



Tormenta de gran desarrollo vertical (*Cumulonimbus Incus*) creciendo en los cielos de Málaga el 13 de mayo de 2004. Autor: David Mancebo Atienza.

¿ESTAMOS CAMBIANDO EL CLIMA?

José Miguel Viñas Rubio

*A Sergio y a Susana,
los dos grandes amores de mi vida*

Índice

Prólogo

Introducción.

1. La percepción social del cambio climático.
 - 1.1. ¿Qué entendemos por cambio climático?
 - 1.2. El tiempo... ¿Está loco?
2. Cambios “recientes” en el sistema climático.
 - 2.1. El imparable ascenso de las temperaturas
 - 2.2. El deshielo de los polos y el retroceso de los glaciares
 - 2.3. La subida del nivel del mar
 - 2.4. Otros cambios “sintomáticos” detectados
 - 2.5. El aumento de los gases de efecto invernadero
3. La ciencia del clima terrestre y sus variaciones.
 - 3.1. El sistema climático
 - 3.2. Los mecanismos de realimentación
 - 3.3. El ciclo del carbono: Fuentes y sumideros de CO₂
 - 3.4. El papel termorregulador de los océanos
 - 3.5. Cambios bruscos en el clima
 - 3.6. La influencia solar
 - 3.7. Los ciclos climáticos: La Teoría Astronómica de Milankovitch
4. Las predicciones del clima futuro.
 - 4.1. El último informe de los expertos
 - 4.2. El porvenir climático de España

Epílogo y agradecimientos.

Bibliografía.

Prólogo

Sucede con demasiada frecuencia que cuando uno se siente interesado por algún tema de actualidad y decide buscar información más profunda al respecto, acabe renunciando poco después a progresar demasiado en el conocimiento del asunto. Si se decide a leer algún texto erudito sobre la cuestión, suele encontrarse con un autor que escribe para especialistas, dando por sabidas todas las cuestiones básicas para entenderlo. Y aunque el lector disponga de los fundamentos necesarios para poder profundizar, a menudo esos manuales técnicos abundan en largas y áridas digresiones sobre aspectos parciales de la cuestión que acaban haciendo su lectura poco digerible.

Si por el contrario uno se conforma con la información más asequible sobre el tema en artículos divulgativos en prensa y revistas, páginas de Internet, etc., puede saberle a poco y lo que es peor, descubrir la ligereza con que llega a tratarse un tema cuando es de fuerte actualidad y los medios de difusión no cesan de aprovecharlo. Se encontrará con frecuencia con información que se centra sólo en los aspectos más impactantes del tema, eludiendo consideraciones más amplias o equilibradas y recurriendo a medias verdades cuando no a frecuentes contradicciones.

El cambio climático y su posible causa por la actividad humana es uno de esos temas. Es de máxima actualidad porque todo el mundo coincide en la preocupación por sus consecuencias para la Tierra y sus habitantes, es interesante porque siempre lo ha sido hablar de las condiciones atmosféricas y es complicado porque nadie parece estar muy seguro de lo que está pasando o va a pasar con el clima.

José Miguel Viñas ha conseguido ese raro equilibrio de ofrecernos una visión completa de lo que hay detrás y delante del cambio del clima en el planeta. Su libro no cae en la aridez de los tratados especializados y al mismo tiempo ilustra con solvencia y seriedad sobre los orígenes del posible cambio del clima terrestre y del famoso calentamiento global, su observación y sus causas así como sus posibles consecuencias, todo ello basándose en las investigaciones más importantes que se están realizando en todo el mundo.

Personalmente la lectura que sigue me ha cautivado. Aunque mi profesión es la Meteorología no tenía un conocimiento demasiado formado sobre el cambio climático, sobre todo porque mi especialidad durante largo tiempo fue la predicción, el tiempo de las próximas horas y días, y no la evolución a largo plazo de ese tiempo. Pero en los últimos años me he visto implicado en la negociación de numerosos convenios internacionales que firman los servicios meteorológicos de distintos países y es significativo que ahora muchos de esos convenios se están centrando sobre la investigación del clima. Pensé por tanto que debería saber algo más sobre los fundamentos científicos del tema y fue entonces cuando me encontré con el dilema que acabo de mencionar. No pretendía convertirme en un especialista, pero sí informarme a mayor nivel de lo que corrientemente escuchamos o leemos en las fuentes más cercanas.

José Miguel Viñas rellena perfectamente esa trinchera entre lo altamente técnico y lo divulgativo o simplemente periodístico. El libro empieza con esa distinción, haciéndonos ver que la propia actualidad del cambio climático, el aumento de la temperatura y la preocupación por sus consecuencias han provocado un incesante flujo de información impactante con cierta tendencia al catastrofismo. La tentación a atribuir todos los desastres de origen atmosférico, inundaciones, avalanchas, sequías, etc. al cambio en el clima se ha hecho irresistible. Es necesario examinarlo con una óptica más aséptica y detenida y, sobre todo, distinguir qué factores pueden influir en el clima

además de la intervención del hombre, quien para la literatura periodística ha sido ya condenado como único causante de los desajustes del clima terrestre.

A medida que el lector vaya recorriendo las páginas se encontrará con una serie de aspectos y referencias sobre la observación y la investigación del cambio climático que quizá no había sospechado: la imperfecta referencia que proporcionan los datos instrumentales por su cortísima existencia en relación a la historia de nuestro clima, la difícil apreciación de la “temperatura media”, la aportación de la observación por satélites, la influencia de las erupciones volcánicas, el retroceso de los glaciares, el hielo polar, la dilatación térmica del océano y muchos otros datos y aspectos que es imprescindible considerar. Para todos ellos el autor insiste en deslindar lo que se sabe de lo que todavía no es conocido y en particular en distinguir la posible influencia “antrópica” de la que probablemente no depende de la actividad humana. Cada sección del libro es, en este sentido, una llamada a la “sensatez científica”.

El tercer capítulo ofrece una versión pormenorizada sobre el sistema climático de la Tierra, sus componentes y su intrincado acoplamiento, en el que es evidente que la especie humana tiene su lugar. Irremediamente es el capítulo que más tiene que recurrir al uso de conceptos científicos, pero resulta suficientemente ameno con unos conocimientos básicos y es especialmente atractivo incluso para quien no esté directamente interesado en el cambio del clima. Finalmente en el capítulo cuarto, el autor aborda la posible respuesta a la “pregunta del millón”: ¿cómo será el clima futuro? Para ello, además de recoger los aspectos que ha ido desarrollando antes, nos ofrece los resultados más recientes de la intensa investigación que el IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) y otros organismos especializados vienen realizando para poder responder.

Si al llegar al final se ha despertado el interés y la curiosidad del lector, como a mi me ha sucedido, se incluye una larga referencia bibliográfica que se suma a las continuas referencias a pie de página que se encuentran en todo el texto. Sin duda a muchos les servirá para continuar profundizando en el tema, pero el lector medio como yo me clasifico, y así se lo dije al autor cuando me hizo el honor de pedirme un prólogo, adquiere ya con la lectura un conocimiento completo, documentado y sobre todo riguroso. ¿Estamos cambiando el clima? No ya para responder, sino incluso para tener cierto derecho a hacer la pregunta, conviene conocer bastantes cosas previas. Todas ellas están en el libro de José Miguel Viñas.

Manuel Palomares Calderón
Jefe de la Unidad Técnica de Relaciones Internacionales
Instituto Nacional de Meteorología

Septiembre de 2004

Introducción.

Pese a los extraordinarios avances de los últimos años en las Ciencias de la Tierra, todavía no podemos responder con total seguridad a la pregunta que da título a este libro. Lo cierto es que el debate está en la calle, en boca de todos y más vivo que nunca: ¿Estamos cambiando el clima?

Muchos somos los que nos planteamos la pregunta a menudo, casi a diario, aunque, claro, en mi caso quizás esto se justifique por mi condición de meteorólogo, al estar todos los días “metido en harina”, rodeado de mapas del tiempo, trabajando con montones de datos de temperatura, precipitación... reflexionando frecuentemente sobre nuestro clima y con la cabeza casi siempre “en las nubes”, en palabras de mi sufrida esposa.

Si hubiera que apostar por el SÍ o por el NO; las dos posibles respuestas a nuestra pregunta, lo más probable es que, con independencia de cual sea su nivel de conocimiento sobre el sistema climático, apueste por el SÍ. Es fácil encontrar argumentos y datos más o menos sólidos y objetivos que respalden su afirmación. Salvo que escondamos la cabeza bajo tierra como el avestruz, los ciudadanos del siglo XXI no podemos dejar de ver el daño cada vez mayor que infligimos a nuestro entorno, dentro y fuera de las ciudades.

Vivimos en un planeta sorprendente y lleno de formas de vida, siendo la nuestra la única capaz de modificar el frágil equilibrio terrestre, gracias al cual existimos. Cualquiera puede sospechar que tendremos que pagar un alto precio por tanta tala de bosques, por nuestras emisiones a la atmósfera, por tantas y tantas cosas... Algunos, de la mano de la ciencia, tratan de evaluar y, lo más importante, de cuantificar nuestra responsabilidad en el cambio climático que al parecer ya está en marcha.



Nuestro planeta visto desde el espacio. Fotografía de la Tierra tomada por los astronautas del Apolo 17 el 7 de diciembre de 1972.

A los científicos, acostumbrados a moverse entre números como peces en el agua, también les gusta hacer apuestas sobre cualquier cuestión abierta, y la planteada sobre *nuestro clima futuro*¹ es, sin duda, una de ellas. Si hace una década, preguntados al respecto, mostraban división de opiniones, hoy en día las apuestas apuntan decididamente hacia el SÍ.

La huella del hombre aparece cada vez más nítida en las observaciones recientes. Cada vez se investiga más y mejor la máquina del clima y, aunque se plantean nuevos interrogantes, parece más evidente que algo “se está cocinando” en este momento de la historia de la Tierra, y no sólo por causas naturales (parcialmente entendidas) como ha venido ocurriendo desde tiempos remotos.

En este libro aportaré datos e informaciones muy variadas que han llamado mi atención en estos últimos años. Creo, además, que al margen de lo experto que uno sea en la materia, en un tema como éste hay que expresarse con una gran dosis de prudencia, aceptando las grandes incertidumbres aún existentes y no dejándose llevar únicamente por las “evidencias” o el sentir popular.

Lo cierto es que no resulta fácil ser imparcial en esta historia. Los datos están ahí y algunos hablan por sí solos, arrastrándonos hacia el enfoque más irracional, menos reflexivo, más pasional... el del autoconvencimiento de que el cambio climático está en marcha gracias a nuestras emisiones de gases de efecto invernadero. Puede ser verdad y, de hecho, la comunidad científica empieza a llegar a este tipo de conclusiones.

Pero la cosa no queda ahí, sino que además asociamos cualquier episodio meteorológico que llama nuestra atención con los desajustes del clima, y es que “la reiteración mediática de que nos hallamos inmersos ya en el escenario de un cambio climático ha convertido esta hipótesis en un axioma científico ampliamente aceptado. Cualquier anomalía o fenómeno atmosférico que se produce tiene su explicación inmediata en la misma hipótesis que contribuye aparentemente a fundamentar. Sin duda, no es otro el precio que se ha de pagar cuando la importancia social de un tema científico saca las investigaciones preliminares de sus moldes de trabajo y se divulga sin los filtros de gabinete y laboratorio”². Así, con estas palabras, queda reflejada la sugestión a la que nos vemos sometidos permanentemente y lo gratuito de algunos titulares de prensa. Merece la pena reflexionar sobre todas estas cuestiones y evitar, en la medida de lo posible, una predisposición a ver más allá de lo que una determinada cifra, gráfica o información concreta pueda estar contándonos.

El libro está dividido en cuatro capítulos. El primero de ellos trata del cambio climático desde la óptica del ciudadano; es decir, la forma en la que este problema global es percibido por todos nosotros, a través, básicamente, de los medios de comunicación. Los principales cambios observados en el sistema climático serán analizados detalladamente en el capítulo 2, en un intento por ofrecer una visión completa de una información que a menudo nos llega sesgada.

Para entender un poco mejor como funciona ese sistema tendremos que seguir avanzando en la lectura y llegar hasta el capítulo 3. Veremos cuáles son las diferentes escalas y mecanismos que entran en juego, su comportamiento caótico intrínseco, sus ciclos... y una vez que tengamos claros estos conceptos, estaremos en disposición de introducirnos en el cuarto y último capítulo y escuchar a los científicos. Disertaremos brevemente sobre algunas de sus más recientes predicciones sobre el clima futuro, haciendo especial hincapié en las dificultades que entraña la modelización climática. En

¹ “Nuestro clima futuro” fue el lema elegido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para conmemorar el Día Meteorológico Mundial de 2003. Publicación OMM-nº 952.

² Referencia 15 de la bibliografía.

la segunda parte de este capítulo nos fijaremos solamente en España y lo que apuntan esas predicciones climáticas en nuestro ámbito geográfico.

Finalmente, para profundizar más en alguna de las muchas cuestiones tratadas en el libro, invito al lector a hacer uso de la bibliografía existente en castellano. He seleccionado una relación de lecturas adicionales lo más completa y actualizada posible, tanto de libros como de artículos de divulgación científica. Las referencias de estos últimos irán apareciendo a lo largo del texto, mientras que los libros se incluyen al final, en la bibliografía.

Tampoco podíamos olvidarnos de Internet y de sus poderosos motores de búsqueda de información, por lo que se irán facilitando algunas páginas web de interés, como resultado de un cuidadoso filtrado, siempre necesario en la red de redes. Fueron verificadas por última vez en agosto de 2004.

