

Reflexiones sobre el Cambio Climático

CÁTEDRA DE EMÉRITOS
de la Comunidad Valenciana

GENERALITAT VALENCIANA
CONSELLERIA DE MEDI AMBIENT, AIGUA, URBANISME I HABITATGE

Reflexiones sobre el Cambio Climático



CÁTEDRA
DE EMÉRITOS
de la Comunidad Valenciana

GENERALITAT VALENCIANA

Edita: ©

CÁTEDRA
DE EMÉRITOS
de la Comunidad Valenciana

Autores:

© Manuel Toharia
© Juan Cuenca
© Amando García
© Vicente Domingo
© Jorge Olcina

Contacto:

Concha Albalat
e-mail: calbalat@telefonica.net
teléfono: 96 391 10 30

D.L.: V-841-2008

Diseño y producción:

efusiónvlc
poeta querol, 8 - 1ª
teléfono: 96 391 10 30
www.efusiongroup.com

Esta publicación ha sido patrocinada por la
Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge

Índice

Presentación. Dña. Concha Albalat.....7

Apertura del Acto. D. Jorge Lamparero.....9

Cambio Climático, el Mito, la Realidad. D. Manuel Toharia.....12

Historia del Clima en la Humanidad. D. Juan Cuenca.....18

Cambio Climático y Energía. D. Amando García.....44

Influencia del Sol en el Cambio Climático. D. Vicente Domingo.....62

Cambio Climático y Riesgos Climáticos.
Efectos en el Litoral Mediterráneo Español. D. Jorge Olcina.....76

Los Ponentes......88

Presentación

Concha Albalat Criado
Directora de la Cátedra de Eméritos de la Comunidad Valenciana

Esta reunión "Reflexiones sobre el Cambio Climático" surgió en la Cátedra de Eméritos de la Comunidad Valenciana. En vista de la gran repercusión y alarma que produce en nuestra sociedad, creímos que debíamos dar una visión científica hablando de realidades y no de mitos.

Nuestro Presidente D. Vicente López Merino vio que este tema encajaba dentro de las actividades de esta Cátedra de Eméritos y puso todo su interés presidiendo posteriormente el acto.

Al exponerle esta idea al director general de Cambio Climático de la Consellería de Medio Ambiente D. Jorge Lamparero la aceptó de pleno y le prestó su apoyo incondicional. En su día abrió las intervenciones con unas palabras sobre el estado actual del tema y patrocina la publicación de este libro que recoge conocimientos y experiencias de estos grandes expertos de la materia.



Apertura del Acto

D. Jorge Lamparero
Director General para el Cambio Climático
de la Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su Cuarto Informe de Evaluación, cuyo documento de síntesis será aprobado en Valencia la semana del 12 al 17 de noviembre, muestra numerosas evidencias científicas del calentamiento global del planeta y de la influencia que en este fenómeno ejerce la actividad del hombre.

Estas afirmaciones son de gran calado, ya que los datos facilitados por el IPCC tienen su origen en la mejor y más contrastada información disponible en la actualidad en materia de cambio climático. Los científicos del IPCC evalúan toda la literatura científica y técnica de calidad que sobre esta materia está publicada, ofreciendo una información útil en relación con los diferentes puntos de vista existentes sobre esta problemática.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, formado por más de 2.500 científicos procedentes de más de 100 países, fue creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en el año 1988.

La misión del IPCC es suministrar a los gobiernos información detallada a nivel científico, técnico y socioeconómico para comprender las causas, consecuencias y soluciones del calentamiento global. Es muy significativo que las grandes decisiones políticas adoptadas hasta la fecha en esta materia tengan su origen en la actuación del IPCC.

En este sentido tiene especial relevancia el Segundo Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático publicado en el año 1995, el cual fue decisivo para iniciar las negociaciones del Protocolo de Kioto.

El Protocolo de Kioto se puede considerar el primer intento serio de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y supone un compromiso de reducción concreto y jurídicamente vinculante para aquellos países desarrollados y en transición a una economía de mercado que lo han ratificado. Mediante este instrumento jurídico, las Partes firmantes del mismo asumen el compromiso de reducir de forma individual o conjunta las emisiones de seis gases de efecto invernadero en no menos de un 5,2 % respecto a las emisiones del año 1990 en el periodo de compromiso comprendido entre los años 2008-2012.

A pesar de la existencia de un compromiso global, cada Parte del Protocolo tiene un objetivo individualizado de reducción de emisiones, en concreto la Unión Europea, debido al gran peso específico de sus emisiones en el total mundial (en la actualidad aproximadamente un 28%) y su alto grado de desarrollo e industrialización, entendió que debía reducir sus emisiones en mayor medida, y en consecuencia se comprometió en un porcentaje del 8% en lugar del anteriormente mencionado del 5.2%.

Para hacer frente a esta nueva obligación, la Unión Europea diseñó toda una política frente al cambio climático, cuyo principal instrumento ha sido la creación de un mercado de derechos de emisión. Un derecho de emisión es equivalente a una tonelada de CO_2eq. en el territorio europeo, a través de la aprobación de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003.

Mediante la creación de este nuevo sistema de compra-venta de emisiones, se pretendió que los países adquiriesen experiencia de forma previa a la puesta en marcha en el año 2008 del comercio internacional de emisiones, el cual es un mecanismo creado por el Protocolo de Kioto para aminorar el esfuerzo que supone el cumplimiento de los objetivos de reducción fijados en el mismo. Pero la puesta en marcha temprana de un comercio europeo de emisiones ofrece una ventaja todavía más interesante, y es el hecho de que con su implantación se fomentan reducciones eficientes de emisiones, es decir, allí donde el coste económico es menor.

La Generalitat, ha puesto en funcionamiento, junto con la Administración General del Estado, el comercio de derechos de emisión en la Comunitat Valenciana. Actualmente existen en nuestro territorio 114 instalaciones afectadas por el mismo, siendo su distribución sectorial la siguiente:

- 21 instalaciones de cogeneración con más de 20 megawatios instalados.
- 24 instalaciones de combustión con más de 20 megawatios instalados.
- 3 instalaciones de generación eléctrica.
- 1 instalación de refino de petróleo.
- 1 instalación de fabricación de cal.
- 3 instalaciones de fabricación de cemento.
- 26 instalaciones para la fabricación de productos cerámicos.
- 19 instalaciones de fabricación de fritas y esmaltes cerámicos.
- 6 instalaciones de fabricación de vidrio.
- 10 instalaciones de fabricación de papel y cartón.

El comercio de derechos de emisión se basa en un complejo mecanismo en el que el Gobierno fija a las instalaciones afectadas la cantidad de dióxido de carbono que pueden emitir de forma gratuita, todo ello en función de los compromisos de reducción asumidos por España en el marco de la Unión Europea. Por su lado, las Administraciones de las Comunidades Autónomas deben asegurarse de que las instalaciones ubicadas en su ámbito territorial, determinan de forma correcta y bajo criterios uniformes sus emisiones anuales de CO_2.

La necesidad de recurrir al mercado se crea cuando las emisiones reales de una instalación son superiores a las emisiones asignadas de forma gratuita, en este caso las instalaciones deben comprar en el mercado de emisión una cantidad de derechos equivalente al exceso emitido, también se crea esta necesidad justo en el caso contrario, en esas circunstancias las instalaciones pueden vender los títulos de emisiones sobrantes.

En este sistema intervienen, además de entidades de iniciativa privada que dan soporte a la Administración en el proceso de verificación de emisiones, todos aquellos agentes existentes en cualquier mercado financiero.

Aunque ésta sea la mayor iniciativa acometida hasta la fecha, sería injusto además de insuficiente volcar toda la responsabilidad de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector industrial.

Las emisiones que generamos los ciudadanos en el desarrollo de nuestra actividad diaria (las procedentes del transporte, las residencias, los comercios y las instituciones), junto con las procedentes de la gestión de residuos y el sector agrario se denominan emisiones difusas y su importancia en el conjunto de las emisiones de gases de efecto invernadero es de tal magnitud que hace peligrar seriamente el cumplimiento de los compromisos de Kioto, si no se adoptan medidas con carácter urgente.

Es muy ilustrativo observar cómo influyen las diferentes actividades en la producción de emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo con los datos del año 2005, último inventario disponible, la contribución de las mismas es la siguiente: la industria un 42.2%, el tráfico un 32.3%, la producción energética un 10.3%, la agricultura y ganadería un 7.3%, el sector residencial y servicios un 5.2% y la gestión de residuos un 2.7%.

Como puede observarse, son especialmente problemáticas las emisiones debidas al tráfico, las cuales ocupan la segunda posición por su peso en las emisiones de gases de efecto invernadero de la Comunidad Valenciana. Asimismo, es sorprendente su evolución, el crecimiento de las emisiones del tráfico por carretera desde el año 1990 hasta el año 2005 ha sido del 105%.

Para poder alcanzar los objetivos del Protocolo de Kioto, el Gobierno de España y los Gobiernos autonómicos están elaborando políticas concretas en el marco de Estrategias a largo plazo para conseguir la reducción de las emisiones difusas de una forma eficaz.

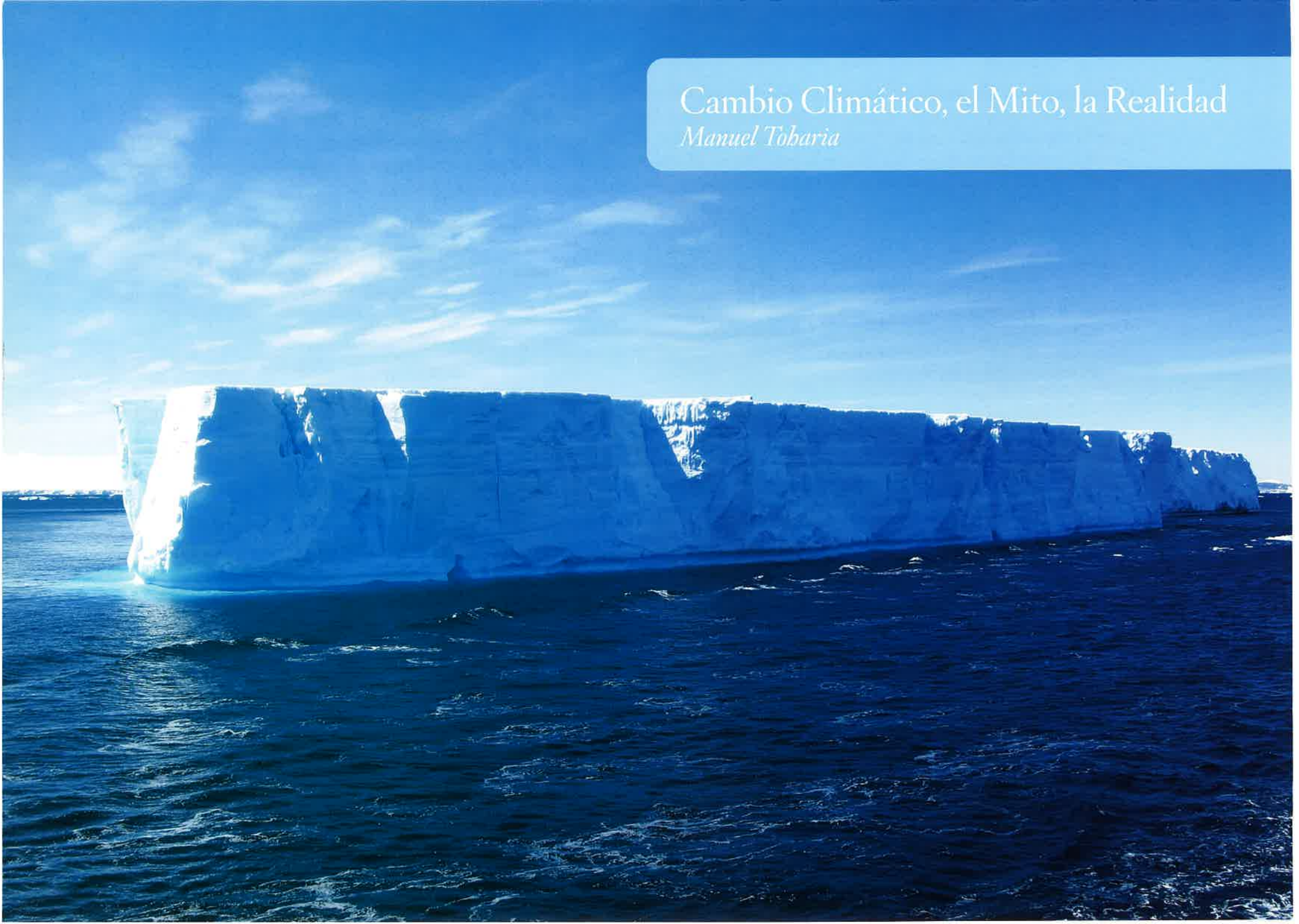
La mitigación de las emisiones difusas es sustancialmente más compleja que la reducción de las emisiones procedentes de las instalaciones afectadas por el comercio de derechos de emisión. Esto se debe a diversas razones: la cantidad y la diversidad de las fuentes generadoras de este tipo de emisiones; la implicación de seis gases de efecto invernadero frente al comercio que sólo incluía el dióxido de carbono; y el hecho de que en su intervención y control compartan competencias las distintas Administraciones Públicas territoriales.

Además existe otro factor limitante, para que las medidas previstas por la Administración para mitigar estas emisiones sean realmente efectivas, es necesaria una implicación de los ciudadanos, los cuales deben renunciar a ciertos hábitos incompatibles con un desarrollo sostenible.

Por este motivo desde la Generalitat se considera que la formación y sensibilización de los ciudadanos deben ser pilares de todas las estrategias en materia de cambio climático, ya que éstos son valores seguros para conseguir una reducción eficaz y progresiva de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, la plena concienciación de la sociedad ante el problema del cambio climático es un reto complejo que requiere mucho trabajo por parte de los organismos públicos y sobretodo tiempo para que la sociedad pueda asumir nuevos modos de comportamiento.

Valencia, 18 de octubre de 2007.



Cambio Climático, el Mito, la Realidad

Manuel Tobaria

Los cambios en los climas han sido noticia frecuente en los medios de comunicación desde hace ya muchos años y no, como suele creerse, en estos últimos tiempos. Ya en los años sesenta se hablaba de una glaciación, atribuida popularmente o bien a los experimentos con bombas atómicas o, aun más sorprendente, a los primeros escarceos espaciales –al Sputnik, lanzado hace medio siglo, el 4 de octubre de 1957, se le atribuyó en algunos periódicos la responsabilidad incluso de la terrible riada que anegó Valencia unos pocos días después–. Pero en la actualidad, y desde los años ochenta, lo que preocupa es el calentamiento global, cuya realidad ya parece bien establecida a comienzos del actual siglo.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) de la ONU ha publicado ya cuatro Informes –el último, ha sido presentado en forma de resumen a lo largo de 2007 y será ofrecido íntegramente a la opinión pública mundial en Valencia, en noviembre– que cada vez parecen confirmar más la idea de un calentamiento progresivo de la Tierra y que, además, van perfilando las predicciones alarmantes que se anunciaban hace un par de decenios para lo que queda de siglo XXI y tiempos venideros.

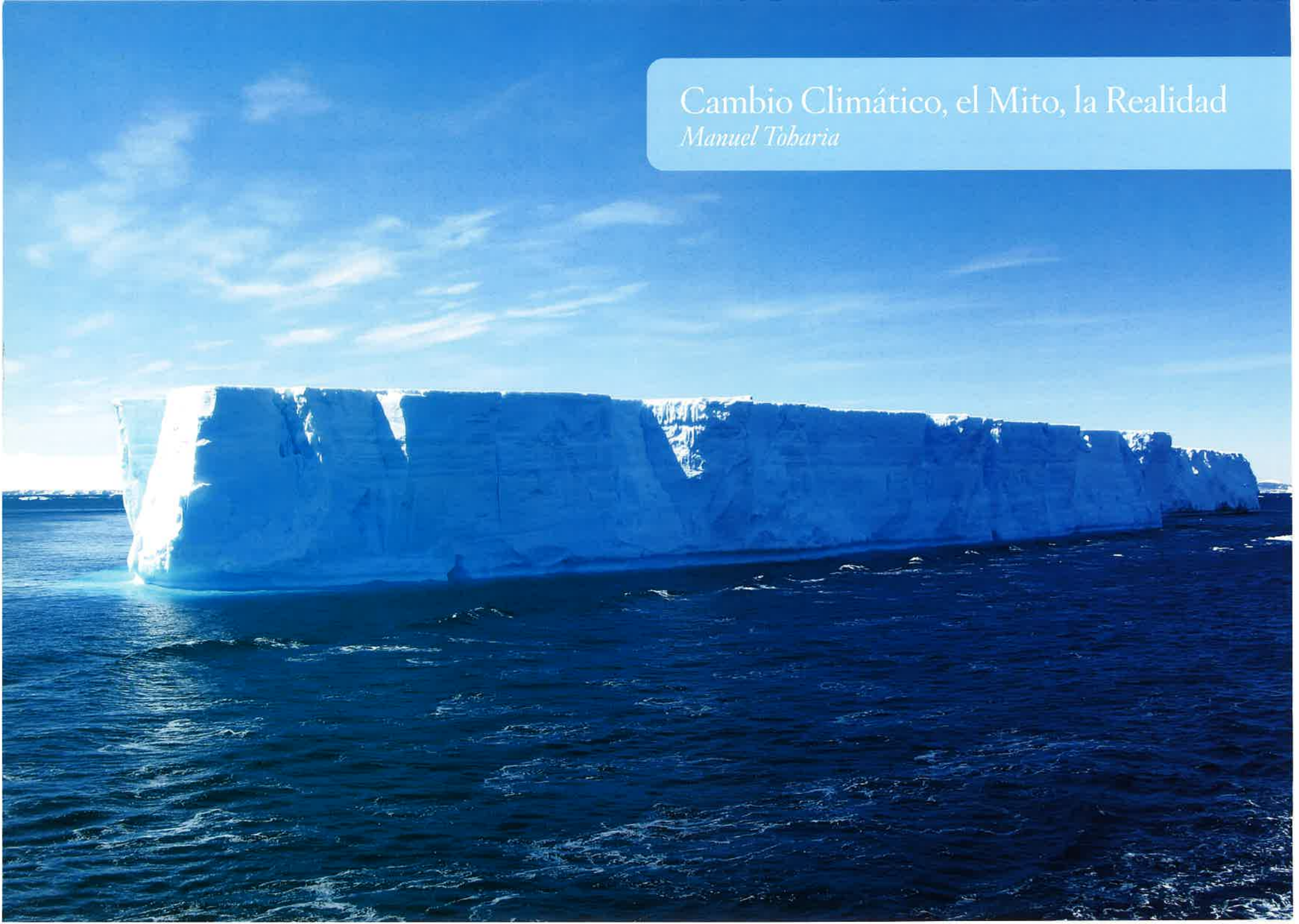
Estos fenómenos de calentamiento no son inusuales en la atmósfera terrestre: el más reciente de esos episodios rápidos de calentamiento lo conocemos bien y fue el que dió lugar al nacimiento de nuestro Periodo Holoceno, hace 10.000 años, terminando bruscamente la última glaciación, un breve periodo de un par de miles de años de fríos intensos conocido como Dryas Reciente. Con todo, el actual podría estar siendo demasiado acelerado como para deberse sólo a causas naturales, y es ya atribuido, de manera bastante mayoritaria, a las emisiones de gases invernadero por el mundo industrializado. Y, lo que es peor, se anuncia una aceleración a lo largo del presente siglo si no se pone coto a las emisiones de gases invernadero.

Las consecuencias de todas esas noticias, de base científica y más que razonable, son vistas por la población a través del prisma de los medios de comunicación –que no son ni rigurosos ni prudentes en sus calificaciones, digan lo que digan los informes respecto a las inevitables cautelas ante previsiones a cincuenta o cien años vista– y también a través de los portavoces aislados pero mediáticamente muy significados, como por ejemplo el ex-presidente Al Gore, recientemente galardonado con el Nobel de la Paz junto al propio IPCC. Un Nobel de la Paz no es un Nobel de la Ciencia, pero es tomado como tal por la prensa. Sin embargo, lo que se premia no es la seriedad científica de los trabajos del IPCC y de Al Gore –conviene aclarar que, en el caso del IPCC, esa seriedad es obvia, pero no tanto en lo que hace y dice el ex-político– sino la contribución de sus actos a la paz mundial. Y no cabe duda de que hablar del cambio climático a escala global es un esfuerzo colectivo que merece mejor suerte por parte de las decisiones que muchos gobiernos y, sobre todo, muchas empresas no están dispuestos a tomar.

Con todo, el mundo tiene problemas para la paz mucho más graves que el cambio climático, por preocupantes que sean sus previsiones. Si falta más agua potable en el futuro por culpa de dicho cambio de clima en los países más pobres, eso no excusa para que hoy no hagamos nada por remediar esa falta de agua, que es ya dramática desde hace decenios para muchos cientos de millones de personas. Por ejemplo.

El mito del cambio climático, aireado habitualmente por los medios de comunicación, aparece cuando se le atribuyen a los cambios de clima sucesos extraordinarios del tiempo que, en mayor o menor medida, siempre se han venido dando.

En España y otros países cercanos, el calurosísimo verano de 2003, el verano más bien fresco de 2006 y de 2007, la preocupante sequía del año agrícola 2005-2006 seguida de lluvias abundantes en las regiones atlánticas y muy parcas en la vertiente mediterránea... Y allende la mar océana, la intensidad de tal o cual ciclón tropical, como el Katrina hace dos años, la alternancia cada dos o tres años de fenómenos como el Niño o la Niña, incluso la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos que nada tienen que ver con la atmósfera, como los terremotos y tsunamis...



Cambio Climático, el Mito, la Realidad

Manuel Tobaria

Todos estos, y muchos otros, fenómenos recientes, que tienen más que ver con el tiempo meteorológico y su habitual variabilidad –algunos incluso nada tienen que ver con estas cuestiones, como los sucesos de origen sísmico-, son atribuidos de manera inmediata al cambio climático. Y no sólo por los medios de comunicación, ávidos de malas noticias, o por los ecologistas, siempre en pie de guerra a la hora de denunciar excesos del mundo consumista, sino incluso por muchos científicos de rango académico más que notorio.

Eso es parte del mito.

Hay quien afirma de manera contundente –por ejemplo, Al Gore, en su aplaudido documental, galardonado con dos óscars de Hollywood- que estamos ante el reto del siglo, la mayor amenaza a la que se ha enfrentado nunca la humanidad. ¿Puede ser cierto? ¿Tan dramática es ya la situación? ¿O bien estamos sólo ante un problema de futuro, que depende de lo que seamos capaces de hacer en los próximos decenios más que de lo que ya hayamos hecho mal en el pasado reciente?

Antes de seguir adelante, conviene precisar ciertas desmesuras, como simple acotación paralela: si el cambio climático y el calentamiento global constituyen la peor amenaza a la que se enfrenta la humanidad, ¿quiere eso decir que se trata de un problema aun más grave que el hecho de que estén muriendo literalmente de hambre casi mil millones de seres humanos? ¿Más grave que los muchos millares de cabezas nucleares que almacenan los arsenales de las potencias atómicas? ¿Más grave que el terrorismo fanático internacional, ciego e irracional, suicida e incontrolable?

¿Qué hacemos los países ricos, qué hace la humanidad, para evitar esos dramas?

Por lo que al cambio climático respecta, estamos ante una alerta, esencialmente científica, que tiene mucho que ver con la forma en que nos hemos desarrollado y seguiremos desarrollándonos los países ricos, y que tiende a empeorar porque ésa es la conducta que imitan los países que están dejando de ser pobres para parecerse a nosotros, los ricos. No se trata, pues, de una alarma inmediata y a muy corto plazo, pero sí parece que podría haber llegado el tiempo de la acción reflexiva y eventualmente preventiva y paliativa; cuidando en cada caso, eso sí, que el remedio no sea peor que la enfermedad.

Pero todo lo dicho no debe servir de excusa para minimizar la cuestión del cambio climático, porque estamos, sin duda, ante un reto de enorme magnitud. Cuya realidad, al margen de los mitos que unos y otros quieran crear, es evidente.

Porque sabemos muchas cosas, con más que aceptable fiabilidad, y también ignoramos otras muchas. Eso no nos impide predecir, con márgenes de incertidumbre que ni siquiera estimamos muy bien, y al tiempo expresar nuestros temores, ligados al miedo a perder lo mucho que tenemos.

Digamos, antes que nada, que hay que evitar la frecuente confusión entre tiempo y clima, porque es el origen de muchos malentendidos en estos temas. Podría parecer una precisión innecesaria, quizá académica. Pero resulta imprescindible porque, aunque son términos que se parecen y hablan de cosas similares, inducen a una confusión perniciosa: tiempo y clima no son, en absoluto, la misma cosa. Y sus cambios nada tienen que ver los unos con los otros. Los del tiempo son cambios constantes, a corto plazo, a veces muy intensos. Y se refieren a parámetros medibles, físicos. El tiempo es un conjunto de fenómenos físicos que caracterizan el estado de la atmósfera en un momento y en un lugar dados. Y ya sabemos realizar predicciones aproximadas del comportamiento futuro del conjunto a partir de ciertas leyes que, aun conocidas imperfectamente, permiten pronósticos bastante acertados a corto plazo, y ya sumamente inciertos cuando se abarcan periodos superiores a un poco más de una semana.

El clima, en cambio, no es propiamente real; no se puede medir sino estimar o calcular. Expresa más bien una especie de integración global de esas variaciones del tiempo a lo largo de periodos de muchos años. Se trata, pues, de una síntesis de la temperie, en forma de promedio a largo plazo de sus variaciones. Un promedio que sólo se hace patente biológica y geológicamente al cabo de muchos años, y se expresa ante todo en el paisaje y en sus distintos elementos de fauna y flora.

A partir de los datos de las variables meteorológicas, compiladas durante muchos años, es posible efectuar un tratamiento estadístico que permita obtener valores numéricos del clima. Esos datos climáticos expresan una abstracción matemática, un promedio que define una cierta "normalidad". Que nos permite comparar el dato puntual de un día o un año con esa "normalidad" promediada del clima, para determinar si ese dato está por encima o por debajo de lo habitual. Nada más... y nada menos. El clima nos sirve de criterio de referencia para evaluar la conducta caprichosa del tiempo. No es ninguna referencia física, sólo un marco de referencia.

Así planteadas las cosas, decir que un verano extremadamente cálido o un ciclón tropical suficientemente dañino son síntomas de cambio climático resulta cuanto menos aventurado. Habría que esperar a ver si, en los próximos decenios se repiten esos fenómenos extraordinarios con mayor frecuencia que en el pasado; porque siempre hubo, hay y habrá fenómenos extraordinarios, en más o en menos, en el tiempo atmosférico. Lo que el clima muestra, al cambiar, es su mayor o menor proliferación en promedio. Si la frecuencia de esos sucesos aumenta o disminuye, eso acabará repercutiendo en los promedios a largo plazo que, al variar, indicarán un cambio de clima en uno u otro sentido.

Sólo tenemos datos fiables del clima desde hace poco más de un siglo; muy poco desde el punto de vista estadístico, porque cada periodo de cálculo debería incluir muchos decenios, al menos tres como poco. Incluso siglos, milenios y hasta millones de años, según nos remontamos hacia el pasado remoto.

Incluso dentro del Holoceno, en los últimos 10.000 años –por no remontarnos a periodos más lejanos- dentro de un clima cálido en promedio, también ha habido fluctuaciones hacia el frío o el calor. Por ejemplo, cuando los vikingos descubrieron Groenlandia (que significa Tierra Verde), allí había en verano extensas praderas y se pudieron generar colonias permanentes durante unos años. Luego desaparecieron, al iniciarse en el siglo XIV la llamada "Pequeña Edad del Hielo", con un periodo especialmente frío durante el siglo XVII llamado Mínimo de Maunder. Luego, a partir del siglo XVIII las temperaturas comenzaron a recuperarse, ascenso que ahora parece haberse intensificado desde finales del siglo XX, tras un periodo de tregua e incluso enfriamiento a mediados del siglo XX y hasta finales de los años setenta.

Pero lo más preocupante de lo que sabemos es que a lo largo del siglo XX los gases invernadero han ascendido de manera continua, debido a las combustiones de carbón e hidrocarburos con fines energéticos, y como soporte esencial del desarrollo industrial. Y que las temperaturas parecen subir imparablemente desde hace unos treinta años. Parece obvio correlacionar ambas cosas: los expertos son hoy bastante unánimes a la hora de considerar que ese incremento térmico de los últimos años tiene que ver con nuestro desarrollo industrial.

En todo caso, somos muchos los que criticamos la conversión mediática de un fenómeno científico, de enorme interés y más que probable gravedad aunque obviamente sometido a la natural controversia entre especialistas, en un ente catastrófico con vida propia, casi ubicuo y omnipresente aunque no venga a cuento. Eso que algunos han llamado "efecto infernadero".

De la realidad al mito hay muy poca distancia...

Porque también hay muchas cosas que no sabemos. Por ejemplo, ignoramos cómo se comportan a largo plazo los sistemas complejos caóticos, como el sistema climático de nuestro planeta, considerado de manera conjunta.

O cuál es la importancia real, superior a lo que se creía hace pocos años, del transporte de calor por las corrientes marinas, tanto superficiales como submarinas. Sabemos muy poco acerca de la influencia real del Sol y su "viento solar" –radiaciones muy energéticas que nos llegan desde el Sol- sobre nuestros climas, incluyendo su interacción con el "viento galáctico" (la radiación cósmica), cuya importancia comienza a ser considerada por muchos especialistas como más que considerable.

Lo que podemos observar es que la forma de desarrollo de los países ricos es un proceso que ahora imitan países con un enorme potencial de crecimiento, sobre todo India y China. Nuestro desarrollo se ha hecho con un modelo energético basado casi exclusivamente en los combustibles fósiles, con procesos escasamente eficientes y propiciadores de un consumismo desperdiciador que ha hecho que nuestra forma de vivir pueda ser catalogada como civilización del desperdicio. Y en un mundo cuya población crece en torno a 100 millones de seres humanos suplementarios cada año eso ya no parece sostenible.

Los científicos son muy serios, y prudentes. Cuando expresan sus temores no lo hacen de forma periodística sino a base de estudios con mayor o menor margen de fiabilidad, y con predicciones, cuando pueden hacerlas, o conjeturas lo más racionalmente posibles a la vista de lo que se sabe y de lo que se ignora. Todo ello se basa en muy distintos sistemas de trabajo, no siempre coinciden; y en cuanto a las predicciones, el método más versátil y poderoso, a pesar de sus lagunas, tiene que ver con los modelos matemáticos que intentan simular el comportamiento del sistema climático, en función de las muchas variables que pueden intervenir hoy y en el futuro. Variables que dependen de factores naturales –sabemos que son lentos pero inexorables- y de factores humanos, capaces de acelerar o modular los procesos naturales, y que a su vez son muy variados, aunque sobre ellos podemos influir directamente.

Las decisiones que tomemos los humanos sobre la obtención de energía a partir de unas u otras fuentes, fósiles o renovables, dependen mucho de los criterios políticos –y, por tanto, industriales, o sea económicos- que adopten los distintos países. Lo mismo que conseguir una mayor eficiencia de uso y un mayor ahorro en los comportamientos de los consumidores y las empresas.

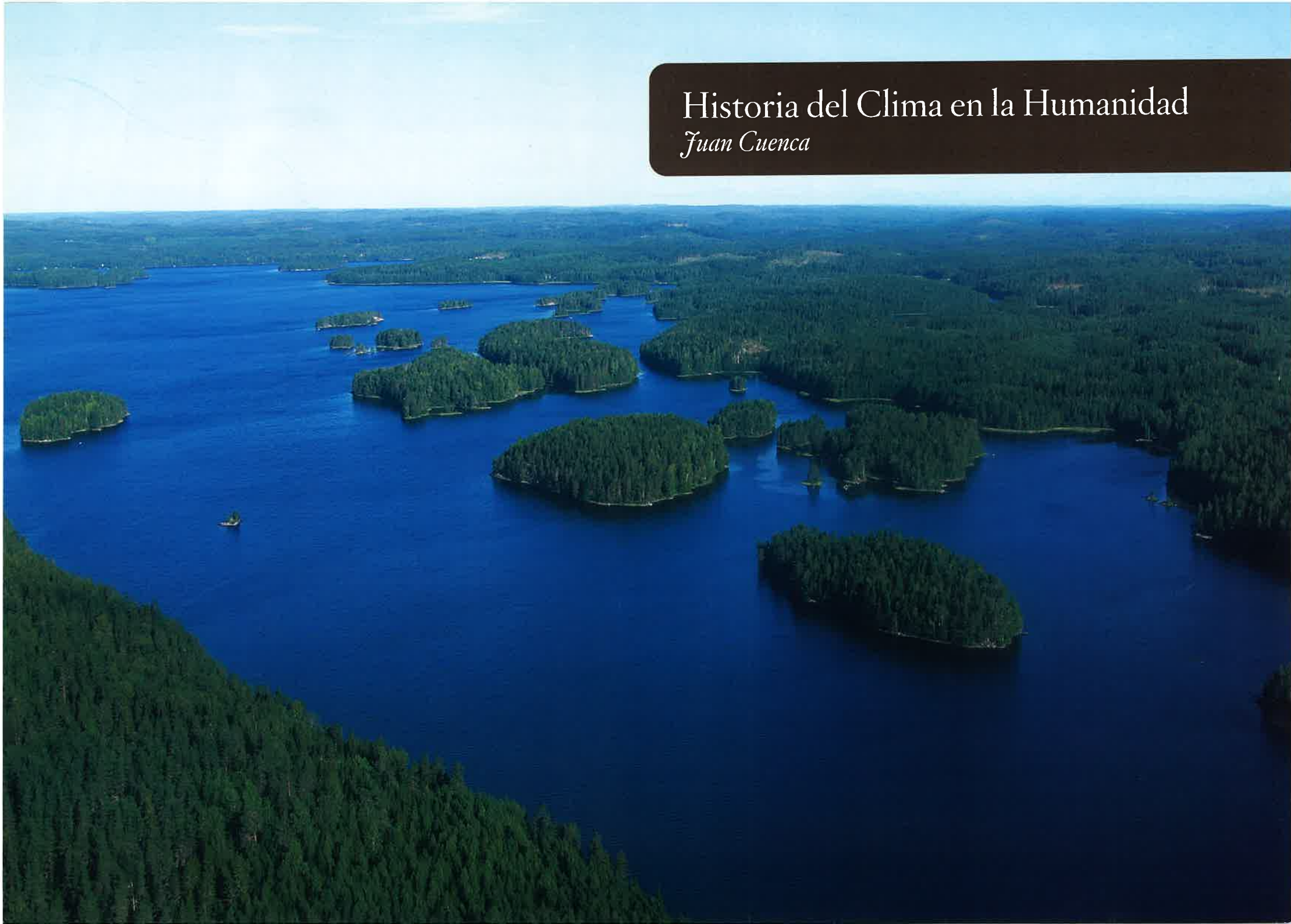
Esas decisiones modularán la influencia humana sobre los climas futuros. No estamos, pues, ante un problema que afecte sólo a España, o a Asia, o a la Antártida; se trata de un problema planetario. Y ésa es quizá la peor de sus características, de cara a buscar una solución generalizada y a largo plazo; porque hay pocas de esas soluciones tomadas por la humanidad en pleno. Quizá ninguna; al menos hasta ahora: ni en pro de la paz mundial, ni para luchar contra el hambre, ni para evitar la proliferación nuclear... Ni siquiera para respetar mutuamente las civilizaciones ajenas.

Abordar la cuestión del cambio climático desde el punto de vista científico no puede, pues, partir de premisas absolutas -por ejemplo, blanco-negro- sino que debe atender a los muchos elementos de indeterminación que nos impiden conocer con detalle suficiente las leyes naturales que intervienen en el asunto, y que también aparecen a causa de nuestra propia incertidumbre respecto a los datos que utilizamos, los métodos con los que realizamos los modelos de predicción, e incluso las consecuencias que podemos llegar a temer. Y, al tiempo, debe obligarnos a instaurar cuanto antes, de forma colectiva –si ello es posible- políticas energéticas menos dependientes de los combustibles fósiles, más eficientes en el uso de las fuentes de energía –más renovables de todo tipo, por ejemplo- y más ahorradoras en el consumo habitualmente despilfarrador que todos tenemos.

¿Es mucho pedir? Puede que sí. Pero los que ya somos abuelos no podemos dejar de pensar en nuestros nietos; y en los hijos y los nietos de nuestros nietos...

Historia del Clima en la Humanidad

Juan Cuenca





Introducción

A) El Cambio Climático en la sociedad

El Cambio Climático es un tema omnipresente en la sociedad actual, desde hace pocos años. Con el tratamiento que se le ha dado, es un tema muy amplio, en el que se entrelazan tres temas o grupos de temas:

1º, **el campo estrictamente científico:** interpretación y valoración de las modificaciones que se están produciendo en el clima de la Tierra, especialmente respecto al calentamiento global y sus consecuencias, que es el aspecto más llamativo de este cambio.

