorbe casi completamente las radiaciones de 200/250 nm (UVC) y reduce considerablemente el paso de las de 280/320 nm (UVB), actuando como un escudo protector.

El potencial de destrucción de la capa de ozono (*ozone depletion potential*, ODP), mide la incidencia de ciertos compuestos en la disminución de la concentración de esta molécula. Las sustancias de mayor incidencia son algunos freones -que incluyen clorofluorocarbonos (CFCs) e hidroc fluorocarbonos (HCFCs)-, ciertos halones - bromoclorofluorocarbonos, bromofluorocarbonos e hidrobromofluorocarbonos-, el metilcloroformo y los halometanos, derivados del metano, y el tricloroetano, derivado del etano.

Estas sustancias son químicamente muy estables; como consecuencia de dicha estabilidad, la permanencia de estas moléculas en la atmósfera es elevada y la principal problemática ocurre cuando los CFCs acceden a la estratosfera. En principio, el intercambio gaseoso entre troposfera y estratosfera es reducido, pero esa permanencia permite que, finalmente, los CFCs terminen accediendo a esa última capa, donde ocurren reacciones fotoquímicas, promovidas por luz ultravioleta incidente, lo que favorece la descomposición de esas moléculas, lo que se denomina fotólisis. En esta reacción se liberándose átomos de halógenos, principalmente cloro, pero también flúor y bromo, ocurriendo posteriormente las siguientes reacciones, en las que se indica un clorofluorocarbono genérico con "x" átomos de cloro:



Estas reacciones son catalíticas, es decir, que la presencia de cloro favorece la formación de oxígeno molecular a partir de ozono, recuperándose finalmente el átomo de cloro, por lo que el proceso puede continuar posteriormente.

El efecto directo que ocasiona la reducción de la concentración estratosférica de ozono es un incremento de la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre, lo cual podrá originar afecciones sobre la salud humana (aumento de determinadas afecciones oculares, como cataratas y de la incidencia de cáncer de piel y debilitamiento del sistema inmunológico) y sobre los ecosistemas, tanto terrestres como marinos, fundamentalmente un descenso en la productividad primaria y una mayor incidencia de necrosis en vegetales, con las consiguiente afecciones secundarias sobre las diferentes redes tróficas y sobre determinados sectores económicos que, en concreto, se traducirían en una menor producción pesquera y agrícola.

TEWI

Lo normal es que los refrigerantes que han venido a sustituir a los orgánicos anteriores tengan una eficiencia algo inferior, lo que se traduce en un mayor consumo eléctrico para obtener la misma potencia frigorífica. En la medida en que la corriente se obtenga por transformación de energía obtenida por combustión en centrales térmicas convencionales, el mayor consumo energético supone también una mayor producción de CO₂, lo que significa un efecto invernadero adicional por este concepto. Para tenerlo en cuenta se ha creado otro índice, el Total Equivalent Warming Impact, cuyo uso no está tan generalizado por las discrepancias en las proporciones de los diversos orígenes de la energía eléctrica.

$$TEWI = GWP \cdot M + \alpha \cdot B$$

siendo:

M = masa de refrigerante liberado (kg);

α = CO₂ liberado en la producción eléctrica (kg/kWh)

B = consumo energético del sistema (kWh).

4.- Tratados internacionales

La difusión de los datos relativos a las proporciones en la atmósfera de los gases con efecto invernadero y el ritmo de su crecimiento, y en particular los datos de Mauna Loa, crearon en la comunidad científica internacional una gran inquietud, que con el tiempo se extendió también a la comunidad política internacional.

A fin de poder cuantificar el posible calentamiento en la atmósfera terrestre, y evaluar sus consecuencias climáticas, se convocó una conferencia científica bajo los auspicios de la Organización Meteorológica Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Consejo Mundial de Uniones Científicas. El objetivo propuesto era el de evaluar el incremento de la temperatura media de la superficie terrestre cuando se duplicara el efecto equivalente de los gases con efecto invernadero, con relación a la proporción existente en el comienzo de la era industrial. En realidad no se planteó la duplicación del dióxido de carbono, es decir, el alcanzar las 600 partes por millón, sino evaluar los efectos climáticos al llegar a una proporción de todos los gases con efecto invernadero de un potencial de calentamiento equivalente al doble de la proporción existente al comienzo de la era industrial.

La **Conferencia** se celebró en **1985** en **Villach**. En ella se concluyó que, de continuar la tendencia prevaleciente, el efecto combinado de todos los gases con efecto invernadero podría ser equivalente al doble del existente en la época preindustrial hacia el año 2030, con un calentamiento de la superficie terrestre entre 1,5 y 4,5 grados. El efecto térmico podría ser retrasado una o dos décadas debido a la gran capacidad de almacenamiento de calor de las capas superficiales del océano. Se estimó que el calentamiento llevaría a una elevación del nivel del mar entre 20 y 140 cm, y por otra parte el incremento térmico sería mucho más sensible en las zonas polares que en las ecuatoriales.

Las evaluaciones de Villach causaron gran impacto en el mundo científico y pronto trascendió al político. Poco después las Naciones Unidas adoptaban resoluciones que expresaban la preocupación por el problema, y en 1988 se creó el Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC).