Adentrémonos, sin más preámbulos, en algunas de las principales cuestiones que encierra y plantea el popular cambio climático; un término que está de moda y que, dando por buenas las predicciones de los investigadores del clima, lo seguirá estando en los próximos años.

1. La percepción social del cambio climático.



1.1. ¿Qué entendemos por cambio climático?

En primer lugar, debemos saber distinguir entre dos conceptos a menudo mal empleados: el *tiempo* y el *clima*.

Si bien son muchas las definiciones³, más o menos técnicas, que nos ofrecen los meteorólogos y climatólogos; para un lugar concreto y simplificando las cosas, el *tiempo* sería el estado de la atmósfera en un momento dado (en un instante), mientras que el *clima* vendría dado por la sucesión periódica de situaciones meteorológicas (diferentes estados atmosféricos) que se dan a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente amplio.

Es bastante corriente escuchar o leer frases en las que se comenta que las adversas condiciones “climatológicas” o “climáticas” fueron la causa de tal o cual accidente de tráfico. Si el suceso ocurre, por ejemplo, en una carretera de Almería y en ese momento llueve intensamente, entonces hay que entender que las condiciones “meteorológicas” son de *tiempo lluvioso* en una de las zonas más secas de España (*clima seco*).

En la película del clima cada fotograma nos muestra el tiempo meteorológico de un determinado instante. Dado que existe una variabilidad natural intrínseca al sistema climático, esa sucesión continua de tipos de tiempo no se repite exactamente igual todos los años; algunos son más húmedos, otros tienen veranos más calurosos, a veces se suceden varios otoños escasos de lluvias... Pero entonces, si esa realidad meteorológica variable es lo normal, ¿por qué han saltado las alarmas?

Resulta que de un tiempo a esta parte el clima muestra cambios (en particular de la temperatura media global) en un único sentido, que parecen no justificarse únicamente por causas naturales. Además, los modelos climáticos nos permiten ver la película de los próximos años y en ella se observa que esos cambios unidireccionales se

³ Véanse, por ejemplo:

Gibbs, W. J.: **Definiendo el clima**. Boletín de la OMM. Vol. 36; n° 4 (1987).

Linés Escardó, A.: **Contribución al concepto de clima**. Territoris, n° 1 (1998): pp 203-213.

acentúan aún más en el futuro, en concordancia con nuestro creciente impacto medioambiental.



Figura 1.1

El mundo artificial que hemos creado a nuestro alrededor nos hace olvidar con demasiada frecuencia la fragilidad del medio natural en el que vivimos y los daños permanentes al que le sometemos.

La OMM⁴, en su Vocabulario Meteorológico Internacional⁵, nos ofrece dos definiciones para el término *Cambio Climático*. En la más general de ellas indica que “[el cambio climático] abarca todas las formas de inconstancia climática, con independencia de su carácter estadístico o sus causas físicas. Los cambios climáticos pueden resultar de factores tales como las variaciones en la radiación solar, los cambios a largo plazo de elementos de la órbita terrestre (excentricidad, oblicuidad de la eclíptica, precesión de los equinoccios), los procesos internos naturales del *sistema climático* (sic) o el forzamiento antropogénico (por ejemplo, aumento de las concentraciones atmosféricas de *dióxido carbónico* (sic) y de otros gases de efecto invernadero)”.

La realidad es que al ciudadano medio no le llega este concepto tan amplio y detallado que engloba todas las causas posibles que inciden sobre nuestro sistema climático. Los medios de comunicación se encargan (deliberadamente y con un claro interés comercial en mi opinión) de identificar el cambio climático únicamente con los forzamientos inducidos por el hombre, ¡cómo si no hubiera más causas!

⁴ La Organización Meteorológica Mundial es un organismo dependiente de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) y con sede en Ginebra (Suiza). URL: <http://www.wmo.ch>

⁵ Publicación OMM-nº 182.

Esto lleva a la gente a pensar, equivocadamente, que cualquier hecho meteorológico o climático que llama nuestra atención (un fuerte aguacero otoñal en el Mediterráneo, una nevada fuera de fechas, una “ola” de frío o de calor, el desbordamiento de un río, el fenómeno de El Niño, el “agujero” de ozono sobre la Antártida...) es debido al cambio climático.

¿Son ahora más frecuentes los episodios extremos?, ¿es ésta la forma en la que el cambio climático está empezando a actuar? Ciertamente, las noticias alarmistas que apuntan en este sentido son cada vez más numerosas pero, como veremos, el asunto no está tan claro. Hay un dato incuestionable y es que, año tras año, aumenta el coste de los desastres naturales en todo el mundo. Los informes de las reaseguradoras no dejan lugar a dudas; las pérdidas ocasionadas por las catástrofes naturales (se relacionen o no con el cambio climático) se multiplican por dos aproximadamente cada década (Figura 1.2).

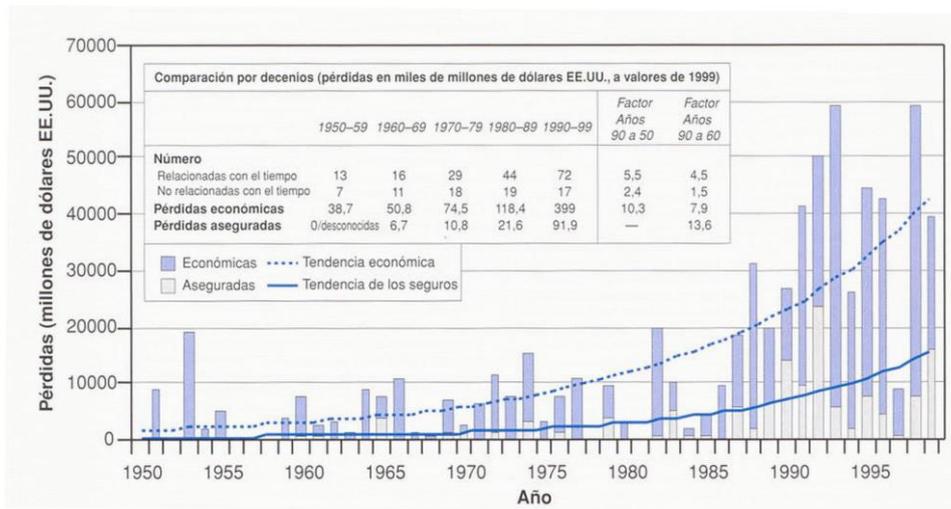


Figura 1.2

Las pérdidas económicas por los desastres naturales no paran de crecer año tras año.

Fuente: Tercer Informe del IPCC⁶ (2001).

María del Carmen Llasat, profesora del departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona, tras haber investigado los episodios de inundaciones catastróficas en la cuenca norte del Mediterráneo desde el siglo XIV hasta nuestros días, llegaba en 2003 a la siguiente conclusión: “en 700 años, las inundaciones catastróficas no han aumentado. Sin embargo, el valor de los daños que causan es cada vez mayor porque se siguen ocupando áreas inundables. La presión urbanizadora es impresionante y se construye en áreas de riesgo que jamás deberían haberse ocupado, sobre todo en la costa mediterránea española, francesa e italiana”. En esta misma línea se han expresado recientemente otros investigadores⁷, aunque sobre este asunto volveremos más adelante.

En cualquier caso, parece que hay una realidad *mediática* de la que, junto a la percepción subjetiva de cada individuo, es bastante difícil escapar. Esa realidad

⁶ Siglas inglesas con las que se conoce al Grupo (o Panel) Internacional de expertos sobre el Cambio Climático. Su principal misión es la elaboración de informes periódicos de evaluación y proyección futura sobre este complicado asunto. Muchas de las informaciones que aparecen en este libro han sido tomadas del tercer y último de esos informes (2001).

⁷ Martín Vide, J.: **Sobre las señales del cambio climático antrópico**. IX Jornadas de Meteorología “Eduard Fontserè” (2003). Libro de ponencias, pp 159-168.

sustituye a la *climática*; la verdadera, de difícil análisis, compleja en sí misma y muy escurridiza para los investigadores.

Por si esto fuera poco, el problema del cambio climático, entendido como algo que nos irá complicando la existencia, es que, por su propia naturaleza, en ningún momento en el futuro se convertirá en una amenaza a corto plazo para los gobernantes. De momento, no parece fácil que éstos se quiten la venda de sus ojos y vean más allá de sus años de mandato, por lo que cualquier decisión política al respecto será un pequeño parche poco eficaz aunque necesario.

Los acontecimientos meteorológicos extremos (inducidos o no por el hombre) parecen estar a la orden del día y lo seguirán estando en el futuro, pero, ¿desde cuándo sufrimos los desajustes del clima?, ¿cuáles (de haberlas) son las principales evidencias del cambio climático?, ¿realidad climática o mediática? Entremos en materia.

1.2. El tiempo... ¿Está loco?

De unos años a esta parte, muchas personas ven en las locuras del tiempo un signo inequívoco del cambio climático que está en marcha. En éste, como en muchos otros casos, vuelven a mezclarse con poca fortuna los conceptos de tiempo y clima.

La climatología de cualquier lugar viene caracterizada por una serie de valores estadísticos (con la *media aritmética* a la cabeza) de elementos como la temperatura, presión atmosférica, precipitación, viento... que presentan una alta variabilidad temporal a muy diferentes escalas, sobre todo en latitudes templadas, como ocurre en la Península Ibérica.

Así, por ejemplo, la distribución anual de la precipitación no se ajusta a un patrón fijo de variación, y aunque el otoño sea, estadísticamente, el periodo más lluvioso y dentro de esa estación octubre, pongamos por caso, el mes con mayor pluviometría, en una serie de 30 años no es raro encontrar un poco de todo, incluso años en los que octubre fue un mes seco. Estas anomalías son bastante habituales (una constante, podríamos decir) y los años “raros” se suceden, encontrándonos en las series climatológicas con periodos secos y periodos húmedos más o menos persistentes (Figura 1.3).



Figura 1.3

La presencia de cauces secos es bastante habitual durante el fuerte estiaje veraniego peninsular, en contraposición con los desbordamientos y las grandes crecidas que sufren esos mismos ríos durante los periodos de lluvia. En la imagen, el cauce seco del río Jarama en junio de 2002. Fuente: http://www.elsoto.org/jarama_vivo.htm

Algo parecido ocurre con los episodios meteorológicos extremos y su irregular distribución espacio-temporal. Pese a ser en su mayoría de corta duración y tener un carácter más puntual, su impacto social es considerable, perdurando muchas veces selectivamente en la memoria de la gente. “Ni los más viejos del lugar recordaban algo así”, reza la coletilla en las crónicas periodísticas, cuando en la mayoría de las ocasiones los registros históricos no avalan dicha afirmación gratuita.

Atrapados por esa realidad mediática de la que antes hablábamos, relacionamos cada vez más las locuras del tiempo con el cambio climático, lo que no parece del todo razonable. Incluso cuando no existía esa preocupación colectiva por el porvenir de nuestro clima, la caprichosa meteorología provocaba reflexiones parecidas en la gente.

“Continuamente estamos oyendo a personas de edad avanzada, que el clima de Vitoria se ha modificado de una manera notable (...). Nosotros, que siempre hemos tenido por un excelente criterio el respeto a la ancianidad, y la fe en el testimonio humano, creemos que será así efectivamente, y mucho más si tenemos en cuenta que en los meses de diciembre, enero y febrero, que son por lo regular aquellos, salvo algún día que otro, [en los que] apenas la temperatura nos hace conocer que nos hallamos en la helada estación del año. Mas esta modificación no llega a los meses siguientes, por lo que de algunos años a esta parte estamos viendo; pues así que [nos] encontramos en el mes de marzo, suele empezar a sentirse un frío intenso, y aún a caer la nieve, como ha sucedido en este año; de tal modo que no parece sino que han cambiado las estaciones y que en vez de estar en la primavera, nos hallamos en riguroso invierno”. (El Porvenir Alavés, 9 de marzo de 1867).

“...En otros tiempos había una transición dulce y paulatina entre el rigor estival y el frío cruel del invierno; había un otoño dulce, templado, melancólico; se pasaba dulcemente y sin sentir desde el ardiente hasta el helado polo.

Pero ahora los dos polos se tocan, y un día anochece como de agosto y el otro amanece como de diciembre. No falta quien achaque esto a que la Tierra se va enfriando; verdaderos achaques del planeta que se va haciendo viejo...” (La Unión Vascongada, 15 de septiembre de 1894).

Sirvan este par de ejemplos⁸ de la segunda mitad del siglo XIX para comprobar como la pérdida de nitidez de los ciclos estacionales ya se denunciaba hace más de 100 años, cuando el impacto a nivel global (que no local) de las actividades humanas era despreciable. La pregunta que deberíamos hacernos es si hay alguna diferencia fundamental entre el tiempo “loco” que sorprendía a nuestros antepasados y el comportamiento actual de la atmósfera.

Hoy en día la sensación que se tiene es que nuestro clima se está desajustando de forma precipitada, siendo cada vez mayor la frecuencia con la que aparecen fenómenos meteorológicos extremos. Los récords climatológicos son batidos continuamente en todo el mundo, lo que confirma, aparentemente, nuestras sospechas.

Para el caso particular de España y limitándonos a la última década (1995-2004), sorprende, tras un primer análisis cuantitativo, el elevado número de episodios que podríamos calificar como extraordinarios. Aunque de naturaleza y escalas diferentes, todos ellos superaron los umbrales que a priori parecían razonables.

A mi entender resulta evidente que, pese a los importantes avances de las últimas décadas en los modelos numéricos de predicción, todavía desconocemos muchos de los mecanismos de la máquina del clima. No obstante, gracias a estos avances ha mejorado notablemente la prevención de los efectos de las catástrofes naturales de origen meteorológico⁹.

⁸ Tomados del libro: **El clima del País Vasco a través de la prensa**. Servicio Vasco de Meteorología (1998).