2º, **la influencia del hombre en este cambio**. La preocupación, hace unos lustros, por la posible influencia dañina del hombre era más general: la contaminación; y contra ella se viene luchando, a veces con éxito llamativo (Támesis, Rin). Actualmente ocupa el protagonismo la lucha contra la emisión de CO_2 (protocolo de Kyoto). El principal motivo de nuestro interés es la persuasión, que se va extendiendo por la sociedad con motivo o sin él, de que el hombre es el responsable del cambio climático, al cual, además, se le asignan unas consecuencias funestas en un futuro bastante próximo.

3º, **el derroche de la sociedad**, mayor, naturalmente, en los países más desarrollados: derroche de energía, de agua, de materias primas. Unos adjetivos pueden caracterizar este derroche: enorme, disparatado, insensato; insolidario, insultante, injusto; contraproducente, peligroso, suicida.

La sociedad ha entrelazado estos tres temas que, sin embargo, requieren tratamientos distintos. El tema 3º, **el derroche**, requiere un tratamiento político para su corrección: mentalización de la sociedad, normas adecuadas, y exigencia de esas normas.

El tema 2º, **la influencia del hombre**, requiere ante todo un tratamiento científico para precisar el mecanismo y el alcance de este influjo; y, a continuación, es necesario adoptar las medidas para suprimir o reducir ese influjo, y para mitigar sus consecuencias negativas. Ambos aspectos, científico y político, deben abordarse al unísono.

El tema 1º, **el estudio del clima**, es la base que justifica toda actuación ulterior en este campo. El clima es algo que nos preocupa porque nos afecta sensiblemente. Ésta es la razón por la que se han dedicado esfuerzos ingentes a estudiar el sistema climático terrestre y a predecir la situación del tiempo a un plazo lo más largo posible; así ha sido desde mucho antes de que sintiésemos el acicate del cambio climático.

En los últimos lustros se ha hecho un gran esfuerzo para dar un tratamiento científico a los temas medioambientales, en obras y artículos especializados, y se ha avanzado notablemente en estos campos; pero aún quedan muchos puntos oscuros y, desde luego, no se ha llegado a un consenso entre los científicos sobre la interpretación integral de los datos. La razón está en la gran complejidad de los procesos climáticos.

En efecto, los numerosos estudios sobre los factores climáticos en el presente y en el pasado, nos han aportado datos preciosos, pero también han puesto de manifiesto la dificultad de esclarecer sus interacciones, por una parte; y por otra, todo indica que estos factores climáticos alcanzan frecuentemente puntos críticos, de consecuencias espectaculares, a pesar de fluctuar sus valores dentro de una banda estrecha.

Por estos motivos, los científicos son extremadamente cautos cuando se trata de señalar la causalidad de los cambios climáticos; de valorar su dimensión real; y, mucho más, si se trata de emitir cualquier pronóstico.

Es patente que estos temas requieren un estudio objetivo, libre de prejuicios, veraz; es decir, un estudio científico amplio, con los medios adecuados para ello, que nos vaya resolviendo los múltiples interrogantes que ahora nos planteamos. Sólo sobre la base de ese estudio se podrán tomar las importantes decisiones que ya son necesarias, y que cada día se hacen más urgentes.

B) La dimensión histórica

Esta charla aborda el estudio científico del cambio climático; no en su base física, meteorológica, para lo cual no estoy preparado, sino desde un punto de vista que debe ayudarnos a interpretar correctamente los datos de la climatología reciente y actual: el punto de vista histórico.

Se dice que la Historia es maestra de la vida. Lo es, sin duda, y bueno es que se acuda a ella cuando se trata de asignar su justa dimensión a circunstancias actuales que nos afectan. Casi siempre, el mirar con perspectiva histórica una situación o un fenómeno actual, moderará el entusiasmo o el temor que nos haya producido en una primera impresión; es decir, nos ayudará a atribuirle su verdadero valor.

La Geología Histórica se ocupa de la Historia de la Tierra; en este caso, mejor es escribir HISTORIA, toda la palabra con mayúsculas, porque hablamos de una Historia que empezó hace 4.600 millones de años (Ma). Hablando con propiedad, nuestro planeta, ya como tal en su órbita alrededor del Sol, evolucionó unos 600 Ma diferenciando sus capas estructurales y enfriándose, hasta alcanzar una configuración similar a la actual: son los "tiempos cosmogónicos". Cuando el enfriamiento permitió que la lluvia alcanzase la superficie de la Litosfera, y el agua corriese por ella, se formaron los mares, y comenzó el ciclo ininterrumpido de erosión, transporte, sedimentación, metamorfismo y orogénesis; es decir, empezaron los "tiempos geológicos". Según el actualismo de Lyell, podemos decir que empezaron a ser las cosas de la Tierra tal como son ahora. Eso ocurrió hace unos 4.000 Ma.

La Geología Histórica, como Historia que es, empieza cuando dispone de documentos de los que pueda obtener información: estos documentos son los estratos, que nos proporcionan datos sobre las condiciones en que se formaron. **La Estratigrafía** es la base de la Geología Histórica; con toda razón se ha dicho que los estratos son las hojas del libro de la Historia de la Tierra. Tenemos estas hojas para leer nuestra historia desde hace 3.800 Ma.

La segunda gran Ciencia que sirve de fundamento a la Geología Histórica es **la Paleontología**. En este caso, existen huellas muy antiguas de la presencia de la vida en los mares de la Tierra, durante varios miles de millones de años. Ahora bien, hace 540 Ma, aparece bruscamente una gran cantidad de fósiles variados, que nos informan de las características de los biotopos en los que vivieron, entre ellas del clima.

Dentro de la Geología Histórica, y como consecuencia del desarrollo de la Estratigrafía y de la Paleontología, ha nacido más recientemente otra Ciencia, actualmente en pleno desarrollo: **la Paleoclimatología**. Los estratos muestran muchos signos del clima en que se formaron (por ejemplo, morrenas glaciares), y es bien conocido que muchos fósiles son excelentes indicadores del clima en que vivieron esos seres (por ejemplo, el reno o el hipopótamo).

Naturalmente, como es norma en los procesos históricos, los datos paleoclimáticos son más abundantes en los tiempos más recientes.

Con esto llegamos al tema que hoy nos ha reunido aquí: reflexionar sobre el cambio climático en el que estamos inmersos en la actualidad, cuyo último episodio notable empezó hace unos 150 años, pero cuya gran referencia, el final de la última glaciación, ocurrió hace 13.000 años. En este caso, por "reflexionar" se entiende aplicar la perspectiva histórica, paleoclimática, a los cambios que observamos en estas últimas décadas.

Es necesario que lo hagamos, porque queremos encontrar la justa medida de los cambios que estamos viviendo. Las posiciones extremas son bien conocidas: "aquí no pasa nada", o "se acerca el fin del mundo"; y sus vecinas aproximaciones: "se trata de una oscilación normal, sin trascendencia para la vida", o "las consecuencias serán las de una gran catástrofe mundial". El conformismo y el tremendismo no tienen justificación científica; pero el cambio climático está ahí y, en el plano operativo, hemos de reaccionar ante él: no cruzarnos de brazos, ni pretender reorganizar el mundo, pero sí dar una respuesta adecuada a esta realidad.

En la breve extensión de este trabajo sólo puedo hacer alusión a algunos hechos relevantes del pasado remoto, y fijarnos en algunos hechos del pasado reciente, con el objetivo de buscar una respuesta al cambio climático que vivimos.

Tendré presente el criterio de Cervantes: "El hombre prudente debe juzgar los futuros acontecimientos por los que ha habido en el pasado y los que se suceden en el presente."

* * * * *

Antes de considerar el clima del pasado, me ha parecido conveniente hacer una sucinta exposición de los criterios fundamentales para comprender el clima de nuestro planeta. Con esto, el esquema del trabajo queda así:

Parte 1ª.-EL CLIMA DEL PLANETA TIERRA

Cap. 1º.- Análisis del Sistema Climático
Los Subsistemas Climáticos
Apéndice: El ciclo biogeoquímico del CO_2
Cap. 2º.-Oscilaciones climáticas en la Historia de la Tierra
Períodos cálidos y períodos fríos

Parte 2ª.-EL HOMBRE COMO TESTIGO

Cap. 3º.- Las Glaciaciones del Cuaternario
Cap. 4º.- La Historia reciente
El Holoceno
La Época Actual

CONCLUSIONES

PARTE 1ª.- EL CLIMA DEL PLANETA TIERRA

Como nos dice el diccionario, clima es el conjunto de condiciones atmosféricas y telúricas que caracterizan una región: temperatura y humedad (las principales), altitud, latitud, insolación, vientos, estaciones...; éstos son los "factores climáticos" que, combinados de muchas maneras y con diversa intensidad, dan como resultado los variados climas que existen en nuestro planeta.

No podía ser de otra manera, ya que el Sistema Climático de la Tierra es el resultado de la interacción de cuatro subsistemas principales: Atmósfera, Hidrosfera, Litosfera y Biosfera. Presento unas breves consideraciones sobre ellos, como base para considerar los cambios climáticos.

CAP. 1º.- ANÁLISIS DEL SISTEMA CLIMÁTICO

En este capítulo pretendo hacer una sucinta exposición del sistema climático de la Tierra, con un análisis elemental de los conceptos a los que me referiré al presentar luego el núcleo de este trabajo, que es la consideración del clima del pasado en relación con el clima del presente.

Para ello, me fijaré en lo esencial de los subsistemas climáticos terrestres, y añadiré un apéndice sobre el ciclo biogeoquímico del CO_2, al que se le atribuye un protagonismo tan señalado en el calentamiento global que padecemos.

* * * * *

Subsistema 1º.- La Atmósfera

En todas las consideraciones climáticas, el protagonismo lo ocupa la Atmósfera. Las irregularidades de la Litosfera, especialmente la orografía; la proximidad de la Hidrosfera, mares sobre todo; y la latitud, tienen gran influencia en las condiciones climáticas, pero las variaciones de la Atmósfera son las que definen los climas.

Desde hace 4.000 Ma, la Tierra tiene una Atmósfera similar a la actual en muchos aspectos de su dinámica, aunque se hayan producido importantes cambios en su composición: con la formación de la Atmósfera empiezan las variaciones climáticas.

Composición

Como sabemos, la Atmósfera es una delgada mezcla gaseosa que cubre nuestro planeta. Aunque se extiende varios cientos de kilómetros sobre la superficie terrestre, es muy escasa a pocas decenas de kilómetros. Si se concentrase toda ella con la misma densidad que tiene a nivel del mar, formaría una capa de 8 km de espesor. Representadas a escala 1/1 millón, la Tierra resultaría una bola de 12'75 metros de diámetro, rodeada por una Atmósfera de 8 mm de espesor.

Su masa es relativamente pequeña, menos de una millonésima parte de la masa del planeta, pero tiene una acción decisiva en el clima, y en otros procesos geológicos y biológicos. Además, es asiento de la vida en "el medio aéreo", el nuestro.

La atmósfera seca está formada en un 99'5% por nitrógeno, oxígeno y argón. En la pequeña fracción restante se encuentran otros gases nobles, sin influencia en el clima, y otros gases de gran importancia climática: son los gases de "efecto invernadero".

Además de todos ellos, se encuentra siempre en la atmósfera una cierta cantidad de vapor de agua. El valor medio, un 0'41%, nos dice poco, porque apenas hay en las regiones polares, mientras es de un 3% en casi toda la franja tropical a nivel del mar: es la "humedad atmosférica", el principal factor climático, junto con la temperatura.

Finalmente, también existen en la atmósfera, en cantidades muy variables, los aerosoles, que son gotitas de líquidos (agua sobre todo, que forma las nubes), y partículas de sólidos (polvo, humos, polen).

Temperatura

La energía que recibimos del Sol nos llega en forma de ondas de distinta longitud; todas entran en contacto con la Atmósfera antes de alcanzar la Litosfera, la Hidrosfera o los seres vivos. Ya que la Tierra mantiene una temperatura constante, hay que deducir que emitimos al exterior tanta energía como recibimos, también en forma de ondas, que deben atravesar la atmósfera antes de perderse en el espacio. Sin detallar este punto, hay que decir que emitimos pocas ondas luminosas, las que refleja nuestro planeta, menos de un tercio de las que recibe del Sol; las demás cambian su longitud al atravesar la Atmósfera o al contacto con la Litosfera, Hidrosfera y Biosfera, y lo que emitimos es calor, en forma de ondas infrarrojas.

La emisividad de la Tierra está calculada desde hace tiempo por las leyes físicas, y medida más recientemente por los satélites y sondas espaciales: la Tierra es un planeta que emite a -18°C. A esa temperatura, tendría que ser un planeta sin vida. Pero no es así, porque la temperatura media en la Atmósfera, junto a la superficie de la Litosfera y la Hidrosfera, es de 15°C, 33°C más de la que le corresponde.

La causa de esta anomalía la encontró Fourier ya en 1827, y la precisó Tyndall en 1859: la Atmósfera es como el cristal de un invernadero, que deja pasar los rayos solares al habitáculo, pero impide que se escape el aire caliente. Todos los gases dejan pasar los rayos, y la Tierra los absorbe y se calienta, con lo que emite rayos infrarrojos; el oxígeno, el nitrógeno y los gases nobles son transparentes a ellos, pero el vapor de agua, el CO_2, el metano, el ozono de la troposfera (no el de las estratosfera, que causa otros efectos) y otros gases, absorben esos rayos, se calientan y hacen aumentar 33°C la temperatura de la Atmósfera inferior: producen este "efecto invernadero".

Los cálculos posteriores han mostrado que el vapor de agua es responsable de un 64% de ese calentamiento, es decir, hace subir la



La delgada capa atmosférica es protagonista del clima terrestre.

temperatura 21 grados; el CO_2, causa el 21% (7 grados); el ozono troposférico, el 6%, 2 grados; y los demás gases, el 9% restante, 3 grados.

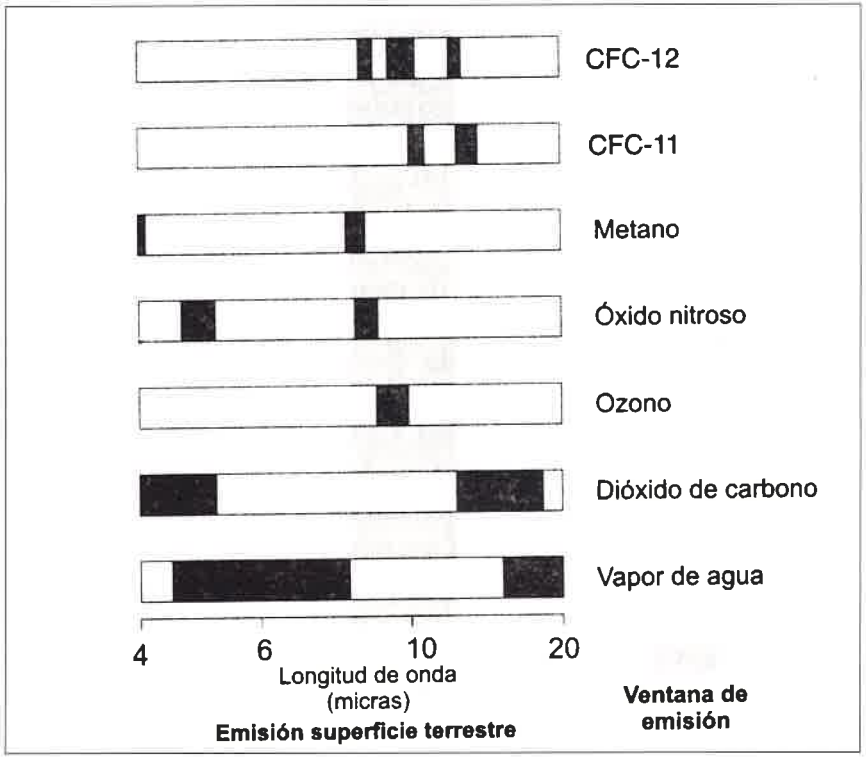


Fig. 1: La ventana de emisión

El calor de rayos infrarrojos que emite la superficie terrestre, lo hace a diversas longitudes de onda, entre 4 y 20 micras, y cada "gas invernadero" absorbe sólo una o varias bandas, más o menos extensas, de esas longitudes. La cantidad de vapor de agua y anhídrido carbónico en la atmósfera, gases relativamente abundantes, ha asegurado siempre la absorción casi total de la emisión de infrarrojos dentro de sus respectivas bandas: son un obstáculo, un muro para la salida del calor. Pero queda una banda de infrarrojos, en la longitud de onda entre

7 y 14 micras, que no es absorbida por estos dos gases: es la "ventana de emisión". La emisión de calor por esta "ventana" haría que la temperatura de la atmósfera fuese menor, si no existiesen otros gases que interceptan la mayor parte de esos rayos infrarrojos; es decir, siguiendo la metáfora, lo que hacen es "cerrar la ventana". La fig. 1 muestra el esquema de la "ventana de emisión": el vapor de agua y el CO_2, en sus respectivas bandas de absorción, forman el "muro", y los demás gases cierran más o menos la "ventana".

Esta sencilla metáfora del muro y la ventana es fácil de comprender, y es verdadera en lo fundamental, pero no es fácil de aplicar para explicar los detalles del clima, por la complejidad de los fenómenos atmosféricos; como hemos dicho, en la Atmósfera se dan múltiples interacciones entre los factores climáticos, unas conocidas y otras, no, y los factores alcanzan con frecuencia puntos críticos, en los que cambian completamente su comportamiento. Todo esto es lo que explica la cautela de los científicos.

Subsistema 2º.- La Hidrosfera

La Hidrosfera que conocemos es una singularidad de nuestro planeta.

Aunque el agua representa sólo una de cada 4.500 partes de la masa de la Tierra, juega un papel decisivo en el clima por sí misma y por su interacción con la Atmósfera (humedad atmosférica), la Litosfera (modelado del relieve) y la Biosfera. En ésta su importancia es tal que se puede decir, sencillamente, que la vida es un "fenómeno hídrico". Además, en el medio acuático tuvo su origen la vida, y actualmente es asiento de la mayor parte de ella.

Tres cuartas partes de la superficie terrestre son agua, salada en su gran mayoría. Si la distribución fuera uniforme sobre toda la superficie del planeta, tendría una profundidad de 2'7 km.

La Hidrosfera juega un papel decisivo en el clima, con influencia directa e indirecta en múltiples factores, que no son objeto de este trabajo. Sólo vamos a considerar el CO_2 que contiene y sus intercambios con la Atmósfera.

Cantidad de CO_2 de la Hidrosfera

Constantemente se hace referencia al CO_2 atmosférico, pero este gas se encuentra también en las aguas continentales y marinas, en mucha mayor cantidad que en la Atmósfera. Se encuentra como gas disuelto, y como ión carbonato y bicarbonato, las tres formas en equilibrio dinámico según la temperatura, pH y salinidad de las aguas. Para ser precisos, también existe una cuarta fracción de CO_2 en forma de ácido carbónico, en equilibrio con las demás, pero es tan pequeña que me limito a señalar su existencia.

La cantidad total de CO_2 en la Hidrosfera es de unos 128 billones de toneladas, 50 veces más que en la Atmósfera; al estar en contacto la Atmósfera y la Hidrosfera, el CO_2 de ambas está en equilibrio dinámico. El mar actúa así como un gran reservorio para la Atmósfera: si aumenta el CO_2 atmosférico, tiende a disolverse en el mar hasta equilibrar las concentraciones, más exactamente, la tensión parcial en ambos medios; si disminuye en la atmósfera, el CO_2 marino se incorpora a la atmósfera hasta equilibrar las tensiones.

El 85% de este CO_2 marino se encuentra en estado de ión bicarbonato, y el 15% como ión carbonato, aproximadamente; sólo un 0'5% como CO_2 libre, disuelto. Al pensar en el trasiego del CO_2 entre la Atmósfera y la Hidrosfera, es fundamental considerar que el CO_2, como los gases en general, es más soluble en el agua fría que en la caliente.

Comportamiento del CO_2 en la Hidrosfera

Quiero añadir un nuevo punto de atención sobre esta materia, de la que se habla menos.

Es bien conocido, desde el siglo XIX, el comportamiento del CO_2 en nuestra sangre. La ecuación sumaria de la respiración nos dice que arrojamos a la Atmósfera el mismo volumen de CO_2 que el del O_2

que tomamos de ella. En los tratados de Fisiología Animal se pueden consultar los numerosos condicionantes del paso del CO_2 de la sangre a la Atmósfera, un proceso admirable, de cuya eficacia no podemos dudar.

En el ámbito de este trabajo, interesa señalar que el CO_2 se encuentra en nuestra sangre como gas disuelto, un 10%; como ión bicarbonato, un 70%; y como ión carbonato, un 20%. Son proporciones distintas a las que se encuentran en el mar, pero ésos son los valores que corresponden al equilibrio de las tres formas a la temperatura, pH y salinidad de la sangre, según las mismas leyes físico-químicas que regulan la presencia del CO_2 en los mares.

La sangre transporta constantemente a las células el oxígeno que necesitan; y recibe un continuo flujo de CO_2 procedente de la respiración celular. Ambos gases se intercambian con el aire atmosférico en los pulmones. Respecto al CO_2, el aire inspirado contiene actualmente un 0'0375%, mientras que el espirado, en reposo, contiene un 5'3%, 140 veces más.

La sangre se relaciona con el aire en los pulmones, separada de él sólo por el endotelio de los capilares y el de los alvéolos, que a veces no existe. A través de esa tenue membrana, los gases pasan del lugar de mayor tensión al de menor, por simple difusión. En el caso del CO_2, la tensión en la sangre es de 42-46 mm de Hg, mientras que la del aire alveolar es de 35-45 mm; en estado de reposo, se admite que es de 46 y 40 mm de Hg, respectivamente. Esta diferencia de tensiones nos puede parecer pequeña, pero es más que suficiente para lo que se pretende: se admite que una diferencia de 1 mm de Hg es suficiente para producir en los pulmones un trasiego de 1.000 ml de CO_2 por minuto, más de 1.500 veces la cantidad media normal.

El intercambio del CO_2 atmosférico y marino se hace por la superficie del mar, que es mucho mayor que los 361 Mkm^2 que indican los mapas: en las olas alborotadas, en las rompientes, en las playas, es inmensa la superficie de las gotas de agua que se pone en contacto con el aire.

He buscado estudios sobre los mecanismos de intercambio atmósfera-mar del CO_2, especialmente sobre la velocidad de este intercambio. Sigue siendo un punto oscuro, aunque he encontrado alusiones a que ese intercambio parece ser lento. De lo que estoy seguro es de que se hará según las leyes físicas de la difusión.

Subsistema 3º.- La Litosfera

La doctrina de la Tectónica Global es la base de la Geología moderna. Ha integrado en un todo armónico, lleno de significado, las múltiples teorías antiguas referidas a la Geodinámica Interna; como consecuencia, es la clave para comprender la Geografía, pasada y actual y, por lo tanto, para comprender la Climatología, pasada y actual.

El calor interno de la Tierra es la causa de los cambios en la situación de las tierras emergidas (la Deriva Continental); de la formación de cadenas montañosas (Orogenias); de los Terremotos, y de los Volcanes. En este trabajo, dada la limitación de su extensión, y su objetivo, que es el cambio climático, sólo atenderé a los Volcanes y, naturalmente, a la presencia de CO_2 en la Litosfera.

Volcanes

En efecto, los desplazamientos de las masas continentales y la formación de las cadenas montañosas se hacen a una velocidad tan lenta que sólo influyen en el clima, en general, a escala de millones de años, y los Terremotos influyen poco. Con esto, son los Volcanes el único aparato geológico de la Litosfera capaz de modificar el clima a corto plazo. El análisis de un solo ejemplo sirve para el objetivo de este trabajo.

En junio de 1991, el Pinatubo entraba en erupción, una erupción grande, pero no excepcional, en términos absolutos. Se desprendieron enormes nubes de cenizas y polvo volcánico, que alcanzó la Estratosfera, y allí se mantuvieron más de dos años. Estos aerosoles dejaron en la sombra extensas zonas de la Tierra, reflejando una parte de los rayos solares. El resultado fue un descenso de la temperatura media que se evaluó entre

0'3 y 0'5°C durante más de dos años. Nadie hubiese pronosticado que una erupción volcánica fuese capaz de anular, durante varios años, el calentamiento global producido en bastantes décadas.

Hay que concluir que nuestro conocimiento de los fenómenos atmosféricos y sus interacciones era, y sigue siéndolo, muy incompleto.

El CO_2 de la Litosfera

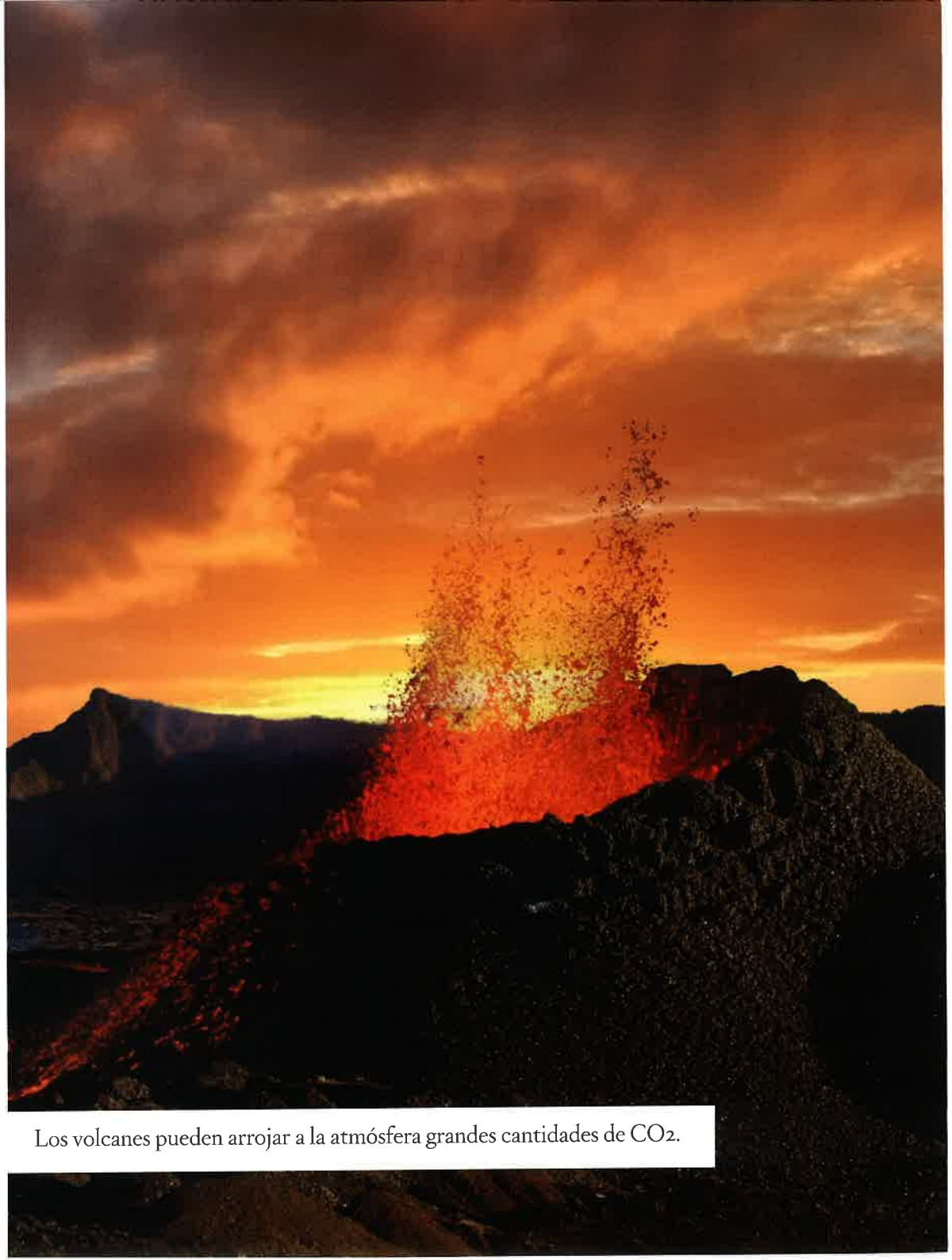
La caliza es la roca más abundante en la corteza terrestre, después del granito. Su componente fundamental es el carbonato cálcico, del que el CO_2 representa el 44% de su peso. Si observamos esos potentes estratos de caliza de las sierras de nuestra Comunidad y del resto de la llamada "España caliza", comprendemos que en la Litosfera existe una cantidad ingente de CO_2. En concreto, un km^3 de caliza contiene unos 1.080 Mtm de CO_2, del orden de 4 a 5 veces más que el emitido en España anualmente por el consumo de combustibles fósiles.

Ese CO_2 de las calizas no se queda indefinidamente en forma de carbonato. Existen varios procesos geológicos que lo hacen cambiar. Sólo señalo dos de ellos: la disolución por las aguas meteóricas, y la descomposición por el calor.

En efecto, el agua de lluvia, cargada de CO_2, transforma el carbonato cálcico, apenas soluble, en bicarbonato, más soluble, y lo arrastra: es lo que han hecho las aguas de nuestra Comunidad, que son, como bien sabemos, bastante calizas. Ese bicarbonato pueden depositarlo en la Litosfera en forma de carbonato (estalactitas, concreciones calcáreas): en ese caso devuelven a la a la Atmósfera el CO_2, que le habían tomado; o bien, pueden arrastrarlo hasta el mar.

En este caso, cuando se alcancen las condiciones adecuadas, es posible que se depositen en forma de carbonato.

Otra forma de descomponerse los carbonatos es por el calor: es lo que hacen los rayos al caer en nuestras montañas, y nosotros en los hornos de cal. A escala geológica, es lo que ocurre en la subducción de una



Los volcanes pueden arrojar a la atmósfera grandes cantidades de CO_2.

placa litosférica bajo otra, al alcanzar la temperatura precisa: se forma magma, volcanes, y éstos arrojan a la Atmósfera grandes cantidades del CO_2 desprendido de las calizas.

En suma, de la Litosfera puede pasar a la Atmósfera una gran cantidad de CO_2. Volveremos sobre este punto en el Apéndice de este capítulo.

Subsistema 4º.- La Biosfera

La Vida es la mayor singularidad del planeta Tierra. El conjunto de los seres vivos integramos la Biosfera.

La materia orgánica, en su casi totalidad, está formada por compuestos de carbono (prótidos, lípidos y glúcidos) y por agua. Se admite que un gramo de C origina 2'4 g de materia orgánica seca y, en general, unos 5-24 g de materia fresca, margen muy amplio, pero sucede que es muy variable el contenido de agua en los tejidos. Nosotros estamos compuestos en un 70% por agua: un 10% los dientes, un 85% el cerebro, que es más rico en agua que la sangre.

Se estima que la masa de la Biosfera es de unos 500-700 x 10^{15} g de C, es decir, de 500.000 a 700.000 Mtm de C.

La masa de materia orgánica muerta se estima que es ocho veces mayor que la masa de la materia viva, y en su mayor parte está constituida por celulosa, que es también la sustancia orgánica más abundante en la Biosfera.

Para el caso de la especie humana, 6.500 millones de personas, de un peso medio inferior a 40 kg, su masa sería de unos 250 Mtm, es decir, la masa del agua de un pantano mediano; o, de otra forma, cabríamos en un contenedor cúbico de menos de 630 m de lado. Puestas todas las personas a 1 m de distancia de las circundantes, sólo cubriríamos algo más de la mitad de la provincia de Valencia; pero en línea, cogidos de la mano, daríamos más de 175 vueltas a la Tierra.

La especie humana representa unas 50 millonésimas partes de la masa de la Biosfera.

La Biosfera influye decisivamente en varios procesos climáticos. Vamos a considerar el inmenso trasiego del ciclo fotosíntesis-respiración; su participación en el vertido y sumidero de CO_2; y la modificación del albedo terrestre. Me refiero en este capítulo al conjunto del Reino Animal y del Reino Vegetal, pero nunca debemos olvidar el papel de la especie más singular de la Biosfera, que somos nosotros.

El ciclo Fotosíntesis-Respiración

La Biosfera, el Sistema Vida, es un sistema abierto, material y energético: toma materia y energía del medio, y vierte al medio materia y energía. Cada ser vivo, y cada célula, son también un sistema abierto material y energético.

Es admirable que la práctica totalidad del trasiego material y energético de la Biosfera tenga lugar en dos procesos bioquímicos de carácter universal: la Fotosíntesis y la Respiración. Las plantas verdes, con la Fotosíntesis, transforman la materia mineral en materia orgánica, incorporándole la energía, que toman de la luz solar: son seres autótrofos, "que se nutren por sí mismos"; en el ecosistema global, son los "productores". Los demás seres vivos somos los heterótrofos, los "que se nutren de otros", de los que tomamos la materia y la energía que contiene; en el ecosistema, somos los "consumidores".

La Respiración es un proceso de significado biológico inverso a la Fotosíntesis: todos los seres vivos, plantas y animales, oxidamos, quemamos la materia orgánica que han fabricado las plantas verdes,

y obtenemos de ella la energía que necesitamos para nuestras funciones vitales. Es admirable que todos los seres vivos, desde bacterias hasta nosotros, lo hagamos de la misma manera.

El balance de estos procesos se expresa en las conocidas ecuaciones sumarias

de la Fotosíntesis: $6CO_2 + 6H_2O + 674\ \text{KCAL} \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$

y de la Respiración: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 674\ \text{KCAL}.$

Vemos que resultan inversos, aunque el cúmulo de reacciones que se compendian en cada caso es totalmente diferente.

He calificado de "universales" a estos dos procesos. No lo son en sentido estricto, porque existe la Quimiosíntesis, como proceso que incorpora energía a la materia mineral, y las Fermentación, como proceso que libera energía de la materia orgánica; pero estos procesos son mucho menos importantes cuantitativamente, y no tienen importancia climática.

Fotosíntesis, Respiración y CO_2

El CO_2 se halla en la atmósfera, y se disuelve en las aguas. Durante la segunda mitad del siglo XX, se ha admitido que la cantidad de carbono inorgánico transformado en orgánico por la fotosíntesis mundial es de unos 66.000 millones de toneladas al año: algo menos de 30.000 en los continentes, y algo más de 36.000 en los océanos. Creo que estas cifras necesitan una actualización, pero las voy a utilizar, porque son las que he manejado desde hace 50 años, y son suficientes para los objetivos de este trabajo.

La siguiente tabla recoge la distribución de la Fotosíntesis en el mundo.

Producción en la biosfera - Fotosíntesis			
	Producción neta anual (g C/m²)	Extensión (10^6 km²)	Producción anual (10^6 tm C)
Bosques	400	41	16.400
Cultivos	350	15	5.250
Estepas y Pastos	200	30	6.000
Desiertos	50	40	2.000
Rocas, hielos, ciudades	0	22	0
Tierras		148	29.650
Océanos	100	361	36.100
Aguas Continentales	100	1,9	190
Aguas		362,9	36.290
TOTAL			65.940

Para esta función, las plantas verdes descomponen anualmente unos 242.000 Mtm de CO_2: un 55% en el mar, y un 45% en los continentes. Es el CO_2 que desprenderían 80.000 Mtm de combustibles fósiles, 8 veces más de lo que consume el mundo anualmente. Sólo un 8% de esta absorción de CO_2 se realiza en los cultivos terrestres.

La Respiración es el proceso inverso, en materia y en energía, a la síntesis biológica; por lo tanto, desprende tanto CO_2 como había consumido aquélla. En principio, dada la estabilidad de la Biosfera, hay que considerar ambos procesos de la misma magnitud material; aunque existen derivaciones de ambos, no influyen en el clima.

El caso del Hombre

El Hombre, como ser vivo que respira, emite CO_2, que lo podemos considerar dentro del ciclo fotosíntesis–respiración; pero ahora somos más de 6.500 millones de humanos respirando, y la cantidad de CO_2 que emitimos alcanza un valor importante, que va en aumento.

En efecto, los 150 millones de humanos del comienzo de la Era Cristiana, eran 500 M en el s. XVI, y 1.000 M a comienzos del s.XIX, pero ya eran 1.600 M en 1900, 3.000 M en 1960, y 6.000 M en 1999, en acusada progresión geométrica. En relación con el tema que nos ocupa, digamos, como curiosidad, que los 6.500 M de humanos de 2007 vamos a verter a la atmósfera el CO_2 equivalente al de la combustión de unos 340 Mtm de combustibles fósiles.

Ahora bien, desde que el hombre utilizó el fuego, emite a la atmósfera un CO_2 adicional al de su respiración. Hasta el siglo XVIII, mientras se quemaba sólo madera, se puede considerar esa emisión, prácticamente, dentro del ciclo fotosíntesis–respiración; pero con el uso del carbón mineral se iniciaba un cambio significativo en las emisiones de CO_2. En 1859, con la perforación del primer pozo de petróleo, se abría otra fuente de CO_2. Luego se incorporaría el gas natural, ahora en pleno desarrollo.

Son muy aleccionadoras las cifras de la variación histórica del uso de los combustibles fósiles: en 1.800 se producían 20 Mtm de carbón al año, de ellas 18 Mtm en Inglaterra; eran 30 Mtm en 1830, pero se llegaba a 125 Mtm en 1860, y a 512 Mtm en 1890. En cuanto al petróleo, las 67.000 toneladas de 1860 eran ya 20 Mtm en 1900. En 1913, poco antes de la I Guerra Mundial, se producían 1.388 Mtm de carbón y 57 Mtm de petróleo.