En **1988** se celebró la **Conferencia de Toronto**, convocada bajo el lema "La atmósfera en evolución: implicaciones para la seguridad del globo", y que si bien no fue una convención suscrita por gobiernos, si fue en cambio un foro de científicos, economistas, políticos y planificadores que lograron un pleno consenso en sus trabajos. Convocada por el Gobierno de Canadá, con el apoyo de la OMM y el UNEP, constituyó un éxito y en su declaración final diagnosticó los tres principales problemas atmosféricos que afectan o pudieran afectar a la seguridad del mundo, a la economía mundial y al medio ambiente natural. Estos tres problemas y por orden de importancia, son los siguientes:

- a) Calentamiento global, riesgo de elevación del nivel de los mares y alteración de la configuración de las precipitaciones por efecto invernadero
- b) Debilitamiento de la ozonosfera
- c) Transporte atmosférico a larga distancia de sustancias tóxicas y acidificantes.

La conferencia se declaró partidaria de un cuadro de medidas tales como un "Plan de acción para la protección de la atmósfera", que incluiría una Convención mundial; asimismo, el establecimiento de un Fondo mundial para tal protección, eliminación de los CFC antes del año 2000 y un plan mundial para reducir las emisiones de CO₂ para el año 2005 en un 20% del valor de 1985. Es interesante señalar que en esta Conferencia por primera vez se plantea seriamente el problema de una tasa sobre las emisiones de CO₂.

Es importante el hecho de que la Conferencia de Toronto haya marcado la pauta en muchas actuaciones internacionales en materia medioambiental, y de hecho, en la Conferencia de Rio de 1992 los acuerdos fueron en la línea de Toronto.

En 1988 fué creado el **Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC)**, dependientes de la OMM y el PNUMA. Dentro del Panel fueron creados tres grupos, con los siguientes cometidos:

- Evaluación científica del cambio climático
- Impacto económico y social del cambio climático
- Estrategias frente al cambio climático

Este organismo desarrolló intensos trabajos a lo largo de dos años y presentó sus conclusiones en la **II Conferencia Mundial del Clima**, en **1990** relativos a los impactos y las respuestas de la ciencia y la política al cambio climático. Sirve como base para la negociación del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

A partir de ahí, el desarrollo cronológico de los acontecimientos más relevantes es como sigue:

- **1992. 9 de mayo.** Se adopta el Convenio Marco de la ONU sobre el cambio climático en la sede de la ONU en Nueva York.
- **1992. 4 de junio.** Se abre el Convenio para su firma en la cumbre de La Tierra, *Earth Summit* (conferencia de la ONU sobre desarrollo y medio ambiente), celebrada en Río de Janeiro. Los líderes políticos mundiales acuerdan fijar el objetivo de volver a los niveles de emisión de CO₂ de 1990 para 2000.
- **1994. 21 de marzo.** El Convenio entra en vigor. Su "objetivo final" (artículo 2) es evitar que una "interferencia" peligrosa con el sistema climático ame- nace la natura- leza, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico.
- **1995.** Los gobiernos se reúnen para la primera conferencia del convenio de partici- pantes *Convention's First Conference of Parties (COP1)*, en Berlín. El Convenio les obliga a considerar si el acuerdo alcanzado por los líderes mundiales en Río es el ade- cuado para evitar el peligroso cambio climático. Concluyen con la necesidad de em- prender más acciones. En vez de acordar objetivos más duros, crean un nuevo man- dato para dos años con más debates sobre lo que va a ser el Protocolo de Kioto.
- **1997. 11 de diciembre.** Los gobiernos en la COP3, en **Kioto** (Japón), adoptan el texto del Protocolo. Éste establece seis gases como causantes del efecto invernadero, y tiene como objetivo final la reducción de emisiones en un 5,2 % respecto al año ba- se, 1990. Estados Unidos se compromete a bajar un 7 %, Japón un 6 % y la Unión Europea un 8 %. Otros países, como Rusia, se comprometen a un crecimiento del 0%, mientras que Australia tiene un margen de crecimiento de emisiones de hasta el 8%.
- **1998. 16 de marzo.** Se abre el texto del protocolo de Kioto para su firma en la sede de la ONU en Nueva York.
- **1998. 29 de abril.** Los países de la Unión Europea, incluida España, firman de forma conjunta el Protocolo de Kioto.
- **1998. 14 de noviembre.** Concluye la IV Conferencia de la ONU sobre Cambio Climá- tico en Buenos Aires (Argentina). No se producen avances significativos en cuantos a los mecanismos para aplicar el Protocolo, aunque se consigue la firma del mismo por parte de Estados Unidos. No obstante, mantiene ciertas reservas en cuanto a su eje- cución práctica.
- **1999. 26 de mayo.** El embajador representante de Estados Unidos ante la Comisión del Cambio Climático de la ONU afirma que su país ratificará el protocolo siempre y cuando no suponga efectos negativos para la economía del país, y cuente con el apo- yo de una cantidad significativa de países industrializados.
- **1999. 5 de noviembre.** V Conferencia de las partes de la Convención Marco de Na- ciones Unidas sobre Cambio Climático celebrada en Bonn (Alemania). Aumentan las discrepancias entre países ricos y pobres.
- **2000. 22 de junio.** Durante la reunión de los quince ministros de Medio Ambiente de la UE en Luxemburgo surgen los primeros problemas graves para la aplicación del protocolo. Se ponen en tela de juicio algunos de los mecanismos recogidos en el do- cumento inicial, como los denominados "sumideros de carbono".
- **2000. 25 de noviembre.** Culmina la primera gran crisis, con el fracaso de la VI Con- ferencia de las Partes del Convenio Marco de la ONU sobre el Cambio Climático que se celebra en La Haya (Holanda). Los diferentes países reunidos no consiguen ponerse

de acuerdo en la forma de aplicación del Protocolo. Se hacen cada vez más patentes las diferencias entre Estados Unidos y la Unión Europea.