⁹ Quizás el ejemplo más ilustrativo sea el de Bangladesh, donde los ciclones tropicales provocan cada cierto tiempo inundaciones catastróficas. En este país, la mejora de las predicciones, junto a la difusión de avisos en el momento oportuno y el incremento de medidas de sensibilización y preparación, ha permitido reducir espectacularmente el número de víctimas mortales, que ha pasado de 300.000 muertos en 1970, a 138.000 en 1991 y “tan sólo” (comparativamente) unos 2.000 en 1994, teniendo en cuenta que en los tres casos los ciclones tropicales tuvieron una intensidad comparable.



Figura 1.4

Efectos devastadores al paso de un tornado por la localidad alemana de Pforzheim, en julio de 1968.

A este respecto, y enlazando con el tema del efecto invernadero, que iremos abordando en este libro, es interesante la reflexión que hacía a principios de los años 80 el oceanógrafo norteamericano Roger Revelle, cuando afirmaba que: “las sociedades han acumulado mucha experiencia para reaccionar frente a catástrofes naturales a corto plazo: episodios tales como huracanes, inundaciones, sequías, erupciones volcánicas, terremotos e incendios forestales. Pero los cambios que pueden producirse como resultado del aumento de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera no serán episodios, sino variaciones ambientales lentas, difusas y omnipresentes. Serán imperceptibles, para la mayoría de la gente, de un año a otro a causa del pequeño incremento anual de la variación climática”¹⁰.

De cualquier forma, pese a que en el futuro contemos con unos pronósticos cada vez más ajustados a la realidad, la Meteorología seguirá mostrándonos cada cierto tiempo su cara menos amable y más imprevisible, con independencia de la forma en que nos afecte (o esté afectando ya) el cambio climático.

¹⁰ Revelle, R.: **Dióxido de carbono y clima mundial**. Investigación y Ciencia, nº 73 (Octubre 1982). Véase la referencia 42 de la bibliografía.



Figura 1.5

Las tormentas son una de las manifestaciones más claras del carácter imprevisible y severo de la Meteorología. En la imagen, un espectacular rayo fotografiado desde Collado Villalba (Madrid) en la madrugada del 7 de junio de 2004. Autor: Alberto Lunas Arias.

Repasemos cronológicamente algunos de los episodios meteorológicos más destacados (probablemente los que mayor impacto han tenido en la población) ocurridos en España en los últimos diez años¹¹:

- **Julio de 1995:** Intensa *ola de calor* en la que se batieron récords históricos de temperatura en muchos observatorios (se rozaron los ¡¡47°C!! en Córdoba y Sevilla). Ese caluroso verano ponía el broche final a un largo periodo de sequía en nuestro país (1991-1995)¹².
- **La catástrofe de Biescas (7 de agosto de 1996):** Fortísima tormenta desencadenante de una violenta y repentina avalancha de agua, lodo,

¹¹ Tengamos en cuenta que, al presentar cada uno su propia escala espacio-temporal, los episodios que se enumeran no son comparables desde un punto de vista meteorológico.

¹² También en julio de 1995 otras regiones del mundo padecieron olas de calor extremo. Destaca el episodio ocurrido en Chicago, donde fallecieron más de 700 personas ¡en tan solo cuatro días!

piedras y vegetación que se llevó por delante el camping “Las Nieves”, en las cercanías del pueblo oscense de Biescas. Fallecieron 87 personas. El carácter torrencial de la precipitación fue extremo (Intensidades mayores de 200 mm/h).

- **Noviembre de 1997:** Lluvias torrenciales en Extremadura, con especial incidencia en Badajoz, donde una riada causa 25 muertos. La lluvia caída en dos horas supuso la cuarta parte del total pluviométrico anual de la zona.
- **Junio de 2000:** Histórico episodio de lluvias ocurrido durante la noche del 9 al 10 en la montaña de Montserrat y alrededores (Barcelona). Las precipitaciones superaron en algunos puntos los 250 l/m², causando graves desperfectos en el monasterio y el derrumbe de un puente de la carretera N-II. Fallecieron 5 personas.
- **Octubre de 2000:** Excepcional *gota fría* en el Mediterráneo por lo persistente en el tiempo (tres días de duración), que dejó importantes cantidades de precipitación en muchas zonas del este peninsular. Los máximos de lluvia (por encima de 500 l/m²) se alcanzaron en algunas localidades de Valencia y Castellón.
- **Diciembre de 2001:** A lo largo de este mes se suceden dos intensas *olas de frío*, teniendo especial incidencia en algunas comarcas de Aragón y Cataluña. La persistencia del frío fue muy notable en ciudades como Teruel, donde se bajó de -7 °C o más (llegando hasta los -18 °C) durante diecisiete días casi consecutivos.
- **La tormenta de Tenerife (31 de marzo de 2002):** Una fuerte tormenta queda “anclada” sobre Santa Cruz de Tenerife, dando lugar a una tromba de agua sin precedentes. Cayeron 220 l/m² (cantidad equivalente a toda la lluvia de un año en la capital tinerfeña) en tan sólo tres horas. Fallecieron 8 personas.
- **El tórrido verano de 2003:** Excepcional episodio de calor ocurrido en gran parte de Europa. Su larga duración fue la característica más acusada. En nuestro país, aparte de algún récord absoluto de temperaturas máximas (39 °C en San Sebastián), destacaron sobre todo unas mínimas muy elevadas. La tasa de mortalidad de ese periodo se elevó muy por encima de la media¹³.

A la vista de lo anterior, podríamos llegar a pensar que en los últimos años los desajustes climáticos y los extremos meteorológicos han aumentado en número e intensidad. “Demasiadas casualidades”, diríamos, teniendo en cuenta, además, que “los años noventa parecen haber sido el decenio más cálido del milenio en el hemisferio norte”¹⁴. Sin embargo, es posible confeccionar cronologías similares, e igualmente “sintomáticas”, de otras décadas anteriores, incluso de otras épocas¹⁵. Como dije en la introducción, la prudencia debería ser nuestra principal arma en la batalla por comprender el cambio climático.

¹³ Sobre todo en Francia y concretamente en el área metropolitana de París, donde las cifras de muertos en agosto superaron en más de un 70% las tasas de otros años. Para toda Francia el número de fallecidos ascendió a cerca de 15.000. Tan luctuoso hecho destapó las graves deficiencias del sistema sanitario francés.

¹⁴ Referencia 9 de la bibliografía.

¹⁵ Referencia 4 de la bibliografía.



Figura 1.6

Desbordamiento del río Nervión a su paso por la localidad alavesa de Llodio durante las inundaciones del País Vasco en agosto de 1983. En aquel histórico episodio de lluvias más de cien municipios vascos fueron declarados zona catastrófica, falleciendo 34 personas y registrándose hasta 600 l/m² de precipitación en 24 horas. Parece claro que antes de que se desatara la actual “fiebre climática” los desastres meteorológicos estaban también a la orden del día. Fuente: El correo digital. Monográfico: “Las inundaciones 1983-2003”. URL: <http://canales.elcorreodigital.com/especiales/inundaciones/portada.html>



Figura 1.7

La calle Correduría, en pleno casco histórico de Sevilla, durante las inundaciones de 1947. Aunque el dicho popular nos recuerde que: “La lluvia en Sevilla es una maravilla”, en ocasiones como ésta las precipitaciones pueden adquirir carácter torrencial, provocando el desbordamiento del río Guadalquivir. Fotografía de Serrano. Fuente: Libro *Sevilla un siglo de imágenes*.

Otro de los hechos que, de un tiempo a esta parte, llama poderosamente nuestra atención, es el de los récords meteorológicos. Como botón de muestra, aquí van unos cuantos publicados en la prensa durante el periodo considerado:

“Andalucía vivió en 1996 su mes de diciembre más lluvioso del siglo.” (El País, 5 de enero de 1997)

“Las mayores precipitaciones del siglo colapsan la provincia de La Coruña.” (ABC, 10 de marzo de 1999)

“El invierno más seco del decenio amenaza la agricultura y reduce la reserva de agua a la mitad” (La Vanguardia, 5 de marzo de 2000)

“Galicia vivió la temporada de lluvias más larga desde el inicio del siglo XX.” (El Correo Gallego, 23 de marzo de 2001)

“Cataluña registra la temperatura más alta que se ha dado en un mes de marzo desde 1880.” (El Periódico, 24 de marzo de 2001)

“La Península sufre el calor más elevado de los últimos ochenta años para un mes de octubre...” (La Vanguardia, 31 de octubre de 2001)

“Valencia sufre el aguacero más intenso de los últimos 41 años.” (El Periódico, 2 de julio de 2002)

“Valencia sufre la noche más calurosa de las que constan registradas desde 1869.” (Las Provincias, 29 de julio de 2003)

“Guipúzcoa padeció la jornada más calurosa de los últimos 75 años.” (Diario Vasco, 5 de agosto de 2003)

“Barcelona registró el mes de julio más cálido de la historia.” (El Periódico, 5 de agosto de 2003)

Y así podríamos seguir y seguir... *ad aeternum*. “Al parecer, continuamente se están batiendo valores récord en nuestro clima en uno u otro lugar de nuestro planeta (...), y ello es percibido por la población como si se tratase de una tendencia incontestable hacia un clima más extremo. Sin embargo, no caemos en la cuenta del enorme número de récords meteorológicos que podemos enunciar, de manera que aunque no existiese ninguna tendencia al cambio, con el paso del tiempo estos récords se irían sucediendo”¹⁶.

Con estas palabras queda claro que lo de batir récords no es algo tan extraordinario como pudiera parecer a primera vista. De hecho, la probabilidad de alcanzar un determinado récord en un observatorio es muy alta¹⁷. Sólo cuando detectamos una acumulación de récords en un solo sentido (lo que está ocurriendo con la tendencia al alza de la temperatura media anual del planeta) se puede hablar con propiedad de cambio climático en el sentido más general del término.

El ascenso global de la temperatura parece ser el principal indicador del cambio climático que se cierne sobre nosotros, siendo cada vez más las evidencias que apuntan en ese mismo sentido; relacionadas todas ellas, sin duda, con la temperatura, aunque no de una forma tan simple como algunos quieren ver.

Las redes de observación terrestre nos aportan a diario millones de datos que en los últimos años muestran una tendencia muy clara (indiscutible) hacia un calentamiento global. Como veremos en el capítulo 4, éste seguirá aumentando a lo largo del siglo XXI, y lo hará, además, de forma más acusada. Pero antes de hablar del

¹⁶ Lorente Castelló, J.: **La precipitación del cambio climático**. Véase la referencia 43 de la bibliografía.

¹⁷ Matemáticamente podemos expresar esa probabilidad como $1-[1-(2/n)]^r$, donde n es la longitud de la serie (número de años) y r el número de variables. Tomado de Martín Vide, J.: **El tiempo y el clima**. Rubes Ed. (2003).

futuro, centrémonos en la realidad climática actual, situándola dentro de un contexto histórico más amplio, para poder así caracterizarla de la forma más objetiva posible.

2. Cambios “recientes” en el sistema climático.



Arco Iris fotografiado el 23 de agosto de 1990 en las cercanías de Kiruna, al norte de Suecia.
Autor: Fernando Bullón Miró.

En este capítulo analizaremos cuales han sido los principales cambios detectados durante la última centuria en las diferentes variables e indicadores de interés climático. El objetivo final es ir adquiriendo una visión lo más objetiva posible del clima actual que nos ayude posteriormente a entender mejor su naturaleza y comportamiento.

2.1. El imparable ascenso de las temperaturas

Hablamos indistintamente del calentamiento global, del efecto invernadero e incluso del cambio climático, para expresar una misma cosa: el aumento global de las temperaturas iniciado hace algo más de un siglo y que, muy probablemente, continuará en los años venideros. Mientras que esto último es el resultado al que nos llevan nuestras, hoy por hoy, imperfectas predicciones climáticas, el aumento experimentado en los últimos tiempos por las temperaturas es un hecho real y en consecuencia medible, basado en la observación sistemática y permanente que hacemos del sistema climático.

“Los datos meteorológicos registrados durante los últimos cien años indican que el mundo se está calentando”¹⁸. No obstante, podemos plantearnos muchas preguntas al respecto: ¿Cómo se determina la temperatura media de todo el planeta?, ¿debe preocuparnos una subida de “tan sólo” unas cuantas décimas de grado?, ¿es

¹⁸ Jones, P. D.; Wigley, T. M. L.: **Tendencias hacia el calentamiento global**. Investigación y Ciencia, n° 169 (Octubre 1990). Véase la referencia 42 de la bibliografía.

significativo ese aumento?, ¿a qué tipo de causas obedece?, ¿es un claro indicador del (hipotético) cambio climático antrópico (provocado por el hombre)?

La avalancha de informaciones aparecidas en la última década haciendo referencia al calentamiento global nos transmite sólo una visión parcial del asunto, en muchos casos catastrofista. Pensemos, por ejemplo, en las zonas de tundra cercanas al límite latitudinal de las nieves perpetuas, donde actualmente el clima es frío y extremo, imposibilitando la actividad agrícola. En este caso una subida de la temperatura implicaría cambios en los usos del suelo, permitiendo a medio-largo plazo su explotación y, en consecuencia, más ventajas que inconvenientes para los sufridos pobladores de esas tierras.

No obstante, muchos científicos empiezan a ver el tema con preocupación, y nos advierten que “aunque algunas regiones pudieran beneficiarse durante cierto tiempo [del calentamiento global], cabe esperar que, en conjunto, las alteraciones resultarán perjudiciales e incluso catastróficas”¹⁹.

Fijaremos nuestra atención en los resultados y las conclusiones de las campañas de observación llevadas a cabo por los investigadores del clima lo que, como veremos también, ha ido teniendo su reflejo en la prensa diaria.