Actualmente, se queman, aproximadamente, unos 10.000 Mtm de combustibles fósiles al año (4.500 Mtm de carbón, 3.750 Mtm de petróleo, 1.730 Mtm de gas natural), que arrojan unos 30.000 Mtm de CO_2 a la atmósfera.

Una última consideración sobre el CO_2 en relación con el Hombre. Ya que la mayoría de los humanos, en las naciones civilizadas, trabajan en locales cerrados, ha sido necesario regular las condiciones del aire (gases, humos, polvo) en estos locales. Respecto al CO_2, la legislación sanitaria española fija el límite en el 0'5% para la jornada de 8 horas, una concentración 13 veces superior a la atmosférica; en el 1'5% para una permanencia de 15 minutos en esa concentración, 40 veces superior a la normal; el límite absoluto, en el que se prohíbe el trabajo, es del 3%, 80 veces más que el aire normal.

El albedo de las plantas

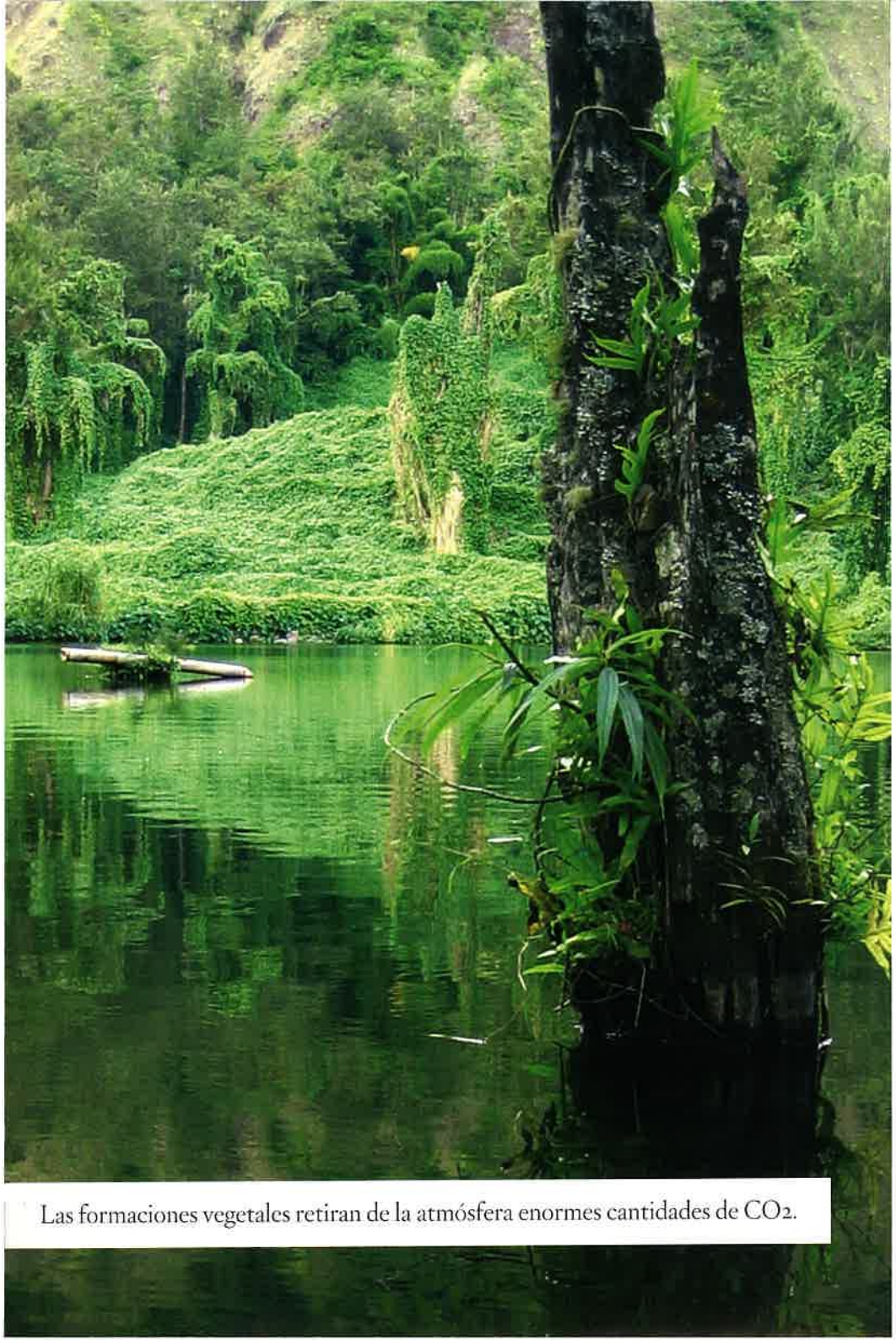
Si se observa con detenimiento el paisaje, se advierte la gran diversidad de los tonos de verde: se puede decir que no hay dos plantas que tengan igual color verde. Esto mismo se puede decir de los bosques y de las formaciones vegetales en general

La selva tropical y los bosques de coníferas, de color verde oscuro, tienen un albedo del 13%, que es bajo. El del bosque de eucaliptus, más claro, tiene un 18%. La hierba, los pastos, los cultivos, tienen un albedo del 16-26%, según su tono, y según la época del año, porque es frecuente que el albedo de las formaciones vegetales tenga variaciones estacionales importantes. Así, en nuestras latitudes, podemos observar los diferentes aspectos de los bosques caducifolios, o del pasto, verde o amarillo, tanto más distintos cuanto más acusada sea la variación estacional.

Traeré el ejemplo de nuestros naranjos: en primavera tienen un mayor albedo, por las hojas nuevas, más claras, y por el azahar; siguen unos seis meses con mínimo albedo, con las hojas oscuras y las naranjas verdes; luego el albedo aumenta, cuando están cubiertos de naranjas coloreadas; y, finalmente, de nuevo una disminución del albedo, hasta los brotes nuevos y la floración.

Con tantas variaciones, sería difícil el estudio global del albedo, y así lo ha sido hasta que se han utilizados los satélites y la teledetección.

A las variaciones del albedo vegetal propiamente dicho se suman las variaciones del albedo del planeta por otros factores, como son la nieve (tundra verde en verano, nevada en invierno), las nubes (pluvisilva, gran parte del tiempo cubierta de nubes) o la presencia de diversos aerosoles.



Las formaciones vegetales retiran de la atmósfera enormes cantidades de CO_2.

La importancia del albedo está en la gran cantidad de calor que es reflejado al espacio, antes de intervenir en el sistema climático terrestre.

APÉNDICE: EL CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL CO_2

Al CO_2 atmosférico se alude constantemente cuando se habla del calentamiento global: porque se le considera el mayor responsable del calentamiento actual; porque ha alcanzado una concentración en la atmósfera que es la mayor medida en cientos de miles de años; y porque los hombres estamos añadiendo cada año a la Atmósfera un 1% del CO_2 que ya tiene.

Este dato podría no ser preocupante si ese CO_2 añadido pasase pronto de la Atmósfera al mar, su destino más lógico e inmediato, o a las plantas. Pero no es así: la mayor parte del CO_2 que hemos arrojado a la Atmósfera en el último siglo y medio, se ha quedado en ella. Durante el siglo XX, ha pasado de ser el 0'03% del aire a ser el 0'0375%, con un aumento del 25%. En valores absolutos, la cantidad de CO_2 en la atmósfera ha pasado de los 2'2 billones de toneladas que tenía en 1860 hasta 2'86 en 2000; el aumento ha sido de 560.000 Mtm durante el siglo XX.

Éste es un dato del mayor interés, porque esa cifra se aproxima, aunque no llega, a la cantidad de CO_2 que hemos arrojado los hombres a la Atmósfera durante este siglo, sobre todo por la quema de combustibles fósiles, y eso significa que seguirá aumentando en la Atmósfera si continúa nuestro sistema productivo de energía actual, pero también que los otros subsistemas de la Tierra han aumentado su absorción de CO_2, aunque no sabemos cuánto lo ha hecho cada uno.

En el análisis expuesto en los cuatro subsistemas climáticos, he pretendido dejar constancia de que el CO_2 de la Atmósfera llega a ella y se retira de ella por varios procesos químicos, biológicos y geológicos, que englobo en el concepto de "ciclo biogeoquímico". El resultado final es un enorme trasiego de CO_2 entre los cuatro subsistemas climáticos.

Es decir, existe un "Sistema CO_2" en el mundo, cuyo estudio técnico cae fuera del ámbito de este trabajo; pero sí debo resaltar su importancia, porque está en el núcleo del intercambio material y energético del "Sistema Vida".

Los vaivenes del CO_2 tienen características muy diferentes. El intercambio más constante se da por la absorción y emisión de CO_2 por parte de la Biosfera con la Atmósfera y la Hidrosfera; el más llamativo, una emisión volcánica en muy poco tiempo; el más largo, la liberación del CO_2 de los estromatolitos calizos en los que está desde hace 3.500 Ma. También largo es el tiempo que ha pasado desde que las plantas del Carbonífero, hace 300 Ma, retiraran de la Atmósfera el CO_2 y formaran los hidratos de carbono, que luego se transformaría en carbón, para que ahora lo quememos y devolvamos a la Atmósfera el CO_2 que lo originó.

No es ocasión de analizar los detalles interesantes del trasiego del CO_2 en nuestro Planeta, pero hay un concepto que ha de estar presente al ocuparnos de él: que el CO_2 atmosférico es una parte ínfima del que existe, en forma actual o potencial, en la Tierra. Muy poco está en forma libre; una parte mucho mayor está en equilibrio con él, y puede fácilmente liberarse; la inmensa mayor parte requiere procesos muy largos para llegar a ser atmosférico. Pero todas esas formas de CO_2 son piezas del mismo sistema, y así hay que considerarlas en un estudio global del mismo.

CAP. 2º.- OSCILACIONES CLIMÁTICAS EN LA HISTORIA DE LA TIERRA

El clima ha presentado grandes oscilaciones, conocidas de antiguo a gran escala (decenas o cientos de millones de años), y cada vez mejor conocidas a escala menor, pero siempre grande, de millones de años; sólo en la época más reciente podemos precisar los cientos de miles o las decenas de miles de años en los tiempos próximos al nuestro. En la actualidad, la Paleoclimatología está en pleno desarrollo, y constantemente aporta hallazgos interesantes.

Señalo en este capítulo algunos de estos cambios climáticos anteriores a la presencia del Hombre en nuestro planeta.

Oscilaciones antiguas

De manera muy esquemática, sin analizar los datos, sólo presentándolos, podemos decir que el clima de la Tierra fue cálido hasta hace menos de 2.500 Ma, cuando se produjo una gran glaciación, que duró 400 Ma. Siguió un largo período cálido, hasta hace menos de 1.000 Ma, al que sucedieron tres nuevas glaciaciones de 50, 90 y 60 Ma, hasta hace 580 Ma; en este tiempo se produjo el máximo enfriamiento detectado en la Tierra: nuestro planeta llegó a ser, prácticamente, una bola de hielo. Se produjo entonces una gran extinción de las formas de vida, que eran todas marinas y unicelulares.

Las condiciones cambiaron ya durante el final del período glacial, y en el mar aparecieron seres pluricelulares variados, sin esqueleto: es la llamada "fauna de Ediacara", con nombre de la localidad australiana en la que se encontró por primera vez, luego han seguido otras.

La Era Primaria

Por fin, hace 540 Ma, con los mares ya cálidos, empieza una espléndida eclosión de la vida: Espongiarios, Celentéreos, Braquiópodos, Anélidos, Artrópodos, Moluscos, Equinodermos, con muchas formas de tipo actual y otras ya extinguidas, que aparecen en pocos millones de años y se diversifican prodigiosamente durante el Cámbrico (40 Ma), el primer período de la Era Primaria. Hoy decimos que todos estos invertebrados, en su evolución, fueron adquiriendo la dotación enzimática necesaria para formar esqueletos silícicos o calcáreos. Con esto, la Paleontología y sus Ciencias complementarias, en concreto la Paleoclimatología, disponen de abundante documentación fósil.

Al Cámbrico le sigue el Ordoviciense (65 Ma), período en el que continúan las condiciones cálidas semejantes a las del Cámbrico, con gran diversificación de muchos grupos de invertebrados, y en el que

aparecen los vertebrados con esqueleto, aunque es probable que existiesen anteriormente formas de vertebrados sin esqueleto. Los continentes no tenían vida, sólo sus aguas, y se conservan huellas de dunas desérticas.

El final del Ordoviciense, sus últimos 20 Ma, registran un cambio total del clima: se produce una glaciación. Como consecuencia, baja la temperatura de los mares, y se produce la primera gran extinción de animales marinos, que afectó a más de la mitad de las especies vivientes.

La glaciación se produjo porque se acumularon en las proximidades del Polo Sur las placas del continente de Gondwana: Suramérica, África, Madagascar, India, casi toda la Antártica y buena parte de Australia estaban en el Hemisferio Sur, también la placa ibérica; el Polo estaba situado en el Sáhara. Al comienzo del Silúrico (30 Ma), el clima volvía a ser cálido, como en la primera parte de la Era Primaria.

En el Silúrico se registran las primeras plantas continentales, que prosiguen su desarrollo en el Devónico (50 Ma), con la aparición de las Criptógamas fibrovasculares (Helechos y Licopodios, sobre todo), y las Gimnospermas al final del período.

También en el Devónico encontramos los primeros Tetrápodos, los Anfibios. Su origen se ha asociado a un cambio climático, cuando los Peces Óseos de las aguas continentales vieron convertirse muchos de sus ríos en una serie de charcas durante la estación seca. Fue entonces cuando algunos de ellos, los Crosopterigios, modificaron sus aletas pares, el "pterigio", y las hicieron más robustas y alargadas, más aptas para arrastrarse en busca de la próxima charca: apareció así el "quiridio" que, ya en los Anfibios, tuvo la constitución de nuestras extremidades. Nacía así un órgano de enormes capacidades evolutivas en el desarrollo de los Tetrápodos.

Al final del Devónico se produce un gran cambio climático en la Tierra. Por una parte, las placas continentales se aproximan y acabarán formando un único continente, la Pangea II, situada en su mayor parte en el Hemisferio Sur: con eso se favorece una gran glaciación, que durará 100 Ma, con altibajos glaciares semejantes a las glaciaciones cuaternarias, pero más duraderos; se señalan unos 40.

Por otra parte, en las tierras de la zona ecuatorial, cálidas y húmedas, se desarrolla durante el período Carbonífero (75 Ma) una espléndida vegetación de Criptógamas fibrovasculares y de Gimnospermas, que se continúa en el período siguiente, el Pérmico (40 Ma). Estas plantas, con su función clorofílica, logran retirar de la Atmósfera una ingente cantidad de CO_2, que se nos ha conservado en forma de carbón, por un proceso bien conocido, ya que tiene lugar también en la actualidad, en las turberas. Se estima que un metro de restos vegetales, casi todos celulosa, ($C_6H_{11}O_5$), van perdiendo el hidrógeno y el oxígeno, enriqueciéndose en carbono, hasta más del 80%: un metro de restos vegetales dará un centímetro de carbón.

Además de la retirada de CO_2 por las plantas, se produce en los mares, en las plataformas continentales, grandes depósitos de carbonatos, con la consiguiente dificultad de pasar el CO_2 de los mares a la Atmósfera: como resultado de ambos procesos, se estima que el CO_2 atmosférico se redujo a la décima parte, alcanzando al final del período una concentración similar o algo inferior a la actual.

La Era primaria se cierra con una gran orogenia, el Plegamiento Herciniano; y con la mayor extinción en la historia de la Biosfera: desaparecen el 95% de las especies marinas, y el 75% de las terrestres. No se ha encontrado una explicación a este hecho que, además, no fue brusco, y estuvo acompañado de la desertización de grandes zonas de los continentes. No lo podemos analizar en este trabajo, pero parece que la clave hay que buscarla en la Paleoclimatología, no en ninguna catástrofe cósmica.



La vegetación exhuberante del carbonífero nos ha proporcionado el carbón que ahora quemamos.

La Era Secundaria

Es una larga época, 180 Ma, considerada antiguamente como de tranquilidad geológica, ya que en ella no se producen orogenias; pero hoy sabemos que durante esta época prosiguió la separación de las placas de la Pangea II, lo que implica grandes márgenes de acreción y de subducción, y la formación de numerosos volcanes.

Los agentes geológicos externos denudaron el relieve de las orogenias anteriores, y cubrieron de sedimentos mares interiores, plataformas continentales y geosinclinales, que luego serían plegados en la Orogenia Alpino-Himalaya. La ausencia de casquetes glaciares polares, la denudación del relieve, y la colmatación de muchas cuencas, hizo subir el nivel del mar varios cientos de metros; en la gran transgresión mesocretácica, hace 100 Ma, muchos millones de km^2 de los continentes fueron cubiertos por las aguas.

La Era Secundaria se inició en el Trásico (37 Ma) con un clima cálido pero seco, para continuar haciéndose cada vez más lluvioso, lo que propició el desarrollo de la vegetación continental y de la fauna en el Jurásico (62 Ma) y Cretácico (81 Ma). Es llamativo el desarrollo de los Reptiles en todos los biotopos, lo que le ha valido el apelativo de "Era de los Reptiles".

La temperatura de la Atmósfera y de la Hidrosfera alcanzó el máximo valor en la historia de la Tierra. Se estima que la temperatura media del Planeta, que ahora es de 15°C, pudo estar entre los 20 y los 24°C; pero hay que precisar que debió ser poco superior a la actual en el trópico, pero muy superior, progresivamente, en las latitudes medias y altas, hasta llegar a ser más de 30°C superior a la actual en los polos, como se expresa en la fig. 2. Así ocurre también con la temperatura de los océanos en las latitudes medias y altas. Eso explica que se encuentren dinosaurios en latitudes en las que hoy no pueden vivir los reptiles.

No hay signos de glaciaciones en esta época.

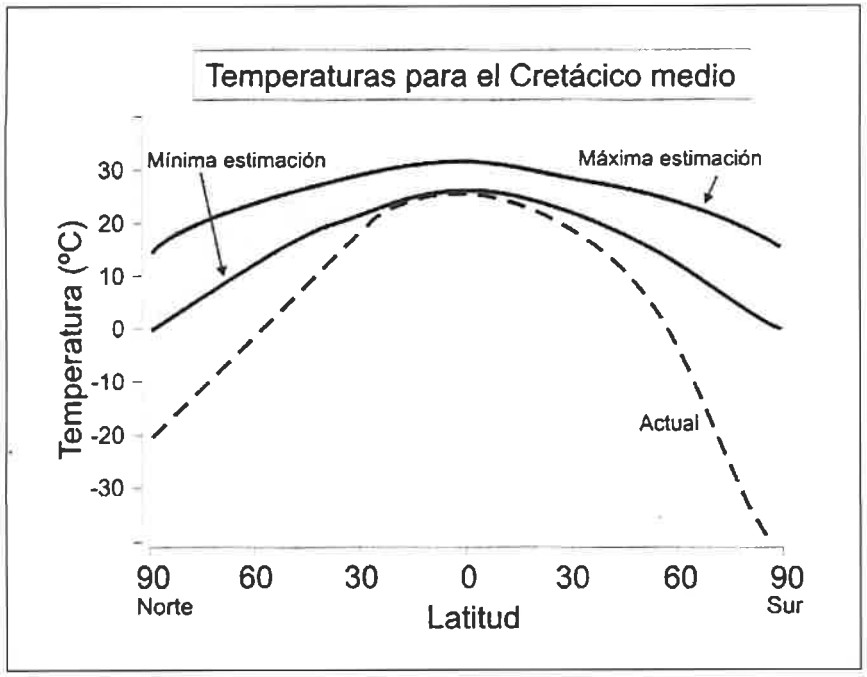


Fig. 2.

La gran extensión de los mares superficiales, la alta pluviosidad y escorrentía, la temperatura alta, y el gran desarrollo de la vegetación y del plancton, fueron las condiciones ideales para la formación de los sapropeles que originaron el petróleo, en su mayor parte de origen cretácico.

A pesar de la ingente función clorofílica, en la Atmósfera se alcanzaron valores de CO_2 similares a los de comienzos del Carbonífero, unas diez veces superiores a los del Cuaternario, a causa, probablemente, de las grandes emisiones volcánicas; y en los mares someros se depositaron enormes cantidades de calizas, que luego se plegaron en el Terciario. Toda nuestra Comunidad es muestra de ello.

Al final de esta época se produjo una gran extinción, le segunda más importante en la historia de la Biosfera, superior al 50% de las especies vivientes, cuya causa es un tema apasionante, aún sin decidir. Es probable que, en su fase final, se agudizase por la caída de un gran meteorito.

La Era Terciaria

Comienza hace 65 Ma, y en ella, mejor conocida por la proximidad en el tiempo, tienen lugar muchos acontecimientos geológicos que condicionaron nuestra época. Nos fijamos en los más relacionados con las variaciones climáticas.

Lo más llamativo de esta Era son los movimientos de las placas litosféricas. Unas placas se acercan y colisionan, plegando los geosinclinales: es la gran Orogenia Andino-Alpino-Himalaya, que forma las mayores montañas actualmente existentes; en España se originan los Pirineos, la Cordillera Ibérica y la Penibética. Otras placas se separan: se sigue abriendo el Atlántico, y se separa la Antártida de Australia, África y América del Sur.

Este hecho es el comienzo de una gran alteración climática: al perder la Antártida su conexión con Australia y, posteriormente, con Suramérica, se forma una corriente circumpolar que aisla el continente de las aguas oceánicas cálidas, y permite la formación de un gran casquete polar, que aún continúa. Esto empieza ya en el Eoceno, y se consuma en el Mioceno, hace 25 Ma.

Por otra parte, la formación de las grandes cadenas montañosa y la elevación de extensas altiplanicies diversifica mucho los climas; el antiguo Mar de Tetys, luego golfo, se convierte en el Mediterráneo; y se forma el Istmo de Panamá entre ambas Américas, que cierra las corrientes marinas entre el Pacífico y el Atlántico. Con todo ello, se acusa mucho más la estacionalidad en las latitudes medias, y la Tierra inicia una época de enfriamiento, en la que aún estamos, que culminó en las glaciaciones cuaternarias.



Recosntrucción del ecosistema de la Rioja durante el Cretácico inferior. El Clima muy cálido de aquella época favoreció el llamativo desarrollo de los reptiles.

Por afectar a nuestro entrañable "Mare Nostrum" aludiré, como ejemplo de evento climático, a la desecación del Mediterráneo, ocurrida hace 6 Ma: el plegamiento de la Penibética y del Rif de Marruecos cerraron la estrecha comunicación que aún quedaba entre el Atlántico y el Mediterráneo, convirtiéndolo en un lago, que se desecó, depositando en el fondo la sal de sus aguas.

Me apresuro a decir que esto no fue lo que se entiende de inmediato: la cantidad de sal depositada fue muy superior a la que contenían las aguas del Mediterráneo, parece que unas 30 veces más. Entonces, como ahora, el Mediterráneo estaba situado entre tierras áridas, sometido a una intensa evaporación, que no compensaban las precipitaciones y la escorrentía de los ríos. Actualmente existe una corriente superficial por el Estrecho de Gibraltar que compensa este exceso de evaporación.

Ahora bien, esto llevaría a una salinización progresiva, al evaporarse agua dulce y reponerse con agua salada; eso no se produce, porque existe otra corriente por el Estrecho del Mediterráneo al Atlántico, ésta profunda, de agua más salada y de volumen menor que la superficial. No obstante, el Mediterráneo mantiene una salinidad 6% superior a la del Atlántico.

Puede que sea más correcto decir que el Mediterráneo "se estuvo desecando" que decir "se desecó". Durante mucho tiempo estuvo entrando agua salada, quizás intermitentemente, que no salía de la cuenca y se evaporaba en ella. Desde luego, en un millón de años, el Mediterráneo fue un lago de aguas que habían llegado a la saturación de sal, como una inmensa salina, en cuyo fondo se depositó tanta sal como si se hubiese secado treinta veces ese mar. Incluso se ha apreciado que esa precipitación de sal pudo hacer que bajara la salinidad de los mares en un 2%.

Con la extinción de los Dinosaurios y la diversificación de los biotopos, encuentran los Mamíferos la oportunidad que necesitaban desde hacía más de 100 Ma, y se diversifican extraordinariamente en pocos millones de años: es la "Era de los Mamíferos". Actualmente son la fauna

dominante de los continentes, pero no son tan variados como en la primera mitad de la Era.

Sólo citaré aún un evento climático, por la trascendencia que habría de alcanzar.

En el último tercio de la Era, una extensa pluvisilva se extendía por el África tropical: era el biotopo ideal de los Simios, los más evolucionados de los Primates. Se produjo entonces una actividad tectónica que ocasionó la formación del valle del Rift y la elevación de las mesetas del África Oriental, lo que hizo cambiar la banda de pluvisilva tropical, que ya no recibía la humedad del Índico, sólo la del Atlántico. El biotopo evolucionó hacia sabana, diferenciándose notablemente: sabana más húmeda, con manchas arbóreas en las zonas llanas, y sabana más seca, incluso esteparia, en las altas mesetas, que mantenían el bosque en las laderas de orientación favorable. Los Simios, los Antílopes y los Carnívoros colonizaron estos biotopos que iban apareciendo, como otros muchos animales y plantas.

En este contexto climático, geológico y biológico, algunos monos antropomorfos, Póngidos, posteriores a los gorilas, pero anteriores a los chimpancés, desarrollaron una adaptación novedosa: el bipedismo. Primariamente parece una adaptación locomotora favorable, pero conlleva otras posibilidades evolutivas que acabarán siendo mucho más ventajosas: liberación de la mano de la función locomotora, con lo que podrá obtener una gran riqueza de movimientos; adquisición de la postura erecta, con mejor campo visual; y facilidad para el crecimiento del cerebro.

Se repetía así un proceso evolutivo comparable al que había dado origen a los Tetrápodos 400 Ma antes.

Con eso se llegaría a los Homínidos, que fueron bastante variados, hoy reducidos a un único Género y a una única Especie, el *Homo sapiens*, nosotros.

PARTE 2ª.- EL HOMBRE COMO TESTIGO

Evolución del Hombre

La evolución que ha llevado hasta el Hombre nos es bastante bien conocida. La resumo por el interés que tiene para nosotros y por su relación con el clima del pasado, aunque no es objeto central de este trabajo.

En las sabanas de la región centro-oriental de África encontramos, desde hace más de 4 Ma, un grupo variado, los Australopitecos, que ya han adquirido el bipedismo, pero no las proporciones humanas: eran semejantes en la talla a los chimpancés, de unos 40 kg de peso, con los brazos aún bastante largos, dentición de tipo humano primitivo, y con un cerebro semejante al de los chimpancés. Forman parte de la familia de los Homínidos, con rasgos evolutivos comunes con los humanos, pero no han cruzado el umbral de la hominización. No fabricaban instrumentos. Coexistieron con los humanos bastante tiempo, ya que se extinguieron hace un millón de años, después de extenderse por extensas áreas del África Central, Oriental y del Sur.

Los primeros instrumentos atribuibles al Hombre se han encontrado en Etiopía, y datados en 2'5 Ma. Su autor, probablemente, fue el *Homo habilis*, presente en el registro fósil del África Central y Oriental entre 2'3 y 1'6 Ma: bípedos, con brazos más cortos que los Australopitecos, dentición más moderna, y encéfalo un 20% mayor, lo cual es una diferencia notable, porque supone un cerebro bastante mayor, ya que el cerebelo y bulbo raquídeo son semejantes. Sus instrumentos líticos, del Modo Técnico I, les daban, no obstante su sencillez, unas innegables ventajas.

Dio origen al *Homo ergaster*, de proporciones somáticas como las del hombre actual, con un encéfalo inicial de 800 c.c., que llegará a ser de 950 c.c. en las formas más modernas. Se extiende por gran parte de África, desde 1'8 Ma, y alcanza Eurasia muy pronto, con fósiles en el Caúcaso (1'7 Ma), Italia (800.000 años) y Atapuerca, en el mismo tiempo. Es autor de una industria más evolucionada, de bifaces, presente en muchos yacimientos europeos, conocida ahora como Modo Técnico



El yacimiento de Atapuerca nos ofrece la mayor variedad de fósiles humanos de Europa.

II, que es la antigua industria acheulense. Para los restos de Atapuerca, más evolucionados, se ha propuesto el nombre de *Homo antecessor*, al considerarlo origen del *Homo sapiens*, no del de neandertal. Esta opinión aún no se ha generalizado.

El *Homo ergaster* se extendió también por Asia y la Insulindia: son los célebres pitecántropos, el *Homo erectus*, que se ha mantenido allí hasta época tardía, con una industria bastante primitiva, sin bifaces, aunque modernamente ha sido interpretada como del Modo Técnico II.

Llegamos a las dos especies humanas más conocidas, son el *Homo neanderthalensis* y el *H. sapiens*, especies distintas, según la opinión mayoritaria actual; ambas son objeto de múltiples discusiones, que no tienen cabida en este trabajo. Se originaron en África.

El Hombre de Neandertal se conoce en África desde hace 600.000 años; luego se extendió por Eurasia hasta la India. Los "neandertales clásicos" son los europeos, que se encuentran desde hace 130.000 años. Eran semejantes a nosotros en la talla, pero más corpulentos, es decir, con menor superficie cutánea para la misma masa corporal. Este rasgo, y la presencia de un tracto buco-nasal y faríngeo más largo y de mayor volumen, que permitía humedecerse y calentarse el aire antes de entrar en los pulmones, se interpretan como una adaptación al frío de esa época glaciar. Tenían una capacidad craneana algo mayor; son autores de la industria musteriense, el Modo Técnico III, más complejo, para cuyo aprendizaje, según algunos, era necesario el uso del lenguaje. Era cazador y recolector, vivía en grupos y usaba el fuego

Aunque algunos investigadores ven en sus actividades signos de poseer una inteligencia simbólica, no es la opinión más generalizada.

No es antecesor del hombre moderno, pero parece que tuvo algún intercambio cultural con los cromañones durante sus 10.000 años de convivencia en Europa, y algunos autores creen también posible algún intercambio genético. Sus últimas poblaciones se extinguieron en nuestra Península, al sur del Ebro, hace 30.000 años.

El Hombre moderno, el *Homo sapiens*, tuvo su origen en África hace 200.000 años. Se le encuentra en Oriente Medio hace 100.000 años,

y de allí se extendió por Asia y llegó a Australia y Oceanía hace 60.000 años; por el Estrecho de Behring alcanzó América hace 10.000 años. Todos los grupos humanos conocidos en la Historia pertenecen a esta especie.

Llegó a Europa hace 40.000 años, en plena glaciación würmiense; aunque los "cromañones" eran menos robustos y estaban peor adaptados al frío que los neandertales, se impusieron a ellos por su tecnología, muy superior; y por su cultura, fruto de una inteligencia productora de variados símbolos: ritos (de caza, funerarios), adornos, Arte y, sin duda, lenguaje. El Arte paleolítico proporciona, además, datos paleozoológicos interesantes: las 50 especies figuradas (mamuts, elefantes, rinocerontes, leones, bisontes, renos, antílopes), en parte ya no existen, o no existen donde las representó el Hombre.

CAP. 3º.- LAS GLACIACIONES DEL CUATERNARIO

Tras esta sucinta exposición de nuestra historia paleontológica, vuelvo al tema de este trabajo: el clima en que vivió el Hombre antiguo; en concreto, al fenómeno climático más característico del Cuaternario, que son las glaciaciones, en las que aún estamos.

Las glaciaciones cuaternarias

Estas glaciaciones son muy llamativas; en 50.000 años, el clima de una región cambia de ser cálido a ser muy frío, para volver a ser cálido 50.000 años después, alternancia que se ha repetido 4 veces en los últimos 420.000 años; pero lo que nos impresiona son las consecuencias de estas oscilaciones. Sabemos que hace 225.000, vivían en el Guadalquivir los hipopótamos, y también en el Rin y en el Támesis, mientras que unas decenas de miles de años después, los renos ocupaban casi toda Europa, incluida la parte Norte de la Península ibérica; hace 14.000 años, el glaciar del Ródano, que ahora tiene 8 km, llegaba hasta cerca de Lyon, a 300 km, y su lengua, encajada en el valle antes de llegar al lago de Ginebra, tenía un espesor en vertical de 1.500 m; en ese tiempo el nivel del mar había bajado 140 m, ya que una enorme masa de hielo cubría Escandinavia, Groenlandia y el Canadá.

Desde mediados del siglo XIX se conoce la sucesión de las cuatro grandes glaciaciones del Cuaternario que han afectado a Centroeuropa; luego se ha sabido que afectaron a toda la Tierra; que fueron precedidas, desde hace 720.000 años, por otras cuatro, mucho menos acusadas; y se han hecho múltiples estudios sobre ellas: unos, para encontrar sus causas; otros, para determinar su amplitud, y su relación con otras muchas observaciones paleoclimáticas que se han ido produciendo.

Sobre sus causas, el serbio M. Milankovich expuso en 1920 la teoría que lleva su nombre, atribuyéndolas a variaciones del calor que recibimos del Sol, y dedicó bastantes años a calcular con gran precisión las variantes orbitales de la Tierra (excentricidad, inclinación del eje, precesión axial) y su influencia en la insolación, incorporando también los datos que se iban conociendo sobre las glaciaciones cuaternarias. En 1937 hizo la exposición definitiva de su teoría.

Sus trabajos, publicados en revistas serbias de escasa difusión, no consiguieron imponer sus ideas. Él mismo era consciente de que, en principio, las pequeñas variaciones encontradas no parecían suficientes para explicar los grandes cambios de una glaciación; y no disponía de datos empíricos, paleoclimáticos, suficientes para probar su hipótesis. Es más, creyó que nunca se llegaría a disponer de esos datos de época tan lejana. Pero los datos se encontraron, y más de los esperados.

En efecto, durante la segunda mitad del siglo XX se han realizado multitud de observaciones paleoclimáticas indirectas, que han permitido un mejor conocimiento de los climas del Cuaternario (estudios de las varvas, paleosuelos, Palinología, fósiles indicadores de temperatura y salinidad, sedimentos), junto con una mayor precisión en los métodos de datación. Todo ello hubiera sido suficiente, probablemente, para probar la teoría de Milankovich, pero la Ciencia dispuso de un nuevo método más eficaz: el análisis de los isótopos del oxígeno. Lo resumo brevemente.

En el mar existen ^{16}O y ^{18}O en una determinada proporción; las moléculas de agua formadas con el primero, más ligero, se evaporan más fácilmente, y muchas de ellas no vuelven al mar en época de

glaciación, ya que precipitan en forma de nieve, que se va acumulando en forma de hielo en los casquetes polares y glaciares; con eso se altera la proporción de esos isótopos en el agua de los mares.

A finales de la década de los 40, H.C. Urey y su equipo analizaron las proporciones de ambos isótopos en conchas calcáreas de animales marinos, y del agua del mar en la que habían vivido, observando la correspondencia entre ambas. La primera conclusión es que de una concha marina se puede deducir la relación isotópica del mar en que vivió. Y una segunda conclusión es que eso nos permite tener una idea bastante aproximada de la cantidad de hielo acumulado sobre las tierras en ese tiempo; es decir, si era o no era una época glaciar.

Con la aplicación de este método, C. Emiliani, en 1955, analizó la relación isotópica de conchas de foraminíferos microscópicos procedentes de sondeos marinos, y pudo demostrar la alternancia de las últimas glaciaciones.

La prueba definitiva para la confirmación de la teoría de Milankovich, la presentaron en 1976 J.D. Hays, J. Imbrie y N.J. Shackleton, con un estudio sobre dos sondeos oceánicos, bien datados, que abarcaban los últimos 500.000 años. Una vez establecida la serie cronológica de las variaciones isotópicas, consideraron que ésta era una función periódica compleja, compuesta por otras funciones periódicas simples, que consiguieron poner de manifiesto por el método matemático del "análisis espectral".

El resultado fue espectacular: aparecía unos picos más marcados, cada 100.000 años aproximadamente, acompañados de otros dos picos, con períodos aproximados de 43.000 y 22.000 años. Se constataba así la coincidencia de estas variaciones climáticas con las tres variaciones periódicas en la órbita terrestre (excentricidad, inclinación del eje, y precesión axial): quedaba probada la teoría de Milankovich.

Estudios posteriores han permitido extender con eficacia este método hasta 2'5 Ma.

Más recientemente, los sondeos del hielo de Groenlandia y de la Antártida casi nos han trasladado a un mundo aparentemente de ciencia-ficción, pero que es de pura Ciencia.

En 1989 se iniciaba en Groenlandia un sondeo que iba a extraer testigos de hielo de hasta 3.027 m de profundidad, y otro hasta los 3.052 m del hielo, más 1'55 m de roca. Sólo los testigos más profundos, los más antiguos, no resultaron fiables por problemas técnicos; pero se pudo obtener un espléndido registro climático de los últimos 105.000 años. Con el hielo, se habían extraído las burbujas de aire que siempre quedan atrapadas cuando se compactan las capas de nieve, se convierten en neviza y luego en hielo glaciar, al que confieren su inconfundible color azul-verdoso. Ahora, los científicos analizaban directamente el aire y el agua de hace 105.000 años.