- **2001. 3 de marzo.** Los ministros de Medio Ambiente del G-7 y Rusia reunidos en Trieste (Italia) se comprometen a desbloquear las negociaciones para que el Protocolo de Kioto entre en vigor en el año 2002, en el décimo aniversario de la celebración de la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro.
- **2001. 13 de marzo.** George W. Bush presenta el Protocolo de Kioto ante el Senado estadounidense. Poco después, la administración Bush declara "muerto" al Protocolo. Anuncia su negativa a ratificarlo por considerarlo perjudicial para los intereses de su país.
- **2001. 5 de abril.** El Parlamento Europeo condena, mediante resolución consensuada, la negativa de Bush a la ratificación del Protocolo. Se hacen así oficiales las enormes diferencias existentes entre ambas partes.
- **2001. 9 de abril.** Conversaciones entre Japón y la Unión Europea para evitar la congelación definitiva del acuerdo.
- **2001. 14 de junio.** La Cumbre UE-EE.UU. finaliza con el acuerdo de los líderes de la UE para seguir adelante con Kioto, con la ausencia de los EE.UU., que acuerdan no impedirlo, eliminando así los temores de fracaso para el Protocolo de Kioto.
- **2001. 23 de julio.** Se retoma la conferencia estancada en noviembre de 2000; 180 países firman el **Acuerdo de Bonn**, abriendo una puerta para completar los detalles legales del Protocolo de Kioto. El Acuerdo de Bonn sobre el Protocolo de Kioto fue un hito político en las lentas negociaciones internacionales. Los ministros de unos 180 países llegaron a un acuerdo global que incluía normas y procedimientos sobre diversos asuntos de los países en desarrollo (fondos, traspaso de tecnología, capacitación, adaptación a los impactos del cambio climático), los mecanismos de Kioto (Comercio de Emisiones, Aplicación Conjunta y Mecanismo de Desarrollo Limpio), sumideros y cumplimiento. En su conjunto, el acuerdo creó la arquitectura fundamental básica para que los países ratificasen y pusiesen en práctica el Protocolo, y para que negociasen futuros recortes de emisiones más estrictos.

Se habilitó un paquete de fondos que incluía compromisos por parte de la UE, Nueva Zelanda, Noruega y Suiza para conceder a los países en desarrollo 410 millones de dólares americanos por año para 2005, con una revisión de los mismos en 2008.

Entre los puntos principales del Acuerdo de Bonn se incluyen:

- dar un tratamiento preferente a las energías renovables limpias bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio;
- pedir a los países industrializados que frenen el fomento de la energía nuclear en los países en desarrollo. De hecho, los gobiernos han dicho no a la energía nuclear como modo de frenar la contaminación por carbono;
- normas factibles para el Comercio de Emisiones.
- un régimen de cumplimiento que incluya consecuencias no opcionales, de obligado cumplimiento para aquellos países que no alcancen sus compromisos.

- **2001. 10 de noviembre.** Los gobiernos finalizan los detalles legales y de funcionamiento del Protocolo en Marrakech, abriendo una puerta hacia la ratificación. La conferencia de Marrakech se centró en resolver algunos asuntos que quedaron pendientes en Bonn y finalizar la transposición del Acuerdo de Bonn a un texto legal con arreglo a la ONU. Esto se realizó de forma satisfactoria y se acordó por consenso. En principio, el acuerdo de Marrakech debería haber eliminado cualquier barrera final para la ratificación del Protocolo de Kioto, lo que es especialmente cierto para Japón, Rusia y Canadá, que consiguieron, en un primer momento, imponer sus exigencias como condiciones indispensables para su ratificación. Ahora que las normas son completas, todos los países tienen una idea clara de lo que se espera bajo el Protocolo en todos los niveles.
- **2002. 4 de marzo.** La Unión Europea ratifica unánimemente el Protocolo de Kioto. Desde este momento, los parlamentos nacionales deberán ratificar el acuerdo en cada uno de los Estados miembros.
- **2002. 11 de abril.** El Parlamento español aprueba por unanimidad la ratificación del Protocolo de Kioto, convirtiéndose en el séptimo país de la UE que da este paso. Por otra parte, Rusia manifiesta su apoyo a la ratificación.
- **2002. 15 de abril.** Durante la reunión de ministros de Medio Ambiente del G-8, Japón y Rusia se adhieren a los postulados de la Unión Europea, partidaria de tomar medidas realistas contra el cambio climático. Es la primera vez que países dentro del "grupo paraguas" (los anteriormente citados, más Australia) se desmarcan de los postulados estadounidenses.
- **2002. 29 de abril.** Sesión constitutiva del Consejo Nacional del Clima en España, órgano consultivo adscrito al Ministerio de Medio Ambiente creado para elaborar la Estrategia Española para el Cumplimiento del Protocolo de Kioto. En la constitución de este órgano participaron representantes de las Administraciones públicas, expertos en medio ambiente, universidades, sindicatos y consumidores.
- **2002. 31 de mayo.** La Unión Europea ratifica el Protocolo de Kioto, tras su aprobación previa en los parlamentos nacionales. Se trata de un gran avance para conseguir su puesta en marcha, ya que hace posible que se cumpla la primera condición: que sean más de 55 países los que ratifiquen el tratado. Tras el paso dado por la UE, el objetivo del 55 % de emisiones parece más cercano. La Unión es la segunda productora de CO₂ del mundo, con lo que los firmantes ya acumulan el 26,6 % del total, agrupando a 69 países.
- **2002. 4 de junio.** El cuarto emisor de CO₂ del planeta, Japón, se adhiere definitivamente al Protocolo. Con esta nueva incorporación, el porcentaje necesario para iniciar la aplicación ya es del 35,8 %. Si Canadá y Rusia formalizan sus promesas, el 55 % estará muy cercano. Hay que tener en cuenta que Rusia produjo en 1990 el 17,4 % del total de gases de efecto invernadero, mientras que Canadá fue responsable del 3,3 %.
- **2002. 5 de junio.** El primer ministro australiano, John Howard, niega que su país vaya a ratificar el Protocolo, a menos que no lo haga Estados Unidos y el resto de países industrializados. El gobierno australiano, además, considera que el acuerdo no será útil hasta que Estados Unidos no lo acepte. De nuevo inciden en el hecho de que China e India, dos países responsables de buena parte de las emisiones, tampoco estén