Cuadro I	PRINCIPALES CAMBIOS OBSERVADOS EN LA TEMPERATURA A LO LARGO DEL SIGLO XX
<ul style="list-style-type: none"> • La temperatura media global en superficie ha aumentado en $0,6\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ desde 1860. • Probablemente, el siglo XX sea el más cálido del último milenio en el Hemisferio Norte (idéntica afirmación podemos hacer de la década de los años 90 del siglo XX y del año 1998 en particular). • En el periodo 1950-2000 las temperaturas mínimas nocturnas han aumentado el doble que las máximas diurnas. • Aumento del número de días calurosos y disminución de los días con heladas en casi todas las zonas terrestres durante el siglo XX. • El contenido global de calor de los océanos ha aumentado desde finales de los años 50 del siglo XX (inicio de las observaciones regulares de la temperatura superficial oceánica) a un ritmo de $0,04\text{ °C}$ por década en su capa superficial (primeros 300 metros). 	

FUENTE: Elaboración propia, a partir de los datos del IPCC (2001).

Disponemos de mediciones directas fiables de las variables atmosféricas desde mediados del siglo XIX²⁰, considerando el año 1860 como punto de partida de la llamada *época instrumental*, que alcanza hasta nuestros días. Para conocer cómo se comportó la temperatura, y en consecuencia el clima, en fechas anteriores (*época preinstrumental*), los climatólogos recurren a métodos indirectos de lo más variados e ingeniosos, obteniendo a partir de ellos lo que se conoce internacionalmente como *proxy data*. Se analizan las burbujas de aire primitivo atrapadas en testigos de hielo de las regiones polares, el crecimiento de los anillos de los árboles o los depósitos de sedimentos del fondo de lagos y océanos, entre otras muchas técnicas paleoclimáticas.

¹⁹ Karl, T. R.; Trenberth, K. E.: **Influencia del hombre en el clima**. Investigación y Ciencia, nº 280 (Enero 2000). Véase la referencia 42 de la bibliografía.

²⁰ Aunque existen algunas series de registros meteorológicos que se remontan más atrás en el tiempo. La serie más antigua de España es la de presión atmosférica media mensual de Barcelona, iniciada en 1780.

Para épocas más recientes, aunque anteriores a 1860, son de gran utilidad las fuentes documentales procedentes de archivos históricos (eclesiásticos, municipales...), donde quedan bien reflejadas las diferentes fases por las que pasó el clima terrestre, así como los acontecimientos extremos. En palabras del profesor de la Universidad de Berna (Suiza) Christian Pfister: “Las medidas instrumentales no son suficientemente largas para describir la frecuencia de estos acontecimientos en el régimen climático anterior al calentamiento actual (...) Por ello, tendríamos que estudiar los documentos históricos que narran estos acontecimientos llamados excepcionales durante los siete u ocho últimos siglos. Cuanto más “extremo” es un hecho, con mayor detalle es descrito y se convierte en un objeto histórico”²¹.

Limitándonos, de momento, a la época instrumental, hay que tener en cuenta que no fue hasta bien entrado el siglo XX cuando se dispuso de una red de observación propiamente global. Tropezamos, por tanto, con una serie de inconvenientes al pretender establecer una serie estadística de temperaturas medias mundiales. A principios del siglo pasado, el grueso de los observatorios se situaban en Europa y Estados Unidos, existiendo muy pocos en el resto de áreas continentales. De todas formas, la gran laguna de información se encontraba en el océano (el 70% de la superficie terrestre). Hoy en día obtenemos datos de la temperatura superficial del mar gracias a la cobertura global que nos ofrecen los satélites meteorológicos. Éstos también nos proporcionan datos de tierra firme, ya que “por sí solas, las tomas de temperatura en el suelo [desde los observatorios convencionales] no permiten determinar una temperatura media de la superficie de la Tierra”²².

Lo más conveniente es la utilización de forma combinada de datos meteorológicos tradicionales y por satélite, ya que estos últimos no parecen reflejar la magnitud real del calentamiento actual. Para el periodo 1979-2000, “mientras que la tendencia según los termómetros de superficie (...) es de un alza de 0,25 °C/década, los satélites indican en la troposfera [en niveles cercanos al suelo] un calentamiento casi inapreciable”²³.

Otro hecho que debe tenerse en cuenta, y corregirse adecuadamente al trabajar con series climáticas largas, es el conocido efecto de “isla térmica urbana”; una consecuencia directa del imparable crecimiento al que se han visto sometidas nuestras ciudades durante el último siglo. Muchos observatorios, instalados inicialmente a las afueras de las ciudades, se encuentran en la actualidad rodeados de edificios y calles asfaltadas, que irradian una cantidad extra de calor que se suma a la radiación solar incidente, lo que falsea las medidas, sobrestimando las temperaturas extremas. Los cambios de emplazamiento de un mismo observatorio o el cambio del tipo de garita meteorológica también deben ser considerados.

Pese a todas estas dificultades, los científicos son bastante rigurosos en sus métodos de análisis, indicándonos, incluso, cuales son las posibles fuentes de error en las medidas y las incertidumbres en sus estimaciones. A partir de miles de series termométricas de observatorios repartidos por todo el mundo (estaciones terrestres, barcos, boyas...), y tras un proceso de depuración en el que además se aplican los diferentes tipos de correcciones, se ha podido construir la gráfica de anomalías de la temperatura media global desde 1860 hasta 2000 de la Figura 2.1. Esas anomalías están

²¹ Pfister, C.: **El rompecabezas climático de los historiadores**. Véase la referencia 41 de la bibliografía.

²² Parker, David E.; Folland, K.: **¿Se puede medir la temperatura terrestre?** Mundo Científico, n° 126 (Julio-Agosto 1992).

²³ Uriarte, A.: **Evolución de las temperaturas en el siglo XX**. Revista electrónica Euskonews & Media, n° 204 (Marzo 2003). URL: <http://suse00.su.ehu.es/euskonews/0204zbnk/gaia20402es.html>

calculadas respecto a la temperatura promedio del periodo 1961-1990, que en la figura queda representada por la línea central horizontal (anomalía cero).

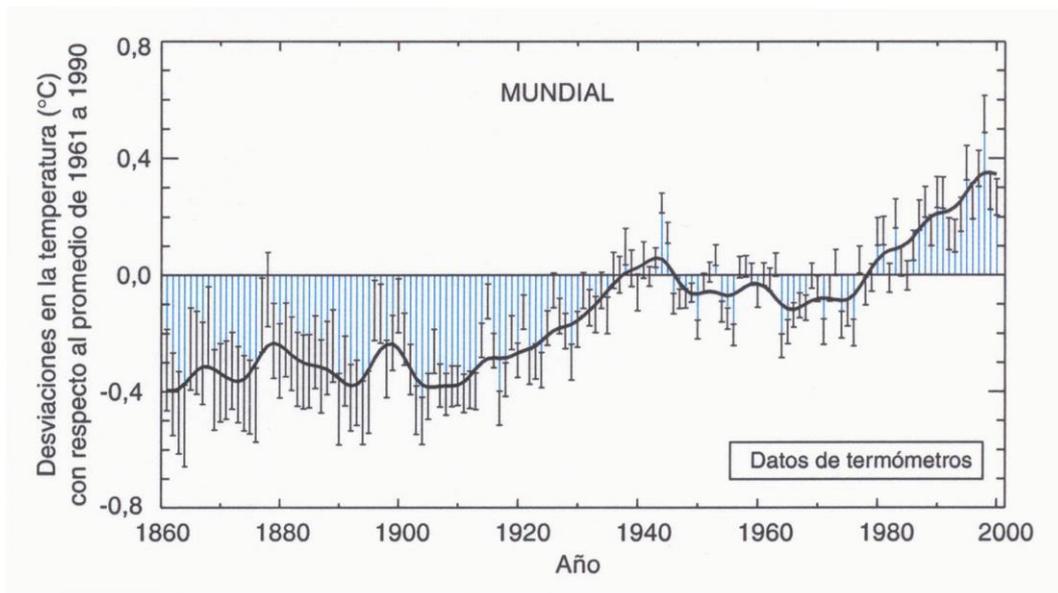


Figura 2.1

Variaciones de la temperatura de la superficie de la Tierra en los últimos 140 años.

Fuente: Tercer Informe del IPCC (2001).

Podemos ver como el aumento de 0,6 °C de la temperatura media global desde 1860, que apuntábamos en el Cuadro I, no se ha producido de forma uniforme a lo largo de todo el periodo, destacando también unas importantes variaciones regionales, así como el diferente comportamiento (que no tendencia) de las temperaturas máximas frente a las mínimas. “A nivel global, las temperaturas mínimas (nocturnas) han aumentado mucho más [el doble en el periodo 1950-2000 (Cuadro I)] que las temperaturas máximas (diurnas). (...) Al mismo tiempo, durante el invierno se ha producido más calentamiento que durante el verano”²⁴, reduciéndose significativamente el número de días de helada (Cuadro I).

La temperatura presenta siempre una gran variabilidad temporal con independencia de las escalas de tiempo que consideremos. En la Figura 2.1 los segmentos verticales sobre los que se construye la curva son las incertidumbres en la estimación de cada valor anual de la anomalía. Entre todos los “altibajos” de la gráfica, destacan con claridad dos tramos ascendentes a lo largo del siglo XX. El primero de ellos abarca el periodo 1910-1945 y el segundo iría desde 1976 hasta el momento actual (año 2000 en la gráfica).

El repunte histórico de las temperaturas experimentado desde principio de los años 90 no parece tener precedentes en los últimos 1.000 años (Cuadro I). Desde esa perspectiva milenaria, más amplia, el calentamiento actual cobra especial relevancia al no encontrarse un periodo tan cálido como el actual en todo ese tiempo. Los datos proxy apuntan a que durante el *Pequeño Óptimo Medieval* (periodo cálido ocurrido entre los años 900 y 1300 que permitió a los vikingos de Erik El Rojo asentarse en Groenlandia; una “tierra verde” por entonces) el calentamiento no alcanzó una magnitud tan grande como la actual (o al menos del mismo orden, ya que en esto no todos los científicos se

²⁴ Referencia 35 de la bibliografía.

ponen de acuerdo). El otro gran episodio climático del último milenio fue la *Pequeña Edad de Hielo* (PEG)²⁵, entre 1550 y 1850, que se justifica, en parte, por la existencia de una fase de poca actividad solar, lo que se conoce como el “mínimo de Maunder” (Figura 2.2).

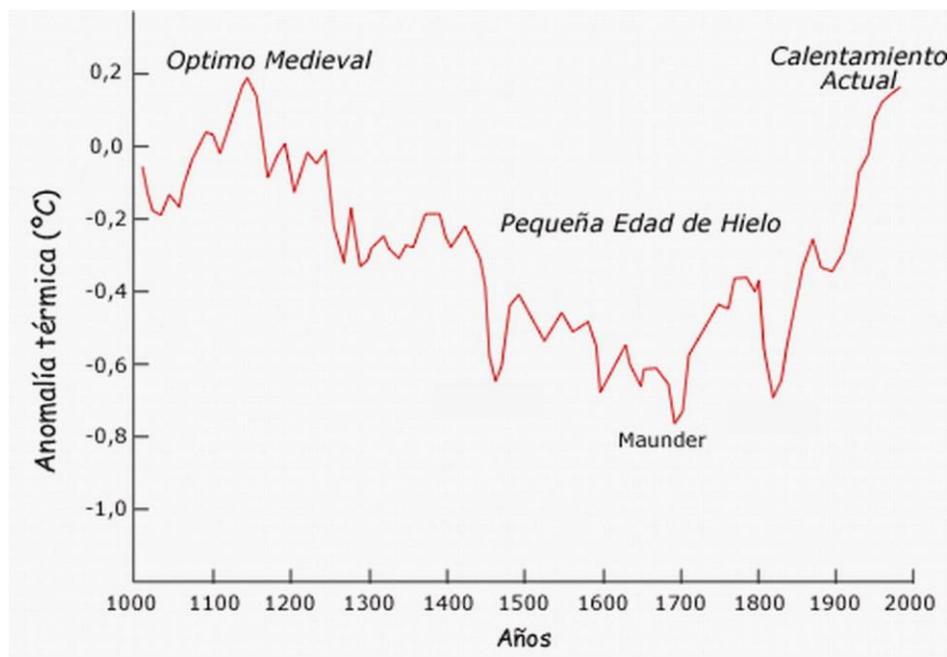


Figura 2.2

Anomalías de la temperatura media global en el último milenio. Comprobamos como al *Pequeño Óptimo Medieval* le siguió un periodo frío que alcanzó su momento álgido durante el “mínimo de Maunder”, coincidiendo con los años más fríos de la *Pequeña Edad de Hielo*. Cortesía de Antón Uriarte.

Cuando a finales de los años 80 del siglo XX el tema del cambio climático comenzó a ponerse de moda, una gráfica brillaba con luz propia en todas las conferencias de corte medioambiental. Nos advertía del inexorable aumento, año tras año, de la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂). La gráfica en cuestión era la famosa de dientes de sierra del observatorio de Mauna Loa, en Hawaii (Figura 2.3), y se correlaciona bastante bien con la del aumento observado de la temperatura. Todavía hoy puede usarse para ilustrar “a las claras” cual es la problemática del efecto invernadero²⁶.

²⁵ A este periodo se le llama también “Pequeña Edad Glacial”, de ahí las siglas que aparecen en el texto y que emplearemos de ahora en adelante.