En la Antártida se han realizado otros sondeos. La fig. 3 muestra el resultado del sondeo Vostok, de 3.623 m. Se muestran los datos de la variación de la excentricidad de la órbita terrestre; de la temperatura media del hielo superficial (escala a la izquierda; y del contenido en CO_2 de la Atmósfera (escala a la derecha, en partes por millón).

Se observa la sucesión de las glaciaciones en los últimos 400.000 años; se puede comprobar la periodicidad de las mismas, aproximadamente cada 100.000 años, coincidente con la variación de la excentricidad de la órbita terrestre; la similar amplitud de ellas; la disimetría en el tiempo de efectuarse el calentamiento y el enfriamiento, más rápido el calentamiento; y el paralelismo entre el aumento de la temperatura atmosférica y el aumento de la proporción de CO_2 en la atmósfera. No se recogen en este gráfico otros datos interesantes que proporcionan los sondeos, como es el de las concentraciones de otros gases (metano) y de aerosoles (sal marina y polvo). Las concentraciones de aerosoles son mucho más elevadas en los períodos glaciares.

Se han propuesto varias hipótesis para explicar el origen de ese CO_2, y la coincidencia de su aumento y disminución con el de la temperatura; lo más probable es que proceda del mar, que lo desprende al calentarse, ya que el CO_2 es menos soluble en el agua cálida que en el agua fría.

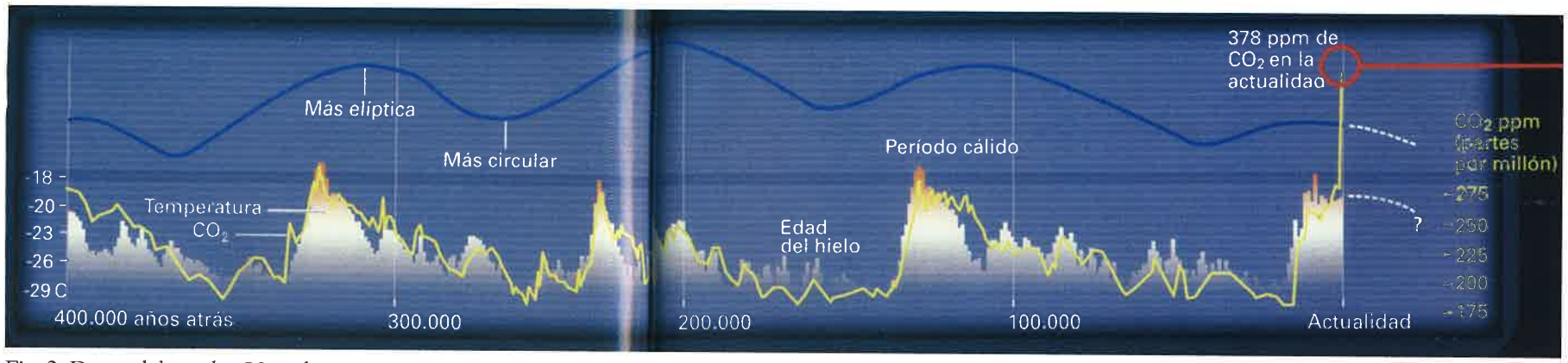


Fig. 3: Datos del sondeo Vostok.

Con todos estos datos, la comunidad científica ha aceptado la teoría de Milankovich, pero sólo en lo que se refiere a los hechos, no a las causas: se admite que el origen de las fases de las glaciaciones está en las variaciones orbitales, pero eso no significa que sean su causa. Los ciclos astronómicos siempre han existido, pero parece lógico pensar que debe depender de otros factores, aún desconocidos, el que desencadenen una glaciación o no lo hagan.

En este marco de las glaciaciones evolucionaron varias especies de humanos, quedando al final sólo una especie, la nuestra.

CAP. 4º.- EL HOMBRE MODERNO

Me refiero con esta expresión al *Homo sapiens*, y considero en este capítulo el clima de la Humanidad desde la última glaciación.

Hace unos 14.000 años empieza el deshielo de la glaciación Würm, que fue muy intensa: se va dulcificando el clima en nuestras latitudes, y con ello mejoran las condiciones de vida del hombre europeo, aún cazador y recolector, con lo que se produce un aumento demográfico.

Pero esta deglaciación no fue sincrónica en los diversos continentes, ni uniforme; es progresiva, pero con fuertes altibajos. El mayor de ellos, el que se conoce como "El Joven Dryas": un recrudecimiento de las condiciones glaciares, que llegaron a alcanzar los valores de la glaciación inmediata. Duró poco más de 1.000 años, y hace 11.000 años el deshielo fue generalizado.

Con esto llegamos a una época crucial en la Historia del mundo occidental: el Neolítico. No hablo del mundo en general, porque el ritmo de la cultura ha sido muy diferente en las diversas regiones: hace 6.000 años que Egipto y Mesopotamia están en la Historia, mientras que las principales culturas americanas estaban en la Edad del Bronce cuando entraron en contacto con la cultura europea; y los esquimales tenía una cultura propia del Neolítico a mediados del siglo XIX, época en que estaban en el Paleolítico bastantes pueblos en Australia, África y América.

El Neolítico ha supuesto la mayor revolución cultural de la Humanidad, y ocurrió en Oriente Medio, hace 10.000 años. Su origen está en el hecho de que el Hombre de esa región, que era cazador y recolector, nómada, se hace agricultor, sedentario y, seguidamente, ganadero. Aparece un gran adelanto tecnológico, la cerámica, con un beneficio social de primer orden: se pueden cocinar los alimentos, que antes había que tomar crudos o asados. Nuevos instrumentos (piedra pulimentada, aguja, anzuelo, rueda) hacen más productiva, más eficaz, la actividad humana.

El hombre vive en poblados, en casas que ya no son un simple abrigo de materiales poco resistentes, y cuida los campos y los animales. Con todo ello, aparece la familia; se desarrolla el sentido de la propiedad privada; se multiplican las relaciones sociales, que se regulan por unas normas, unos códigos, aún no escritos. Simultáneamente, se enriquece el lenguaje, que es la mayor de las actividades simbólicas humanas, para responder a las nuevas necesidades. Pronto los símbolos alcanzarán a la escritura, y entraremos en la Historia.

En ese tiempo, la benignidad del clima propició el desarrollo de la vegetación y la abundancia de animales, los más aptos para las nuevas condiciones: la consecuencia de todo ello fue la revolución cultural del Neolítico.

Hace 6.500 años, en pleno Neolítico, el clima alcanza unas condiciones ideales, que se conocen como el "Óptimo Climático". Durante más de un milenio, la temperatura fue de 2 a 3°C superior a la actual, pero con abundantes lluvias: Oriente Medio era algo parecido a un paraíso. Es el tiempo del desarrollo de las culturas mesopotámicas y egipcia, que entran en la Historia.

Le sucedió un período de enfriamiento, de unos 500 años, de intensidad moderada en términos absolutos, pero bien acusado por el contraste con el período cálido precedente. Hace 5.000 años sube de nuevo la temperatura, que se hizo cálida, pero sin llegar a la del Óptimo Climático. Proseguía el deshielo del Hemisferio Norte, que hizo subir el nivel del mar unos 140 m desde que empezó la deglaciación; en este tiempo alcanzó su máximo, unos 3 m sobre el nivel actual.

Hace 3.500 años el clima se hizo más frío; no fue lo peor, sino que vino acompañado de una disminución de las lluvias en las bandas tropicales, con el desarrollo de los típicos desiertos que ahora las ocupan. La población había crecido en todo el Oriente Medio; al perderse el bienestar agrícola, que era el bienestar productivo, se desarrollaron regímenes sociales fuertemente autoritarios, centralistas, y empezaron las hambrunas y las guerras de conquista. Es el clima de los tiempos bíblicos desde la instalación en Palestina, y los tiempos de la antigua Grecia



Cuando el hombre grabó este mamut el clima de Francia era semejante al actual de Siberia.

(guerras medas, Alejandro Magno) y de la antigua Roma.

Siguió un período moderadamente cálido, más benigno, de unos 500 años, que vienen a coincidir con el apogeo de Roma; pero la etapa siguiente fue muy fría y seca: se la conoce como la "Pequeña Glaciación". Durante ella, los pueblos germánicos se vieron forzados a extenderse hacia el Sur.

Luego, los siglos X y XI fueron notablemente cálidos, más de un grado sobre la temperatura del siglo XX; es el "Período Cálido Medieval". Los hielos dejan libres amplias zonas costeras de Groenlandia, donde se instalan unos 4.000 colonos vikingos, que viven de la agricultura y la ganadería. Aún se mantiene un clima favorable durante el siglo XII, pero a partir del siglo XIII empieza una nueva etapa fría que durará hasta mediados del siglo XIX: es la "Pequeña Edad del Hielo", nombre que otros reservan para su período más extremo, desde comienzos del siglo XVII a mediados del siglo XVIII, cuando muchos ríos y lagos de Europa, Támesis incluido, se cruzaban en carreta durante el invierno. El clima había obligado a ir abandonando Groenlandia a finales del siglo XIV y comienzos del XV.

En esta etapa fría se intercalan el "Mínimo de Spörer" (1450-1510), el "Mínimo de Maunder" (1643-1715), y el "Mínimo de Dalton" (1790-1820), más corto; los dos últimos ya observados y medidos con instrumentos modernos.

Desde hace 150 años el clima se va haciendo más cálido, con altibajos, como es lo normal. La década de los cuarenta registró las temperaturas más altas, que no se superaron hasta la década de los noventa; el año más caluroso medido hasta ahora ha sido el de 1998. En Europa Occidental, el verano más caluroso ha sido el de 2003, por los constantes vientos africanos, pero ese verano fue más bien fresco en Asia y América.

Entre mediados de siglo y los años ochenta hubo un claro descenso de las temperaturas, incluso con recuperación de los glaciares, lo que hizo pensar que empezaba una nueva época glaciar.

La fig. 4 recoge la fluctuación de la temperatura global entre 1880 y 1998. Se advierte bien el descenso de la temperatura de la década de los 40 hasta mediados de los 70, en cuya parte final se inicia un ascenso notable, que aún continúa.

En la fig. 5 se observa bien el crecimiento del contenido de CO_2 de la Atmósfera desde mediados del siglo XIX, y las oscilaciones de la temperatura, en el Hemisferio Norte. Se pueden hacer varias observaciones interesantes.

Quizás lo más llamativo es la semejanza en el crecimiento de ambas magnitudes, sin apenas fluctuaciones en el CO_2, pero con altibajos irregulares en la temperatura; es lo que ha ocurrido en los últimos 420.000 años, que podemos ver con más detalle para estos 144 años.

La década más calurosa ha sido la de los años 90, y el 1998 ha sido el año de temperatura media más alta medida en el Hemisferio Norte, como en todo el Planeta.

Es también llamativo que el CO_2 haya alcanzado en nuestros tiempos la mayor concentración medida para estos últimos 420.000 años. El origen de este CO_2 hay que buscarlo, para su mayor parte, en la quema de combustibles fósiles.

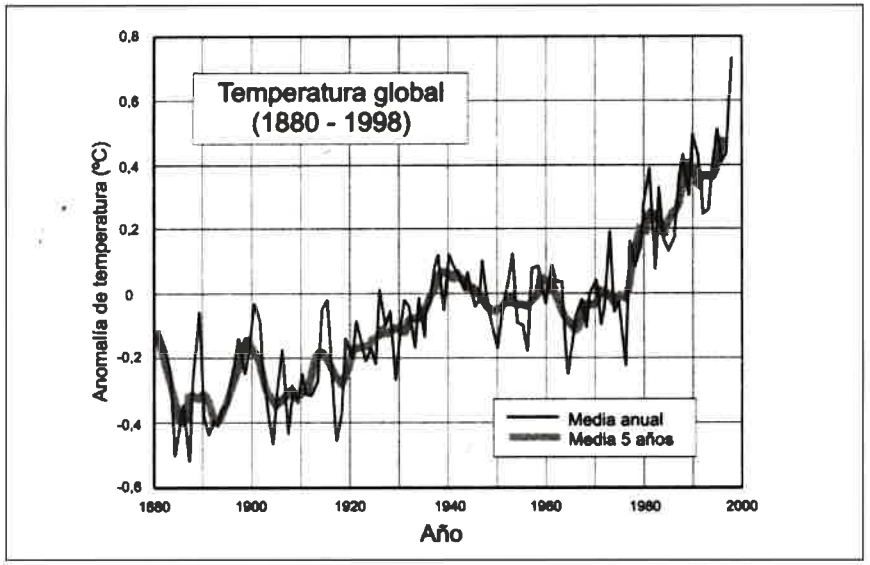


Fig. 4: Temperatura media de la Tierra (1880-1998).

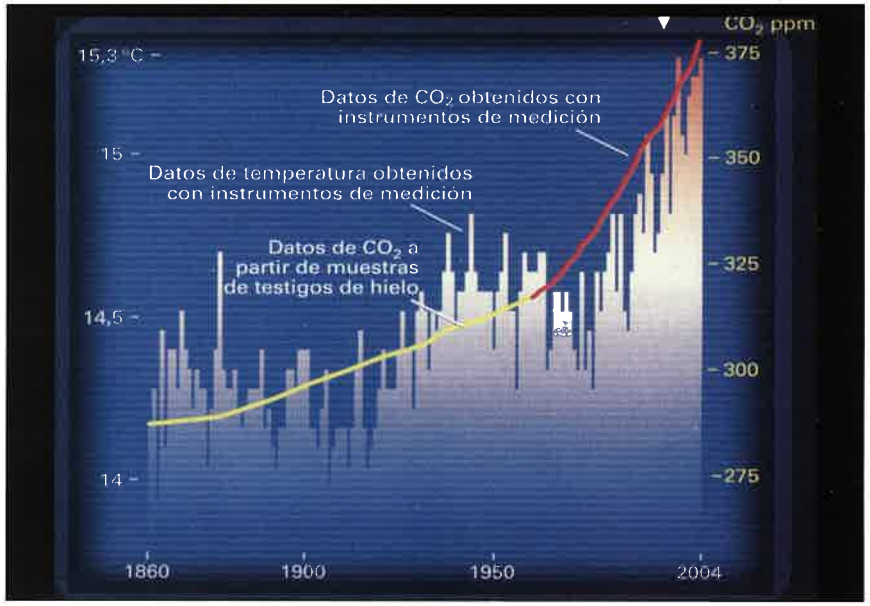


Fig. 5: Temperatura y CO_2 en el Hemisferio Norte (1860-2004).

El aumento de CO_2 se acentuó en 1880, y aún más a partir de 1970; si el aumento anterior a 1880, y el de 1880-1970 eran más bien lineales, ahora se ha hecho exponencial.

CONCLUSIONES

En esta charla he querido dejar claro que conocemos muchos datos y algunos procesos de la Paleoclimatología reciente y de la Climatología histórica, pero no tenemos un conocimiento del sistema climático de la Tierra que nos permita explicar los hechos climáticos del pasado, no digamos hacer una previsión para el futuro ni siquiera para unos pocos años; eso, a pesar de los potentes programas de ordenador que se emplean en la actualidad.

Sabemos que estamos en un interglaciar que empezó hace unos 13.000 años, pero no sabemos en qué fase de su intensidad nos encontramos ni cuándo va a llegar la fase glaciar, ni a qué velocidad se va a desarrollar; en realidad, no sabemos si llegará otra glaciación similar a las cuatro últimas del Holoceno. Si se mantiene la cadencia de las cuatro últimas glaciaciones, ya es tiempo de que empiece el enfriamiento.

Entre tanta incertidumbre, hay algo cierto: que hace 150 años se inició un episodio climático que se ha desarrollado, con altibajos, en el siglo XX, y que ha originado una subida de la temperatura media de 0,8° C, de ellos 0,6° en el siglo XX, lo que viene a resultar una subida del 0'2%. Simultáneamente ha crecido la concentración del CO_2 atmosférico, pero, en este caso, la subida ha sido del 25%. La subida de las temperaturas ha sido bien acusada en Europa, y especialmente en las comarcas mediterráneas; como consecuencia, se están perdiendo los glaciares de los Alpes y del Pirineo, y se están secando las fuentes y los ríos en gran parte de la Península.

Esta oscilación climática no es, o, quizás, no es todavía tan amplia como otras oscilaciones que ha vivido la Humanidad, pero nos afecta sensiblemente, bien lo sabemos los de nuestra Comunidad Valenciana. Por su característica más señalada se la llama con frecuencia "calentamiento global", denominación preferible a "cambio climático", expresión que, en principio, no es precisa, y que se ha llenado recientemente de connotaciones políticas ajenas a la Ciencia o muchas veces, por desgracia, contrarias a ella.

Si es cierto que vivimos en este episodio climático, no es menos cierto que la sociedad tiene que actuar dando respuesta a esta situación. De manera muy esquemática, indico tres campos de actuación.

1°.- Contra la desertización, el remedio es el **agua**, capaz de convertir un desierto en un vergel: vergeles entre montañas resecas son las Huertas de Valencia y Murcia.

2°.- La **reforestación** es el mejor medio para impedir la erosión del suelo, y para retirar de la atmósfera grandes cantidades de CO_2; también lo es para aumentar las precipitaciones en extensas comarcas.

3°.- El **ahorro energético** sirve para mitigar muchos efectos negativos del calentamiento global, directa o indirectamente.

Creo que ésta es una visión realista de la situación climática actual. La solución ideal, de controlar el clima de la Tierra, no está al alcance de la Humanidad; pero se ha hecho necesaria una acción coordinada de todos, desde individuos particulares a Naciones Unidas, para paliar los problemas que origina el calentamiento global.

Todo será más fácil si nos convencemos de que nuestro mayor problema no es el cambio climático: somos nosotros.

* * * * *

Referencias

ARSUAGA (J.L.), *El collar del neandertal. En busca de los primeros pensadores.* Temas de hoy, Madrid, 1999.

CUENCA (J.), *Origen Evolutivo del Hombre.* Cátedra de Eméritos, Valencia, 2006.

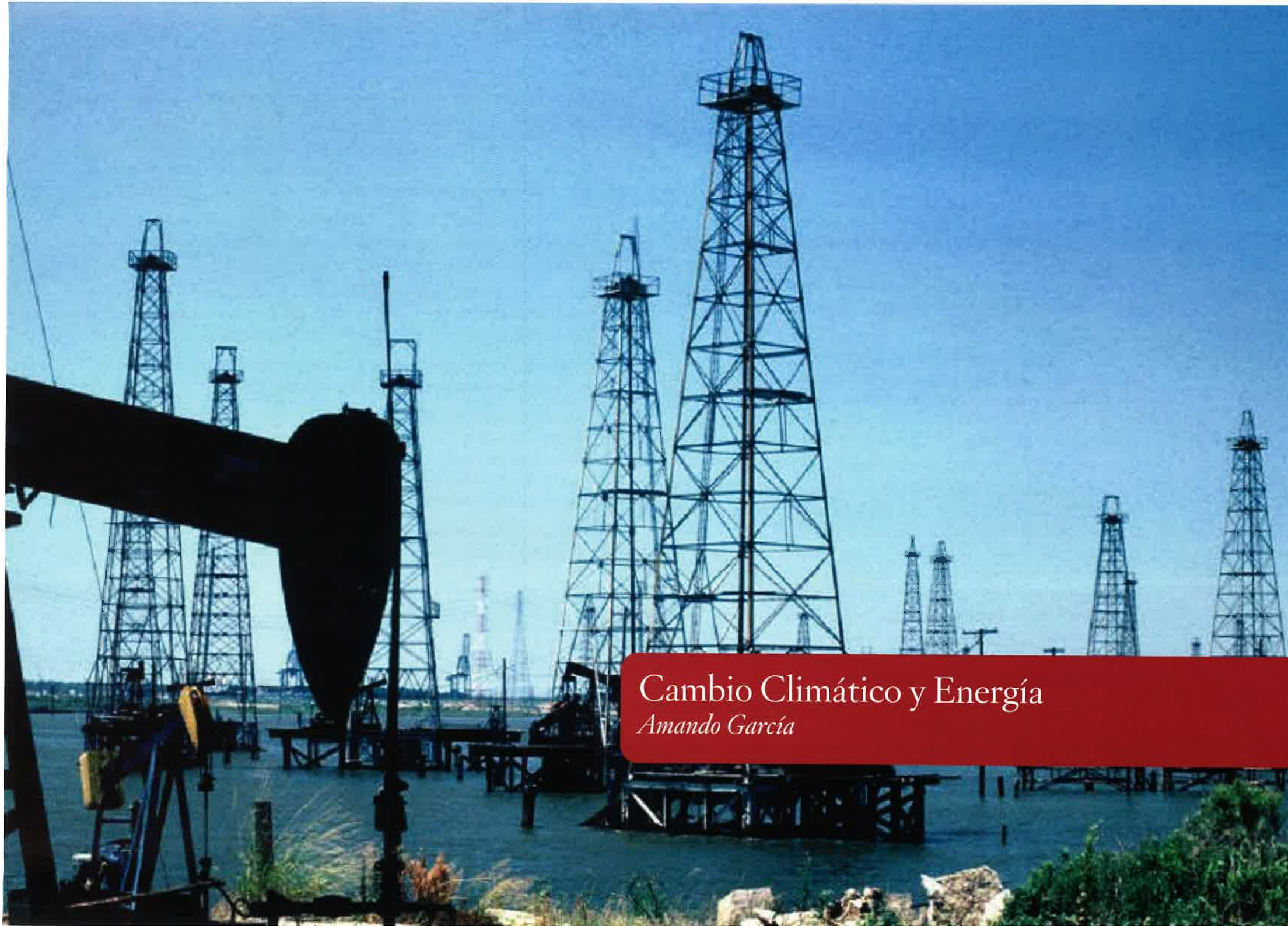
GUTIÉRREZ CABRIA (S.), *Dios. ciencia y azar.* BAC, Madrid, 2003.

MARTÍN CHIVELET (J.), *Cambios Climáticos.* Libertarias/Prodhufi, Madrid, 1999.

MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES, *Dinosaurios.* Madrid, 1990.

REV. NATIONAL GEOGRAPHIC, *Cambio Climático.* Septiembre 2004.

TOHARIA (M.), *El clima.* Debate, Barcelona, 2006.



Cambio Climático y Energía

Amando García

1. Introducción

El objetivo de este texto es presentar algunas consideraciones generales sobre el importante tema del cambio climático en nuestro planeta y su relación con la producción y el consumo de energía. Nuestra intención es abordar este tema aportando la información básica sobre sus aspectos más significativos, y hacerlo en términos sencillos y fáciles de entender para todos, con el objeto de contribuir a una discusión lo más amplia posible sobre el mismo.

Hay que advertir que los datos que recogemos en este trabajo proceden de fuentes solventes de todo tipo (libros, artículos, revistas, etc.). En cualquier caso, somos conscientes de que muchos de los planteamientos que enmarcan el tema del cambio climático se pueden hacer desde puntos de vista diferentes, de acuerdo con los intereses políticos o económicos que los condicionan. Este hecho dificulta, en buena medida, una correcta comprensión de este tema y la valoración objetiva de sus numerosas implicaciones y consecuencias. Sin duda alguna, estamos ante una cuestión de enorme importancia y actualidad, que se plantea con insistencia y preocupación en muy diversos ámbitos de la sociedad actual, y que, a lo largo del presente siglo, afectará profundamente a las formas de vida de toda la humanidad.

2. El clima en el planeta Tierra

Como es sabido, el planeta Tierra está completamente rodeado por un "mar" de atmósfera en cuyas zonas más bajas vive el hombre. En cierto modo, la atmósfera se asemeja a las aguas de un río, dado que en algunos lugares el aire se mueve muy lentamente, en tanto que en otros lo hace con una gran violencia. Los contrastes en la vegetación, cultivos y formas cotidianas de vida de las gentes son un reflejo de estas diferencias en la atmósfera.

Durante siglos, el conocimiento del comportamiento de la atmósfera ha progresado muy lentamente. Sin embargo, en las últimas décadas, los avances en este sentido han sido considerables, aunque hay que reconocer que todavía no se han conseguido esclarecer todos los procesos que en ella tienen lugar.

La gravedad, la interacción del aire con la Tierra y la radiación solar son los tres factores principales que actúan sobre la atmósfera. Aunque a la Tierra llega menos de una millonésima parte de la energía emitida por el Sol, basta esa energía para mantener a la atmósfera en movimiento y dar lugar con ello a las diversas manifestaciones del tiempo meteorológico, un observable que está gobernado por la temperatura, la humedad, la presión y los vientos.

Lo que llamamos clima no es más que la combinación de los diferentes aspectos meteorológicos que se producen en un cierto lugar. Por ejemplo, en las tierras que se extienden a lo largo del ecuador, es frecuente la existencia de grandes selvas con una extraordinaria variedad de especies vegetales (caso de la Amazonia). Esta vegetación exuberante es una consecuencia de las lluvias frecuentes y abundantes (que superan fácilmente la cifra de 4.000 mm/año) y de una temperatura muy elevada (con valores medios del orden de 30º C). Se producen pocos cambios de una estación a otra, ya que el sol de mediodía está situado siempre en lo más alto del cielo.

Como contraste, en los desiertos tropicales (con la única excepción de los oasis), hay pocas cosas que puedan sobrevivir. El calor y la escasez de lluvias hacen casi imposible que las plantas se puedan desarrollar en estas zonas. Los desiertos tropicales son muy secos porque en ellos los anticiclones suelen dominar durante gran parte del año. Aunque ocasionalmente se pueden formar algunas nubes, la lluvia es sumamente escasa y, cuando se produce, la mayor parte de ella se evapora antes de llegar al suelo.

El clima del Ártico y del Antártico se caracteriza también por la escasez de precipitaciones y por el hecho de que el agua que llega a la tierra lo hace en forma de nieve. Las causas de este clima extremado hay que buscarlas en los frecuentes anticiclones, en el aire frío, que no puede contener mucha humedad, y en la ausencia casi generalizada de

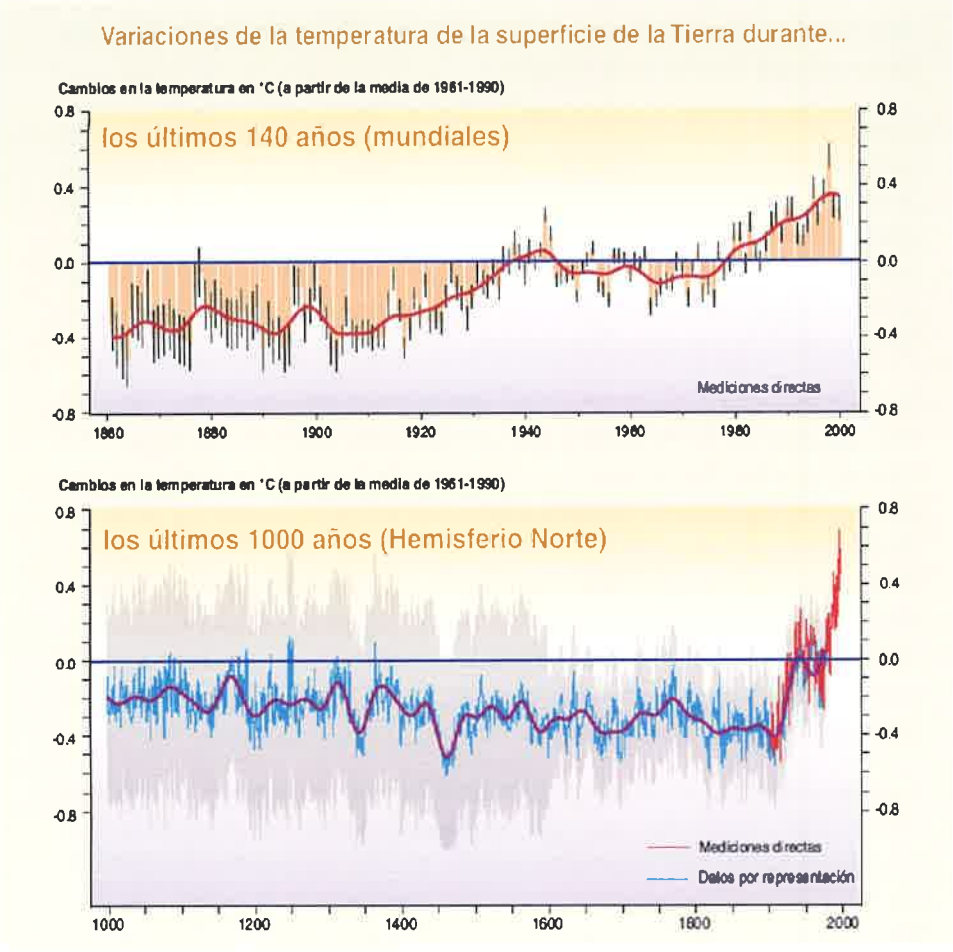


Figura 1.- El cambio climático. Estos dos gráficos muestran la variación de la temperatura de la superficie de la Tierra en tiempos recientes.

corrientes de aire en sentido ascendente. Durante los cortos veranos, la nieve que cubre el suelo se deshiela hasta una profundidad de algunos centímetros, mientras que durante los inviernos el frío es muy intenso. Hay que señalar que, en estas condiciones, la vida humana es extraordinariamente difícil y apenas existe vegetación.

La profunda relación existente entre el hombre y el clima, en todos los sentidos, es un hecho bien conocido. Los agricultores del sudeste asiático esperan con ansiedad la llegada de los monzones que traerán el agua necesaria para alimentar sus arrozales. Los pastores del África oriental, que se desplazan con sus ganados de unos pastos a otros y de unos abrevaderos a otros durante la estación seca, se ven amenazados por la ruina y el hambre cuando las lluvias escasean. Los pescadores de los caladeros de Terranova rezan para que sus embarcaciones se libren de temporales y galernas. Incluso muchos de los residentes de las grandes ciudades, por un motivo u otro, viven pendientes de las predicciones meteorológicas.

El reconocimiento de que existen unos climas más favorables que otros para desarrollar las actividades humanas en condiciones de máximo bienestar, nos lleva a plantear la pregunta de si somos capaces de alterar las condiciones climáticas. En términos globales, la respuesta es rotundamente negativa. A lo sumo, lo único que el hombre ha conseguido hasta ahora es modificar ciertas condiciones climáticas locales, en ámbitos muy limitados (disipación de nieblas, producción de lluvia, lucha contra el granizo, evitación de heladas, etc.).

Nos parece importante recordar también que los mayores cambios que el hombre ha introducido en el clima de nuestro planeta han sido, en principio, involuntarios, y, en general, han tenido resultados negativos. A lo largo de los siglos, grandes extensiones de terreno han sido desembarazadas de bosques y maleza, al tiempo que se han desecado numerosas marismas. La mayoría de estos cambios se han realizado por motivos agrícolas o ganaderos y, sin duda alguna, han influido en el clima de las zonas afectadas. Sabemos, por ejemplo, que en estas zonas han disminuido las precipitaciones y se ha producido un notable incremento de las escorrentías, erosionando el suelo y aumentando el riesgo de desertización. Se ha podido demostrar también que en las regiones desecadas se produce una notable disminución de la humedad y un aumento de las oscilaciones térmicas.

En particular, los millones y millones de personas que viven actualmente en las grandes ciudades de todo el mundo lo hacen en un microclima alterado por el hombre. En general, las condiciones ambientales en las zonas urbanas son distintas de las existentes en las zonas rurales. La temperatura suele ser más elevada, la humedad más baja y la velocidad del viento más reducida.

Para abordar adecuadamente los aspectos básicos de este tema, habría que recordar también que la atmósfera terrestre está constituida por diferentes gases y vapores que rodean a nuestro planeta y que es arrastrada por éste en su movimiento de rotación. Cuando los rayos solares atraviesan la atmósfera, tan sólo un 10% de su energía es absorbida, mientras que el resto se utiliza en calentar, por cierto, de forma muy irregular, la superficie terrestre. Ésta, a su vez, emite de nuevo hacia el exterior una parte de la energía incidente, pero lo hace en forma de radiación infrarroja, es decir, radiación electromagnética de longitud de onda más larga que la de la radiación recibida. Ahora bien, aunque la atmósfera terrestre es transparente a la radiación procedente del sol, es casi opaca para las radiaciones caloríficas de onda larga, comportándose de forma similar a como lo hace la vidriera de un invernadero.

En particular, es muy importante insistir en el hecho de que la atmósfera terrestre no se calienta uniformemente a causa de los rayos solares, sino que adquiere una cierta temperatura en función de las peculiaridades del suelo, que proporciona características singulares a las masas de aire que se encuentran más próximas a él. En este proceso juega también un papel muy significativo la distribución de tierras y mares, ya que estas superficies se comportan de modo diferente. En realidad, el agua de los océanos y los mares se comporta como un enorme termostato regulador de la temperatura.

Reconocida la importancia del clima para la vida humana, no resulta sorprendente saber que el estudio de las posibles variaciones climáticas fuera objeto de atención especial por parte de los expertos cuando se comprobó la existencia de ciertos factores capaces de producirlas, a una escala temporal que puede variar entre unos cuantos millones de años (como es el caso de los relacionados con el arrastre de los continentes) hasta las 24 horas que dura una rotación terrestre. Está perfectamente demostrado que el clima del planeta Tierra ha sufrido numerosos cambios en el pasado y es plausible esperar que en el futuro se sigan produciendo más cambios de características similares a aquellos. Desgraciadamente, nuestro conocimiento actual de los mecanismos que producen estos cambios climáticos no es suficiente para poder predecirlos, dado que ni siquiera estamos completamente seguros de si dichas alteraciones están originadas por cambios internos del sistema formado por los océanos y la atmósfera o por variaciones de factores externos tales como la intensidad de la radiación solar. Por otra parte, el problema se puede complicar todavía más en el futuro ante la posibilidad de que ciertas actividades humanas produzcan un incremento significativo en las emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes (entre los que se incluyen los óxidos de nitrógeno y el ozono, entre otros) capaces de producir cambios pequeños, aunque significativos, en el clima general de nuestro planeta.

Este tema es todavía hoy muy controvertido, debido a que, como hemos indicado anteriormente, las bases científicas en las que se apoya son bastante inciertas. En cualquier caso, casi todas las corrientes de opinión actuales se van inclinando poco a poco hacia la aceptación de la existencia de un cierto cambio climático en nuestro planeta, que puede estar relacionado, al menos en parte, con las actividades y formas de vida del mundo desarrollado.

De hecho, el problema no es nuevo. Hace tiempo que los investigadores mostraron su preocupación por la composición de la atmósfera terrestre y las posibles consecuencias de dicha composición sobre el clima del planeta. En un principio, esta preocupación se centró sobre todo en el posible agotamiento del oxígeno ante la creciente utilización de combustibles y la desaparición de las algas verdes marinas. Más tarde, fue tomando fuerza la idea de que el dióxido de carbono y otros gases

contaminantes producidos en las combustiones era el que podía dar lugar a los problemas más graves.

En principio, y aún sin tomar en consideración las fluctuaciones internas que, con períodos de tiempo más o menos largos, se ponen de manifiesto en el sistema complejo constituido por la atmósfera, los océanos y los continentes, junto con los seres vivos que habitan en ese medio, habría que tener en cuenta tres factores generales capaces de producir alteraciones climáticas.

En primer lugar, sería necesario hablar de las variaciones de la llamada constante solar, es decir, de la cantidad media de radiación procedente del sol que incide por unidad de superficie y de tiempo sobre una superficie situada en el límite superior de la atmósfera. El valor de esa constante es del orden de 140 miliwatios/cm^2. En segundo lugar, habría que considerar la posible variación de las propiedades de la superficie de nuestro planeta, entre las que se incluyen las variaciones del albedo o poder reflector de dicha superficie. Por último, se deberían estudiar también las eventuales alteraciones en la composición de la atmósfera, teniendo en cuenta la presencia en ella de gases y aerosoles.

Las numerosas observaciones realizadas en el curso de los últimos años desde satélites y sondas espaciales han puesto de manifiesto que, aunque los cambios producidos en la constante solar son extraordinariamente pequeños, existen variaciones acusadas en la componente corpuscular, en el ultravioleta lejano y en los rayos X que forman parte de la radiación solar. En cualquier caso, la posible correlación entre la actividad solar y el clima sigue siendo muy discutible. Por el momento, lo único que parece estar claro es la influencia de los conocidos ciclos de actividad del sol (de once años de duración), sobre las temperaturas, precipitaciones y tormentas en la tierra.

En este contexto, buena parte de los cambios climáticos que se puedan producir en el planeta habrá que atribuirlos a variaciones de la composición de la atmósfera, en virtud de las actividades humanas capaces de originar dichas variaciones, básicamente a través del que se conoce como efecto invernadero. La concurrencia de estas actuaciones es capaz de producir un desplazamiento apreciable del balance térmico terrestre. Habría que tener en cuenta que este balance es extraordinariamente crítico en la atmósfera, dado que una variación de tan sólo un par de grados centígrados en su temperatura media podría tener graves consecuencias climáticas. En particular, se ha especulado con que una eventual fusión de grandes masas de hielos polares traería consigo una subida en el nivel medio de los mares y océanos, con la consiguiente inundación de algunas superficies costeras. Algunos investigadores consideran, por ejemplo, que la tercera parte de la superficie actual de Bangladesh desaparecerá bajo las aguas del mar a finales del presente siglo XXI.