comprendidos en el grupo de Kioto. Tras las firmas de Japón y la UE el gobierno de Australia se siente presionado, a pesar de que el acuerdo les ofrece cierto margen de crecimiento en las emisiones.

- **2002. 29 de junio.** El gobierno húngaro anuncia su intención de adherirse a Kioto. Durante el verano, la propuesta será sometida a votación en el Parlamento nacional.
- **2002. 5 de julio.** El gobierno español presenta el Plan Forestal, que pretende repoblar 3,8 millones de hectáreas en 30 años. Será financiado, en parte, con fondos comunitarios, y permitirá aumentar la capacidad de los sumideros españoles en 60 millones de toneladas de CO₂.
- **Julio de 2002.** La Asamblea del Estado de California aprueba el proyecto de ley sobre el clima, el primero de estas características que ve la luz en Estados Unidos. De acuerdo al texto, los fabricantes deberán vender sólo automóviles que emitan la menor cantidad posible de CO₂. Aunque la medida no tendrá efecto hasta 2005, y se espera que los primeros coches así preparados no estén disponibles hasta 2009, la nueva ley ya ha provocado las críticas y oposición de la industria automovilística, que deberá hacer frente a una gran cantidad de gastos para reconvertir sus modos de producción.
- **2002. 10 de julio.** Estados Unidos y Australia anuncian un programa conjunto de trabajo para reducir las emisiones de gases contaminantes.
- **2002. 26 de agosto-4 de septiembre.** Cumbre mundial sobre desarrollo sostenible (*World Summit on Sustainable Development*), Johannesburgo, Sudáfrica. Entre los diversos temas de la agenda política figuraba el Cambio Climático, que apenas fue tratado durante las diferentes sesiones. En el Plan de Acción propuesto al finalizar la cumbre no se consiguió el objetivo deseado por Europa, que era fijar un compromiso para que en el año 2010 el 15 % de la energía primaria en todo el mundo fuera renovable. No obstante, y ya en el último día de sesiones, se lanzó una iniciativa para establecer plazos y mecanismos financieros para la implantación de energías renovables, propuesta para todos aquellos países que desearan adherirse de forma voluntaria. Además de los países de la Unión y los candidatos a la entrada, otros 20 estados se adhirieron verbalmente en sus discursos: México, Argentina, Brasil, Turquía, Sudáfrica y Uganda Samoa y otros pequeños países insulares.
- **2004. 18 noviembre.** Rusia ratifica el Protocolo tras un intenso trabajo de "lobby" por parte de la Unión Europea.
- **2005. 16 febrero.** El Protocolo de Kioto entra en vigor. El Protocolo necesita que los gobiernos demuestren que están haciendo "progresos demostrables" hacia la consecución de los objetivos de Kioto.
- **2008-2012.** "Primer período de compromiso" del Protocolo de Kioto, en el que treinta países desarrollados están obligados a reducir entre estos años en un 5,2% sus emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero con respecto a 1990. Además 106 naciones en vías de desarrollo estarán obligadas a informar sobre sus niveles de contaminación y deberán dar cuenta de sus intentos por disminuirlos.

5.- Control del CO₂

La limitación del CO₂ requiere su separación o captura de la corriente de gases, seguido de su almacenamiento o reutilización. La facilidad de la captura del CO₂ está influenciada por la concentración y presión del CO₂ en la corriente de gases, así como la presencia de otros compuestos. La captura y almacenamiento de CO₂ incurre en grandes penalizaciones, tanto de tipo energético como económico.

5.1.- Captura del CO₂

La idea de la captura de CO₂ en la corriente de gases de una central térmica, surgió de la necesidad del CO₂ en la recuperación de petróleo (Enhanced Oil Recovery: EOR). Los procesos de captura deberían concentrar el CO₂ al 90% de volumen para que sea efectivo en la utilización o almacenamiento posterior. Existe un conjunto de procesos que pueden agruparse de la siguiente forma:

- absorción;
- adsorción;
- criogenia;
- separación por membrana.

La elección dependerá de la concentración de CO₂ en la corriente de humos. Lo más probable es que se necesite un método de recuperación, combinando con otras medidas de limpieza de humos.

La **absorción** mediante disolventes líquidos en torres de absorción es el modo convencional de separación del CO₂ de una corriente de gases. Los disolventes pueden ser de naturaleza química, física o híbrida.