²⁶ Al hablar aquí de “la problemática del efecto invernadero” nos estamos refiriendo únicamente al de origen antrópico (consecuencia directa de la emisión “extra” de *gases invernadero*: CO₂, CH₄, N₂O... a la atmósfera), ya que el efecto invernadero de origen natural, lejos de ser un problema, es algo necesario para la vida. Sin la presencia de esos gases, la Tierra se enfriaría considerablemente, bajando la temperatura media de la superficie de los 15 °C actuales a -18 °C.

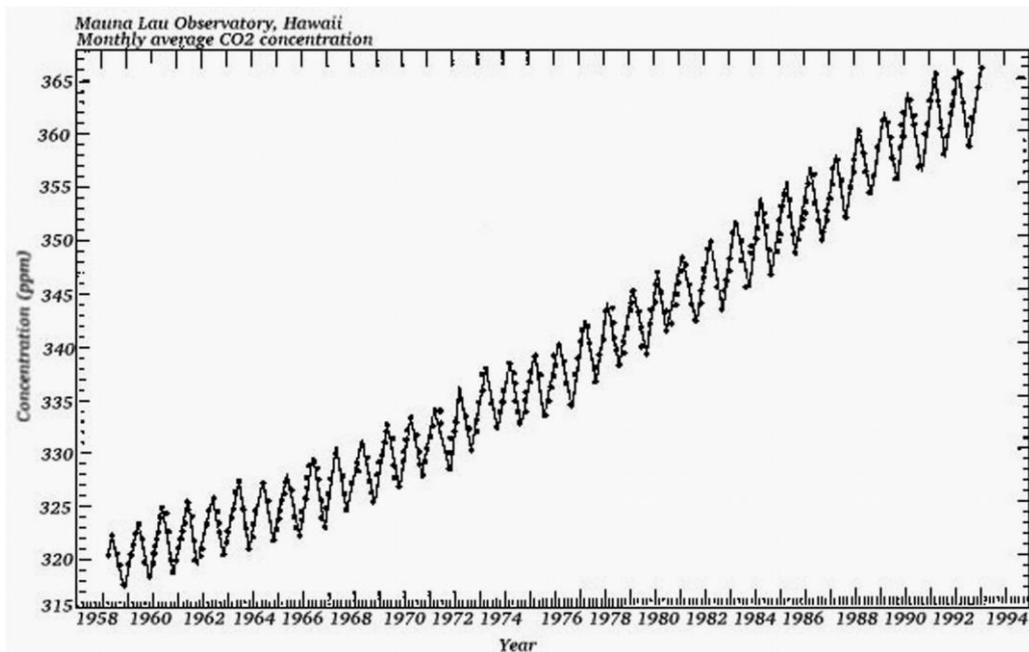


Figura 2.3

Gráfica con la evolución de la concentración de CO₂ atmosférico en las últimas décadas. Desde 1958 (Año Geofísico Internacional) se han llevado a cabo cuidadosas mediciones de las concentraciones de dióxido de carbono por parte de Charles D. Keeling primero, en el Instituto Scripps de Oceanografía de La Jolla, en California, y desde 1974 en el observatorio del volcán Mauna Loa, en Hawai, ambos en EEUU. Cada diente de sierra refleja la oscilación periódica anual que se produce en el intercambio neto de CO₂ entre la atmósfera y la vegetación terrestre.

Si volvemos a las dos fases de calentamiento observadas en el siglo XX, sólo en la más reciente, la actual, cabe pensar que el aumento de emisiones contaminantes (con el CO₂ a la cabeza) es la principal causa por la que la temperatura media global no para de crecer. Para llegar a comprender por qué se elevó también la temperatura durante el periodo 1910-1945, no parece del todo razonable aferrarnos sólo a la causa antrópica, pues en aquellos años, las emisiones globales a la atmósfera eran simbólicas en comparación con las actuales. Debemos aceptar la existencia de otra serie de mecanismos, no sujetos a ningún ciclo o proceso conocido, que en ocasiones cobran relevancia en el sistema climático. La mayor dificultad para comprender las verdaderas causas de los cambios climáticos reside, precisamente, en averiguar cuáles son esos mecanismos, cómo actúan y de que forman se acoplan a los que conocemos mejor.

Examinando con más detalle cada una de esas fases cálidas, localizamos a su vez años anómalos que quiebran o amplifican la tendencia al calentamiento dominante. La última década del siglo XX nos viene como anillo al dedo para ilustrar bien todo esto. Mientras que la temperatura media global durante el periodo 1991-2000 muestra una clara tendencia al alza (Figura 2.4), su comportamiento intra e interanual sigue presentando los característicos dientes de sierra (alta variabilidad temporal). Veamos como, en este caso concreto, se entienden razonablemente bien las causas que han provocado las principales anomalías.

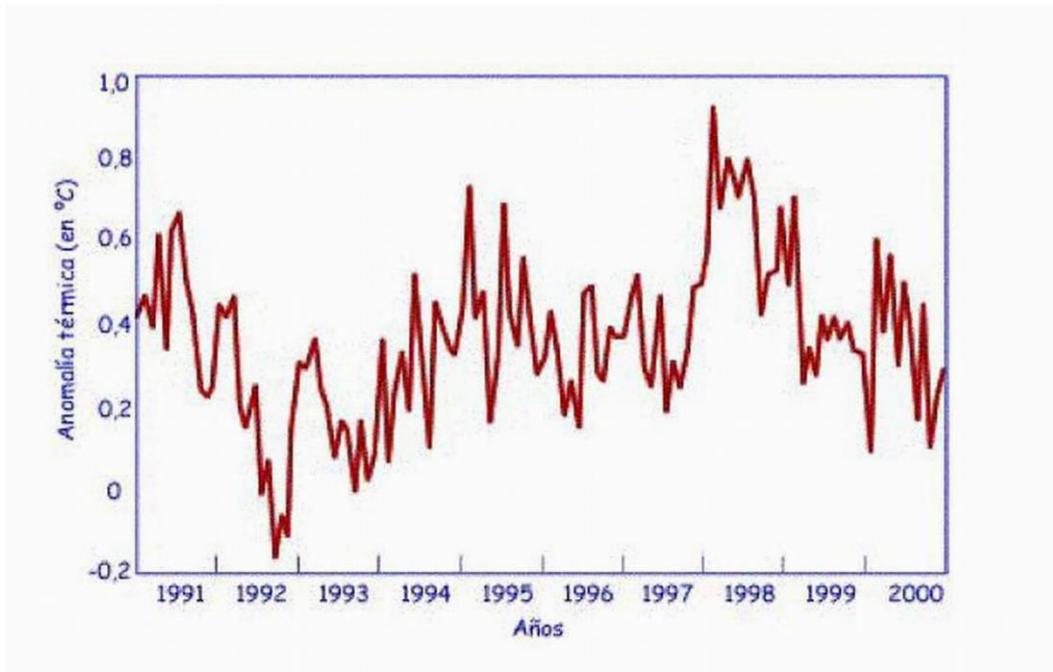


Figura 2.4

Anomalías térmicas mensuales con respecto a la media del periodo 1951-1980. La gráfica refleja el comportamiento de la temperatura media global durante el decenio 1991-2000. Fuente: NASA. Cortesía de Antón Uriarte.

La gráfica de la Figura 2.4 comienza con un bajón de la temperatura que abarca desde la segunda mitad de 1991 hasta finales de 1992. En ese año y medio la temperatura media global bajó del orden de 0,6 °C. ¿Cuál fue la causa de este enfriamiento? La respuesta está en la actividad volcánica y, en concreto, en los efectos inducidos en la atmósfera por la erupción del volcán Pinatubo, en junio de 1991 (Figura 2.5).



Figura 2.5
Erupción del volcán Pinatubo (Filipinas) en junio de 1991.
Fuente: USGS Cascades Volcano Observatory.

Aunque se siguen investigando los complejos procesos que entran en juego, la relación entre los volcanes y el clima es conocida desde hace tiempo²⁷. Si bien todas las erupciones tienen un fuerte impacto medioambiental, únicamente las explosivas o violentas dejan sentir sus efectos en todo el planeta.

A escala local y regional, los volcanes actúan como gigantescas chimeneas que arrojan a la atmósfera enormes cantidades de gases contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂) o el ácido clorhídrico (HCl) entre otros, así como gases “manta” o invernadero (vapor de agua y CO₂ principalmente), contribuyendo estos últimos, como sabemos, al calentamiento global.

A escala planetaria, el mecanismo responsable del enfriamiento que se observa tras la erupción de un volcán como el Pinatubo, es la inyección de cenizas y polvo volcánico hasta la estratosfera (alta atmósfera), donde las fuertes corrientes allí dominantes se encargan rápidamente de dispersar esos elementos por todo el globo. Se crea entonces un velo de pequeñísimas partículas en suspensión (aerosoles) y de gotitas de ácido sulfúrico que, entre otros efectos detectables como el aumento de la turbidez

²⁷ Pueden consultarse los siguientes trabajos:

Bryson, R. A.: **Volcanes y clima**. Mundo Científico. Vol. 2; nº 18 (Octubre 1982).
Baldiceo Molion, L. C.: **Los volcanes afectan al clima del planeta**. Ciencia Hoy. Vol. 7; nº 38 (1997). (Disponible en Internet. URL: <http://www.ciencia-hoy.retina.ar/hoy38/index.htm>).
Fúster Casas, J. M.: **Vulcanismo y cambio climático**. Horizontes Culturales: las fronteras de la Ciencia/ Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Espasa Calpe (2000): pp 115-129. (Disponible en Internet. URL: <http://www.fsanmillan.org/>).

atmosférica, provocan un enfriamiento neto de la troposfera (la capa más cercana al suelo).

La alta concentración de aerosoles en la estratosfera causa el efecto contrario, un calentamiento neto a esos niveles, que detectan bien los satélites meteorológicos (Figura 2.6).

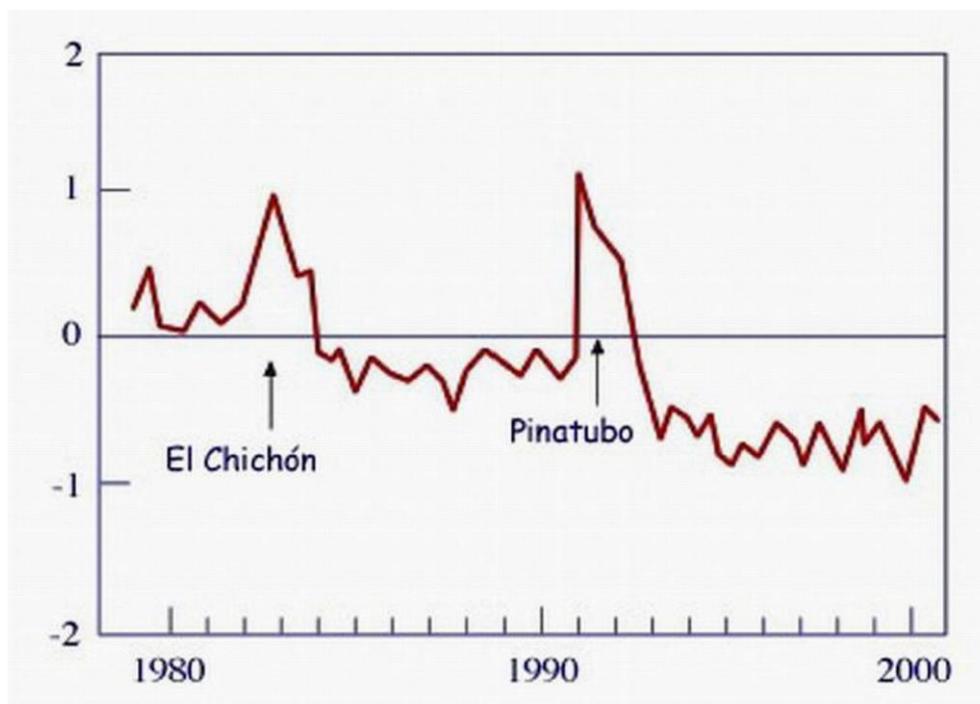


Figura 2.6

Anomalías térmicas (en °C) en la estratosfera durante el periodo 1979-2001, a partir de medidas tomadas desde satélite. Se observa con claridad el calentamiento que provocaron las erupciones volcánicas de El Chichón (México) y el Pinatubo (Filipinas). Fuente: Global Hydrology & Climate Center. Cortesía de Antón Uriarte.

De las erupciones volcánicas más violentas documentadas²⁸, la explosión del Tambora en 1815 ocupa un lugar destacado en la historia, siendo la más importante de los últimos 10.000 años. El año posterior a la erupción (1816) se conoce en Climatología como “el año sin verano”²⁹. Fue tal la cantidad de materiales arrojados a la atmósfera que durante varios días se hizo de noche en un radio de 600 kilómetros en torno al cráter. Las cenizas que alcanzaron la estratosfera permanecieron varios años en suspensión y se estima que la temperatura media planetaria bajó 2,5 °C.

Los ciudadanos del siglo XIX volverían a sobresaltarse en 1883 con la erupción del Krakatoa que, literalmente, hizo saltar por los aires una pequeña isla de Indonesia. La explosión fue de una violencia extrema, alcanzando las cenizas los 80 kilómetros de altura. En este caso se arrojó a la atmósfera una cantidad de materiales “pequeña” en comparación con la del Tambora (aunque subieron más arriba) y el enfriamiento global al año siguiente fue bastante menor, del orden de medio grado (0,5 °C).

²⁸ Cano Sánchez, J.: **Grandes erupciones volcánicas y su influencia en el clima**. Calendario meteorológico 1994. INM.

²⁹ Gozalo De Andrés, C.: **1816, un año sin verano en el hemisferio norte**. Revista electrónica RAM, n° 5 (Noviembre 2002). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero5/pdf/volcanesclima.pdf>

Como conclusión, puede afirmarse que “aunque son innegables los efectos a corto plazo de las erupciones volcánicas en el clima planetario, resultan modestos. Las observaciones realizadas durante el periodo histórico apuntan a que desaparecen al cabo de unos pocos años, generalmente menos de dos”³⁰.