3. El dióxido de carbono en la atmósfera

Vamos a ocuparnos ahora específicamente de los posibles efectos sobre el clima relacionados con los cambios en la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Empezaremos con un dato simple y objetivo. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre ha pasado de las 280 partes por millón (ppm) que habían antes de la revolución industrial (hacia 1850), a las 380 ppm existentes a finales del siglo XX. Así pues, si suponemos que en dicho tiempo no se han producido cambios naturales significativos en la cantidad de dicho gas existente en la atmósfera, se puede concluir que un 30% del dióxido de carbono que existe hoy en la atmósfera ha sido originado por las actividades humanas, y básicamente por los procesos de combustión.

El aumento del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera tiene una gran importancia dado que, como ya hemos dicho anteriormente, aunque la atmósfera es prácticamente transparente para la radiación solar, resulta casi opaca para la radiación que procede de la tierra (infrarroja), dada la absorción que sobre la misma ejercen el dióxido de carbono y otros gases contaminantes. En consecuencia, cualquier incremento de la presencia de estos gases en la atmósfera impide que dicha radiación escape al espacio. Hace algunos años, los especialistas

empezaron a preocuparse por este problema y estimaron que el aumento medio y global de la temperatura terrestre podía llegar a alcanzar un valor del orden de 1°C hacia finales del pasado siglo. Desgraciadamente, las medidas llevadas a cabo han confirmado estos pronósticos.

Se ha calculado que cada año se vierten a la atmósfera terrestre unos 25.000 millones de toneladas de dióxido de carbono procedentes de diversos procesos de combustión, entre los que sobresalen, por este mismo orden, la producción de energía, el transporte y la deforestación. Cabe señalar que esta enorme cantidad está aumentando hoy a razón de un 3% anual. En el contexto que ahora estamos considerando, no deberíamos olvidar que tan sólo la mitad del dióxido de carbono emitido es retenido en la atmósfera terrestre. El resto es absorbido por los océanos (hasta un 75% del total, aproximadamente) y la vegetación (el 25% restante). Si volvemos al dato inicial, podemos afirmar que, como media, cada habitante del planeta está emitiendo ahora a la atmósfera unas 4 toneladas de dióxido de carbono cada año. Es importante señalar que las diferencias en este sentido entre los países ricos y pobres son enormes. Por ejemplo, en Estados Unidos, la emisión de dicho gas a la atmósfera es del orden de las 20 toneladas por persona y año, en tanto que en muchos países del tercer mundo esa cantidad es unas veinte veces menor.

En apartados posteriores nos ocuparemos de la relación existente entre la producción de energía y la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Como elemento adicional al tema que estamos tratando, es oportuno recordar también algunos elementos adicionales sobre el tema de la deforestación que acabamos de mencionar. Ante todo, habría que recordar que la causa más importante de la deforestación son los incendios provocados, con el objetivo de aumentar las tierras de uso agrícola y ganadero en el interior de la selva, o para fertilizar los suelos con las cenizas producidas. Estas prácticas agrícolas son las responsables de unos dos tercios de la pérdida de bosques tropicales, estimada actualmente en unos 6 millones de hectáreas cada año. Por otro lado, hemos de mencionar las talas relacionadas con la obtención de madera, que desde hace ya bastante tiempo están soportando la Amazonia, los bosques de Centroamérica, África y algunas regiones del Sudeste Asiático. Por último, habría que recordar que, en los países pobres, la madera sigue siendo hoy en día el combustible doméstico más utilizado. Es un hecho bien sabido que este hecho ha contribuido, a lo largo de siglos de historia, a la desaparición de muchas zonas verdes en nuestro planeta.

Para completar esta información, habría que mencionar también que, en estos últimos años, y a diferencia de lo que sucedía en otros países europeos, la situación en España no ha evolucionado precisamente en la buena dirección. Sus emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera han ido aumentando cada vez más, sobre todo porque su consumo energético se ha incrementado muy por encima de su producto interior bruto, lo cual equivale a afirmar que nuestro modelo económico se caracteriza por su baja eficiencia energética.

Pese a todos los datos que acabamos de dar, no está de más recordar que el riesgo de que se produzca un aumento significativo en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha sido una cuestión muy controvertida en los medios científicos desde hace mucho tiempo. Concretamente, no pocos observadores opinaban hace algunos años, y siguen opinando ahora, que esta cuestión puede estar manipulada por los partidarios de impulsar unas u otras políticas energéticas (como es el caso, por ejemplo, de los que apoyan ahora la reducción y aún la completa exclusión de los combustibles fósiles a favor de la energía nuclear, que se considera limpia en este sentido).

4. Evidencias de un cambio climático

Desde hace ya algún tiempo, el tema del cambio climático está siendo cuidadosamente estudiado por el denominado Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Se trata de un organismo internacional vinculado a la Organización Mundial de Meteorología (WMO) y al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), del que forman parte unos dos mil científicos y especialistas de más de un centenar de países de todo el mundo. Los resultados del trabajo de

este Panel se recogen fundamentalmente en una serie de informes técnicos publicados periódicamente cada seis o siete años. El último de ellos corresponde a este año. En este texto mencionaremos algunas de sus conclusiones más importantes o llamativas, aunque, por razones fáciles de comprender, lo haremos de forma extraordinariamente sucinta.

Una conclusión especialmente importante de este informe se refiere a la posibilidad de que las temperaturas medias de nuestro planeta se incrementen durante este siglo entre 2 y 6 °C, un aumento muy superior al que ha tenido lugar durante el pasado siglo, estimado en 0'6 °C. Volviendo a las previsiones para el presente siglo, se ha señalado que el deshielo de los polos y glaciares que se produciría como consecuencia del citado aumento de temperatura daría lugar a que el nivel de los mares se elevara en una cuantía comprendida entre los 10 y 80 centímetros, con consecuencias muy graves en numerosas zonas costeras. Por otro lado, según el citado informe, y si no se toman medidas al respecto, el presente siglo XXI se caracterizará por un notable incremento de las sequías, las inundaciones, las hambrunas y las epidemias. Es importante señalar que estas condiciones afectarán, en mayor o menor medida, a todos los países de nuestro planeta y es probable que provoquen la desaparición de muchas especies animales y vegetales.

Aunque con ciertas cautelas, los científicos coinciden ya en hablar de la relación entre el cambio climático y las actividades humanas de las sociedades desarrolladas, aunque sin olvidar la influencia de las causas naturales en dicho cambio. Es curioso advertir que, hace un par de décadas, la unanimidad que se manifiesta hoy en las conclusiones sobre este controvertido e importante tema estaba lejos de alcanzarse. De todos modos, el debate sobre estas cuestiones, sus causas y las propuestas para resolver el problema no han hecho más que empezar. Según los especialistas del IPCC, la contaminación industrial es la principal causante del calentamiento de nuestro planeta. Esta contaminación ha provocado ya la pérdida del 15% de la extensión de la Antártida, la progresión de unos 100 kilómetros de los bosques de Alaska hacia el



Figura 2.- El calentamiento del planeta. El cambio climático está produciendo la fusión de grandes cantidades de hielos polares. Una imagen de Groenlandia.

norte y la reducción del tiempo en que los lagos y ríos del hemisferio norte permanecen helados.

Según el informe que estamos comentando, los países situados en las zonas tropicales y subtropicales de África y Latinoamérica son los que pueden resultar más afectados por estas perturbaciones climáticas y los que registrarán los mayores aumentos en el número de inundaciones o sequías, un hecho cuya consecuencia más importante será el descenso de su producción de cereales

Por lo que respecta al continente europeo, las consecuencias del cambio climático influirán positivamente en los países del norte (más fríos), que verán incrementada su producción agrícola, por efecto de las mayores temperaturas, mientras que los países del sur (más cálidos)

que verán incrementada su producción agrícola, por efecto de las mayores temperaturas, mientras que los países del sur (más cálidos) resultarán más afectados por las sequías y experimentarán un descenso en su producción agrícola.

Como resultado del aumento de las temperaturas, se cree que la mitad de los glaciares europeos habrán desaparecido antes de finalizar el actual siglo XXI. En el estudio al que nos estamos refiriendo se llega también a una curiosa conclusión en relación con el turismo. El aumento de las olas de calor que se producirán durante los veranos tendrá como consecuencia algunos cambios de destino en muchas de las rutas turísticas tradicionales, en un afán por buscar climas algo más agradables. En consecuencia, la industria turística española y de otros países de la cuenca del mediterráneo, tan importante en la actualidad, se podría ver seriamente afectada en un futuro si se cumplen las predicciones del informe que estamos comentando.

Según este mismo informe, en las regiones más secas de África y Asia, el hambre provocará el desplazamiento de muchos millones de personas. En los archipiélagos del Océano Indico, el aumento del nivel del mar, cuyo valor medio es posible que alcance unos cinco milímetros cada año durante el siglo XXI, producirá un aumento importante en la erosión en las costas, dañará los ecosistemas del litoral y causará grandes pérdidas a las poblaciones ribereñas, sobre todo en el caso de las que viven básicamente de la agricultura.

Al parecer, el deshielo de las regiones polares se prolongará durante siglos. Los expertos llegan también a la conclusión de que, incluso si se logra estabilizar la emisión actual de gases relacionados con el efecto invernadero, los efectos de dicha emisión serán irreversibles en las capas de hielo, en las corrientes del océano y en el nivel de los mares.

Una parte importante de los cambios en la naturaleza que los científicos habían previsto para un futuro relativamente lejano, son ya hoy una realidad. Una de las consecuencias claramente constatadas de la continua elevación de las temperaturas medias del planeta es que, en el macizo de los Alpes, algunas especies vegetales han emigrado hacia las cumbres de las montañas entre uno y cuatro metros cada década. También se ha podido comprobar que, en toda Europa, las hojas de los árboles y arbustos se caen cada vez más tarde y las aves migratorias algo llegan antes en primavera y abandonan más tarde sus habitats en otoño. Con cierta frecuencia, ahora se pueden encontrar mariposas, escarabajos, libélulas y otros insectos en zonas geográficas que en tiempos no demasiado lejanos eran demasiado frías para permitir su supervivencia.

Algunas observaciones señalan que las crecidas de los ríos se producen en el hemisferio norte en invierno y no en primavera como venía sucediendo casi siempre hasta ahora. En muchas zonas, las lluvias son más frecuentes que las nieves. En el continente asiático, se ha constatado que el 67% de los glaciales de las cordilleras del Himalaya y de Tianshan, que alimentan los grandes ríos de esas zonas, han retrocedido de forma sensible en el curso de los últimos diez años. El informe al que estamos refiriéndonos aquí señala que es muy probable que estas tendencias continúen en las próximas décadas.

A título de curiosidad, podríamos mencionar finalmente el hecho de que el incremento general de las temperaturas medias permitirá que el mosquito "anopheles", que transmite la malaria, viva en el futuro en zonas donde ahora no puede hacerlo a causa del frío. En consecuencia, no se podría descartar que países como España volvieran a conocer esta grave enfermedad, que fue erradicada de nuestro país en las primeras décadas del pasado siglo.

5. El consumo de energía en el mundo

La disponibilidad de energía tiene una importancia capital en todas las sociedades desarrolladas. Sin energía no se podrían producir una buena parte de los alimentos que consumimos, utilizar los modernos medios de transporte para desplazarnos con gran rapidez de un lugar a otro sin importar distancias, edificar nuestras viviendas, fabricar los muebles y

utensilios que necesitamos, proporcionar unos elevados niveles de confort a nuestros hogares, editar libros, revistas o periódicos, escuchar la radio, ver la televisión o hablar por teléfono, entre otras muchas actividades ligadas a nuestra vida cotidiana.

Cuando el suministro de energía está en peligro, todo lo que depende de dicho suministro está también en peligro. No sólo nuestra forma de vida, sino la vida misma. En cierto sentido, y sin olvidar otros condicionamientos naturales o sociales, podríamos considerar incluso que la pobreza, el hambre o la escasez de agua, presentes en unas u otras regiones del planeta, están relacionadas de una forma u otra con las dificultades para el suministro de energía.

Por todo ello, el temor a la escasez de la energía ha dominado la historia mundial durante las últimas décadas. Este temor se agravó considerablemente a raíz de los trabajos del Club de Roma. Sin embargo, es interesante recordar que el temor a la escasez de energía ha llevado a la búsqueda de nuevos recursos, que siempre se han encontrado. En un tiempo, la fuente de energía predominante fue el carbón (sustituyendo a la madera). Más adelante, apareció el petróleo. A continuación, lo hizo la energía nuclear. Es probable que en el futuro, las fuentes predominantes sean las renovables, tal vez encabezadas por la energía solar. El hombre ha pasado sucesivamente de una fuente de energía a otra, de la misma forma que ha evolucionado de una civilización a otra.

Para comprender mejor esta situación, bastará recordar los importantes cambios que ha experimentado la humanidad a lo largo del último siglo y medio de su historia y el trascendental papel de la energía en el mundo moderno. Hasta mediados del siglo XIX, la energía que consumía el hombre procedía básicamente de sus propias manos y de la ayuda ocasional que le prestaban algunos animales de labor. Desde entonces, esta situación ha experimentado un vuelco total, hasta el punto de que más del 95% de la energía que consume hoy en día la humanidad es de origen mecánico.



Figura 3.- El consumo de energía. Una parte muy importante de este consumo se produce en las zonas urbanas. Vista de la ciudad de México.

Desde el inicio de la Revolución Industrial, la demanda de energía no ha cesado de aumentar en el mundo, y todas las previsiones indican que seguirá creciendo en el futuro. La humanidad consume actualmente cuatro veces más energía que hace cuarenta años. Por otra parte, hay que tener en cuenta que al consumo de los países industrializados se va sumando la demanda de los países en vías de desarrollo, que, como es natural, se esfuerzan por elevar su nivel de vida. Esta situación (en la que no insistiremos más por el momento) contrasta fuertemente con el hecho de que la producción y el consumo de energía, al menos en la forma en que se llevan a cabo en la actualidad, están relacionadas con la degradación del medio ambiente de nuestro planeta y, en particular, pueden contribuir significativamente al cambio climático.

En el año 2000, el consumo mundial de energía ha sido del orden de 20.000 millones de toneladas equivalentes de carbón (Tec). Esta unidad se suele utilizar para expresar globalmente los datos de producción o consumo de energía, al margen de la naturaleza de las diversas fuentes. La cantidad citada equivale a decir que cada habitante del planeta Tierra consumió en dicho año unas tres toneladas equivalentes de carbón (aproximadamente).

Un dato importante en este tema son las diferencias existentes entre los países desarrollados y los no desarrollados. En particular, habría que recordar que, en términos generales, existe una alta correlación entre los consumos de energía de un país y su producto interior bruto. Por ejemplo, en los países de Europa occidental se consumen de 5 a 10 Tec por habitante y año, en tanto que en muchos países de África apenas se llega a las 0'3 Tec por habitante y año. En este contexto, el caso de Estados Unidos merece una mención aparte. Su consumo anual de energía es del orden de 30 Tec por habitante, es decir, un valor diez veces más elevado que el valor medio mundial. Un factor clave de esta discusión se centra en el importante crecimiento experimentado durante estos últimos años en el consumo mundial de energía y, muy especialmente, la consolidación de esa tendencia en el futuro.

En cualquier caso, resulta inquietante constatar que la tasa de aumento del consumo de energía es mucho mayor que la del crecimiento demográfico, lo cual conlleva por supuesto un claro aumento de lo que podríamos llamar "bienestar energético" de la humanidad en términos globales. Por descontado, hemos de insistir una vez más en el carácter general de esta afirmación y en la falacia que puede suponer el dejar a un lado en todos estos razonamientos cualquier tipo de consideración relativa a los fuertes desequilibrios existentes en la distribución de este bienestar a escala mundial.

En particular, durante los últimos años, el incremento más importante en el consumo de energía (en términos relativos) se ha producido en los países en vías de desarrollo, con el fin de aumentar su nivel de industrialización, elevar sus niveles de bienestar y dar respuesta a su crecimiento demográfico. En este sentido, destacan especialmente China, India o Méjico. Para ilustrar este hecho con cifras, podríamos mencionar, por ejemplo, que en el periodo comprendido entre 1980 y 1985, la población de los países no industrializados aumentó en un 11%, en tanto que su consumo de energía lo hizo en un 22%. Es interesante señalar que, en los países más desarrollados, los correspondientes aumentos fueron sólo del 3% y 5%, respectivamente.

Todos estos datos nos llevan directamente a la conclusión de que, salvo que se produzcan cambios realmente significativos en las tendencias actuales, el consumo de energía a escala mundial seguirá aumentando notablemente en el futuro. Por consiguiente, es importante considerar con algún detenimiento las fuentes de que dispone la humanidad para atender a esa ingente demanda y, en el contexto que aquí estamos considerando, analizar las repercusiones que las diferentes opciones pueden tener sobre el cambio climático.

6. Los combustibles fósiles

Ante todo, cabe señalar que las fuentes de energía de que disponemos en la actualidad se pueden clasificar en tres grandes grupos: los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías alternativas. Hoy por hoy, la mayor parte de nuestro consumo energético se basa en la utilización de combustibles fósiles (el carbón, el petróleo y el gas natural). Concretamente, se ha estimado que un 35% de la energía consumida durante el año 2004 estaba producida por el carbón, un 25% por el petróleo y un 20% por el gas natural. Estos datos son de gran trascendencia en relación con el tema que ahora nos ocupa, dado que estos combustibles son los responsables directos de la producción de dióxido de carbono y otros gases contaminantes de la atmósfera que, según las ideas generalmente aceptadas en la actualidad, contribuyen al calentamiento global de la misma, y, en consecuencia, su utilización es la causa principal del cambio climático de origen

antrópico de nuestro planeta.

Hay que recordar que el **carbón** es un combustible fósil formado por los restos de la vida vegetal de épocas muy remotas. El carbón es, con diferencia, el combustible fósil más abundante de que dispone la humanidad. El origen de la hulla se sitúa a mediados de la era Paleozoica, hace más de 300 millones de años. Los depósitos formados con posterioridad, producidos en el Cretáceo y el Terciario, son el origen de los actuales lignitos y carbones grises.

En la época en que se formó el carbón, el clima de la Tierra era cálido y húmedo y el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera era tal vez mucho mayor que en la actualidad. Estas condiciones favorecieron precisamente el crecimiento de enormes masas vegetales en el planeta. Las características del carbón vienen determinadas básicamente por la naturaleza de la vegetación que lo han originado y por los procesos geológicos subsiguientes que han intervenido en su formación. Su composición varía considerablemente de unos yacimientos a otros. En particular, su contenido en carbono varía entre el 85 y 95%. Otros componentes del carbón (con una clara incidencia en su calidad) son el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

A lo largo del tiempo, se han llevado a cabo muchas estimaciones sobre la magnitud de las reservas de este combustible en todo el mundo. Las cifras varían bastante de unas fuentes a otras. Algunas de estas estimaciones nos hablan de una cantidad del orden de 15 billones de toneladas. La mayor parte de estos recursos se encuentran en Rusia (55%), seguida por Estados Unidos (27%), Asia (9%) y Europa (5%). No resulta fácil estimar qué proporción de estos recursos es explotable, dado que ello depende fundamentalmente de las condiciones económicas bajo las que tenga lugar la extracción. Por ejemplo, si los costes de explotación son elevados, es evidente que sólo se extraerá el carbón que sea más accesible, a no ser que se produzca un gran incremento en su demanda. En todo caso, y cuando muchos creían que el carbón estaba a punto de pasar a mejor vida (empujado por el petróleo y



Figura 4.- Los medios de transporte modernos consumen enormes cantidades de energía. Tráfico de automóviles en una calle de El Cairo.

el gas natural), nuevos avances tecnológicos han hecho que esta fuente de energía haya recuperado su importancia tradicional. Como ya hemos indicado anteriormente, el carbón cubre en la actualidad el 35% del consumo energético mundial.

En los últimos años, la producción mundial de carbón ha sido del orden de 5.000 millones de toneladas anuales. Algunos expertos han estimado que, con las tasas de consumo y las técnicas de extracción disponibles actualmente, las reservas mundiales de carbón podrían durar al menos unos trescientos años. En todo caso, el descubrimiento de nuevos yacimientos y los posibles avances y mejoras en las correspondientes técnicas de extracción podrían elevar mucho este plazo, llegando tal vez hasta los 1.000 ó 1.500 años. Sin embargo, la situación

es bastante más complicada en la realidad que lo que acabamos de exponer aquí. Basta con contemplar los graves problemas que atraviesa la minería en muchos países de la Unión Europea para entenderlo. Es evidente que el contexto político, económico y social o la desviación del consumo hacia otras fuentes de energía más asequibles serán factores de enorme importancia a la hora de determinar el futuro de este combustible.

Sin embargo, en relación con el tema que ahora estamos analizando, habría que insistir sobre el hecho de que la energía producida a partir de la combustión del carbón es la menos aconsejable, dado que este combustible produce, por unidad de energía eléctrica producida, un 17% más de dióxido de carbono que el petróleo y un 43% más que el gas natural. La combustión de este combustible fósil es la principal responsable del vertido a la atmósfera terrestre de ingentes cantidades de gases contaminantes (óxidos de carbono, nitrógeno y azufre). Para ilustrar este aspecto de la cuestión, bastará con tener en cuenta que la central térmica de As Pontes de García Rodríguez (Coruña) emitió a la atmósfera en el año 2005 unos 9 millones de toneladas de dióxido de carbono. Este simple dato es suficiente para alertar del peligro que supone la utilización del carbón sobre un posible cambio climático del planeta.

La palabra **petróleo** (es decir, aceite de roca) se utiliza en la actualidad para designar una extensa variedad de hidrocarburos, desde el metano o gas natural hasta los líquidos de alta viscosidad y las parafinas sólidas. El origen y las secuencias de formación del carbón y el petróleo tienen muchos puntos en común, aunque presentan también grandes diferencias. Una de ellas se refiere a la temperatura a la que se encuentran los respectivos yacimientos, dado que muchos componentes del petróleo se descomponen a temperaturas del orden de los 150° C. Este hecho hace que existan muy pocos yacimientos petrolíferos a profundidades superiores a los seis o siete mil metros, dado el aumento de la temperatura asociado con este parámetro.

La extracción del petróleo utilizando únicamente la presión natural de los yacimientos se conoce con el nombre de extracción primaria. En un tiempo, los pozos se abandonaban cuando este flujo natural concluía, aunque muy pronto se descubrió que la inyección de gas o de agua bajo presión permitía prolongar la correspondiente explotación durante algún tiempo (extracción secundaria). En cualquier caso, la extracción de crudos viscosos en rocas de baja porosidad es muy poco eficiente, con rendimientos que apenas superan el 20%. Al menos hoy por hoy, incluso bajo condiciones muy favorables, las tasas de extracción de las explotaciones petrolíferas raramente llegan al 60%.

El dato anterior dificulta enormemente la realización de estimaciones precisas sobre las reservas petrolíferas existentes en el mundo. Por supuesto, éstas pueden variar en la medida en que se descubran nuevos yacimientos o se desarrollen nuevas técnicas de extracción. Los principales yacimientos de que disponemos hoy se encuentran en Arabia Saudí (23% del total mundial), Rusia (12%), Kuwait (10%), Irán (9%), Irak (5%) y Estados Unidos (5%). En Europa cabe destacar las reservas del Reino Unido (2%) y Noruega (1%).

Durante el año 2006, la humanidad ha consumido más de 15 millones de toneladas de petróleo cada día. Como es natural, el consumo de petróleo es particularmente elevado en los países industrializados. Desde los años sesenta del pasado siglo, nuestra "adicción" por este combustible no ha hecho más que aumentar y todo induce a pensar que esa situación se mantendrá en el futuro inmediato, al menos hasta mediados del presente siglo XXI. En cualquier caso, el hecho de que un producto cuya formación haya necesitado el transcurso de miles de años sea consumido por la humanidad en apenas un par de siglos no deja de ser inquietante. La desazón aumenta cuando se toma plena conciencia de los enormes problemas que supondrá la sustitución de este recurso en los usos a los que hoy se le destina de forma predominante en todo el mundo, es decir, el transporte y la industria petroquímica.

El tercer gran combustible fósil es el **gas natural,** que se suele encontrar asociado a los yacimientos de petróleo. La composición del gas natural es muy variable (dependiendo de su origen), aunque su componente principal es el metano, que se encuentra en proporciones entre el 85 y 95% del total. El resto es etano, propano y butano. El helio, el hidrógeno, y otros gases raros como el argón, están también presentes en su composición.

Hasta hace no demasiado tiempo, la extracción del gas natural asociado con el petróleo planteaba muchos problemas y dicho gas no se utilizaba, sino que se eliminaba en las propias explotaciones petrolíferas (formando grandes antorchas). Aunque en la actualidad la situación descrita todavía se mantiene en algunos casos, en general, el gas natural se considera un recurso de gran importancia dentro del panorama energético mundial.

Se ha estimado que las reservas mundiales de gas natural son del orden de los 70 billones de metros cúbicos, una cantidad equivalente a unos 60.000 millones de toneladas de carbón. La distribución de este combustible en el mundo es muy desigual. Los yacimientos más importantes se encuentran en Rusia (32%), Irán (13%), Estados Unidos (10%), Argelia (9%), Abu Dhabí (8%), Holanda (4%), Arabia Saudí (2%), Reino Unido (2%) y Canadá (2%).

En la actualidad, los Estados Unidos es el primer productor mundial de gas natural, con un 33% del total, seguido por los territorios de la antigua Unión Soviética, con un 30%. Los principales consumidores de este combustible son los países más desarrollados. Concretamente, en la década de los ochenta del pasado siglo, los Estados Unidos consumían más del 50% de la producción mundial de este recurso. Hace algún tiempo se predijo que las reservas de gas natural existentes en el mundo se agotarán en unos 250 años. Sin embargo, esta estimación hay que tomarla con alguna cautela, dado que está relacionada con las tasas de consumo, que pueden variar considerablemente en función de la disponibilidad de otros combustibles fósiles. Como es natural, el factor precio juega un papel fundamental en este tipo de estimaciones. En



Figura 5.- Los combustibles fósiles originan importantes emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Una central térmica en Estados Unidos.

particular, habría que tener en cuenta que el gas natural ha alcanzado durante los últimos años una gran importancia dentro del conjunto de recursos energéticos del planeta, hasta el punto de que este combustible cubre actualmente el 20% del consumo energético mundial y que, en realidad, está asumiendo el papel de "energía puente o de transición" entre los combustibles fósiles tradicionales y las fuentes de energía renovables y menos agresivas para el medio ambiente.

Desde el punto de vista medioambiental, es importante recordar también que el gas natural es mucho más limpio que los otros combustibles fósiles. El gas contiene, por unidad de energía producida, un 43% menos de carbono que el carbón y un 26% menos que el petróleo, lo que se traduce en una cantidad considerablemente menor del dióxido de carbono

vertido a la atmósfera. Como ventaja adicional, hay que tener en cuenta también que en la combustión del gas natural apenas se producen óxidos de azufre.

En todo caso, y ante la situación que acabamos de exponer, es evidente que si queremos evitar (o reducir de forma sustancial) la emisión a la atmósfera de los gases de combustión relacionados con el efecto invernadero, deberemos prescindir por completo (o en una gran parte) de la utilización de combustibles fósiles para atender a sus necesidades de energía, actuales o futuras. Para comprender lo que esto puede suponer, bastará con recordar, por ejemplo, que el 80% del consumo energético de la Unión Europea se cubre hoy en día con estos combustibles. En términos generales, hay que ser conscientes de que los problemas que plantearía la mencionada exigencia, a escala mundial, serían de una extraordinaria importancia y producirían cambios absolutamente radicales y difíciles de asumir en nuestras actuales formas de vida.

7. La energía nuclear

Desde su irrupción en la escena energética, hace ya más de 60 años, tras la Segunda Guerra Mundial, la energía nuclear no ha dejado de suscitar polémicas y recelos. En el marco que ahora estamos considerando, habría que empezar recordando que en la actualidad existen unas 440 centrales nucleares repartidas por una veintena de países de todo el mundo, que proporcionan del orden de 370.000 Megawatios, lo cual representa el 16% de la energía eléctrica que se consume en todo el planeta. En Europa están funcionando hoy en día 207 reactores nucleares. A la cabeza de los países europeos se sitúa Francia, en donde existen un total de 59 centrales nucleares, que generan casi el 80% de las necesidades de energía eléctrica de ese país. En España están funcionando hoy 8 centrales nucleares, que producen el 23% de la energía eléctrica que consumimos. Nos parece oportuno mencionar también que en la actualidad se están construyendo una treintena de centrales nucleares en todo el mundo (de ellas, 8 en India, 4 en China y 3 en Japón), por razones de tipo económico y/o estratégico. Como factor positivo de este tipo de instalaciones, se puede argumentar también que su funcionamiento no contribuye al cambio climático, dado que en ellas no se producen emisiones de dióxido de carbono. Precisamente éste es uno de los factores que están utilizando hoy en día con más insistencia los defensores de esta fuente de energía.

En cualquier caso, no se puede olvidar que su peligrosidad ha quedado claramente demostrada en numerosos accidentes de mayor o menor gravedad ocurridos desde que se inauguraron las primeras centrales nucleares, el más importante de los cuales es el que tuvo lugar en la planta de Chernobyl, en la antigua Unión Soviética, en el año 1986, y cuyas secuelas todavía perduran. Los problemas relacionados con la extracción, el transporte y el procesamiento del uranio para preparar el combustible nuclear, los riesgos relacionados con el funcionamiento regular de las centrales nucleares, o el almacenamiento de los residuos radiactivos producidos en estas instalaciones, han sido, entre otros, los motivos del fuerte rechazo con que se contemplan las centrales nucleares por buena parte de la opinión pública. En cualquier caso, el debate sobre las ventajas e inconvenientes de esta fuente de energía está abierto.

8. Las energías alternativas

Dentro de las llamadas energías alternativas, **la energía hidroeléctrica** ha desempeñado un lugar destacado hasta fechas relativamente recientes. Se ha estimado que el potencial aprovechable de este tipo de energía en todo el mundo es del orden de 3 millones de Megawatios. Los países con mayores recursos potenciales en este sentido son China, Rusia, Estados Unidos, Zaire, Canadá, Brasil, Malasia, Colombia e India, por este orden.

Sin embargo, nos consta que, en la actualidad, apenas se aprovecha un 15% de esta enorme potencia. ¿Qué sucede con el resto? La respuesta a esta pregunta ilustra perfectamente un aspecto clave del tema que nos ocupa: la existencia de grandes desequilibrios geográficos entre las zonas donde están localizados los principales recursos energéticos de producción y los lugares en que se consumen mayoritariamente dichos

recursos. Por ejemplo, en Europa se está aprovechando en la actualidad un 60% de la potencia hidroeléctrica disponible, en tanto que este porcentaje en Sudamérica es del orden del 20% y en África apenas alcanza el 1%. En este sentido, habría que recordar que, hoy por hoy, la posibilidad de transportar energía eléctrica a grandes distancias está absolutamente descartada por razones tecnológicas.

En todo caso, el desarrollo del potencial de energía hidroeléctrica en el mundo es poco probable, dado que el agua es necesaria para otros usos distintos de la generación de electricidad y que, en ocasiones, son prioritarios. El Regadío es uno de los más importantes y suele ser muy difícil combinar estos dos usos. Habría que recordar también que los proyectos hidráulicos suponen la inundación de grandes extensiones de terreno y ello puede producir enromes pérdidas de tierras cultivables, una situación difícil de aceptar para la sociedad, ante el importante crecimiento de la población mundial.

La energía eólica es una posibilidad mucho más atractiva. El origen de los molinos de viento (una imagen entrañable en muchos paisajes) se remonta a la más remota antigüedad. Las versiones modernas de los molinos de viento aparecen en fechas relativamente recientes. Por ejemplo, en los años treinta, se construyó en Rusia un molino con aspas de más de 30 metros de diámetro que suministraba una potencia de 100 kw. Tras la Segunda Guerra Mundial, se construyeron en Inglaterra varios molinos de esa potencia. Desgraciadamente, el funcionamiento de algunos de estos prototipos fracasó y el entusiasmo inicial hacia esta fuente de energía desapareció durante bastante tiempo.

Sin embargo, la situación ha cambiado sustancialmente en la actualidad. Aunque los modernos generadores no están exentos de ciertas críticas (por su impacto sobre el paisaje, el peligro para las aves y la generación de ruido), la imagen de los llamados parques eólicos empieza a resultar familiar en muchos países de todo el mundo. En este sentido, nos parece interesante mencionar el caso de Dinamarca, que está realizando últimamente un considerable esfuerzo para desarrollar este tipo de energía. La particularidad es que los generadores eólicos que se están



Figura 6.- La energía hodroeléctrica es una opción interesante. Vista de la gran central hidroeléctrica de Itapú, en la frontera entre Brasil y Uruguay.

instalando en este país están situados sobre el mar, en la costa (off-shore). Se trata de modelos de enormes dimensiones, con un coste del orden de 300.000 euros y una potencia de 2 Mw por unidad. Cuando se complete este ambicioso plan se confía en que la energía suministrada por este tipo de generadores cubrirá hasta un 40 ó 50% de las necesidades de energía eléctrica en aquel país. Como es sabido, desde hace algunos años, en España se ha prestado una gran atención a esta fuente renovable y limpia de energía, hasta el punto de que la imagen de los parques eólicos es ya relativamente frecuente en muchas zonas de nuestro país. Se espera que en el curso de unos pocos años la producción de energía eólica llegue a cubrir hasta un 10% de nuestras necesidades energéticas totales (en este sentido, no está de más hacer un inciso para recordar ahora que nuestro país se ve obligado a importar actualmente un 80% de la energía que consume).

En principio, las perspectivas que ofrece la **energía solar** son también enormemente prometedoras. Ciertamente, hay muchos motivos para justificar el optimismo en ese sentido, dado que el flujo solar sobre las capas altas de la atmósfera es de 1'4 kilowatios por metro cuadrado. Aunque la absorción y la reflexión reducen sensiblemente esta cifra, se considera que un 50% de dicha energía alcanza la superficie de la Tierra. Se ha estimado que la energía solar que llega a la superficie del planeta durante un periodo de veinte días equivale a todas las reservas de combustibles fósiles existentes.

La forma más sencilla de captar la energía solar es el colector plano. En su variante más simple, se trata de una superficie plana y negra por la que se hace circular agua a través de unos conductos. Existen infinidad de modelos y variantes de dichos colectores. El destino más frecuente de estos dispositivos es la obtención de agua caliente para usos domésticos. Hoy en día, el uso de estos colectores solares es relativamente frecuente en muchos países, aunque sin llegar a agotar, ni mucho menos, sus posibilidades. Por supuesto, utilizando colectores de focalización se alcanzan temperaturas mucho más elevadas. En general, esta focalización se consigue mediante el uso de espejos cóncavos. Se han construido numerosos prototipos de estos "hornos solares", en los que se pueden alcanzar temperaturas muy elevadas.

La conversión directa de energía solar en electricidad todavía presenta muchas dificultades en la actualidad. El rendimiento de conversión fotovoltaica de las células solares todavía es muy bajo y, en consecuencia, el coste de la energía eléctrica producida es elevado en comparación con el de otras fuentes de energía. En cualquier caso, es muy posible que la mejora de la eficiencia de las células fotoeléctricas, el perfeccionamiento de los métodos de fabricación actuales y el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías, permitan abaratar considerablemente dichos costes en un futuro no muy lejano. Por el momento, las previsiones realizadas hace una treintena de años de que hacia finales del pasado siglo la energía solar llegaría a cubrir hasta un 10% de las necesidades energéticas del mundo no se han cumplido en absoluto.

Un problema importante inherente a la energía solar es su variabilidad. No sólo se producen variaciones diarias (su valor es nulo durante la noche y máximo a mediodía) como estacionales (invierno y verano), de carácter regular, sino que hay que tener en cuenta también las fluctuaciones al azar que tienen su origen en las condiciones meteorológicas existentes (las horas de insolación varían mucho de unos países a otros). Como es natural, las necesidades de las sociedades modernas no pueden estar condicionadas por todos estos factores. Es evidente que muchas de las dificultades a las que se enfrenta actualmente la energía solar podrían resolverse si existieran sistemas de almacenamiento adecuados. Por lo tanto, no es sorprendente que una parte de la investigación realizada hoy en día al respecto vaya en esa dirección.

La fuente de energía que conocemos con el nombre de **bioenergía** está basada en la biomasa, tanto la vegetal como la animal. Esta moderna fuente de energía (no tan moderna si recordamos que, en realidad, el carbón, el petróleo y el gas natural son biocombustibles, que se formaron en su día a partir de la transferencia de energía solar a ciertos organismos vivos de nuestro planeta) se está desarrollando sobre todo a través de la producción de biocombustibles orgánicos renovables y la producción biológica de hidrógeno.