En la *absorción química*, el CO₂ reacciona con el disolvente para formar un compuesto intermedio que se rompe mediante la aplicación de calor para regenerar el disolvente original y producir una corriente de CO₂. La absorción química proporciona unos índices de absorción y capacidad mayores que la absorción física.

Es por ello, que los disolventes químicos son adecuados para extraer CO₂ a muy bajas concentraciones. Los disolventes más empleados son la monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), metildietanolamina (MDEA) y el carbato de potasio caliente. El primero se considera la mejor amina, dando recuperaciones de CO₂ del 98-99%.

La corriente de gases que entra en el absorbedor se comprime y enfría. El proceso de absorción tiene lugar a 37°C en contracorriente con disolvente pobre. El gas purificado se expulsa a la atmósfera desde la cabeza de la columna de absorción. El disolvente rico se envía al regenerador a través de un intercambiador de calor entre disolvente rico y pobre. En el regenerador, el CO₂ se separa del disolvente recalentado con vapor de baja presión del circuito de vapor de la central.

La *absorción física* está basada en la solubilidad y gradientes de presión parcial. De este modo, los disolventes físicos absorben el CO_2 y se regeneran mediante calor y/o reducción de presión. Esto significa que no son muy efectivos a bajas presiones. Los principales disolventes son el metanol y otros (N-metil-2-pirrolidina, polietileno glicol dimetiléter y carbonato de propileno).

Por su parte, los disolventes *híbridos* combinan las mejores características de los disolventes utilizados en la absorción química y física además de un conjunto de disolventes complementarios.

El proceso de **adsorción** consiste en la transferencia selectiva de uno o más componentes en una mezcla de gases sobre un sustrato de partículas sólidas. El contacto entre gas y sólido se consigue en lechos fijos o fluidos. El soluto de gas se acumula en la interfase de las partículas sólidas, facilitando de este modo su separación selectiva del grueso de la corriente de gas. Para maximizar el volumen de gas extraído en el lecho, se utilizan partículas altamente porosas. Posteriormente, se extrae el gas adsorbido mediante aplicación de calor o reducción de presión.

La energía liberada durante la adsorción y, a su vez, requerida para la desorción depende de la naturaleza de la interacción sólido/gas. No obstante, los programas de investigación en curso (en Japón y EE.UU.) no le auguran un futuro prometedor, ya que el balance energético de este proceso, esto es, la energía requerida para separar y extraer el CO_2 es igual o mayor que la energía obtenida en la combustión del carbón.

Los **sistemas criogénicos** utilizan un método físico de baja temperatura. El gas entrante se seca y comprime; posteriormente se refrigera en una columna de condensación para recuperar el CO_2 en fase líquida. Está recomendado cuando la concentración de CO_2 en la corriente de gases supera el 20%. Tiene la posibilidad de ser utilizado para la recuperación combinada de CO_2 y otros gases ácidos.

Las **membranas** pueden usarse para separar la corriente de gases en flujos ricos y pobres en CO_2 . El uso de membranas para la recuperación de CO_2 puede dividirse en membranas de separación de gas y membranas de absorción de gas. La tecnología membrana ha sido utilizada en separación líquido-líquido y líquido-sólido durante algún tiempo, aunque la aplicación comercial de las membranas para la separación gas-gas es bastante reciente.

Las principales limitaciones de las membranas convencionales son su incapacidad para conseguir una separación fina y su baja selectividad respecto al CO_2 . Para superar esos problemas, se ha trabajado en membranas líquidas. La transferencia, en este caso, depende de la capacidad para mantener la presión parcial del CO_2 a través de la membrana. En el momento actual, la tecnología de membrana no puede competir con otras tecnologías de recuperación de CO_2 como la absorción química.

Una alternativa de aplicación para las membranas consiste en la concentración previa del CO_2 en la corriente de gas mediante una reacción de conversión y después uti-

lizan la membrana para separar el hidrógeno, aprovechándose del menor tamaño molecular del hidrógeno. Si este proceso se combina con una IGCC, las presiones de funcionamiento más altas pueden usarse ventajosamente, ya que el CO₂ permanece en el lado de la membrana a presión más alta. De este modo, se necesita menos energía para comprimir el CO₂ previo a su deposición.

5.2.- Almacenamiento de CO₂

Después de que el CO₂ ha sido recuperado, debe ser almacenado, ya que la utilización tiene un campo limitado. Las vías de almacenamiento a las que se presta la mayor atención, se pueden dividir en las siguientes categorías: Subterránea, Oceánica y Biomasa (masa forestal y biocombustibles). De ellos, la oceánica es la que presenta un mayor potencial.

La investigación más reciente relativa al **almacenamiento subterráneo** del CO₂, se ha centrado en acuíferos y campos de petróleo y gas agotados.

Los acuíferos se consideran zonas factibles para el CO₂ ya que se conocen grandes acumulaciones naturales de CO₂ en el subsuelo. En principio, el CO₂ puede ser almacenado en cualquier estructura subterránea impermeable para el gas, que no esté completamente llena o que esté ocupada por una sustancia que pueda ser extraída, como el agua. El CO₂ es un candidato ideal para el almacenamiento en acuíferos debido a su elevada densidad y solubilidad en agua, a las presiones relativamente altas que se pueden encontrar en los acuíferos.