A la vista de las erupciones “recientes” no parece que los volcanes puedan llegar a provocar cambios climáticos duraderos en el sistema. Con una mayor perspectiva histórica, “todos los estudios geológicos indican que el vulcanismo no participa de forma significativa en la modulación de los climas del último millón de años”³¹.

Existen, sin embargo, precedentes de erupciones de mayor impacto que las comentadas. En concreto la del volcán Toba que, según una estimación, hace unos 74.000 años pudo arrojar hasta 3.500 km³ de materiales a la atmósfera³², originando, presuntamente, un estadal frío (“miniglaciación” en la que se registra una bajada de entre cinco y seis grados centígrados) dentro del periodo glacial en el que se hallaba inmerso el planeta en aquel momento, la llamada glaciación Wurm.

Volviendo a la Figura 2.4, a partir de 1993 la curva invierte su tendencia e inicia un tramo ascendente que culmina a mediados de la década: “La temperatura media de la superficie alcanzó un récord en 1995” (El País, 5 de enero de 1996), superando en 0,4 °C la media del periodo 1961-1990. En la noticia que seguía a ese titular se indicaba que: “El periodo 1991-1995 ha sido más templado que cualquier otro intervalo de cinco años para los que existen registros [1860] (...). Y esto a pesar del efecto de enfriamiento que tuvo el polvo inyectado a la atmósfera por la erupción del volcán Pinatubo en 1991”.

En 1996 tuvo lugar una pequeña quiebra en la tendencia alcista. En este caso, las causas no las encontramos en el vulcanismo (no hubo erupciones violentas ese año), sino en la propia dinámica atmosférica, que dio lugar a una distribución de las masas de aire sobre la superficie terrestre en la que las frías dominaron sobre las cálidas. No obstante, teniendo en cuenta la serie completa de registros meteorológicos, 1996 puede considerarse como un año cálido a nivel global. La concentración de CO₂ seguía aumentando, con un nuevo diente de sierra “más alto” en la curva de Mauna Loa (Figura 2.3).

La segunda gran anomalía de los años noventa comienza en 1997, con una espectacular subida que culminó en el año récord de 1998, el más cálido desde que se miden temperaturas en garita. En aquellos días leíamos en la prensa que “siete de los 10 años más calientes se han registrado desde 1990” (El País, 19 de diciembre de 1998). El calentamiento global del planeta empezaba a ser, más que una realidad, una seria amenaza para algunos.

El pico de los años 1997-98 se explica por la aparición de un excepcional episodio El Niño (fase cálida de ENSO³³) en esas fechas. Este fenómeno natural ilustra bien el conocido acoplamiento que existe entre la atmósfera y el océano. Los años con El Niño las aguas superficiales del este del Pacífico tropical se calientan muy por encima de la media, lo que altera sensiblemente los patrones atmosféricos en diferentes partes del planeta. Esta influencia “a distancia” (teleconexión climática) dejó su huella en los registros meteorológicos de medio mundo.

³⁰ Referencia 3 de la bibliografía.

³¹ Ibid.

³² El Tabora lanzó a la atmósfera del orden de 150 km³.

³³ Siglas inglesas de “El Niño Oscilación Sur”, un fenómeno natural modulado por las diferencias de presión atmosférica a ambos lados del océano Pacífico y las anomalías cálidas en la zona ecuatorial del citado océano. Los años en los que esas anomalías son muy elevadas se habla directamente de un episodio El Niño, como el de 1997-98 o el anterior de 1982-83.

En 1999 la situación empezó a cambiar en el Pacífico, pasándose de una fase cálida de ENSO a una fría (La Niña). Ese año la temperatura media global inició un descenso que duraría poco, ya que en 2000 volvió a repuntar, para seguir subiendo en lo que llevamos de siglo XXI.

En el ranking de los años más cálidos, a 1998 (+0,55 °C) le siguen 2002 (+0,48 °C) y 2003 (+0,45 °C). Los datos entre paréntesis están facilitados por la OMM y son las diferencias respecto al periodo 1961-2000.

Hemos visto como la temperatura media global puede verse alterada durante cortos periodos de tiempo (bianuales como mucho) por la aparición de fenómenos como el vulcanismo violento o los episodios El Niño. Existe además una variabilidad que aparece a todas las escalas de tiempo, siendo difícil de analizar debido a la infinidad de procesos implicados. Entendemos bien el funcionamiento individual de muchos de ellos, pero dejamos de hacerlo cuando actúan todos a la vez. Relacionar el calentamiento global con el aumento de gases invernadero es razonable, pero no lo es tanto ver en ese aumento la única causa.

No sabemos qué parte de las seis décimas que ha subido la temperatura media global desde 1860 es de origen antrópico. En cualquier caso, es una variación pequeña que no parece corresponderse con lo que cabría esperar de un verdadero cambio climático. Como veremos en el capítulo 3, la Tierra ha sufrido variaciones térmicas mucho más importantes o concentraciones de CO₂ mucho mayores en otras épocas anteriores. Hay que tener en cuenta que “los últimos 10.000 años constituyen una rareza en la historia del planeta. Este periodo, durante el cual se desarrollaron las civilizaciones, se ha caracterizado por un tiempo más benigno y menos variable que cualquier otro intervalo similar transcurrido durante los últimos cien milenios”³⁴.

En esta misma línea se expresan los investigadores que, con una perspectiva más amplia, siempre necesaria, estudian los climas del pasado. Nos advierten que tendríamos que estar más preocupados por un enfriamiento repentino (el comienzo de una nueva glaciación) que por el calentamiento global, ya que lo raro en la Tierra es que se den periodos tan estables climáticamente como el actual.

El papel que desempeñan, como moduladores del clima, los gases invernadero de origen antrópico todavía es una incógnita. De lo que sí estamos seguros es que la actual fase cálida llegará a su fin, con independencia de que emitamos más o menos contaminantes a la atmósfera. Lo que pase hasta ese momento no se sabe a ciencia cierta y en ello trabaja una legión de científicos, poniendo a punto sus modelos de predicción climática.

Tras haber analizado la evolución al alza de las temperaturas durante la época instrumental, nos queda por ver de qué forma el calentamiento global está influyendo en el sistema climático, y cuales son las alteraciones más importantes que han empezado a detectarse.

2.2. El deshielo de los polos y el retroceso de los glaciares

La *criosfera* es probablemente la parte del sistema climático más sensible a las variaciones de temperatura. Este subsistema engloba toda la superficie helada del planeta (casquetes polares y glaciares) más la cubierta de nieve, así como el hielo que se encuentra bajo la superficie, lo que se conoce como *permafrost*.

Las diferentes campañas de observación de los últimos años han ido proporcionando datos muy reveladores (Cuadro II). “La toma continua de datos por parte de satélites permite un seguimiento permanente de la evolución de aquellos

³⁴ Broecker, W. S.: **Clima caótico**. Investigación y Ciencia, nº 232 (Enero 1996). Véase la referencia 42 de la bibliografía.

procesos cuya dinámica está ligada al clima. Tal es el caso de las cubiertas de hielo y nieve sobre el planeta”³⁵.

Cuadro II	PRINCIPALES CAMBIOS OBSERVADOS EN LA CRIOSFERA A LO LARGO DEL SIGLO XX
<ul style="list-style-type: none"> • Retroceso generalizado de los glaciares de montaña no polares durante el siglo XX. • Disminución del 10-15% de la extensión de hielo marino (banquisa) en la primavera y verano boreal desde los años 50 del siglo XX. • Probable reducción de un 40% en el espesor del hielo marino del Ártico desde finales de verano hasta principios de otoño en las décadas recientes. • Disminución de unas 2 semanas en la duración de la cubierta de hielo sobre ríos y lagos en latitudes medias y altas, durante el siglo XX. • Reducción, muy probable, en un 10% de la capa de nieve desde que se registran observaciones por satélite. • Fusión, calentamiento y degradación del <i>permafrost</i> en las zonas polares, subpolares y regiones montañosas. 	

FUENTE: Elaboración propia, a partir de los datos del IPCC (2001).

De nuevo hay que advertir como la prensa, en general, nos cuenta sólo una parte de la verdad que hay detrás de un resultado científico, por lo que conviene ser cautos y no presuponer demasiadas cosas “a la ligera” cuando leamos un titular como éste: “La Antártida se desgaja” (El Periódico, 15 de mayo de 2002). Nada más sencillo, y más lejos de la realidad, que relacionar el desprendimiento de grandes icebergs con el calentamiento global. Por más que se empeñen algunos, ese tipo de relaciones simplistas causa-efecto son claramente insuficientes en el estudio del clima terrestre.

En primer lugar, vamos a fijar nuestra atención en los glaciares de montaña que, aunque constituyen sólo la milésima parte del volumen total de hielo del planeta, reflejan fielmente el comportamiento térmico planetario, al ser extremadamente sensibles a las variaciones climáticas, lo que se traduce en cambios importantes en su masa, volumen y longitud.

Estamos, por tanto, ante uno de los indicadores más fiables del calentamiento global, aunque debemos tener en cuenta que el retroceso de los glaciares no sólo obedece a un aumento de la temperatura y/o a una menor acumulación de nieve. En algunos casos (como ocurre, por ejemplo, con los glaciares antárticos) los cambios en la masa glaciar se deben más a las complejas dinámicas internas del hielo que a variaciones en el clima.

Aunque hay algunos pocos glaciares que avanzan, la tendencia general es clara: “En conjunto, los glaciares de la Tierra están mermando más deprisa de lo que crecen” (El País, 19 de marzo de 2000). Los glaciares de montaña están en retroceso en los cinco continentes. Desde los Alpes (Figura 2.7), Andes, Himalaya y las Montañas Rocosas, hasta Alaska, Islandia, Noruega, Kenia, Tanzania, Nueva Zelanda o la Antártida³⁶.

³⁵ Alonso Jiménez, C.; Moreno Burgos, V.: **Satélites, clima y glaciares**. Investigación y Ciencia, nº 308 (Mayo 2002).

³⁶ Veremos posteriormente, en este mismo apartado, como en la Antártida no está ocurriendo “lo que cabría esperar” de acuerdo con la teoría del calentamiento global. En el continente blanco el retroceso de los glaciares se localiza en unas áreas muy concretas.

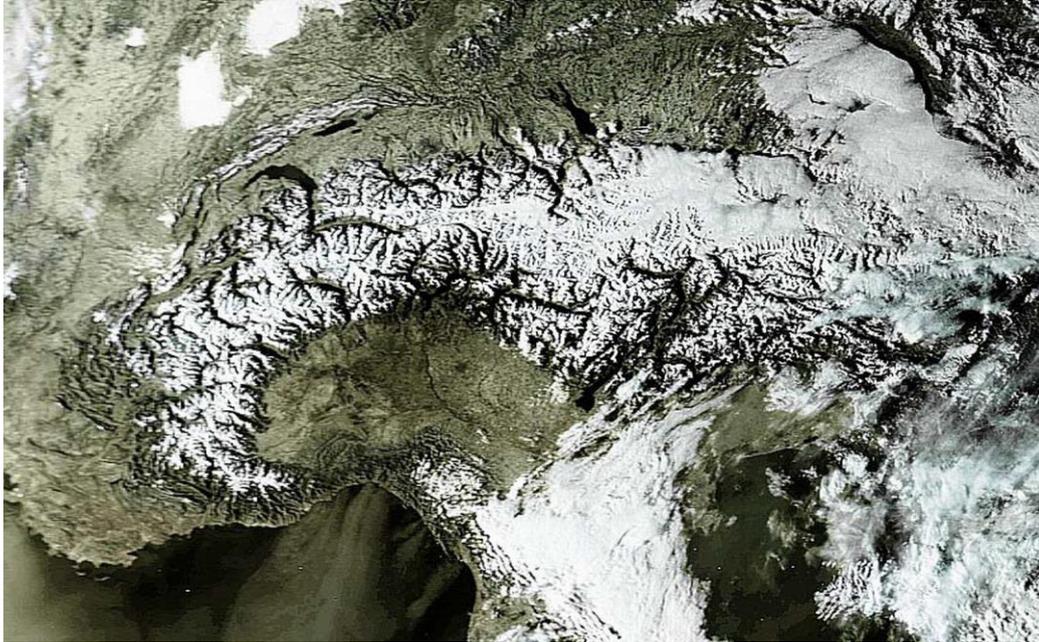


Figura 2.7

La majestuosa cordillera europea de los Alpes vista desde satélite. Se aprecia el característico arco de montañas y valles que dan forma uno de los grandes conjuntos de glaciares del mundo.

La superficie glaciar alpina ha descendido a la mitad en los últimos 150 años, retrocediendo durante el siglo XX y lo que llevamos del XXI a una velocidad sin precedentes. Durante ese periodo los glaciares alpinos han perdido un 40 por ciento de su volumen. “No obstante, la disminución no ha sido continua. Así, aunque retrocedieron mucho entre 1942 y 1953, los glaciares alpinos avanzaron entre 1954 y 1982. Desde hace veinte años retroceden de nuevo”³⁷. Este retroceso, “aunque de amplitud comparable al de los años 1942-1953, no es de la misma naturaleza. Las escasas precipitaciones invernales y los veranos cálidos actuaron entonces conjuntamente para hacer retroceder los glaciares, mientras que una sucesión de veranos excepcionalmente cálidos basta para explicar el retroceso actual”³⁸.