En relación con la primera de estas posibilidades, podemos señalar que, en Brasil, que empezó a desarrollar las técnicas necesarias hace unos treinta años, se cultiva actualmente caña de azúcar para destinarla a la producción de bioetanol, un combustible con el que se mueven hoy en día más de un millón de coches en ese país. Como dato adicional, habría que señalar que un barril de bioetanol cuesta la mitad que un barril de petróleo. Con todo, el bioetanol no es el único biocombustible orgánico. El denominado biodiesel se puede obtener prácticamente a partir de cualquier semilla oleaginosa, así como de aceites y grasas vegetales o animales. Actualmente, el biodiesel se elabora a partir de semillas de colza, soja o girasol. Un tercer combustible de origen orgánico es el gas metano, que se puede obtener por fermentación de residuos orgánicos. Por supuesto, el desarrollo de todas estas posibilidades exigirá un considerable esfuerzo en los ámbitos de inves-

tigación y producción agrícola e industrial.

La producción biológica de hidrógeno (un gas fácilmente transportable y cuya combustión libera agua en lugar de dióxido de carbono) está hoy en fase de investigación en muchos países desarrollados. El proceso conocido como biofotólisis consiste simplemente en la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, lograda con energía solar y mediante el uso de microorganismos (algas o bacterias). Por muchos motivos, este tema resulta muy prometedor. Las eficiencias conseguidas hasta ahora son del orden del 10%, expresadas en términos de la relación entre la energía producida en forma de hidrógeno y la energía solar radiante recibida en los correspondientes cultivos.

A más largo plazo, parece ser que la **energía de fusión** está destinada a jugar un papel importante en cubrir las demandas de energía de la humanidad. De hecho, algunos autores sugieren que ésta será probablemente la "solución final" del problema de la energía, dado que esa fuente permitiría cubrir nuestras necesidades durante un tiempo prácticamente ilimitado. Hay que recordar que la fusión nuclear consiste básicamente en la unión de núcleos ligeros para dar lugar a otros más pesados, con la consiguiente liberación de energía. En cierto modo, este proceso se puede considerar como el inverso de la fisión nuclear. La fusión nuclear tiene lugar de forma espontánea en el Sol y en las estrellas, donde las reacciones termonucleares tienen lugar gracias a la alta temperatura existente en estos astros (aproximadamente, un millón de grados centígrados), en virtud de la cual la agitación térmica es lo suficientemente importante como para que los núcleos se aproximen los unos a los otros, superando la repulsión entre sus correspondientes cargas eléctricas.

Desgraciadamente, aunque los principios en los que se basa esta forma de energía son actualmente muy bien conocidos, su desarrollo se encuentra todavía en fase de investigación. Los problemas que plantea la construcción de un reactor de fusión a escala industrial son enormes y, a pesar de los notables avances que se han conseguido durante las



Figura 7.- Las centrales nucleares no emiten dióxido de carbono a la atmósfera, aunque presentan muchos problemas. La central nuclear de Cofrentes.

últimas décadas en los países más desarrollados (Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, Francia, Rusia y, mucho más recientemente, China), todo parece indicar que habrá que esperar aún mucho tiempo para que esta posible fuente de energía alcance la fase de producción industrial. El esfuerzo constante de un gran número de centros especializados en este campo de trabajo y la disponibilidad de inversiones muy cuantiosas para poder desarrollar las complejas tecnologías relacionadas con esta forma de energía serán, sin duda, factores decisivos para la consecución del éxito definitivo en su desarrollo, a nivel práctico.

9. Conclusiones finales

Realmente, a la vista de las consideraciones que acabamos de exponer muy sucintamente en los apartados anteriores, es evidente que la supe-



Figura 8.- La energía eólica es limpia y renobable. Vista de uno de los parques eólicos construidos recientemente en nuestro país.

ración del desafío que supone el suministro de enormes cantidades de energía a toda la humanidad, en las actuales condiciones de la ciencia y la técnica (sin olvidar los desequilibrios geoestratégicos y económicos que existen en la actualidad a nivel de todo el planeta), será una tarea extraordinariamente difícil.

En consecuencia, muchos expertos coinciden en señalar que, si no se producen cambios muy drásticos en las actuales tendencias, la humanidad está abocada a enfrentarse en un futuro no demasiado lejano con una grave crisis energética, de repercusiones incalculables. Todo induce a pensar que la lucha por los recursos energéticos disponibles en nuestro planeta será muy dura en las próximas décadas, en todos los sentidos. De hecho, ya lo está siendo.

En este contexto específico, y al menos a corto y medio plazo, no resulta plausible pensar siquiera en la posibilidad de que la humanidad renuncie a la utilización generalizada de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), cuya contribución al cambio climático del planeta parece evidente a la luz de los últimos datos de que disponemos en la actualidad. En el marco de la actual demanda energética mundial (una demanda con tendencia a aumentar todavía más en los próximos años), dicha renuncia es poco menos que utópica, pese a las repetidas recomendaciones de los expertos, que contrastan con la opinión de otros especialistas en el tema, que auguran una larga vida a los combustibles fósiles, en el marco de una deseable diversificación de nuestras fuentes energéticas. La magnitud del problema es tal que los efectos de dichas recomendaciones (en las que se consideran aspectos tan diferentes como la mejora de la eficiencia energética de nuestros actuales hogares, industrias y sistemas de transporte, la reducción sustancial de la emisión de los gases que contribuyen al efecto invernadero, o el incremento de la utilización de energías limpias hasta alcanzar unas proporciones de las que todavía nos encontramos muy lejos en la actualidad) se contemplen con un cierto pesimismo por parte de no pocos observadores imparciales, que se muestran un tanto escépticos ante las declaraciones de intenciones de algunos políticos y la contemplación de la cruda realidad en la que estamos inmersos actualmente.

Referencias

MICHEL GRENON.- *La crisis mundial de la energía.*- Alianza Editorial (1973).

AMANDO GARCÍA.- *Energía y desarrollo: la crisis energética.*- Publicado en el libro *"Temps de revolucions".*- Universidad de Valencia (1990).

AMANDO GARCÍA.- *"Medio ambiente y sociedad".*- Cátedra de Eméritos.- Fundación Valenciana de Estudios Avanzados (2006).

VARIOS AUTORES.- *El futuro de la energía.*- Temas para el debate (2006).

VARIOS AUTORES.- *Información y datos sobre el tema del cambio climático y la producción y consumo de energía.*- Diferentes páginas de Internet (2007).



Influencia del Sol en el Cambio Climático

Vicente Domingo

Sumario.

El Sol ha condicionado históricamente el clima de la Tierra en escalas de tiempo de cientos, miles y millones de años, pero la variación de la energía que emite en forma de radiación en escala de tiempo de años o décadas, y que es la que determina la variación de la temperatura del aire cerca de la superficie de la Tierra, es relativamente pequeña. Aún así su determinación nos ha permitido llegar a la conclusión de que en el espacio de tiempo que va desde el sigo XIX al presente, cuando se ha puesto de manifiesto un aumento térmico anómalo socialmente preocupante, la actividad solar puede haber contribuido al calentamiento de la Tierra durante la primera mitad del siglo XX, pero ciertamente no durante la segunda mitad, con lo que queda la contaminación atmosférica de origen humano como única responsable del calentamiento que se observa durante los últimos 50 años.

1. Introducción: Calentamiento de la atmósfera en los últimos dos siglos

Durante la segunda mitad del siglo XX se ha observado un importante aumento de la temperatura media de la atmósfera terrestre. Puesto que este calentamiento anormal ocurre en el apogeo de la revolución industrial y el aumento del consumo humano, pronto se ha sugerido que la actividad humana puede estar a la base del comportamiento anómalo del clima terrestre, causando ansiedad y un deseo de cuantificar el efecto de la contaminación humana del clima. Por otro lado, por estudios históricos y paleo-climáticos se tiene evidencia de que las variaciones de la actividad solar repercuten en la temperatura de la superficie y atmósfera terrestres. Por ello dentro del estudio del cambio climático de la Tierra tiene un lugar importante la comprensión del efecto de las variaciones solares en el mismo, de modo que podamos saber cuánto cambio climático es natural y cuánto artificial (figura 1).

1a. Factores que influyen en el clima y en sus variaciones

El clima, en su aspecto térmico, es el resultado del balance entre el ingreso de energía en la atmósfera terrestre y la salida de energía de la misma. Las variaciones de las entradas y salidas están, de un modo simplista condicionadas por las variaciones de numerosas variables tales como:

·la radiación o energía solar que llega a la Tierra.

·la reflectividad de la atmósfera, cosas como nubosidad y tipo de nubes.

·la reflectividad de la superficie sólida y líquida, cosas como cobertura de hielo y nieve, cobertura de masa vegetal, transparencia de la atmósfera a la radiación reflejada.

·la temperatura de los distintos elementos, y su distribución en el globo.

·la transparencia de la atmósfera a la radiación emitida.

·la re-emisión de energía de la atmósfera, efecto invernadero.

·redistribución en el tiempo de calor: corrientes atmosféricas, corrientes marinas, meteorología.

1b. La Tierra y el Sol

La Tierra, un pequeño planeta del Sol, acusa cualquier cambio en las emisiones del Sol.

Desde Galileo, en Europa, sabemos que el Sol presenta variaciones en su aspecto, como la aparición de manchas, que hoy conocemos como una de las manifestaciones de la actividad solar. (figura 3)

El Sol, que está en la mitad de sus 10.000 millones de años es básicamente muy estable pero sufre pequeñas variaciones. Como es la fuente de toda la energía, excepto de la pequeña cantidad de energía geotérmica que aporta el núcleo de la Tierra, cualquier variación, pequeña o grande, repercute en todo el sistema climático de la Tierra.

La actividad solar influye en cambios de la Tierra a través de múltiple mecanismos, directamente por:

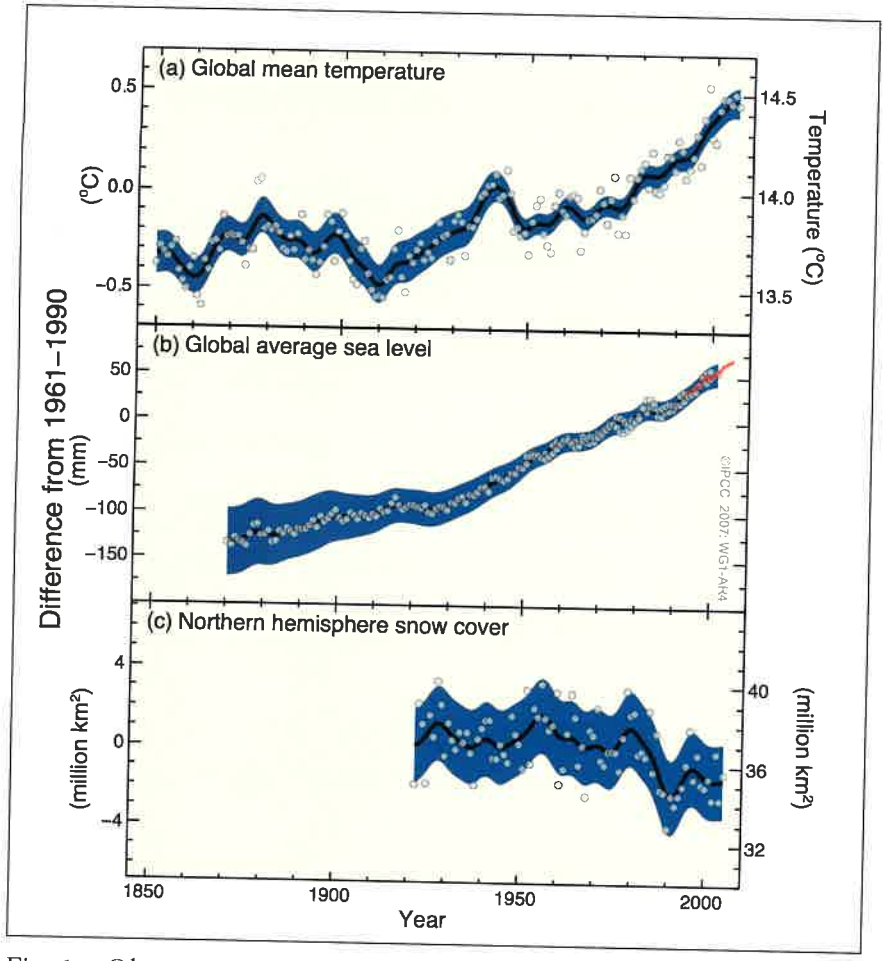


Fig. 1 - Observaciones directas de los cambios climáticos recientes. a) temperatura media global en la superficie de la Tierra, b) nivel medio global del mar, medidas de calado (azul) y satélite (rojo), c) cobertura de nieve en el hemisferio norte en marzo-abril. Todos los cambios son relativos a los correspondientes promedios del período 1961-1990. Los círculos representan valores anuales y las curvas promedios de décadas. El sombreado es indicativo de los límites de incertidumbre estimados.(fuente: Informe del Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC) "Cambio climático 2007").

-la irradiancia total o constante solar, definida como la energía emitida por el Sol que llega a la Tierra por unidad de superficie. Es la fuente básica de energía del clima terrestre, y naturalmente cualquier variación afecta a la temperatura de la superficie y atmósfera terrestres.

indirectamente por:

-los rayos ultravioleta, que son parte del espectro energético de la irradiancia solar, aunque representan una fracción pequeña de toda la energía, puede sufrir variaciones relativas mucho más grandes que las de la irradiancia total sin que se noten en ella porque son variaciones de una pequeña fracción de la misma. Afectan principalmente a la partes altas de la atmósfera terrestre: influyen en la producción/destrucción de ozono, afectando a la química y composición de la atmósfera baja y media y también contribuyen al calentamiento de la atmósfera media y superior.

-partículas cargadas energéticas producidas por las fulguraciones solares, más frecuentes en los periodos de mayor actividad solar.

-los rayos cósmicos o partículas cargadas de origen galáctico son modulados por la heliosfera o cavidad de influencia solar definida por el viento solar y fuertemente influenciada por la actividad solar. Igual que las partículas energéticas solares ionizan las moléculas de la atmósfera y pueden dar lugar a núcleos adicionales de condensación aumentando la nubosidad y modificando el equilibrio radiativo de la atmósfera.

-desarrollo de perturbaciones de la magnetosfera terrestre, que interacciona con la atmósfera terrestre, ionizándola, calentándola en su parte superior, a través de los anillos de radiación y de la generación de corrientes eléctricas.

Los otros factores definen el equilibrio térmico del sistema climático en que vivimos.

El hombre, como el resto de los seres vivos siempre ha contribuido y contribuye a cambios de algunas de las variables, por ejemplo



Fig. 2 - Balance energético de los principales factores que condicionan el nivel térmico del clima. Además del radiación que recibimos del Sol y la radiación que emite la Tierra al exterior (línea superior de la figura), es importante la radiación que emiten los gases de invernadero hacia abajo.

construyendo pantanos, talando bosques, produciendo aerosoles, como el humo, y últimamente, debido a su proliferación como especie y al desarrollo de técnicas de gran productividad, está generando cambios notables en algunos elementos que son importantes en el equilibrio climático, en particular los gases que constituyen el efecto invernadero de la atmósfera, tales como el óxido de carbono (CO_2, producido en el consumo, combustión, del carbón, del petróleo y del gas natural) así como los clorofluorcarbonos (CFC's) que afectan a la capa de ozono, metano, el hollín...

2. Variación de la actividad solar

La producción de energía del núcleo del Sol es extremadamente estable porque se trata de una gran masa de hidrógeno que se convierte en helio mediante fusión nuclear, es decir un reactor nuclear en el centro del Sol a 15 millones de grados, que lleva funcionando desde hace 5.000 años y todavía queda combustible para otros 5.000 años. Esa energía se propaga por el interior del Sol hasta llegar a la superficie visible, la fotosfera, que se mantiene a unos 5.800 grados centígrados y es la fuente inmediata de la radiación que recibimos.

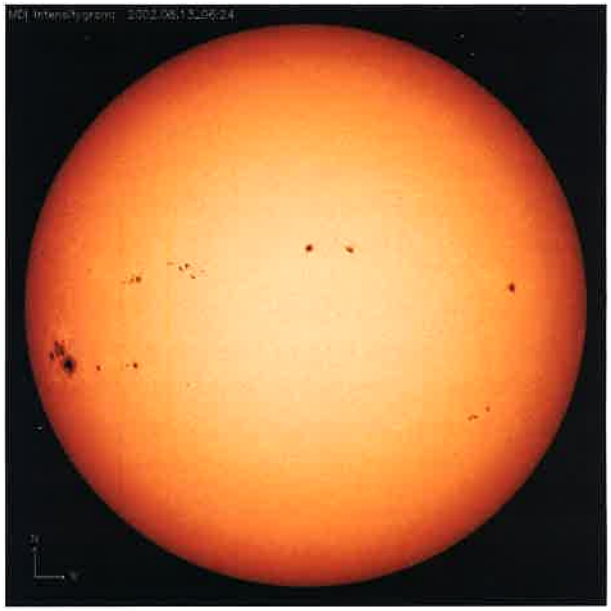


Fig. 3 - Imagen del Sol, donde aparecen algunas manchas, con una región activa desarrollada al lado izquierdo del disco solar. Tomada el 13 de agosto de 2002 por el instrumento "Michelson Doppler Imager" desde el observatorio solar espacial "Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)", de la ESA y la NASA.

Pero la fotosfera no es una superficie, en realidad es la parte que podemos ver del gas ionizado o plasma que constituye la zona superior del Sol, llamada zona de convección porque está en permanente ebullición. Una consecuencia de la convección es la formación de corrientes eléctricas y campos magnéticos en su seno. Los campos

magnéticos en el plasma solar modifican su movilidad o convección, así como la transparencia del mismo y cuando suben a la fotosfera permiten que se emita radiación de distintas profundidades de la misma que están a diferente temperatura y por lo tanto emiten distinta cantidad de energía por unidad de superficie. Cuando los campos magnéticos son intensos y extensos disminuyen la convección haciendo que llegue menos energía a la superficie, y el lugar donde se encuentran aparece como una mancha obscura; cuando son más reducidos en intensidad y en extensión sólo producen un descenso del nivel visible de la fotosfera, y dejan que salga radiación de zonas más calientes y aparecen como manchas brillantes o fáculas, que se ven más intensas cerca de los bordes del Sol, porque es entonces que se ven mejor las paredes del tubo cuyo nivel visible ha disminuido.

Frecuentemente en la parte visible del Sol, o disco solar, se ven una o varias manchas solares rodeadas de una región más amplia en la que están presentes numerosas fáculas y otras perturbaciones de la fotosfera. Estos conjuntos se conocen como regiones activas, lugares en los que aflora el campo magnético subyacente, y en las que el tamaño y número de manchas y fáculas varía constantemente. (figura 3).

Las manchas obscuras mencionadas que aparecen en el Sol duran algunos días. En el mundo occidental fueron puestas de manifiesto por Galileo, alrededor de 1600, al observar el Sol con un pequeño telescopio. Desde el siglo XVIII se cuenta regularmente el número de manchas que hay en el disco solar y constituyen el indicador de lo que se llama actividad solar; pronto se observó que el número de manchas, es decir la actividad del Sol varía con un período de unos 11 años. Las manchas, o mejor las regiones activas que representan van frecuentemente asociadas con erupciones solares y otros fenómenos que alteran la atmósfera solar. Estos elementos son los principales artífices del fenómeno de cambio de la irradiancia total del Sol (o constante solar). (figuras 4 y 5)

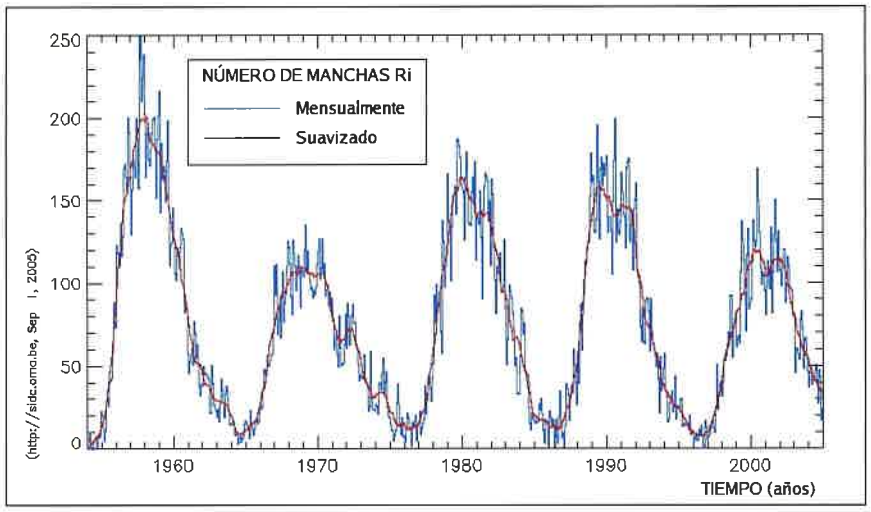


Fig 4- Variación del número de manchas solares observadas en el disco solar durante los últimos cinco ciclos solares.

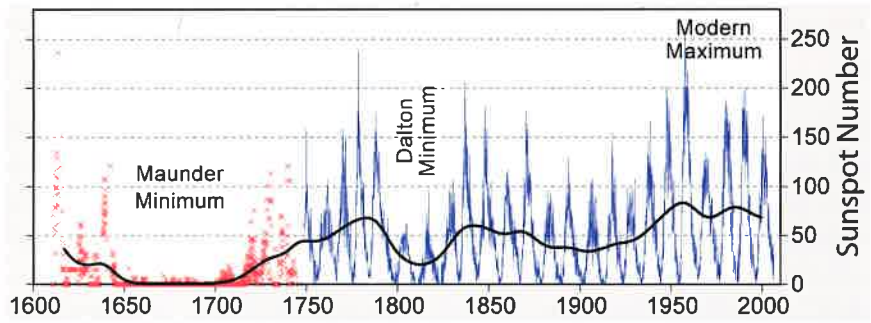


Fig. 5 - Variación del número de manchas solares observadas durante los últimos 400 años. La línea negra es el promedio de manchas, y se puede considerar como un buen indicador de la actividad solar. Los periodos llamados "Maunder Minimum" y "Dalton Minimum" corresponden a épocas de marcado frío en Europa.

2a. influencia de la actividad solar en la irradiancia solar

La presencia de regiones activas en la fotosfera solar se manifiesta de un modo primario por la observación de manchas, cuyo número constituye el índice más utilizado como referencia del nivel de actividad solar. Las regiones activas se caracterizan por la presencia de manchas obscuras de diversos tamaños rodeadas de una región con muchas pequeñas manchas, conocidas como fáculas, mas brillantes que la fotosfera tranquila, pero menos conspicuas cuando se observa el Sol con instrumentos con poca resolución.

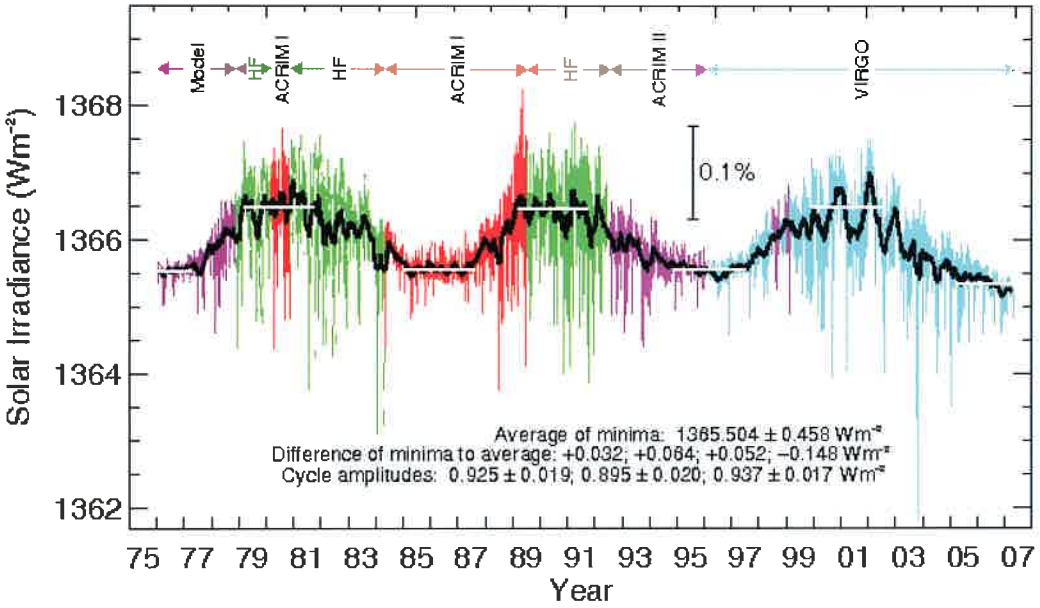


Fig. 6 - Variación de la irradiancia solar (conocida como constante solar) entre 1978, fecha en la que empezó a ser medida y hoy, 2007. Los datos representados son una composición de datos obtenidos por instrumentos a bordo de varios satélites y observatorios que se ha sucedido en el tiempo. HF en el Nimbus 7, ACRIM I en el Solar Maximum Mission (SMM), y ACRIM II en el Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) de la NASA, y VIRGO en SOHO, de la ESA y la NASA. La barra en la parte alta de la figura indica el origen de los datos. (Fröhlich 2005).

Ocurre que, entre otros fenómenos relacionados, la suma de la radiación añadida que producen las fáculas es superior a la suma del defecto de radiación que producen las manchas solares, y ello hace que un aumento de la actividad solar vaya acompañada de un aumento de la irradiancia solar, como se ha podido observar desde que se mide desde el espacio. La medida de la constante solar o irradiancia solar total sólo se puede hacer desde el espacio, porque la absorción de la radiación por la atmósfera hace imposible determinar la radiación que llega del Sol con un error menor que 2 ó 3 % si se mide desde el suelo. Desde 1978 se mide con radiómetros solares en satélite, y vemos que varía como un 0,1-0,15 % entre el mínimo y el máximo de actividad de un ciclo de 11 años. (figura 6) El estudio de los fenómenos de actividad solar junto con las observaciones de la radiación solar permite a los físicos solares establecer relaciones entre la actividad y la irradiancia solar, de modo que conocido un nivel de actividad se puede deducir la irradiancia solar en ese momento. Como se tienen indicadores de la actividad solar anteriores al tiempo de medición directa de la radiación solar (desde 1978) podemos ir atrás en el conocimiento del nivel de radiación solar.

2b. el viento solar y la heliosfera, los rayos cósmicos galácticos

La atmósfera solar, conocida como corona, es un gas ionizado que se encuentra a muy altas temperaturas, y se expande en un flujo del mismo gas que se conoce como viento solar y se extiende hasta que alcanza un equilibrio con el viento interestelar, formando una gran cavidad que se llama heliosfera. El viento solar se aleja del Sol en todas direcciones a velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo cuando pasa cerca de la Tierra. A cierta distancia del Sol, bastante mas lejos que la órbita de Plutón este viento supersónico se ve obligado a disminuir su velocidad para adaptarse a la presencia de los gases de medio interestelar. Primero pasa por un choque terminal y se convierte en subsónico en lo que se llama la funda heliosférica, allí cambia de dirección para alinearse con el ambiente y forma como si fuera una

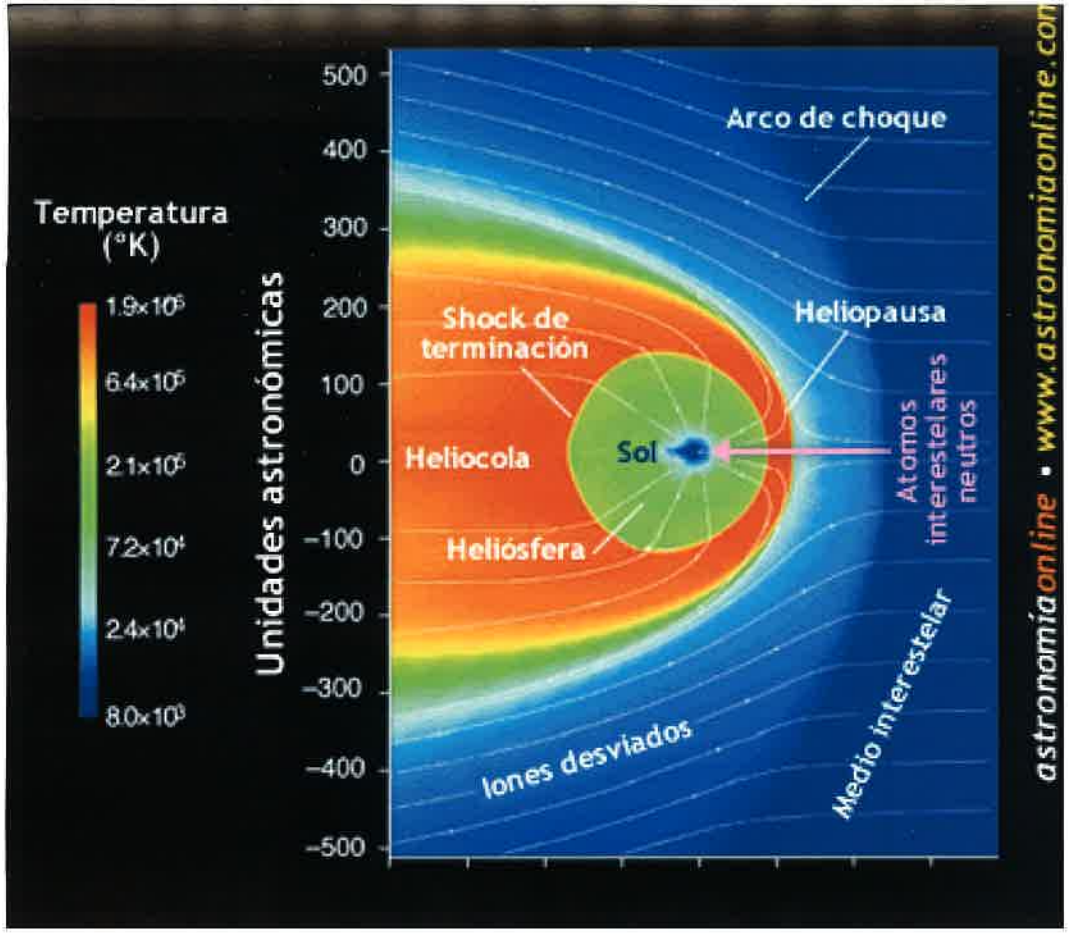


Fig. 7 - Figuración calculada de la heliosfera, la cavidad que se genera alrededor del Sol cuando éste se mueve en el interior del medio interestelar. Dentro de la heliosfera se encuentra el viento solar que lleva consigo las estructuras de la corona solar y que son consecuencia de la actividad solar. Los rayos cósmicos que se encuentran en el espacio interestelar deben atravesar la heliosfera llena con el viento solar que se propaga radialmente, pero cuya estructura magnética es espiral. La figura incluye las posiciones y trayectorias de las varias sondas espaciales que la exploran.

cola de cometa. La funda heliosférica acaba en lo que se conoce como la heliopausa que es la superficie de contacto entre la heliosfera y el medio interestelar.

La heliosfera es una burbuja en el espacio producida por el viento solar. Aunque átomos neutros del espacio interestelar pueden entrar en la burbuja, prácticamente toda la materia en la heliosfera procede del Sol mismo. El viento solar, que se propaga en el interior de la heliosfera, arrastra en su estructura el campo magnético que puebla la atmósfera solar o corona y como el Sol gira sobre su eje en una vuelta cada 27 días, encontramos que las estructuras magnéticas en el mismo adquieren estructura espiral. Junto con la estructura magnética, el viento solar incorpora las variaciones que ocurren en la atmósfera solar debido a la actividad. Este aspecto es importante para entender la propagación de los rayos cósmicos desde el viento interestelar hasta la Tierra porque, en consecuencia, han de hacerlo perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo magnético, que dificultan su entrada de un modo variable, según varíe la actividad solar.

Por el espacio interestelar, en el que se encuentra nuestro Sol y su heliosfera se propagan partículas de gran energía o velocidad, conocidas como rayos cósmicos (galácticos por su origen), que cuando llegan a la Tierra penetran en la atmósfera terrestre y producen cascadas de partículas energéticas al chocar con los átomos de la atmósfera; el conjunto de partículas energéticas, es decir, los rayos cósmicos galácticos, las partículas energéticas solares y las secundarias al interaccionar con la átomos atmosféricos producen iones, que pueden ser núcleos de condensación del agua, contribuyendo a la formación de nubes. Como para llegar a la Tierra los rayos cósmicos han de atravesar la parte exterior de la heliosfera, poblada por el viento solar y las propiedades del mismo varían con la actividad solar, es natural que la llegada de los rayos cósmicos a la Tierra varíe con la actividad solar, cosa que se viene observando desde que se mide el flujo de rayos cósmicos hace muchos años. Éste podría ser otro factor en el clima, puesto que las nubes reflejan parte de la radiación solar. (figuras 7 y 8)

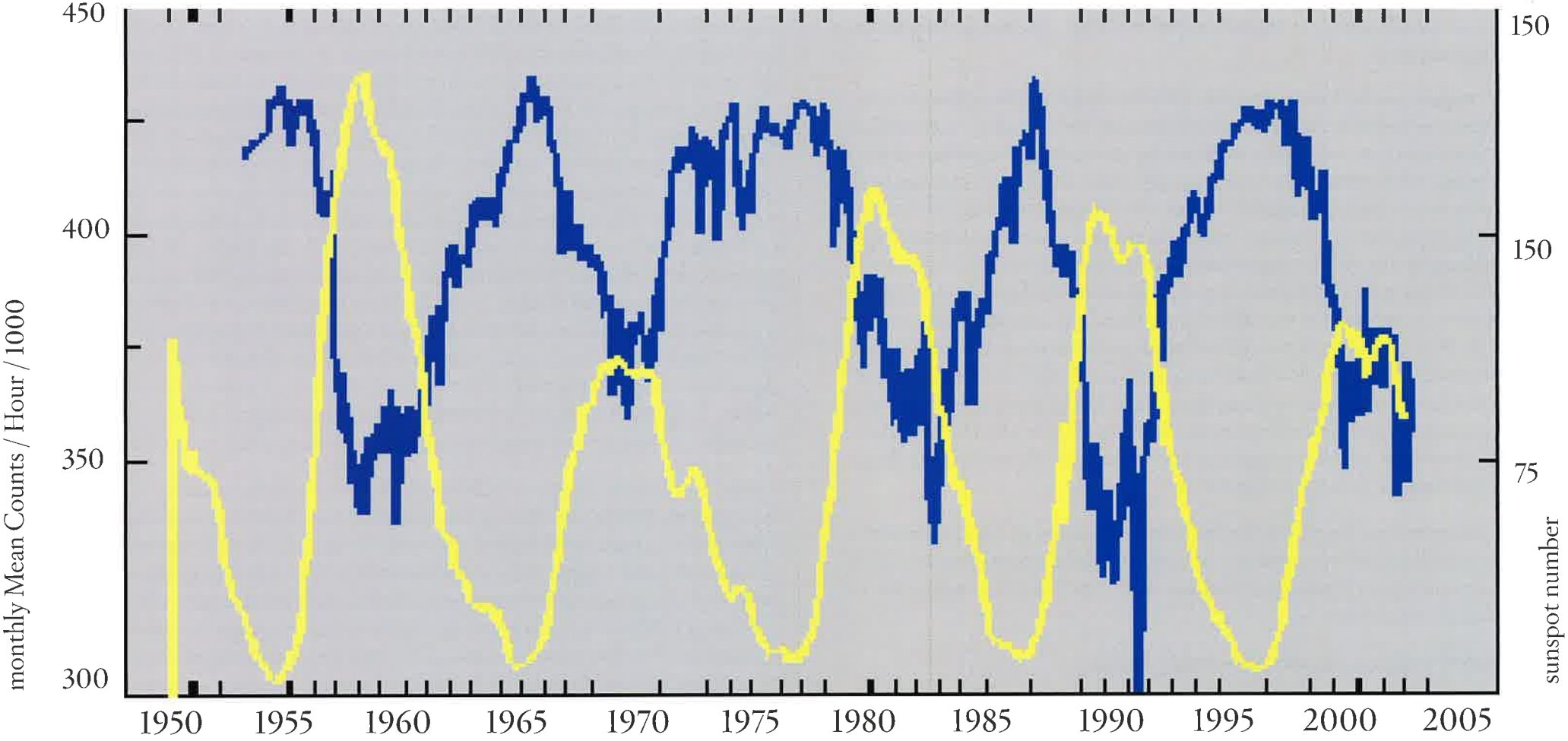


Fig. 8 - Los rayos cósmicos, que son partículas de ultra alta energía. Cuando penetran la heliosfera, al llegar a la atmósfera terrestre chocan o interaccionan con los núcleos de los átomos atmosféricos produciendo numerosas partículas de alta energía que a su vez interaccionan con otros átomos, en un proceso que al repetirse muchas veces resulta en una cascada de partículas que se detectan por diversos métodos. Uno de ellos es el llamado monitor de neutrones. Para estimar el flujo de rayos cósmicos hay varios monitores de neutrones distribuidos por le mundo. La figura muestra la curva de variación del flujo de rayos cósmicos (línea azul) superpuesta con la del número de manchas solares (línea amarilla). Los datos son del monitor de neutrones de Climax, Colorado, operado por la Universidad de Chicago. Los rayos cósmicos están en relación inversa con el ciclo de las manchas solares porque el campo magnético del Sol que se propaga por la heliosfera con el viento solar es más intenso durante el máximo de actividad y protege la Tierra de los rayos cósmicos. (Imagen del National Geophysical Data Center, EEUU).