Los acuíferos contienen espacios intergranulares dentro de la propia roca, lo que le confiere una permeabilidad característica. Para aplicaciones en ingeniería, las siguientes características son importantes:

- la parte superior del acuífero debe estar localizada a una profundidad de 800 m al menos;
- en función de la profundidad, un acuífero debería poseer una permeabilidad de al menos 0,050 - 0,100 m²;
- una capa impermeable debería cubrir al acuífero;
- el acuífero debería ser parte de una estructura "trampa" geológica.

Cuando una gran cantidad de CO₂ se inyecta en un almacén subterráneo, parte se disuelve en el agua. La porción insoluble forma una fase gaseosa inmisible con la fase líquida del fluido subterráneo. El CO₂ en fase gas, se acumula en la capa superior de agua subterránea. Este movimiento ascendente es animado por la presión del fluido.

Una trampa que esté cubierta con roca pelítica o similar es probable que pueda almacenar CO₂ en fase gas. Esto se debe a que la fase gaseosa del fluido en la trampa no puede pasar a través de la capa rocosa a menos que la presión del gas sea mayor que la de desplazamiento para la roca.

El CO_2 que se disuelve en agua provocará acidificación que puede ser un problema en el frente de inyección. Sin embargo, las zonas de agua atrapada pueden también disolver el CO_2 y producir un ambiente ácido más allá del frente de inyección.

Existen una serie de reacciones entre el CO_2 , agua Y sólidos presentes (disolución de calcita, adsorción del calcio disuelto en arcillas, formación de bicarbonatos, ...). La bondad de un acuífero como almacenamiento de CO_2 depende enteramente de su tamaño, dentro de una serie de condiciones límite.

Es bastante difícil predecir el volumen total de CO_2 almacenado en un acuífero, en parte debido a las distintas características geológicas y, en parte, debido al comportamiento del CO_2 en el almacenamiento. En general, se prefieren los acuíferos profundos en términos de propiedades del CO_2 y de presión de almacenamiento.

La capacidad total de almacenamiento en campos de gas agotados puede estimarse bajo la hipótesis de que todos los campos de gas natural se encuentran a profundidades de 3000 m. A esta profundidad, la densidad del CO_2 es de 712 kg/m^3 . Para la estimación, se consideran los campos ya agotados, junto al volumen de reservas probadas que es posible que se agoten. Los estudios realizados en este sentido, concluyen que la capacidad de almacenamiento total es suficiente para almacenar las emisiones de CO_2 a nivel mundial durante varias décadas, pero el potencial difiere entre regiones del mundo.

Por su parte, los campos petrolíferos agotados tienen ventajas sobre otros almacenamientos en estructuras sedimentarias, por ejemplo una geología bien conocida y el beneficio adicional de los procesos de recuperación avanzada de petróleo (Enhanced Oil Recovery, EOR).

El CO_2 se separa de la corriente de gases, se enfría, comprime y seca antes de la inyección en pozos petrolíferos. Los estudios acerca del potencial de almacenamiento han concluido que un pozo de inyección podría almacenar un volumen de CO_2 superior en 150 veces al volumen de poros del almacén.

No obstante existen limitaciones. Por un lado los almacenes próximos a la superficie no tienen suficiente presión para el almacenamiento de CO_2 en fase densa y, por otro, el almacenamiento deja de ser económico más allá de una cierta profundidad.

Un hecho a tener en cuenta sería la recuperación de antiguos campos de cara a un almacenamiento permanente del CO_2 ; aunque habría que localizar los pozos de perforación, reconstruir algunos y obturar definitivamente otros, con el fin de asegurar la integridad física del almacenamiento.

La recuperación de petróleo era un modo de utilización del CO_2 antes de que la captura y deposición se convirtiese en un tema de consideración. Hay dos tipos de métodos de recuperación de petróleo que utilizan el CO_2 como fuerza impulsora. En ellos, el CO_2 se mezcla con el petróleo en condiciones de presión y temperatura adecuadas. El CO_2 hace que el petróleo hinche, reduce su viscosidad y lo hace más móvil.

Actualmente se producen unos 170000 barriles diarios de crudo por este método. En la mayoría de los casos el CO_2 viene de fuentes subterráneas y se lleva al campo petrolífero. Sin embargo, el potencial del EOR se incrementaría si se dispusiese de grandes cantidades de CO_2 provenientes de CC.TT.

El **océano** es un sumidero de CO_2 , en donde se deposita a una tasa de 1,4-2,8 PgC/año. Este proceso es muy lento, de forma que se puede producir un pico de concentración de CO_2 en la atmósfera. Este pico puede evitarse depositando directamente el CO_2 en el océano.

Los intercambios de CO_2 entre la atmósfera y el océano son bastante complejos. En la absorción del CO_2 por el océano, hay tres procesos especialmente importantes:

- intercambios entre la atmósfera y las capas superficiales;
- intercambios verticales entre aguas superficiales y capas profundas;
- difusión horizontal.

En el intercambio entre la atmósfera y las capas superficiales oceánicas, los incrementos en la presión parcial del CO_2 atmosférico controlan el carbono absorbido. El CO_2 es un ácido débil que se disocia en el agua del mar para formar, fundamentalmente, el ión bicarbonato (HCO_3^-), con pequeñas cantidades de ión carbonato (CO_3^{2-}) y CO_2 acuoso. La presencia de estos tres compuestos contabiliza la mayor parte de la capacidad de amortiguación del agua del mar.

La abundancia del ión carbonato y del carbonato de calcio determina cuánto CO_2 puede añadirse al agua del mar sin alterar de forma significativa el equilibrio químico del océano profundo (la concentración del ión carbonato disminuye a medida que aumenta la cantidad de CO_2 añadido).