En 2000, de los 105 glaciares que controla la Asociación Alpina Austriaca desde 1891, un centenar perdió masa, dos de ellos se mantuvieron estables y tan solo tres aumentaron de tamaño, aunque de forma mínima. Prudentemente, declaraba un portavoz de dicha Asociación, en marzo de 2001, que “no está demostrado que el calentamiento de la atmósfera por las emisiones contaminantes tenga un papel decisivo en lo que sucede en los Alpes”.

El caluroso verano de 2003 también trajo consigo una importante pérdida de masa glaciar en Austria, alcanzándose el mayor retroceso desde el año “catastrófico” de 1947. La vecina Suiza tampoco ha permanecido ajena a esa pérdida de masa glaciar, ya que “entre su máximo de 1860, al término de la PEG, y la actualidad, los glaciares suizos se han retirado unos 90 metros (...). No subsisten muchas dudas sobre la

³⁷ Lemarchand, F.: **El peligroso vaciado de los lagos glaciares**. Mundo Científico, nº 239 (Noviembre 2002).

³⁸ Ibid.

extensión mundial [de los glaciares de montaña] de la PEG y del calentamiento iniciado en 1860”³⁹.

En España, el glaciar del Aneto (el mayor de los Pirineos) simboliza a la perfección la desaparición del hielo en las montañas ibéricas. Mientras que a finales del siglo XIX ocupaba una extensión de 2,28 km²⁴⁰, un siglo más tarde, “la más bella masa glaciar pirenaica”⁴¹ se redujo a 1,32 km²⁴²; es decir, una reducción de aproximadamente una hectárea⁴³ por año. Ese ritmo de fusión ha aumentado en la última década, ocupando el glaciar en la actualidad una superficie de 0,75 km² (Figura 2.8).



Figura 2.8

El glaciar del Aneto fotografiado desde el valle de Barrancs en agosto de 2001. Autor: Joan Fradera. Fuente: Observatorio Meteorológico de Roda de Ter (Barcelona).

³⁹ Broecker, W. S.: **El deshielo en la Edad Media**. Mundo Científico, nº 226 (Septiembre 2001).

Sobre la máxima extensión y tamaño que alcanzaron los glaciares alpinos durante la PEG, puede consultarse la referencia 10 de la bibliografía.

⁴⁰ Dato de 1894 publicado por Schrader, F. en 1936.

⁴¹ Plandé, R.: **La nieve y los glaciares en el Pirineo**. Pirineos, nº 5 - Año III (1947).

En este trabajo (el original en francés data del año 1939) el autor establece seis grandes grupos glaciares en los Pirineos, siendo uno de ellos el de Maladeta-Aneto. Sus comentarios respecto a estos dos glaciares son los siguientes: “El primero [Maladeta] tiene 1,420 km de largo por 1,400 km de ancho [lo que arrojaría una extensión aproximada de 2 km²]. *El segundo [Aneto] mucho más vasto y hermoso, se extiende 4 km de largo por 1800 m de ancho*” (la cursiva es mía). De esta información obtendríamos una superficie para el glaciar del Aneto de 7,2 Km², una sobrestimación que entraría en conflicto con la que nos proporciona Schrader, pues supondría un espectacular aumento de la masa glaciar durante las primeras décadas del siglo XX. Todo parece indicar que los datos de Plandé se refieren a la superficie del glaciar en su conjunto y no sólo a la lengua de hielo.

⁴² Dato sacado del inventario realizado en 1990 con motivo de la declaración oficial de los “Monumentos Naturales de los Glaciares Pirenaicos”. Ley 2/1990 del 21 de marzo de 1990, publicada en el BOA (Boletín Oficial de Aragón) nº 36.

⁴³ Una hectárea (ha) es aproximadamente la superficie que ocupa un estadio de fútbol. La equivalencia entre kilómetros cuadrados y hectáreas es la siguiente: 1 km² = 100 ha.

Los datos hablan por sí solos y dejan poco lugar a las dudas. Parece claro que a lo largo del presente siglo, “los glaciares pequeños [como el del Aneto] pueden desaparecer o quedar reducidos a minúsculas porciones de neveros permanentes”⁴⁴. No olvidemos un hecho importante, y es que la desaparición de un glaciar es algo irreversible (aunque termine la actual fase de calentamiento). Si el Aneto desapareciera de aquí a 30 años, la hipotética entrada brusca en escena de un periodo similar a la PEG durante la segunda mitad del siglo XXI, no daría lugar al resurgimiento del glaciar. Un estadal frío (de menor entidad que una glaciación) lo que sí provoca es el crecimiento de los glaciares existentes, pero no la formación de nuevos glaciares.

A veces se forman también peligrosos lagos glaciares (Figura 2.9), que suponen una seria amenaza de desbordamiento sobre amplias zonas inundables⁴⁵. Los satélites nos ayudan a detectarlos a tiempo, permitiendo la evacuación de pequeños núcleos rurales en lugares de difícil acceso como el Himalaya, donde el ritmo de retroceso de los glaciares y la aparición de estos lagos son particularmente alarmantes.



Figura 2.9

Lago formado al final de la lengua del glaciar Gilkey en Alaska (EEUU). En la parte inferior de la imagen, el témpano de hielo más grande tiene unos 600 metros de largo. Fuente: <http://crevassezone.org>

Una vez formado el lago se realimenta el proceso de deshielo, ya que mientras que el hielo refleja la mayor parte de la radiación solar incidente (*albedo*⁴⁶ cercano al 90%), el agua de los lagos glaciares absorbe y transmite el calor de forma más eficiente

⁴⁴ **Los glaciares y el cambio climático: los glaciares de Maladeta y Aneto.** Revista electrónica RAM, nº 2 (Junio 2002). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero2/pdf/glaciares.pdf>

⁴⁵ Existen precedentes como el de 1970 en la Cordillera Blanca, en Perú, donde “perezaron 18.000 personas y la ciudad de Yungay fue totalmente destruida por una gigantesca colada de lodo” (Referencia de la nota 37).

⁴⁶ Cociente entre la radiación (energía radiante o luminosa) reflejada por una superficie y la radiación incidente sobre ella. Se expresa a menudo en tantos por cien (%).

hacia el hielo situado por debajo. Veremos más adelante como este mecanismo puede ser una de las claves en el proceso de fractura de las plataformas de hielo de la Antártida.

Desplazándonos al ámbito tropical, hace un par de años la prensa denunciaba que: “El Kilimanjaro se queda sin nieves” (La Vanguardia, 18 de octubre de 2002). La imagen de la montaña “diezmada”, con muy poca nieve en su cumbre, impactaba visualmente en el lector al compararla con otra fotografía de los años setenta. Se nos decía también que “los últimos glaciares de la mítica montaña desaparecerán en 15 años”, y que “las nieves del Kilimanjaro están disminuyendo rápidamente como resultado del calentamiento global, al igual que otros glaciares tropicales”.

Este es uno de esos casos en los que tendríamos que coger con pinzas toda esa información, ya que los expertos nos advierten que “debido a su extraordinaria sensibilidad a las variaciones climáticas, los glaciares tropicales pueden registrar cambios de corta duración”⁴⁷, por lo que el aspecto del Kilimanjaro en 2002 (el segundo año más cálido de la época instrumental, no lo olvidemos) puede llevarnos a engaño. De cualquier forma, “al igual que los glaciares alpinos, los glaciares tropicales revelan grandes fluctuaciones climáticas a la escala del siglo”⁴⁸, entre las que se incluye la actual fase de calentamiento global.

En los últimos años también está llamando mucho la atención de los científicos el elevado ritmo al que tiene lugar el deshielo de los glaciares de Alaska y la Patagonia, lo que parece contribuir de forma importante al aumento del nivel del mar. La subida de las temperaturas en el Ártico (de hasta 5 °C en algunas zonas) ha acelerado allí la fusión de los glaciares y, según algunos estudios, en el sector sur de los Andes el deshielo parece estar ocurriendo a un ritmo aún mayor. Al más puro estilo periodístico, se podía leer recientemente en la prensa: “Los glaciares de la Patagonia se derriten aceleradamente por el cambio climático” (ABC, 16 de febrero de 2004).

Dirijamos ahora nuestra atención hacia las grandes masas de hielo y nieve del planeta. ¿De qué forma se ven afectadas las regiones polares por el calentamiento global?

Si bien el hielo flotante que rodea al Polo Norte sufre también una acusada merma, tanto en extensión como en grosor (Cuadro I), en la Antártida el comportamiento desconcierta a los científicos, ya que no refleja lo que a priori cabría esperarse de acuerdo con la teoría del calentamiento global. Salvo en la Península Antártica, donde en el último medio siglo las temperaturas medias anuales han subido 2,5 °C, y en otras zonas costeras, en el resto del continente blanco se viene detectando un enfriamiento progresivo, al menos durante los últimos 35 años⁴⁹.

La Antártida es un territorio inhóspito que fascina a todos los que han podido poner los pies sobre él, y hace volar la imaginación a los que todavía no hemos tenido esa suerte. Con una superficie equivalente a 24 veces España, su cubierta helada tiene un espesor medio de 2.200 metros⁵⁰ y contiene cerca del 85% del hielo terrestre. Junto a Groenlandia, concentran el 98% de las reservas de agua dulce del planeta.

El continente antártico es, con diferencia, el más frío y en el que se dan las condiciones meteorológicas más extremas de la Tierra. En la base rusa Vostok, situada en el interior de la llanura antártica, se llegaron a medir -89,2 °C el 21 de julio de 1983;

⁴⁷ Francou, B.; Ribstein, P.; Pouyaud, B.: **La fusión de los glaciares tropicales**. Mundo Científico, n° 186 (Enero 1998).

⁴⁸ Ibid.

⁴⁹ Los valles desérticos de la Antártida, muestran un notable descenso de la temperatura (0,7 °C por década en los de Mac Murdo) desde mediados de la década de los ochenta del siglo XX.

⁵⁰ Radok, U.: **El hielo antártico**. Investigación y Ciencia n° 109 (Octubre 1985).

la temperatura más baja jamás registrada en una estación meteorológica. Es precisamente en esa estación donde se ha perforado el testigo de hielo más largo hasta la fecha (de 3.623 m de profundidad), lo que nos ha proporcionado información del clima terrestre de los últimos cuatro ciclos glacial-interglacial prácticamente enteros (420.000 años).

Podemos establecer tres áreas bien diferenciadas desde el punto de vista del comportamiento climático observado: La Península Antártica (apenas el 4% del territorio), donde, como hemos visto, se detecta bien la señal del calentamiento global; la gran meseta antártica, una capa de hielo asentada sobre un terreno muy estable, que no parece correr peligro de fusión, pues apenas se ha inmutado en los últimos 15 millones de años; y la capa de hielo de la Antártida Occidental (WAIS⁵¹), que descansa sobre unos suelos menos estables y situados por debajo del nivel del mar, siendo vulnerable a periodos de rápida desintegración⁵² (Figura 2.10).

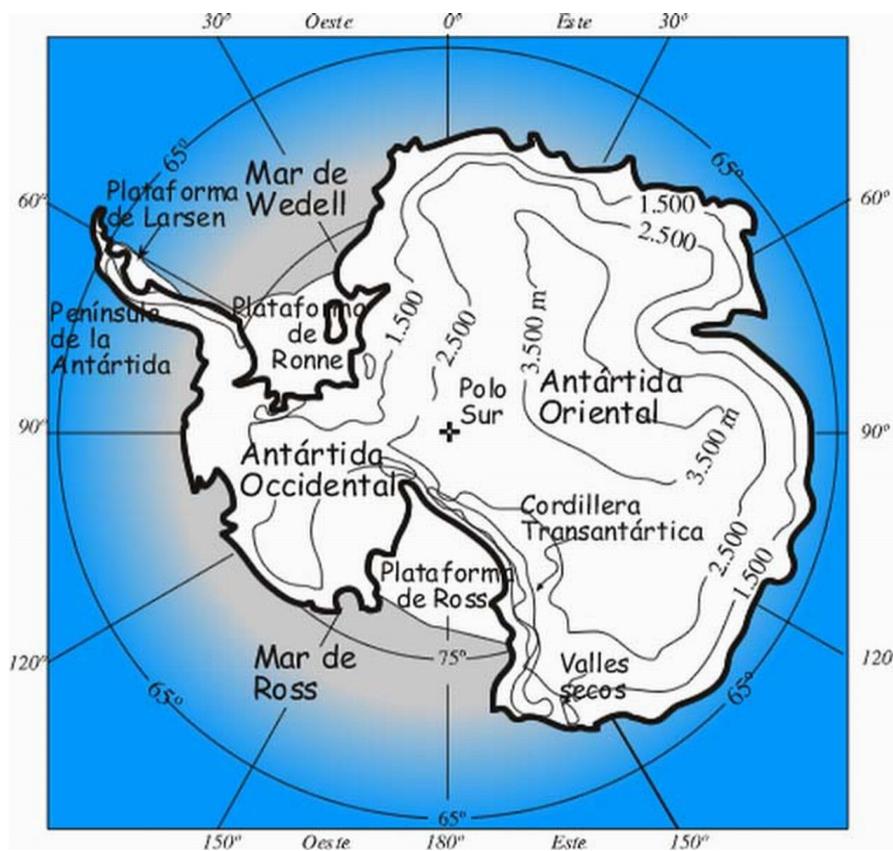


Figura 2.10

Mapa de la Antártida donde se indica la topografía aproximada en metros y la localización de las tres principales plataformas de hielo: Larsen, Ronne y Ross. Cortesía de Antón Uriarte.

⁵¹ Siglas inglesas que emplearemos de ahora en adelante para designar a esta región. El significado de esas siglas es: “West Antartic Ice Sheet”, lo que en castellano traducimos como “capa de hielo de la Antártida Occidental”.

⁵² Más detalles en: Horgan, J.: **La fusión de los hielos antárticos**. Investigación y Ciencia, nº 203 (Agosto 1993).