2c. el viento solar y la magnetosfera terrestre - las partículas solares, fulguraciones

A su paso por la Tierra, el viento solar interacciona con el campo magnético terrestre, creando la magnetosfera terrestre, es decir una cavidad cuya estructura magnética es definida por el campo magnético terrestre pero deformada por la presión de viento solar, que está magnetizado por el campo magnético solar, que arrastra desde la corona. Por el viento solar se propagan ondas de choque y otros fenómenos que interaccionan con la magnetosfera terrestre, induciendo fenómenos eléctricos como la perturbación de las ondas radio, la aparición de aurora, naturalmente más frecuentes cuando la actividad solar es mayor. Por ello el registro del número de auroras observadas históricamente es utilizado como complemento al registro del número de manchas solares en tiempos antiguos. También las partículas energéticas que se producen en las fulguraciones solares llegan a la Tierra a través de la magnetosfera comportándose en la atmósfera terrestre de un modo similar a los rayos cósmicos.

Como vemos, la actividad solar puede incidir en el clima terrestre a través de varios mecanismos, aunque el nivel de conocimiento de la eficacia del forzamiento climático de los mecanismos indirectos es todavía modesto.

3. Sol y clima: pasado, presente y futuro

La energía que llega a la Tierra por unidad de superficie, o irradiancia solar total, tradicionalmente conocida como constante solar, es la fuente básica de calentamiento de la Tierra, y por ello se puede considerar que es determinante para el clima de la Tierra. El clima de la Tierra es consecuencia del balance entre la irradiancia solar y la reflectividad y emisividad de su superficie y de su atmósfera con su efecto invernadero (figura 2)

La temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado sensiblemente, del orden de 0,7°C durante los últimos cien años, y una buena parte del aumento ha sido durante los últimos 40 años. Desde hace varias décadas los climatólogos advierten de la emisión de gases que acumulados en la atmósfera producen un efecto de invernadero adicional al natural de la atmósfera. Pero la climatología es una ciencia muy compleja, en continuo desarrollo, que depende del conocimiento de muchos parámetros que describan las propiedades estáticas y dinámicas de la atmósfera terrestre tales como su composición química a todos los niveles y la cobertura de nubes sobre toda la geografía de la Tierra, de las propiedades de las corrientes oceánicas, de las propiedades radiativas de la superficie de los continentes. Sólo en los últimos años empieza a haber bases de datos obtenidos por satélites y por medidas en tierra que utilizados por los climatólogos con modelos climáticos cada vez mas sofisticados permiten obtener resultados relativamente fiables sobre la evolución del clima. Como se puede ver en la figura 2 aunque la fuente de toda la energía es el Sol, el equilibrio térmico está condicionado por muchas otras variables.

Cuando en las investigaciones climatológicas se calcula la variación de temperatura debida a los gases antropogénicos con efecto invernadero, como el CO_2, para verificar si el resultado de sus cálculos es correcto y va a tener validez para predecir su efecto climático es necesario saber cuál es el efecto sobre la temperatura de los agentes naturales tales como por ejemplo la variaciones de origen solar o el efecto de nubes volcánicas. Por ello, conocer cómo el Sol influye en el clima terrestre tiene interés desde dos puntos de vista, por un lado porque sería importante un día poder predecir si el comportamiento del Sol va a cambiar el clima, y por otro lado para poder tener una línea de base natural que permita decir si el cambio de clima que se observa es debido a la ingerencia humana y en qué cuantía.

Como hemos visto más arriba la irradiancia solar total medida en los últimos 30 años varía alrededor de 0,1 a 0,15 % entre el mínimo y el máximo de actividad en un ciclo de 11 años (figura 6). La inercia del sistema térmico terrestre, constituido por la atmósfera, los océanos y la corteza de la Tierra es grande comparada con los 11 años del ciclo

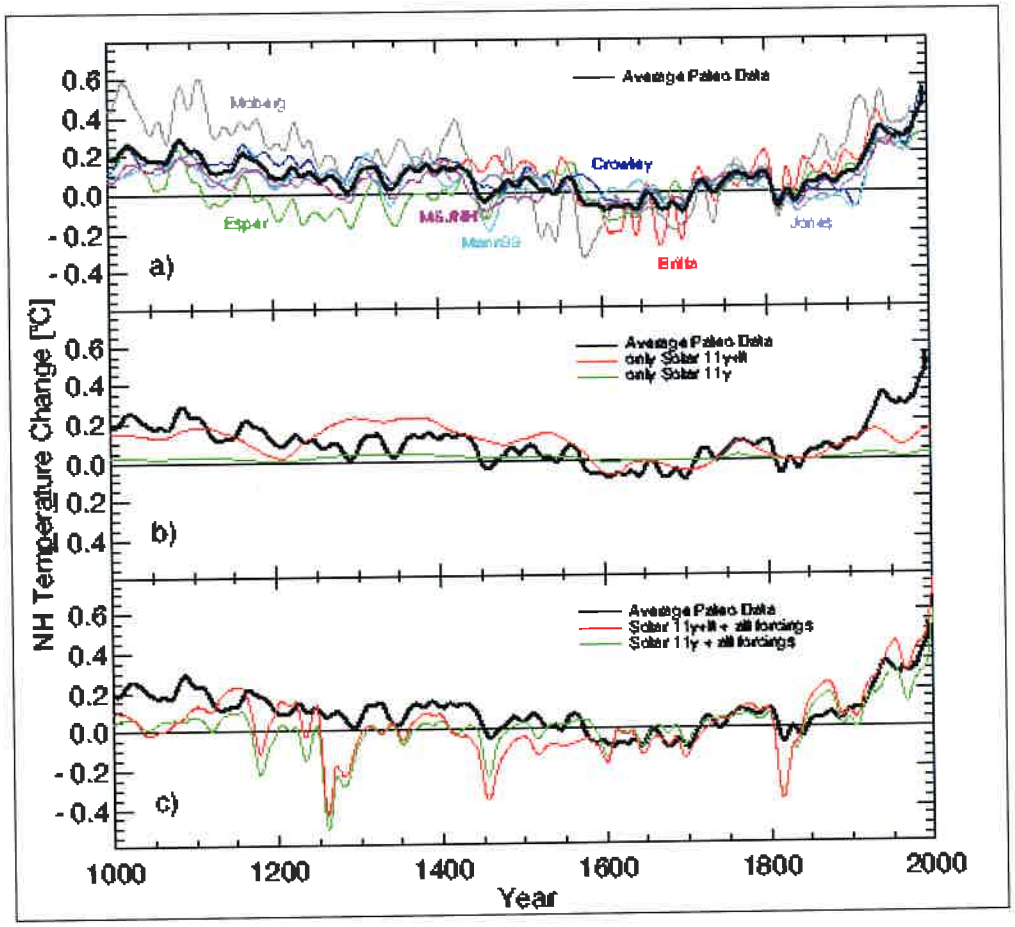


Fig. 9 - Actividad solar y clima. Últimos 400 años. Teniendo en cuenta la información disponible sobre la actividad solar y la actividad volcánica en la Tierra y usando modelos recientes del clima la figura muestra: a) temperatura medida y simulación de los efectos calculados como consecuencia de los agentes naturales: variaciones del Sol y actividad volcánica. b) temperatura medida y simulación de los efectos calculados como consecuencia de la presencia de gases y aerosoles antropogénicos. c) temperatura medida y ambos efectos a) y b) combinados (fuente: Informe del Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC) "Cambio climático 2001").

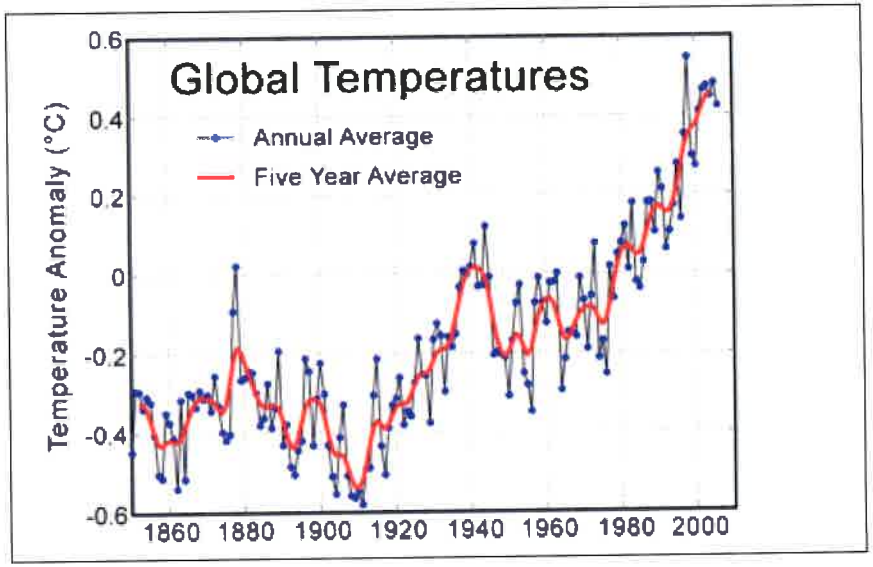


Fig. 10 – Variación de la temperatura global. Últimos 150 años.

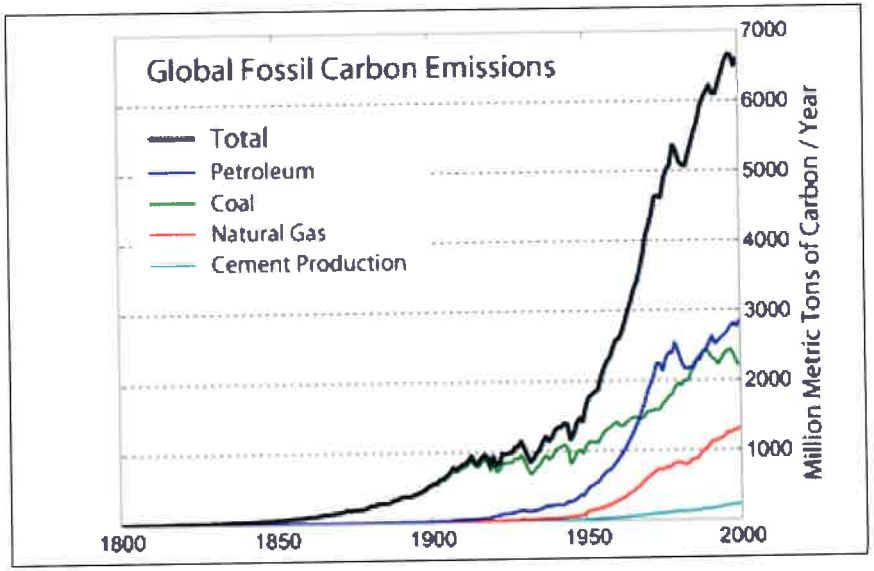


Fig. 11 – Emisiones globales de carbón fósil, últimos 200 años.

solar, por lo que no es de esperar que sea observable el efecto de esta variación en el clima terrestre. Un análisis detallado de las mencionadas medidas muestra (Fröhlich, 2005) que la irradiancia solar se ha mantenido constante dentro de un margen de error de 0,02% durante el periodo de observación en cuestión.

Que el clima está relacionado con la actividad solar se prueba por datos históricos y por medidas indirectas. La temperatura de la Tierra se ha medido instrumentalmente desde hace varios cientos de años y se obtiene información sobre la temperatura de épocas anteriores mediante la medida de concentraciones relativas de determinados isótopos en muestras de hielo de los glaciares como el de Groenlandia hasta miles de años en el pasado. La variación de la actividad del Sol se encuentra registrada en el número de manchas solares, contadas formalmente desde hace 250 años y con datos menos formales desde hace mas de 1000 años. El número de auroras observadas en los países nórdicos es un complemento al recuento de manchas solares que también se extiende algunos cientos de años (la aurora es una manifestación atmosférica de actividad en la magnetosfera que siempre es disparada por actividad en el viento solar). Los rayos cósmicos, que hemos visto son rechazados en mayor número por la heliosfera cuando el Sol está activo, al penetrar la atmósfera producen isótopos radiactivos, tales como el C_{14}, y su cantidad en muestras de una época conocida nos permite conocer el nivel de actividad del Sol en esa época. La figura 9 muestra lo que conocemos de la actividad del Sol en los últimos 1000 años junto con la temperatura media de la superficie de la Tierra calculada a partir de ella, y la observada. Los datos acumulados indican que el clima terrestre está positivamente relacionado con la actividad solar, excepto en los últimos 50 años.

Quizás el período más interesante desde un punto de vista práctico es el que se refiere a nuestra época, por la implicación que tiene al tiempo de decidir que si hay que tomar alguna medida respecto a la emisión de gases con efecto invernadero, particularmente el óxido de carbono (CO_2). La figura 10 muestra cómo ha variado la temperatura media mundial entre 1860 y 2005. La figura 11 representa la generación de productos gaseosos depositados en la atmósfera como consecuencia del consumo de compuestos orgánicos del carbono. La aparente correlación entre el aumento de gases producidos por el consumo de productos carboníferos, está plenamente justificada cuando se estudia el efecto invernadero que producen los gases generados, mayoritariamente dióxido de carbono, CO_2, cuando se acumulan en la atmósfera.

La evolución del clima terrestre se estudia generalmente con modelos que consisten en una representación numérica del sistema climático sobre la base de las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroacción y que tienen en cuenta todas o algunas de sus propiedades conocidas. Los modelos acoplados de circulación general atmósfera/océano/hielo marino permiten hacer una representación integral del sistema climático. Los modelos climáticos que cada vez son mas precisos en la descripción del clima pasado y presente han tenido un desarrollo espectacular durante los últimos 30 años. Ello, en parte, es debido al desarrollo de ordenadores cada vez mas potentes que han permitido la creación de programas capaces de simular sistemas tan complejos como la atmósfera terrestre, los océanos o la superficie de la Tierra, y además, capaces de asimilar el creciente detalle de las medidas obtenidas por observaciones de todo tipo, locales y por satélite así como la calidad de las medidas paleoclimáticas. Al mismo tiempo los modelos han ido incorporando el creciente conocimiento de la química y dinámica de la atmósfera terrestre, de las corrientes marinas, etc.

Para entender mejor los efectos de procesos determinados se estudia el forzamiento del clima que producen al modificarlos en modelos climáticos generales o especializados. Se consideran dos tipos de forzamiento, uno, radiativo o energético, que modifica la cantidad de energía en el sistema climático, otro, no radiativo que cambia la distribución de energía dentro del sistema pero no su energía total. Al primer tipo corresponden: el forzamiento radiativo de los gases de

invernadero, el de las nubes, el de los aerosoles o el de la radiación solar. Al segundo tipo pertenecen el forzamiento de la circulación oceánica y el de la circulación atmosférica.

Se realizan aplicaciones de los modelos climáticos para tiempos pasados, históricos e incluso geológicos y por supuesto aplicaciones al presente y extrapolaciones al futuro, pero su validez se comprueba mejor en los últimos 50 años cuando las medidas por satélite y en la superficie de la Tierra son relativamente completas. En realidad desde mediados del siglo XIX ya hay considerable información tomada en la superficie. Como ejemplo, en el clásico modelo climático global del "Goddard Institute for Space Studies" de Nueva York como factores de forzamiento se consideran:

·una mezcla de gases con efecto invernadero, basada en datos obtenidos por diversos métodos se incluyen el anhídrido carbónico (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nítrico (N_2O) y los clorofluorcarbonos (CFCs),

·los aerosoles estratosféricos, con datos obtenidos con satélites cuando existen y con datos diversos, generalmente obtenidos con aviones para los casos de volcanes ocurridos sin apropiada cobertura de satélites.

·los aerosoles estratosféricos, con datos obtenidos con satélites cuando existen y con la irradiancia total solar, con datos de satélites desde 1978, y calculada a partir de índices de actividad solar bien establecidos desde el siglo XIX.

·el ozono (O_3) estratosférico y troposférico, con datos obtenidos por satélites desde 1980 y mediante un modelo apropiado para el ozono troposférico y variaciones cíclicas anuales para el ozono estratosférico hasta 1979.

·vapor de agua (H_2O) estratosférico, parte del cual puede considerarse como un forzamiento indirecto ya que se produce como oxidación del metano, y de difícil evaluación.

·aerosoles troposféricos, que incluyen tales polvos como carbón y sulfato industriales, principalmente debidos al uso de carbones e hidrocarburos fósiles.

Es ilustrativa la comparación publicada por el "Intergovermental Panel on Climate Change" en el cuarto informe, presentado en Valencia, en noviembre 2007, (figura 12) que muestra el resultado de aplicar lo que conocemos de los efectos de las variaciones naturales (actividad solar, aerosoles volcánicos) y de los efectos de los contaminantes industriales, por separado y en conjunto, mediante uno de los últimos modelos climáticos. Vemos que la temperatura de la Tierra de los últimos años se puede explicar si tenemos en cuenta la probable contribución de los contribuyentes naturales (Sol, volcanes, aerosoles) y la de los gases antropogénicos, pero no con sólo los efectos naturales.

Se puede concluir que una parte importante del cambio climático observado en la primera mitad del siglo XX es debido a cambios en el Sol, pero seguramente no todo, y es casi seguro que en los últimos 50 años hemos visto un aumento de la temperatura que tiene una fuerte componente de origen antropogénico, y al menos que en los últimos 30 años el Sol no ha contribuido al calentamiento climático.

En las últimas décadas ha habido un fuerte impulso en el conocimiento del comportamiento de Sol, gracias al progreso en la instrumentación de los observatorios terrestres y sobre todo al desarrollo de observatorios espaciales que han ampliado la banda de observaciones al salir de la atmósfera terrestre, pero todavía no tenemos las claves que nos permitan predecir cómo se va a comportar el Sol en un futuro medio.

En los últimos lustros la climatología ha realizado un salto cualitativo y cuantitativo en el conocimiento del clima terrestre, gracias sobre todo a la obtención de datos con satélites que girando alrededor de la Tierra han empezado a proporcionar una visión global de las propiedades radiativas de la atmósfera y de las corrientes oceánicas así como de la superficie sólida; todo ello acompañado por el desarrollo

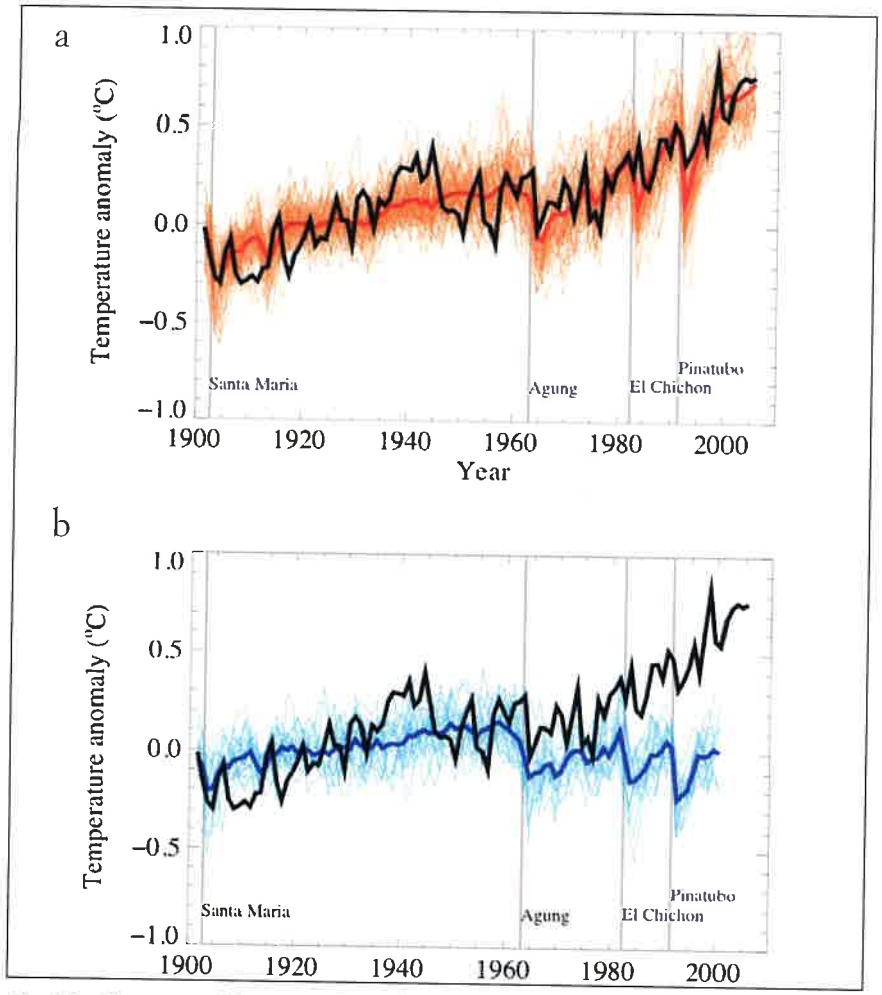


Fig. 12 - Comparación entre el cambio de temperatura medido (línea negra) y el cambio climático que se puede esperar: a) cuando se consideran todos los agentes de forzamiento conocidos, los naturales y los debidos a la actividad humana: la línea roja fina representa los cálculos para cada día y la línea gruesa el promedio anual, y b) cuando se consideran sólo los agentes naturales, principalmente el Sol y los volcanes: la línea azul fina los valores diarios y la línea azul gruesa los valores anuales. (fuente: Informe del Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC) "Cambio climático 2007").

de modelos teóricos que se han beneficiado del desarrollo de los superordenadores utilizados en meteorología. En resumen podemos decir que gracias a los estudios en marcha del Sol, de la atmósfera terrestre y de las propiedades de los océanos y la superficie sólida de la Tierra nos acercamos a entender el comportamiento del clima terrestre, tanto en función de los agentes naturales como de aquellos introducidos por el hombre.

Hay estudios que prueban que el calentamiento va a seguir como consecuencia de los contaminantes humanos, aun cuando se interrumpiera inmediatamente, y naturalmente se va a incrementar la velocidad de calentamiento si como es previsibles no se interrumpe la producción de contaminantes, en particular el CO_2.

De todos modos conviene ser precavidos cuando se pretende predecir cuál va a ser el clima dentro de 50 años. Las medidas de suficiente calidad solo se realizan desde hace pocos años, tanto en el espacio como desde la superficie de la Tierra. Los modelos climáticos están en continuo desarrollo, y si bien pueden describir el clima actual, con parámetros ajustados convenientemente, hay muchas lagunas en la información sobre el clima en tiempos pretéritos y muchas lagunas en el conocimiento de la ciencia de la atmósfera terrestre y es interesante el trabajo de Willie Soon y otros que en un análisis comparativo (W. Soon et al. 2001) ponen de manifiesto la dificultad de incorporar con suficiente precisión en los modelos globales del clima muchos efectos de retroalimentación, tales como los de las nubes o las corrientes oceánicas, y concluyen que si bien es cierto que hay un efecto importante de los gases antropogénicos en el clima, el estado actual de los modelos climáticos no permite dar por seguras las predicciones catastrofistas que se enuncian frecuentemente.

4. Conclusión

Hemos visto que la actividad solar incide en el clima de la Tierra:

·Modificando la cantidad radiación o energía que llega a la Tierra.

·Modificando el número de rayos cósmicos galácticos que llegan a la Tierra. La huella que dejan en la corteza terrestre nos permite investigar la historia de la actividad solar. Además hay indicios en medidas obtenidas por satélites de observación de la Tierra de una posible correlación entre la cobertura de nubes y el flujo de rayos cósmicos, lo que constituiría un efecto indirecto de la actividad solar en el clima de la Tierra.

·En el periodo desde el último tercio del siglo XIX hasta fines del siglo XX la temperatura media mundial ha crecido 0,7°C y en este periodo una parte importante del crecimiento térmico es posiblemente debido al aumento de la actividad solar, pero a partir de 1950 la mayor parte del aumento térmico se debe a los gases antropogénicos contribuyentes al efecto invernadero. Incluso se puede asegurar que desde 1978 hasta 2006 el crecimiento térmico es fundamentalmente antropogénico.

A partir de las observaciones del Sol desde el espacio hoy sabemos que el Sol no es el culpable del calentamiento en las últimas décadas, al menos como fuente variable de energía. Probablemente lo ha sido a largo plazo en tiempos históricos.

Gracias a los conocimientos adquiridos sobre el comportamiento del Sol y un conocimiento mas avanzado de los diversos fenómenos atmosféricos y geológicos en los últimos 30 años, podemos decir que en el siglo XX las causas naturales posiblemente pueden explicar cierto aumento de la temperatura, pero que el rápido aumento a partir de los años 1950 hasta el presente es debido a acciones humanas. Este aumento sigue de un modo acelerado, y debemos pensar cómo detenerlo, si queremos frenar el calentamiento de nuestro ambiente, y evitar las consecuencias que del mismo se derivarían.

Referencias

La organización Mundial Meteorológica (WMO) publica los informes del "Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC)". El cuarto informe del IPCC "Cambio climático 2007" es un resumen del estado de la investigación climática. El IPCC pone al día la información disponible en forma de informes parciales y mantiene un página Web (http://www.ipcc.ch/), donde se pueden encontrar los últimos avances.

La bibliografía del tema de este artículo es extensísima. La información expuesta en el mismo ha sido extraída de muchos artículos, y la lista que sigue es una selección que da una idea de cómo se enfoca el problema por algunos de los científicos que lo ha estudiado.

C. FRÖHLICH. *"Solar Irradiance Variability since 1978",* Memorie della Societá Astronomica Italiana, Vol. 76, 731-734 (2005)

C. FRÖHLICH Y J. LEAN. *"Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms"*, The Astronomy and Astrophysics Review, Vol. 12, 273-320 (2004)

J.D. HAIGH. *"The Sun and the Earth's Climate"* en Living Rev. Solar Phys., 4 (2007)

J. HANSEN, M. SATO, L. LAZARENKO Y OTROS . *"Climate forcing in Goddard Institute for Space Studies S12000 simulations"*, en Journal of Geophysical Research, Vol. 107, 4347-4385 (2002)HEGERL, G.C., F. W. ZWIERS, P. BRACONNOT, N.P. GILLETT, Y. LUO, J.A. MARENGO ORSINI, N. NICHOLLS, J.E. PENNER AND P.A. STOTT. *"Understanding and Attributing Climate Change"*, en Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR AND H.L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 663-746 (2007)

M. LOCKWOOD Y C. FRÖHLICH. *"Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature"* en Proceedings of the Royal Society A, 1880 (2007)

W. SOON, S. BALIUNAS, S. B. IDSO, K. Y. KONDRIATEV Y E. S. POSMENTIER. *"Modelling climatic effects of anthropogenic carbon dioxide emissions"* en Climate Research, Vol. 18, 259-275 (2001)

R. C. WILLSON Y A. MORDVINOV. *"Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23"* en Geophysical Research Letters, Vol. 30, 1199-1202 (2003)



Cambio Climático y Riesgos Climáticos. Efectos en el Litoral Mediterráneo Español

Jorge Olcina

1.-El litoral mediterráneo español, región-riesgo en el contexto europeo

Si hubiera que estudiar el litoral mediterráneo español en virtud de los rasgos de su medio físico tan sólo encontramos un elemento unificador: su carácter de espacio ribereño del mar Mediterráneo, esto es, la presencia de una franja litoral que, históricamente, ha sido vía de acceso de pueblos y culturas, de civilización, aunque también de peligros y de muerte. Al margen de ello, el arco mediterráneo español es un espacio de contrastes desde el punto de vista físico, paisajístico. Ése es, precisamente, el rasgo geográfico significativo de este espacio. Son varios los elementos físicos que dan personalidad a este espacio geográfico:

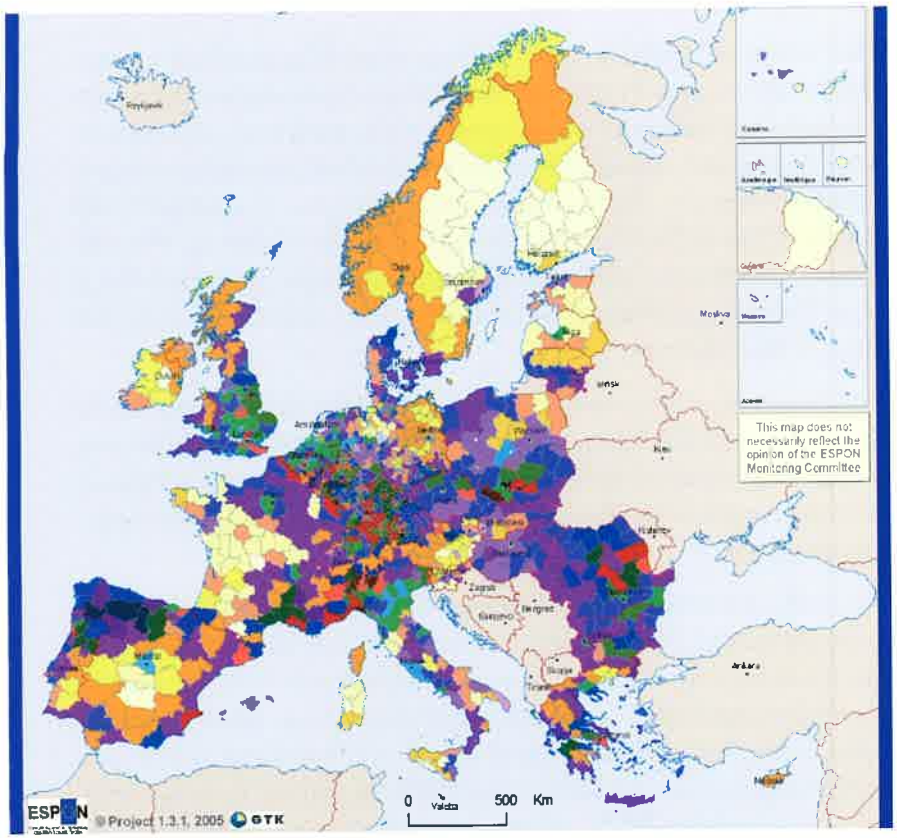
-unas unidades de relieves próximas al mar que limitan la influencia marina sobre los elementos climáticos a una franja de pocas decenas de kilómetros y ello da razón de las variedades climáticas que, bajo el rasgo común de la sequía estival, se dan en estos territorios; unos relieves, además, predominantemente calcáreos que favorecen la formación de acuíferos que constituyen una importantísima reserva hídrica de la que se abastecen los núcleos de población que allí se asientan y la reserva de materiales de construcción, amén de constituir una reserva ecológica de primer orden que en muchos casos ha merecido la protección.

-una red hidrográfica dominada por la abundancia de cursos autóctonos de mediano o pequeño tamaño de comportamiento torrencial, y donde los grandes colectores tienen su origen en territorios allende sus límites administrativos (Ebro, Turia, Júcar, Segura). En relación con estos últimos se han formado, en sus llanos aluviales y espacios de desembocadura, ricos paisajes agrarios donde se ha consolidado, ya desde época histórica, la actividad agraria más dinámica de las tierras ibéricas.

-formaciones litorales donde alternan sectores rocosos y acantilados (Costa Brava, Garraf, litorales rocosos de Ibiza y Mallorca, litoral alicantino entre Altea y Denia, litoral murciano entre Mazarrón y Águilas, costas del Cabo de Gata y Costa tropical granadina) y zonas de playas cuyo comportamiento natural (campos dunares) ha sido profundamente alterado por la promoción turística; sectores de humedal litoral que subsisten merced a su declaración como espacios naturales protegidos dado su alto valor ecológico (Aiguamolls del Empordá, Prat del Llobregat, Sa Albufera de Mallorca, Prat de Cabanes, Albufera de Valencia, Albufera de Elche, Lagunas de La Mata y Torrevieja, salinas del Cabo de Gata y, con una formación distinta, el Mar Menor).

-formaciones vegetales muy ricas que integran desde bosques de coníferas y caducifolias hasta especies adaptadas a las duras condiciones pluviométricas mediterráneas con especies como las encinas y pinos, hasta los matorrales más degradados, a favor de la aridez y de la explotación antrópica.

Y junto a ello, los territorios del litoral mediterráneo español participan de una serie de aspectos que les caracterizan como espacio de riesgo; uno de los territorios con mayor nivel de vulnerabilidad y exposición a los peligros naturales –esencialmente climáticos- en el contexto europeo, como ha señalado recientemente el Observatorio Europeo en red de Ordenación del Territorio (ESPON, 2006) (vid. figura 1). Así, el sector andaluz del litoral mediterráneo forma parte de una de las zonas de actividad sísmica más activa de la península Ibérica en relación con la disposición de los relieves béticos. Esta actividad se prolonga hasta las tierras del sur Alicante y la región de Murcia. Se trata de una franja situada en el contacto de placas tectónicas enfrentadas (africana y europea), con ejemplos de terremotos importantes, como el que sacudió el sur de Alicante en 1829 y los asimismo destacados en Adra (1910, 1993), Cehegín (1948), Mula (1999) y pedanías de Lorca (2005). Y es además una macrorregión afectada por riesgos de causa atmosférica diversa: lluvias torrenciales con efectos de inundación, sequías, temporales de viento, heladas y tormentas de granizo, que amenazan espacios urbanizados y áreas agrícolas, hasta convertir a estos territorios en los de mayor vulnerabi-



Typology of the regions

Intensity of hazard	Degree of vulnerability				
	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	7
3	4	5	6	7	8
4	5	6	7	8	9
5	6	7	8	9	10

Figura 1.-Territorios y grados de riesgo frente a los peligros naturales en Europa. Fuente: ESPON, 2005.

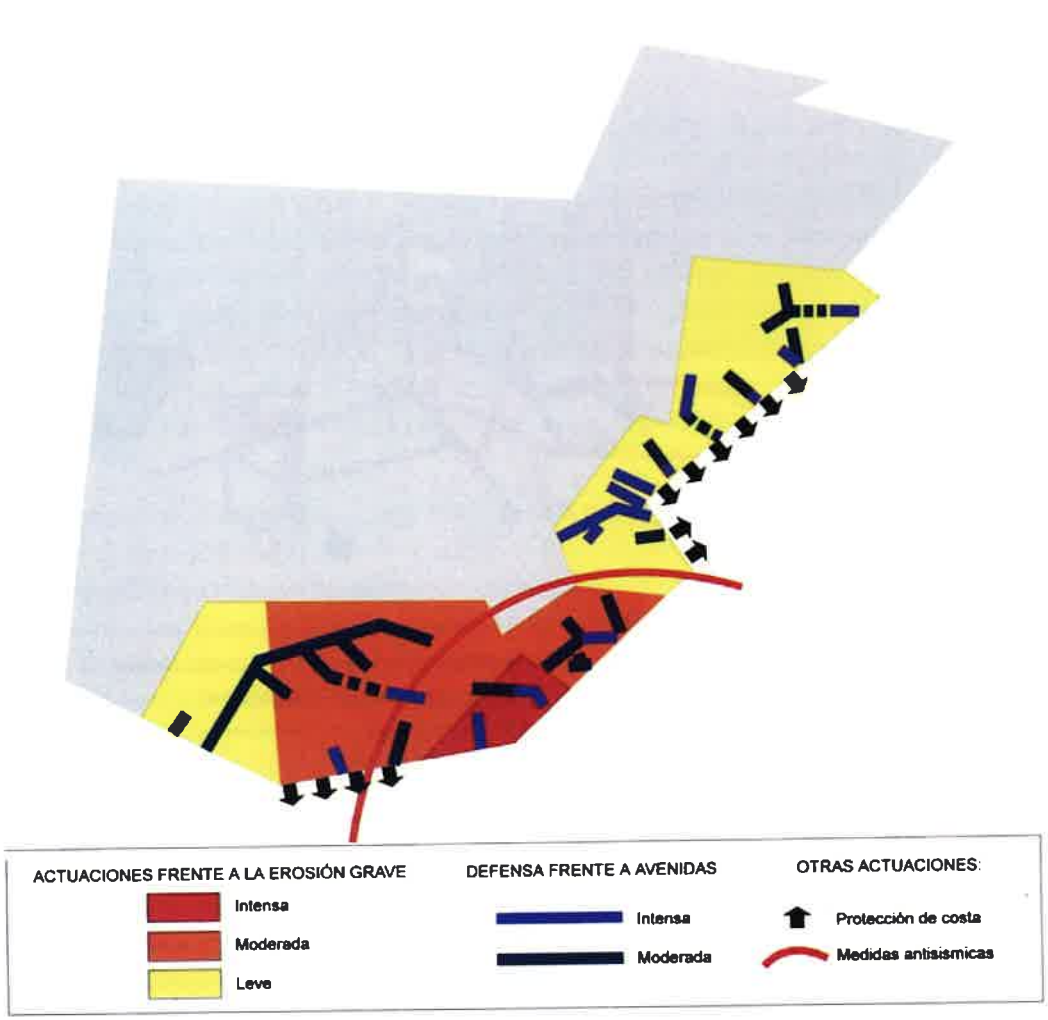


Figura 2.-Esquema de localización de riesgos naturales en el litoral mediterráneo español. Fuente: Generalitat Valenciana, 1993.

lidad por causa climática del conjunto del estado español. Fruto de ello son las numerosas actuaciones puestas en marcha para aminorar sus efectos y que se han plasmado, incluso, en las revisiones recientes de la legislación del suelo y ordenación territorial.