La concentración de ión carbonato proporciona una buena estimación de la capacidad transportadora del CO_2 del agua del mar y los cálculos indican que los océanos pueden absorber, inicialmente, por lo menos 1090 PgC en forma de CO_2 sin cambios significativos en el equilibrio marino.

Existen tres vías de deposición de CO_2 : sólida líquida y gaseosa, que se exponen a continuación, brevemente.

La deposición sólida consiste en sumergir bloques de CO_2 solidificado en el mar, aprovechándose de su alta densidad frente al agua marina. A medida que se hunde, se va absorbiendo. No obstante, este proceso requiere gran cantidad de energía, así como el transporte y vertido de los bloques sólidos.

Para efectuar la deposición gaseosa, el CO_2 debe ser comprimido a una presión igual o mayor a la correspondiente presión hidrostática a la profundidad de inyección (de 50 a 100 MPa a una profundidad entre 500 y 1000 m), más la presión necesaria para difundir el CO_2 en forma de chorro. En tales condiciones de presión y temperatura, el CO_2

está completamente licuado por lo que la inyección gaseosa sólo es posible a profundidades menores de 500 m, en las que su tiempo de residencia es corto, por lo que es un sistema que no encuentra grandes aplicaciones.

La deposición líquida consiste en disolver el CO_2 en el agua del mar a presiones elevadas y bombearla después a profundidades de 200-300 m. En estas condiciones, el CO_2 es ligeramente más denso que el agua marina circundante y se hunde. Este sistema incluye el bombeo de CO_2 líquido a través del suelo marino mediante un conducto conectado a un barco-tanque o a una plataforma. La ubicación de la inyección es también de gran importancia. La efectividad del secuestro de CO_2 en estos sitios está influido por las variaciones locales en la circulación y densidad (por ejemplo el Mar Muerto sería un lugar preferido como almacenamiento).

Aunque existe consenso sobre la posibilidad real de almacenar CO_2 en el océano, existen distintas opiniones a cerca de las implicaciones medio ambientales. El CO_2 puede interferir en los hábitos alimenticios de los organismos que nadan y enterrar organismos bentónicos a medida, que se deposita en el fondo. También produce modificaciones en el pH pudiendo superar los límites aceptables para los organismos marinos. Dicha variación no tiene la misma influencia en capas superficiales que en profundas, por lo que la influencia sobre los ecosistemas también será diferente.

La **biomasa** puede actuar como almacén de carbón o como un sustituto directo de los combustibles fósiles sin contribución neta al CO_2 atmosférico, siempre y cuando se produzca y consuma de forma sostenible.

La cantidad de carbono fijado anualmente en la Biosfera, se estima en 217 Pg C. Los ecosistemas de bosques son los que más contribuyen a dicha fijación, 100 Pg C, lo que supone un 46% aproximadamente. Sin embargo, la proporción relativa de su superficie respecto a la del planeta es tan sólo del 11,18%.

En condiciones naturales, se producen intercambios entre la atmósfera y los seres vivos de la Biosfera que alcanzan un valor del orden de los 210 Pg C/año en cada sentido; por un lado, los vegetales fijan CO_2 de la atmósfera para producir materia orgánica y por otro, los seres heterótrofos en sus procesos respiratorios desprenden CO_2 que vuelve a la atmósfera. También los vegetales desprenden CO_2 durante la noche o durante el día en sus órganos no fotosintéticos (raíces y tallos principalmente).

La actividad humana aporta CO_2 a la atmósfera a razón de 6,5 Pg C/año, de los cuales 5 Pg C corresponden al consumo de combustibles fósiles en los sectores industrial, transporte o calefacción y el resto de la deforestación que supone un aporte de 1,5 Pg C/año en forma de CO_2 . De los 6,5 Pg C de origen antropogénico liberados anualmente a la atmósfera, parte son neutralizados por masas vegetales y océanos pero restan unos 3 Pg C que contribuyen al efecto invernadero.

Según los datos presentados, la cantidad total de carbono liberada anualmente a la atmósfera por causas antropogénicas, representa menos del 10% de la actividad fotosintética anual de la Biosfera.

En el proceso fotosintético, los vegetales captan el CO₂ atmosférico y lo transforman en compuestos orgánicos según el proceso de fotosíntesis. Se ha estimado la respuesta de la vegetación ante el incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, estableciéndose la existencia de una correlación entre el aumento de la concentración de CO₂ no son definitivos ya que se parte de modelos obtenidos en condiciones experimentales muy concretas (variación de CO₂), sin tener en cuenta otros factores como la temperatura, agua disponible por las plantas, presencia de nutrientes o características genéticas de las plantas.

Sin embargo, si parece claro que la vegetación ejerce cierto control del efecto invernadero mediante la absorción de una parte del incremento del CO₂ producido, por lo que favorecer el desarrollo de la vegetación o frenar su eliminación, son contribuciones positivas para reducir el efecto invernadero y sus consecuencias, al retirar de la atmósfera grandes cantidades de este gas e inmovilizar el carbono en su masa lignocelulósica.

La fijación media anual de CO₂ por los eco sistemas de bosques, varía entre las 38 t/ha (3,8 kg/m²) para el bosque tropical a las 12 t/ha (1,2 kg/m²) para matorrales y arbustos, con una media en el entorno de las 22 t/ha (2,2 kg/m²) correspondiente al bosque templado.