El litoral mediterráneo español es por tanto, la región-riesgo más importante de España y, como se ha señalado, una de las más destacadas del espacio europeo (vid. figura 2).

En resumen, el litoral mediterráneo es un espacio geográfico con un medio físico contrastado, sometido a una elevada presión humana donde más que en ningún otro territorio peninsular el paisaje cultural domina frente al natural gracias, precisamente, a la variedad de su medio y a la riqueza histórica que lo adorna.

En este contexto, los modelos climáticos desarrollados en el marco de la actual hipótesis de cambio climático por efecto invernadero señalan, como aspecto probable, el incremento de la frecuencia de aparición de episodios atmosféricos de rango extraordinario que, sin duda tendrá consecuencias socio-económicas importantes en los territorios del litoral mediterráneo.

2.-Certezas e incertidumbres del cambio climático por efecto invernadero. Efectos en el litoral mediterráneo.

Como se ha señalado, el litoral mediterráneo es un territorio de riesgo donde se registran episodios atmosféricos de rango extraordinario que originan daños económicos y, en ocasiones, pérdida de vidas humanas. Por tanto, existe un problema territorial que ha ido agravándose en las últimas décadas, con el avance del proceso urbanizador que, en ocasiones, no ha respetado el funcionamiento del medio físico.

Pero estas condiciones pueden verse alteradas en los próximos lustros en el marco de la hipótesis de calentamiento planetario. En efecto, los modelos elaborados por el IPCC u otros centros y laboratorios de investigación señalan un posible incremento del carácter extremo del clima en nuestras latitudes. Y el Mediterráneo es, per se, un área especialmente vulnerable ante este funcionamiento extremo del clima debido a la intensa ocupación humana que soporta.

La actual hipótesis de cambio climático por efecto invernadero cuenta con un hecho incontestable: la superficie terrestre es en la actualidad más cálida que hace tres décadas. Y este hecho lleva asociado dos procesos complementarios: la reducción de la cubierta de hielo y nieve y el aumento comprobado del nivel del mar en algunos sectores planetarios.

La clave es encontrar el factor desencadenante de este incremento térmico. Desde 1985 el informe aprobado en la denominada Conferencia de Villach, que hizo suyos los trabajos sobre gases de efecto invernadero elaborado por el Instituto Meteorológico Internacional de Estocolmo, la comunidad científica internacional agrupada en el denominado Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), que se crearía unos años después bajo el auspicio de las Naciones Unidas, ha defendido que son los denominados gases de efecto invernadero los responsables del incremento en las temperaturas que empezada a ser patente entonces. En el citado informe se indicaba que el efecto de forzamiento de radiación de gases de efecto invernadero distintos del CO_2 podía compararse cuantitativamente con el efecto de éste. Ello significaba que el equivalente de una duplicación del CO_2 podía darse hacia la mitad del siglo XXI, en lugar de en sus años finales como sucedería de considerarse sólo los efectos del CO_2. En la Conferencia de Villach se convino que, de continuar la presente tendencia, en el año 2030 se duplicaría la presencia de gases de efecto invernadero en la troposfera terrestre, con la consiguiente repercusión en el ascenso de temperaturas (entre 1,5 ° y 4,5°C) y elevación del nivel del mar (entre 20 y 140 cm.).

Desde entonces hasta el momento actual, con la presentación a lo largo de 2007 del 4° Informe del IPCC, todos los documentos oficia-

les sobre la evolución futura del clima terrestre han apuntado en el mismo sentido, lo que debe hacer pensar que hay razón científica detrás de la hipótesis de cambio climático por efecto invernadero. De mantenerse la tendencia al incremento en la proporción de gases de efecto invernadero de origen antrópico existentes en la atmósfera terrestre, el clima futuro de la Tierra debe presumirse más cálido que el actual; mucho más cuando mayor sea esta proporción. En los últimos cien años la temperatura media de la superficie terrestre habría subido 0,8ºC. El incremento previsto para los próximos cien años, como mínimo duplica esta cifra.

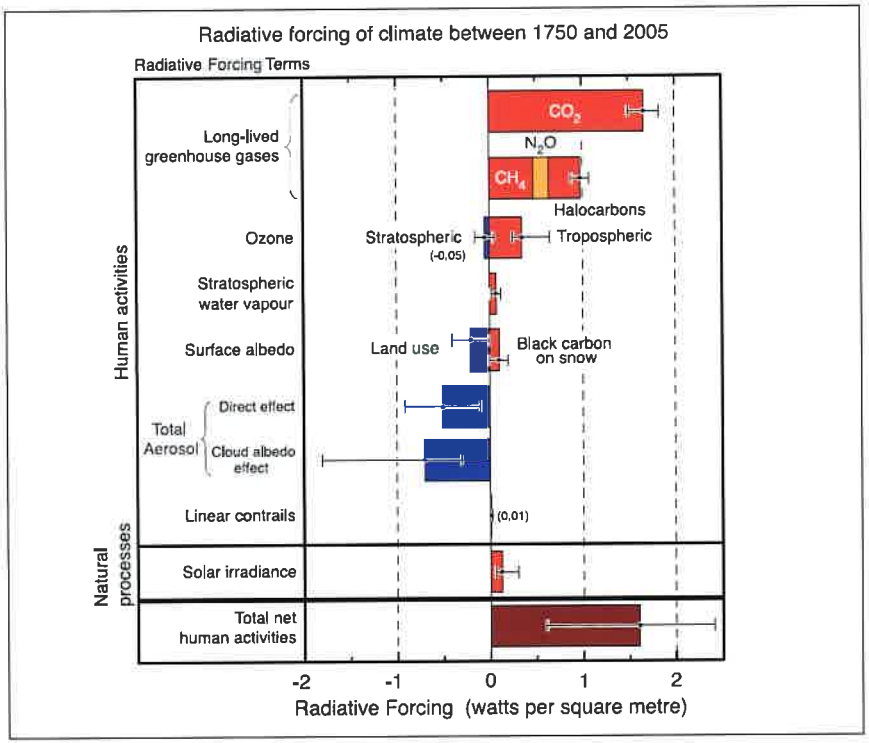


Fig 3.- Alteraciones radiactivas introducidas por los procesos naturales y de origen humano en el balance energético planetario (Fuente: IPCC, 2007).

La proporción de CO_2 existente en la atmósfera ha pasado de 295 ppmv partes por millón en volumen- a comienzos del siglo XX a 379 ppmv en 2005. Y a ello hay que unir la evolución registrada en la proporción de otros gases de efecto invernadero como metano u óxido nitroso que asimismo han experimentado aumentos significativos en la última centuria (IPCC, 2007).

El último informe del IPCC (2007) ha cuantificado, con detalle, la alteración en el balance energético planetario que supone la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre, destacando que en su conjunto, el "forzamiento de radiación" calculado se eleva a 1-1,5W/m²; esto es, se estaría produciendo ya un desajuste en el balance energético planetario. (vid. figura 3)

Recientemente, Ruddiman (2006) ha ido un poco más allá en la valoración de la actividad humana sobre el clima al señalar que el efecto invernadero causado por las prácticas agrarias y forestales desarrolladas por el ser humano desde hace 5.000 años habría evitado que, desde ese momento, hubiese empezado una nueva fase de glaciación. Según este autor, a partir del uso de modelos climáticos de pasado, el efecto de esta actividad habría ocasionado un calentamiento medio de 0,8ºC, inmediatamente antes de la era industrial. No obstante este notable calentamiento habría quedado enmascarado por cambios climáticos en sentido opuesto que habrían conducido al enfriamiento térmico del planeta en relación con ciclos orbitales de la Tierra. En definitiva, el clima terrestre habría iniciado, de modo natural, un nuevo ciclo glacial hace cinco milenios, que quedó mitigado por la creación y desarrollo ulterior de la agricultura con la producción asociada de gases de invernadero.

Con estos supuestos, los modelos climáticos oficiales dibujan una Tierra más cálida para el año 2100, con una superficie helada mucho menor –por derretimiento de glaciares y de inlandsis- y con ascenso del nivel marino, variable según las regiones. Todo ello en relación con la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera; esto es, la situación climática futura será más o menos preocupante en función

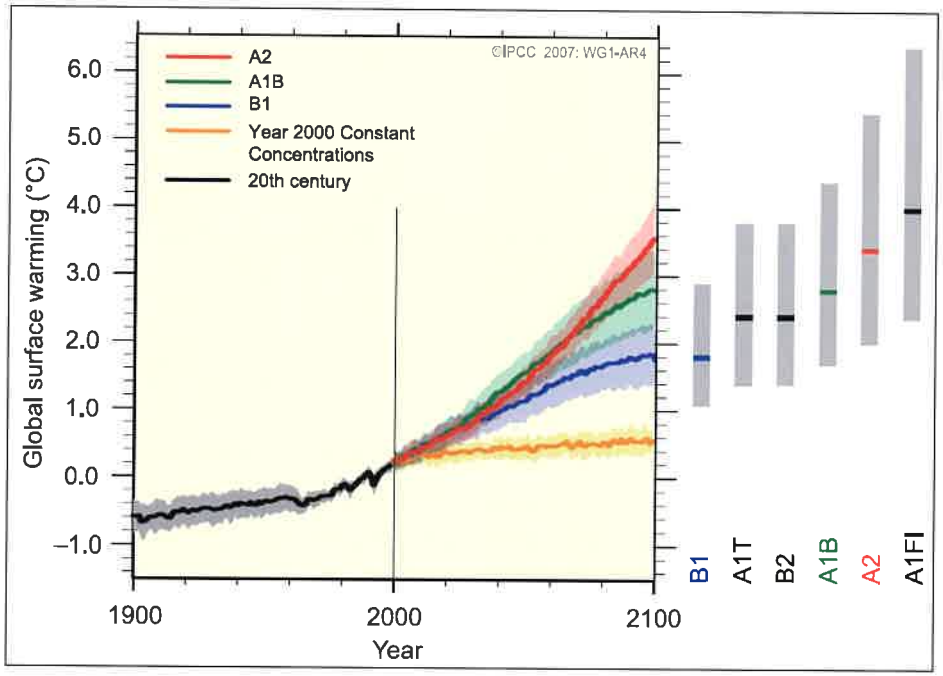


Fig 4.-Incremento térmico global estimado por los diferentes modelos de predicción climática para el conjunto de la superficie terrestre hacia 2100. La diversidad de los efectos depende de las condiciones de emisión futura de gases de efecto invernadero (Fuente: IPCC, 2007).

de la puesta en marcha de medidas que contribuyan a disminuir los gases de efecto invernadero (vid. figura 4). No obstante, no hay unanimidad por lo que respecta al comportamiento futuro de las precipitaciones; los modelos no coinciden a la hora de calibrar una reducción estimada, a nivel global, pero que presenta matices muy importantes cuando se desciende a la escala regional.

Un aspecto interesante que ha confirmado el IV Informe del IPCC y que ya se había apuntado en los anteriores es que el cambio climático futuro no se manifestará sólo con un aumento de la media de temperatura sino también con un incremento de la variabilidad en el ritmo de las temperaturas. Es decir, que suba la temperatura media no significa que ya no vayan a desarrollarse temporales de nieve y frío en los meses fríos del año, en latitudes medias y altas; lo que ocurre es que estos serán menos frecuentes, pero no menos intensos.

Los científicos críticos con la postura oficial señalan que es difícil poder establecer el comportamiento climático a medio y largo plazo a partir de modelos de predicción, cuando todavía se desconocen aspectos básicos de la circulación atmosférica general e incluso los pronósticos meteorológicos diarios no son infalibles. Sin dejar de ser ello cierto, no lo es menos que los modelos climáticos no son pronósticos sino patrones que marcan tendencias; y desde hace veinte años, todos los modelos climáticos existentes marcan la misma tendencia; con mayor o menor intervalo de confianza, pero siempre la misma tendencia al incremento de temperaturas en el planeta. Asimismo indican que hasta el momento ningún episodio atmosférico extraordinario ocurrido en estos últimos años (huracanes, inundaciones, sequías, temporales,...) pueden ser achacables al cambio climático, sino a la propia variabilidad natural del sistema climático. Pero la crítica más importante a las tesis oficiales parte del hecho de la escasa importancia que tendría la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre comparado con otros gases "naturales", como el vapor de agua y por tanto la pérdida de protagonismo de aquéllos como responsables directos del incremento térmico registrado en los últimos decenios (Uriarte, 2003).

Un aspecto de interés es la posibilidad de que en el Atlántico Norte el proceso de calentamiento global y de derretimiento de la masa de hielo ártica podría llevar consigo, en unos primeros momentos, un enfriamiento de las condiciones climáticas al romperse el circuito normal de la corriente del Golfo y la Deriva Atlántica que suaviza el clima en amplias zonas de Europa occidental. La incorporación de aguas frías procedentes del deshielo ocasionarían una desaceleración en el citado circuito de corrientes y ello se saldaría, en un primer momento, con un descenso de temperaturas en esta parte de Europa. Es el denominado cambio climático brusco o súbito, hipótesis que

adelantaron los investigadores franceses Duplessy y Morel en 1993 y que se incluye en el IV informe del IPCC, aunque se descarta que pudiera dar lugar a una nueva pequeña edad del hielo.

El problema del cambio climático por efecto invernadero no es el problema de la previsible subida de las temperaturas. Lo más llamativo, desde la óptica de la circulación atmosférica puede ser la alteración en las pautas de los tipos de tiempo que puede traer consigo. Dicho de otra manera, los seres vivos pueden adaptarse a las subidas de temperatura que están señalando los modelos climáticos para los próximos 50 ó 100 años, pero no tanto a una intensificación del carácter extremo de los fenómenos meteorológicos, fundamentalmente lluvias torrenciales, temporales y sequías. Este es, sin duda, el verdadero problema del cambio climático que se investiga.

En España, como en el resto de la superficie terrestre, se habría registrado, también, desde los años ochenta del pasado siglo una subida de las temperaturas (vid. figura 5), un descenso de la cobertura de hielo y nieve y un ascenso -débil- del nivel marino. Así, se manifiesta en el informe oficial del Ministerio de Medio Ambiente sobre evaluación preliminar de los impactos del cambio climático en nuestro país (MMA, 2005).

Los modelos climáticos elaborados a escala peninsular, indican un agravamiento de estas condiciones y un aumento de la irregularidad climática, aspecto por otra parte común en los climas de raigambre subtropical, como los que se dan en la mayor parte de las tierras ibéricas y los archipiélagos. Se ha estimado un incremento térmico de 0,4° C por década en invierno y de 0,6° C en verano en el escenario más favorable, que sería más notable en el interior peninsular. Por su parte, la subida del nivel del mar, -uno de los aspectos que más inquieta, dada la ocupación indebida de primeras líneas de costa que se ha dado en nuestro país en los últimos cincuenta años-, se estima en 50 cm por término medio, aunque con mayor efecto en el litoral cantábrico y atlántico que en el mediterráneo, por su carácter de cuenca marina cerrada.

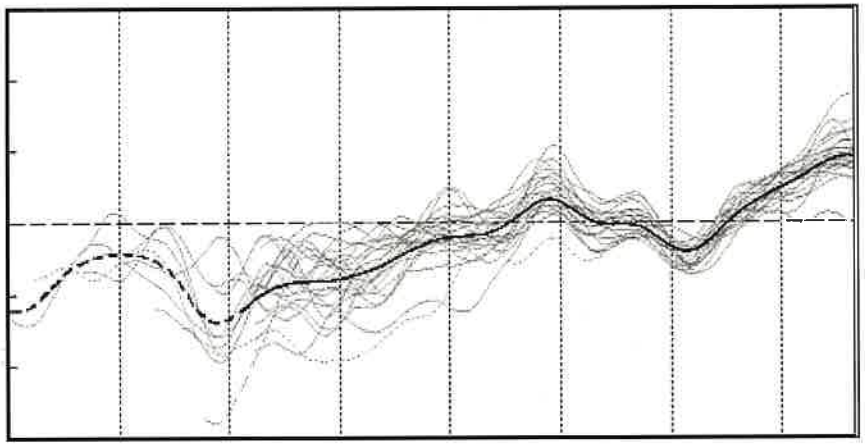


Fig 5.-Evolución de la temperatura media de las máximas de 22 observatorios españoles durante el período 1850-2003, expresada como anomalías respecto a 1961-90 y suavizada con un filtro gaussiano de 13 años. (tomado de Brunet et alii, 2006).

Por otro lado, se ha producido una reducción del número de días de nieve al año. Si comparamos la situación actual con la existente hace 150-200 años la reducción de precipitaciones se torna todavía más evidente. Entonces el clima en Europa atravesó la denominada "Pequeña Edad del Hielo" (ss. XV-XIX). En las montañas del litoral mediterráneo era frecuente encontrar (por encima de 800 m.) los denominados "pozos de nieve" donde se acumulaba la nieve en invierno para poderla utilizar en verano. De ahí surge la tradición de la industria del helado características de algunas poblaciones mediterráneas (Ibi, Jijona) y que se ha mantenido hasta la actualidad. Estos pozos quedan hoy sólo como patrimonio arquitectónico y testimonio de un pasado climático con condiciones térmicas más frías que en la actualidad (vid. figura 6).

Hay, sin embargo, algunas cuestiones que conviene matizar a la vista de las investigaciones recientes llevadas a cabo en nuestro país sobre la evolución climática reciente. Así, se ha señalado que en el aumento



Fig 6.- Pozo de nieve en la Sierra de Mariola (Alicante). El comercio de nieve tuvo destacada importancia en muchas zonas del litoral mediterráneo español durante el siglo XVIII y primera mitad del s. XIX.

de las temperaturas medias registrado en la última centuria tendría un protagonismo muy destacado el incremento de las temperaturas mínimas nocturnas, más que las máximas diurnas. Ello podría hablar de la influencia del efecto urbano nocturno de los observatorios meteorológicos existentes en las grandes ciudades, que son los que tienen series largas de datos para poder trabajar en estas cuestiones. El aumento térmico habría sido más moderado en observatorios de áreas rurales. Así se ha demostrado en algunas áreas del litoral mediterráneo español (Quereda et alii, 2001). La subida se habría notado sobre todo en los observatorios situados en poblaciones con más de 100.000 habitantes (observatorios urbanos). En estos la subida entre 1950 y 2000 ha sido de 0,8º C. Sin embargo, apenas se ha notado en los rurales (0,4º C).

Por su parte, existen muchas incertidumbres sobre la evolución futura de las precipitaciones. De entrada, éste es el parámetro que menos significación estadística ha mostrado en la última centuria, y ello a pesar de la existencia de una amplia percepción ciudadana que habla de una disminución de lluvias importante en las últimas décadas. No obstante esta percepción en nada es avalada por los datos instrumentales (Martín Vide, 2007). Los modelos climáticos de futuro señalan una disminución significativa en las regiones del centro y sur peninsular (MMA, 2005). Sin embargo, no hay unanimidad en los modelos de predicción. El informe sobre riesgos naturales y tecnológicos del Observatorio Europeo de Ordenación del Territorio (2006), llega a hablar de un incremento de lluvias en el sur de España (Schmidt-Thomé, 2005). Por otra parte, el señalado aumento de la irregularidad en este elemento climático (más sequías y más inundaciones) no añade nada nuevo puesto que en gran parte de España, los climas existentes se caracterizan precisamente por la irregularidad pluviométrica.

Y una última cuestión sobre la que conviene matizar de modo enérgico. En las últimas décadas el incremento experimentado en las temperaturas no sería el responsable en absoluto del supuesto proceso de desertificación que se dice estaría ocurriendo en nuestro país a pasos acelerados. Antes al contrario en los últimos treinta años se ha producido un notable incremento de la superficie ocupada por la vegetación en nuestro país como consecuencia de la reducción de superficies cultivadas en espacios de ladera y montaña (vid. tabla 1). De manera que en España existen problemas de erosión en diversas áreas a favor de litologías blandas, pendientes significativas y arrastres provocados por lluvias intensas, en las que es necesario actuar. Pero erosión no es igual a desertificación, a creación de condiciones de desierto, a no ser que mediaran especiales condiciones climáticas muy extremas, no ocurridas.

	1986-87	2006
ALICANTE	61.532	112.895
MURCIA	189.114	289.435
ALMERIA	89.991 (+40.000 ha respecto al primer inventario forestal)	sin finalizar
TOTAL ESPAÑA	10.025.918	14.539.046 (a falta de Andalucía)

tabla 1: Tercer inventario forestal de España (Ministerio de Medio Ambiente 2007).

3.-La "litoralización" del riesgo. El papel de la ordenación del territorio, como medida de adaptación a los cambios previstos.

Desde mediados del siglo XX se ha asistido a otro fenómeno interesante en relación con la localización de las áreas de riesgo en España: la "litoralización" de los mismos. La pérdida de importancia socio-económica de la actividad agrícola, la más expuesta a los peligros de causa climática, ha desplazado el escenario de la vulnerabilidad del campo a la ciudad y dentro de los escenarios urbanos el desarrollo de actividades relacionadas con el ocio y el turismo en áreas litorales ha situado en estos espacios un foco principal de riesgo.

La franja costera española presenta una destacada incidencia de episodios naturales de rango extraordinario que hacen especialmente vulnerables algunas áreas donde actividades económicas y asentamientos están influidos por el desarrollo de tales sucesos. La costa y, en sentido más amplio, el litoral español presentan numerosos ejemplos de implantación de usos del suelo que no han tenido en cuenta, por desconocimiento o imprudencia, su realidad física y este hecho convierte a este medio geográfico en un territorio de gran vulnerabilidad ante sucesos naturales extraordinarios en el conjunto europeo.

No se puede negar, sin embargo, que la franja costera es un medio de oportunidades, favorecido por unas condiciones del medio que, en los últimos años han permitido un desarrollo intensivo de actividades urbano-turísticas. La existencia de costas bajas y arenosa, unido a unas condiciones climáticas saludables son la base del modelo turístico implantado mayoritariamente desde los años sesenta del siglo XX, especialmente en la fachada mediterránea española, y que ha elevado los niveles de renta y bienestar en las poblaciones del litoral español.

Pero el medio natural ofrece una faz poco agradable; esto es, la realidad de unos episodios que alteran el ritmo de las sociedades al perturbar el normal funcionamiento de su vida económica. La magnitud de las consecuencias económicas y humanas llega a motivar, incluso, cambios en la propia organización territorial.

Temporales de viento de componente diversa, crecidas fluviales por efecto de lluvias abundantes o intensas son peligros naturales consustanciales a un espacio costero, a ellos se unen, en algunos sectores de la costa española, deslizamientos, sismicidad y ausencia coyuntural de precipitaciones, para configurar la relación de episodios naturales de rango extraordinario que afectan a las costas españolas. El alto grado de utilización del territorio y la propia diversidad de episodios naturales extraordinarios confieren al medio costero español un grado de riesgo elevado ante dichos peligros en el conjunto de países europeos, como se ha señalado.

Si el cambio climático se ha convertido en el principal problema ambiental a escala planetaria es porque lleva asociados efectos económicos que pueden alterar el bienestar de las economías avanzadas o agravar el subdesarrollo en regiones pobres. Por ello los gobiernos mundiales han comenzado a tomar cartas en este asunto, aunque no todos con el mismo vigor. La reducción de gases de efecto invernadero implica un cambio en el actual modelo energético mundial, muy dependiente de los combustibles fósiles y una disminución, en primera instancia, de los niveles de crecimiento económico en muchos países. De ahí que no siempre se acepten protocolos u otros acuerdos internacionales que puedan suponer una pérdida de los niveles de renta. El protocolo de Kioto, por lo demás, es un acuerdo de mínimos que en poco puede solucionar la situación de grave contaminación atmosférica existente. Serán necesarias medidas más enérgicas.

A ello se unen los posibles costes de fenómenos directamente asociados con el calentamiento planetario como el deshielo y la subida del nivel del mar. El informe Stern ha calculado que en Europa si el nivel del mar aumentase un metro más de 20 millones de personas se verían afectadas directamente y unos 300.000 millones de dólares del PIB de diversos países europeos correrían peligro de perderse. (N. Stern, 2007). Ello ha movido a algunos países a aplicar medidas de adaptación a la subida del nivel marino, basadas en obras de infraestructura (diques) y ordenación del territorio. Ejemplo de ello pueden encontrarse en algunas ciudades de países del Báltico (p.e. Espoo). Hay que señalar que la evaluación de los costes económicos del cambio climático que se están realizando actualmente se refieren básicamente a proyecciones de las pérdidas económicas que ocasionan los episodios atmosféricos extraordinarios. Y éstos no son una consecuencia del cambio climático sino fenómenos propios del comportamiento natural del clima. Otra cuestión es que hayan derivado en un problema (riesgo) por actuaciones indebidas llevadas a cabo por el ser humano sobre el medio geográfico y que han aumentado la vulnerabilidad y exposición al riesgo de las sociedades. En España tenemos buenos ejemplos de ello en el litoral mediterráneo y en Canarias, donde en la actualidad hay más riesgos de inundaciones y sequías que hace tres decenios.

No resulta correcto hablar de medidas, políticas o lucha "contra" el cambio climático porque, como se ha comentado, el clima terrestre es por naturaleza cambiante y siempre va a ser así. Por tanto, que cambie el clima es algo normal. Otra cuestión es que en el actual momento histórico y, especialmente, en los países avanzados las sociedades no quieran padecer los posibles efectos de un cambio en las condiciones climáticas actuales para evitar que ello pueda perturbar su nivel de bienestar actual. Pero hay que recordar que en todo momento histórico ha habido alteraciones y cambios climáticos con efectos, más o menos intensos, sobre las actividades económicas y el desarrollo general de las sociedades.

En puridad hay que hablar de actuaciones para la reducción de los gases que ocasionan efecto invernadero porque éste es el principal problema que acucia a la atmósfera terrestre, independientemente de que su presencia y permanencia en la troposfera puedan causar los citados efectos en las condiciones climáticas de la Tierra a medio y largo plazo. Si además estas medidas consiguen situar en un plano de normalidad natural las alteraciones climáticas terrestres asistiremos a una de las intervenciones antrópicas más racional e importante sobre el medio llevadas a cabo en la historia de la humanidad. Aunque esto último parece un objetivo complejo y difícil de alcanzar. De ahí que ante las posibles alteraciones que manifieste la maquinaria climática durante los próximos decenios, lo más prudente sea la adaptación a la probable nueva realidad ambiental.

Ante los cambios previstos y el incremento de los episodios de rango extraordinario, las medidas de ordenación del territorio se presentan como la solución más racional y sensata a la hora de adaptarse a los efectos previstos en los modelos climáticos de futuro.

En la Comunidad Valenciana, a falta de la aprobación de la Estrategia Territorial Valenciana, y del escaso desarrollo de la figura de los Planes de Acción Territorial de carácter integral, la escala local, a través de

la aprobación de Planes Generales de Ordenación Urbana o de planificación derivada –Planes de Actuación Integral, PAIs- se ha convertido en la verdadera protagonista de los procesos de ordenación del territorio.

Este proceso crea un territorio desvertebrado, compuesto por un mosaico de piezas (municipios) que planifican sus actuaciones territoriales teniendo en cuenta, tan sólo, sus propias necesidades y, generalmente, a corto plazo. El territorio valenciano es, en la actualidad, un territorio sin programa, donde la presión inmobiliario-residencial sobre el espacio geográfico, marca los pasos de su acelerada transformación territorial. Esto explica muchas de las situaciones de elevada vulnerabilidad y exposición al riesgo que se han originado en los últimos años en muchos municipios valencianos, debido a la puesta en marcha de actuaciones urbanas que no han tenido en cuenta el comportamiento del medio natural propio de este territorio. Y ello crea una enorme incertidumbre en el marco del calentamiento climático planetario, que exige acciones coordinadas por parte de las administraciones responsables de la gestión y ordenación territorial. Estamos ante un proceso global, que exige respuestas globales y jerarquía en las actuaciones para que todas las escalas de trabajo se vean implicadas en las políticas y prácticas de adaptación mediante medidas de ordenación territorial a los posibles efectos del cambio climático.

En los próximos años tendremos que planificar los nuevos territorios del cambio global. Esto es los espacios geográficos dinámicos del litoral mediterráneo español que pueden verse afectados por dos fenómenos de enorme trascendencia espacial (aumento del nivel del mar e incremento de los episodios atmosféricos de rango extremo). Esto nos debe hacer reflexionar sobre la mejor manera de ocupar el espacio geográfico para conseguir una reducción de la vulnerabilidad y la exposición ante estos dos procesos.

Tenemos un reto enorme que debemos ir poniendo en marcha a partir de este momento: la planificación territorial y urbana debe comenzar a considerar los efectos del cambio climático en sus escenarios de futuro. Hay territorios europeos (Holanda, países nórdicos) que ya están planificando su territorio bajo los supuestos del calentamiento planetario; en España, y especialmente, en las regiones del litoral mediterráneo debemos comenzar a elaborar planes territoriales que tengan en cuenta esta nueva variable. La recientemente aprobada Ley del Suelo obliga a elaborar informes de "sostenibilidad ambiental" en las nuevas actuaciones urbanísticas; y en estos informes debe incluirse un análisis detallado de los riesgos naturales que puedan existir en un territorio, con su cartografía correspondiente. Es una medida que apunta en el buen camino de considerar la gestión prudente del territorio como herramienta eficaz de adaptación a los cambios ambientales que existen o puedan presentarse en el futuro.

En algunas comunidades autónomas (p.e. en la C. Valenciana) se han puesto en marcha, asimismo, planes específicos para la reducción del riesgo de inundaciones desde la ordenación territorial. Es un primer e importante paso que debe complementarse, en el futuro próximo, con la elaboración de una estrategia territorial de adaptación al cambio climático, que contenga medidas a aplicar en las zonas potencialmente vulnerables. Y los municipios deberán aplicar las actuaciones que se establezcan en dicha estrategia.

Estamos ante un fenómeno que puede marchar el futuro de la Humanidad durante las próximas décadas. El calentamiento planetario es uno de los grandes temas del mundo contemporáneo, que pone todavía más énfasis en la tesis de la sociedad del riesgo que propusiera en los años ochenta del pasado siglo el sociólogo alemán Ulrich Beck. Y lo mejor es que estamos todavía a tiempo para poner soluciones. No conviene lanzar una visión catastrófica de los efectos del cambio climático, porque al ser un proceso a largo plazo se tardarán décadas

en ponerse de manifiesto y ello puede desincentivar el interés de la sociedad. Antes al contrario hay que informar de los avances que se vayan produciendo en las investigaciones de cambio climático y comenzar a adaptarse a sus posibles efectos. Si estos son menos drásticos de lo que hasta ahora se señala desde los organismos internacionales, habremos minimizado, al menos, el riesgo existente ya en muchos territorios de la superficie terrestre. Y entre ellos, el litoral mediterráneo es una región-riesgo que merece una especial atención de las administraciones y la sociedad para evitar que se agraven los efectos, ya manifiestos, del carácter extremo del clima... de un clima que puede cambiar.

Referencias

-AYALA-CARCEDO, F. J. Y OLCINA CANTOS, J. (COORDS.) (2002) *Riesgos Naturales.* Barcelona, Editorial Ariel. Col. Ciencia, 1.512 p.

-BRUNET, M., SALADIÉ, O., JONES, PH., ET ALII (2006) *"The development of a new dataset of Spanish Daily Adjusted Temperature Series (SDATS)* (1850-2003)", International Journal of Climatology, vol. 26, Issue 13, pp.1777-1802.

-DUPLESSY, J. C. Y MOREL, P. (1993) *Temporal sobre el planeta.* Madrid, Acento editorial, 312 pp.

-GIL OLCINA, A. Y OLCINA CANTOS, J. (1997) *Climatología General,* Barcelona. Edit. Ariel, 579 pp.

-HANSEN, J. (2006) *"El calentamiento global"* en Cambio Climático. Temas de Investigación y Ciencia, nº 45. Barcelona, Prensa Científica S.A., pp. 4-13.

-IPCC (2007) *Climatic Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climatic Change, Cambridge, Cambridge University Press (available in www.ipcc.ch)

-MARTÍN VIDE, J. (2002) *El tiempo y el clima*, Barcelona, Rubes, ed. 128 pp.

-MARTÍN VIDE, J. (COORD.) (2007) *Aspectos económicos del cambio climático.* Estudios Caixa de Cataluña nº 4. Barcelona, Caixa Cataluña, 83 pp.

-Ministerio de Medio Ambiente (2005) Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Madrid, Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático, 39 pp.+ CD.

-OLCINA CANTOS, J. (2006) *¿Riesgos Naturales? I. Sequías e inundaciones.* Barcelona, Editorial DaVinci Continental. Colección Geoambiente XXI, 220 p.

-OLCINA CANTOS, J. (2006) *¿Riesgos Naturales? II. Huracanes, sismicidad y temporales.* Barcelona, Editorial DaVinci Continental. Colección Geoambiente XXI, 205 p.

-QUEREDA SALA, J. MONTÓN CHIVA, E. ESCRIG BARBERÁ, J., GIL OLCINA, A. OLCINA CANTOS, J. Y RICO AMORÓS, A. (2001) *Nuestro porvenir climático, ¿un escenario de aridez?. Castellón de la Plana*, Publicaciones de la Universitat Jaume I, 223 pp.

-RUDDIMAN, W.F. (2006) *"Calentamiento antropogénico preindustrial"* en Cambio Climático. Temas de Investigación y Ciencia, nº 45. Barcelona, Prensa Científica S.A., pp. 14-21.

-SCHMIDT-THOMÉ, P. (edit) (2005) *The spatial effects and management of natural and technological hazards in Europe.* Luxemburgo. ESPON, (thematic project 1.3.1.) (avaliable in www.espon.eu)

-STERN, N. (2007) *El informe Stern. La verdad del cambio climático*, Barcelona, Paidós, 389 pp.

-TOHARIA, M. (2006) *El Clima. El calentamiento global y el futuro del planeta.* Barcelona, Ed. Debate, 333 pp.

-URIARTE, A. (2003) *Historia del Clima de la Tierra.* Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 306 pp.

-VV.AA. (1974) *Predecir y cambiar el tiempo.* Libros de bolsillo El Correo de la UNESCO, Barcelona, Promoción Cultural, 157 pp.



MANUEL TOHARIA CORTÉS

Estudios de Ciencias Físicas, especialidad de Física del Cosmos, Universidad Complutense de Madrid.
Profesional de la comunicación, periodismo y divulgación científica.
Profesor de periodismo científico del Master de Periodismo de la Universidad Autónoma UAM-EL PAIS y del instituto Español de la Energía.
Director del Museo Interactivo de la Ciencia ACCIONA en Madrid.
Director del Museo de la Ciencia de la Fundación La Caixa en Alcobendas (Madrid).
Director del Museo de las Ciencias Príncipe Felipe de Valencia.
Presidente de la Asociación Española de Comunicación Científica.
Premio de Periodismo Científico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C).
Premio de Vídeos de Divulgación Científica de la Casa de las Ciencias (La Coruña).
Premio SIMO a la divulgación científica en televisión.
Premio al Fomento del Ahorro energético (Ministerio de Industria)
Medalla de Honor al fomento de la Invención (Fundación García Cabrerizo)
Premio Prisma 2004 a toda una trayectoria de divulgación, del Ayuntamiento de La Coruña.



JUAN CUENCA ANAYA

Licenciado en Filosofía.
Doctor en Biología.
Catedrático de Ciencias Naturales del Instituto Luis Vives.
Profesor en la Facultad de Biología, Asignaturas de Vertebrados y Paleontología.
Colaborador en la confección del Catálogo-Inventario de la Colección "Rodrigo Botet" del Museo Paleontológico municipal.



AMANDO GARCÍA RODRÍGUEZ

Doctor en Física.
Catedrático de Universidad en el Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Física de la Universidad de Valencia.
Director del Laboratorio de Acústica.
Becario de la Institución Alfonso el Magnánimo de la Diputación Provincial de Valencia, la Fundación Juan March, la Internacional Atomic Energy Agency y la Carolina Harrold Foundation.
Premio " Alfonso el Sabio" del C.S.I.C.
Actualmente es Vicepresidente de la Sociedad española de Acústica.
Editor de Technical and Applied Papers de la revista Acústica/Acta Acústica.
Autor de una quincena de libros de mecánica, física nuclear y acústica aplicada.



VICENTE DOMINGO CODOÑER

Investigador de Ciencias Espaciales.
Su contribución al estudio de rayos cósmicos galácticos, extragalácticos y física de partículas elementales ha sido en varios centros Europeos y Americanos.
La mayor parte de su labor investigadora y de promoción científica la ha realizado en la Agencia Espacial y Europea (ESA), desde 1970 en su Centro de Investigación y Tecnología del Espacio(ESTEC) en Noordwijk, Holanda.
Ha contribuido a la activación en Europa de la investigación espacial de la física del sol y de sus relaciones con la tierra. En los últimos años ha coordinado el desarrollo científico por la ESA del observatorio solar espacial SOHO siendo director de operaciones científicas desde un centro de la NASA.
Actualmente su actividad se centra en la física solar y en particular en el estudio de la radiación solar, su origen y su influencia en la tierra.