Una posible alternativa a otras medidas de tipo medio ambiental para las industrias que lo desearan podría consistir en la repoblación forestal en una superficie de captación equivalente a la generada por dicha industria. Como el CO₂ es un contaminante transfronterizo, las plantaciones no tendrían que realizarse necesariamente en el área de producción sino que podrían hacerse en países que dispongan de terreno para ello: en el caso de la UE, los países mediterráneos (castigados con recortes debido a los excedentes agroalimentarios y con graves problemas de desertización) o bien a países en vías de desarrollo, lo que supondría también importantes beneficios de tipo social y económico.

Asumiendo una fijación media anual de CO₂ del orden de 22 t/ha para una plantación forestal de clima templado, la superficie necesaria para absorber el CO₂ producido por una central térmica de 1000 MW, funcionando una media de 8000 h/año y con un consumo de carbón, del 75% de contenido en carbono, en el entorno de las 10000 t/día, supondría un área de 4000 km² anuales, equivalente a una circunferencia de 36 km, aproximadamente.

En Asturias, la potencia instalada supera los 2000 MW termoeléctricos, por lo que el área necesaria sería de 8000 km², siendo el área total del Principado de 10500 km².

No obstante, la cuestión no es tanto el área de terreno necesaria para contrarrestar las emisiones de carbono anuales, *sino el área necesaria para almacenar la totalidad durante*

un periodo de tiempo dado. Los resultados estarán muy influenciados por las distintas pautas de crecimiento de las distintas especies vegetales.

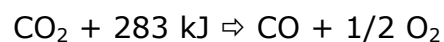
Los árboles no sólo son efectivos para prevenir la acumulación de CO₂ en la atmósfera sino también para suministrar una fuente de energía sostenible que sustituya al carbono emitido por combustión de fuentes fósiles.

Dentro de ellos, podemos considerar tres tipos:

- Cultivos de corta duración: describe una plantación de árboles de crecimiento rápido que se cosechan cada 3-10 años y que conservan la misma raíz durante varias generaciones. La madera se dedica a la producción de astillas. Como ejemplo, para suministrar suficiente biomasa para mantener una capacidad generadora de 450 GW(e), se necesitaría una superficie de 130 Mha (1,3 Mkm²) de cultivo. (España tiene una potencia instalada de 20779 MW termoeléctricos. Si se pretendiese sustituir la potencia de origen fósil por biomasa, se necesitaría una superficie de 60000 km², 10 que equivale al 12% del territorio nacional).
- Las microalgas constituyen plantas unicelulares con gran capacidad fotosintética. Pueden usarse para retener el CO₂ de los gases de chimenea. La biomasa resultante puede emplearse como fuente de energía (tanto química como producto alimentario), mientras que los residuos se convierten o reciclan en subproductos útiles.
- Las halofitas son plantas tolerantes a la sal, que se pueden cultivar en desiertos costeros o interiores. Su potencial de retención del carbono es similar a los árboles.

5.3.- Usos industriales del CO₂

El CO₂ es un gas no tóxico, sólido a -78,9° C, sublima cuando se calienta desde esa temperatura a 0° C y libera 645 kJ/kg. Es muy estable y se disocia a 1200° C, según la reacción:



Estas propiedades abren varias expectativas para usar CO₂ en numerosas aplicaciones industriales, tales como: refrigeración, bebidas carbonatadas, EOR, fabricación de metales y de productos químicos.

El CO₂ es un medio de refrigeración ideal para la industria alimenticia por lo que emplea una gran cantidad de gas en forma de hielo seco como refrigerante. También se utiliza para almacenar alimentos, ya que es inerte y no tóxico, aumentando el margen de caducidad de aquéllos.

La soldadura metálica se lleva a cabo bajo atmósfera de CO₂. También los extintores de incendios se basan en CO₂. Otra área de aplicación muy prometedora es la EOR. Cuando el CO₂ se pone en contacto con el petróleo en las condiciones de presión y temperatura

existentes en el almacén geológico, se disuelve en la masa petrolífera, reduciendo su viscosidad y favoreciendo la migración del petróleo.

Sus propiedades respecto de la reactividad, permiten utilizar el CO_2 para controlar el pH de los alimentos y del agua potable. También se utiliza para neutralizar aguas residuales, ya que el uso de CO_2 produce carbonatos evitando el uso de ácido sulfúrico o cloruro de hidrógeno, que producen sulfatos y cloruros.

Por su parte, la industria química utiliza CO_2 para la síntesis de una variedad de productos químicos orgánicos e inorgánicos. Los carbonatos orgánicos se obtienen mediante la reacción general:



entre los que se cuentan los carbonatos de sodio, potasio y bario, así como varios pigmentos.

Los principales productos químicos obtenidos a partir del CO_2 son la urea (utilizada como fertilizante, resina o alimento de animales), carbonatos (utilizados como disolventes e hidroxicompuestos), ácido acetilsalicílico (utilizado en la industria farmacéutica para la fabricación de aspirina) y en la síntesis del metanol.

Un método interesante que emplearía CO_2 es el proceso "Calcor", que consiste en calentar una mezcla de CO_2 e hidrocarburos en presencia de un catalizador para obtener CO de una pureza superior al 99%. Este CO se utiliza como materia prima en procesos industriales.

Finalmente, se estudia la posibilidad de obtener polímeros a partir de la reacción del CO_2 con compuestos orgánicos. Ejemplos de dichos polímeros son: policarbonatos, poliuretano y poliurea.