Binschadler, R. A.; Bentley, Ch. R.: **¿Sobre hielo quebradizo?** Investigación y Ciencia nº 317 (Febrero 2003).

Nos debe quedar claro que “la Antártida es globalmente muy estable a la escala de milenios, pero el continente helado está animado de una dinámica incesante, extraordinariamente compleja, que produce múltiples variaciones locales”⁵³ como el desmoronamiento de grandes icebergs en la barrera de hielo Larsen; al oeste de la WAIS, en la Península Antártica (ver Figura 2.10) o en la de Ross.

Probablemente, uno de los iconos más usados por la prensa para alertar al ciudadano sobre los peligros del cambio climático sea el de los icebergs que se desprenden de las plataformas (o barreras) de hielo de la Antártida. Antes de ver algunos ejemplos, tengamos en cuenta que la falta de largas series de registros y la gran variabilidad observada en la extensión del hielo flotante, no permiten deducir que el desprendimiento de grandes icebergs sea una consecuencia directa del calentamiento global. Lo que sí se detecta en los últimos años son más zonas marinas circundantes en las que ha aumentado la *temporada de hielo*⁵⁴, como ocurre, por ejemplo, en el mar de Ross.



Figura 2.11

Los desprendimientos de grandes icebergs de las plataformas de hielo no deben relacionarse únicamente con el calentamiento global.

Si bien la desintegración de barreras como la de Ross no influye directamente en la subida del nivel del mar, por tratarse de hielo flotante, de forma indirecta sí que es un factor a tener en cuenta, ya que su rotura permite la llegada hasta el mar de hielo del interior del continente. Las barreras ayudan a mantener la estabilidad de la capa de

⁵³ Postel-Vinay, O.: **Calentamiento global y deshielo**. Mundo Científico n° 241 (Enero 2003).

⁵⁴ Número de días por año en los cuales al menos un 15% de dicha área está cubierta de hielo.

hielo, actuando como contrafuertes que soportan el borde de la capa que toca suelo firme.

Al igual que ocurría con los lagos glaciares, la fusión desde el fondo podría ser la clave que ayude a explicar, en parte, la pérdida de masa de hielo de las plataformas. No obstante, existen otros mecanismos a tener en cuenta como la “ablación interna”⁵⁵, que “ha aumentado un 35,6% en los últimos diez años, en el casquete del sur de la Antártida.” (El País, 8 de noviembre de 2000).

Los dos episodios de fractura de hielo más destacados de la última década se localizaron en las plataformas de Ross y de Larsen respectivamente:

“El mayor iceberg del siglo está desprendiéndose de la Antártida.” (El Periódico, 24 de marzo de 2000).

“Una plataforma del tamaño de Álava se derrumba en la Antártida.” (El País, 20 de marzo de 2002).

En el primer caso se trataba de un bloque de casi 300 kilómetros de largo por 37 de ancho, lo que nos da una superficie de unos 11.000 km², equivalente a la provincia española de Murcia (Figura 2.12).

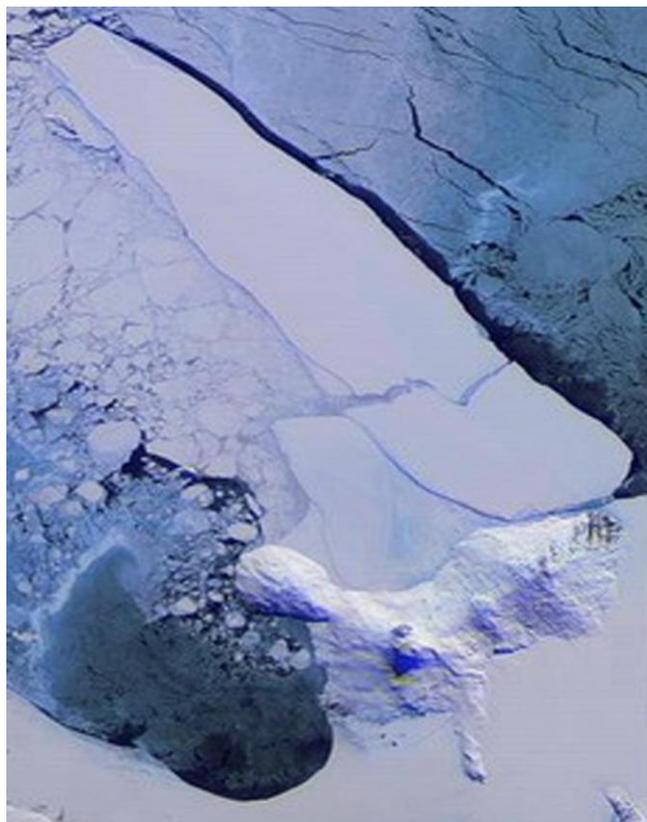


Figura 2.12

El desprendimiento del gigantesco iceberg B15-A captado por el radiómetro MISR del satélite Terra de la NASA, en marzo de 2000. En su desplazamiento a lo largo de 2000 y 2001 formó una barrera natural que influyó en el régimen de vientos y corrientes, alterando el ecosistema local. Fuente: NASA Langley Research Center.

⁵⁵ Pérdida de masa glaciar por drenaje, en forma de agua líquida. Véanse más detalles en la siguiente dirección de Internet: <http://www.ual.es/asocia/sedeck/revista/n4-2.pdf>

Posteriormente, a principios de 2002, se produjo la rotura de la gigantesca plataforma Larsen-B, desprendiéndose un inmenso bloque de hielo de 200 metros de grosor, con una superficie de 3.235 Km² (Figura 2.13). Ya en 1995 el desprendimiento de Larsen-A (con la mitad de tamaño que Larsen-B) puso en guardia a los científicos, a quienes no pilló por sorpresa el episodio de 2002. Tras la rotura de Larsen-B la superficie de la barrera Larsen era un 33% inferior a la que tenía en 1995 y “desde 1975 (...) perdió más de 12.000 km²”⁵⁶.

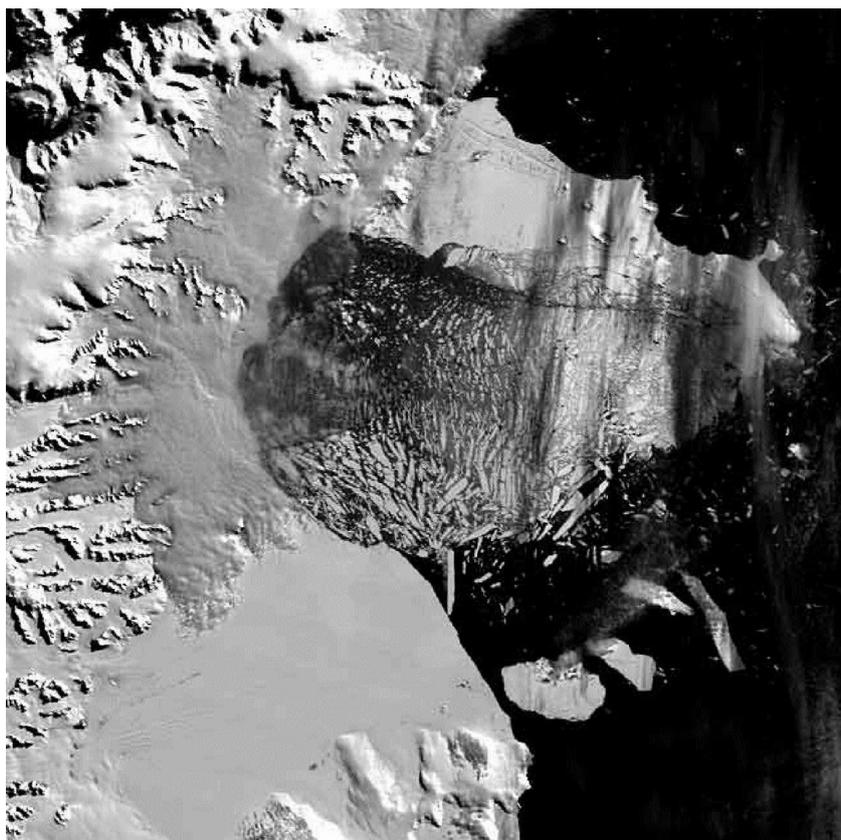


Figura 2.13

Fragmentos de hielo flotante de la plataforma Larsen-B en la Península Antártica. Imagen del 5 de marzo de 2002 tomada por el satélite Terra de la NASA. Cortesía de Ted A. Scambos del Centro Nacional de datos de Hielo y Nieve de los EEUU.

Teniendo en cuenta que el calentamiento atmosférico regional en la Península Antártica no tiene precedentes en los últimos 50 años, las plataformas de hielo parecen ser unos buenos indicadores de cambios climáticos.

En el otro extremo del planeta, en las regiones árticas, la mayor alteración que se viene detectando es la reducción de la capa de hielo marino o banquisa (Cuadro I), de consecuencias imprevisibles en el clima global. Desde que en 1972 se iniciaron las observaciones por satélite, el área cubierta de hielo ha disminuido a razón de un 3% por

⁵⁶ <http://www.dna.gov.ar/DIVULGAC/LARSEN2.HTM>

Véase también: Massons, J.; Camps, J.; Grau, J.: **El calentamiento de la Antártida**. Referencia 43 de la bibliografía.

década, fundiéndose cada año una superficie “neta” equivalente a Cataluña y Baleares juntas.

El calentamiento ártico es una realidad cuyas consecuencias afectan a todo el planeta. La dificultad estriba en saber discernir nuestra responsabilidad en todo esto. “Una complicada telaraña de sistemas de realimentación climática [con el del Albedo/Hielo a la cabeza⁵⁷] hace difícilísimo saber si el calentamiento debido al efecto invernadero es la principal causa de las transformaciones árticas”⁵⁸.

La banquisa del Ártico muestra sus mayores signos de fragilidad durante los meses de verano, apareciendo entonces grandes fracturas y extensas áreas totalmente libres de hielo. Aparte de las nada despreciables repercusiones que esto tiene en el balance de calor de la Tierra, tampoco podemos olvidar las alteraciones en los ecosistemas de la región (poblaciones de osos polares, focas o de los propios esquimales).



Figura 2.14

En los últimos decenios el hielo del Ártico se funde antes y se congela más tarde, reduciéndose año tras año la capa de hielo flotante. Si bien esto facilita la navegación por esas frías aguas, altera el modo de vida de las especies que habitan en la banquisa.

⁵⁷ Cuantas más zonas libres de hielo queden expuestas, mayor será la cantidad de radiación solar absorbida por las capas superiores del océano (por el menor albedo del agua frente al hielo), desencadenándose un efecto de “bola de nieve” (realimentación o *feedback*) que aumentará aún más el ritmo de fusión de la banquisa ártica.

⁵⁸ Sturm, M.; Perovich, D. K.; Serreze, M. C.: **Fusión en el Norte**. Investigación y Ciencia, nº 327 (Diciembre 2003).

En agosto de 2000, varios científicos que viajaban “de vacaciones” por el Ártico, a bordo de un rompehielos ruso, se toparon con una laguna rodeando el Polo Norte. Una de las fotografías que tomaron fue portada de *The New York Times*. Algo así no podía ser estacional, por lo que se encendieron las alarmas. Tras el caluroso verano de 2003 leíamos en la prensa: “El hielo se abre en el Ártico”, “Los científicos detectan la formación de una fractura que parte en dos un bloque de hielo ártico del tamaño de Ibiza” (El País, 24 de septiembre de 2003). Para algunos científicos, de seguir así las cosas, el Ártico será navegable en verano de aquí a 50 años. Los responsables de las compañías navieras se deben estar frotando las manos.

La fusión de la banquisa ártica no contribuye a subir el nivel del mar (hecho basado en el famoso Principio de Arquímedes⁵⁹), por lo que, si nos preocupa el ritmo actual de ascenso del nivel marino, debemos dirigir nuestras miradas a otros lugares como el casquete helado de Groenlandia. Al igual que el antártico, “la forma y el volumen de ambos casquetes están regidos por el equilibrio entre los flujos de entrada (las precipitaciones nivosas) y los flujos de salida (los icebergs y la fusión de los hielos)”⁶⁰. En Groenlandia, las nevadas son proporcionalmente mucho más abundantes que en la Antártida, habiéndose detectado, no obstante, una importante reducción en su cubierta de hielo.

Se está investigando el papel que puede desempeñar el aporte de agua dulce al océano procedente del deshielo de Groenlandia. La preocupación de los científicos no es tanto su contribución al aumento global del nivel del mar⁶¹, sino la influencia que esos aportes de agua dulce puedan tener en la llamada “cinta transportadora” oceánica. Dejemos para un poco más adelante este asunto, viendo ahora de qué forma la fase cálida actual está afectando a los mares de la Tierra.

2.3. La subida del nivel del mar

Durante el siglo XX el nivel de los océanos ha subido entre 10 y 20 centímetros según las diferentes estimaciones de los científicos. Aún se desconoce en que momento del pasado se inició la actual tendencia, no resultando tampoco fácil separar todas las causas que han dado lugar a ese ascenso.

Las variaciones del nivel del mar pueden ser debidas a causas de origen geológico y de origen climático. Las primeras son una consecuencia de la dinámica de la tectónica de placas, lo que da lugar, entre otros efectos, a cambios en la forma y el tamaño de las cuencas oceánicas. A una escala de siglos, que no geológica, parece claro que las fluctuaciones del nivel del mar deben obedecer sólo a causas climáticas. De éstas, que implican un cambio en el volumen del agua oceánica, destacan dos por encima de las demás: la dilatación térmica del océano y la fusión de los glaciares continentales.

⁵⁹ El Principio de Arquímedes establece que: “*Todo cuerpo parcial o totalmente sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical ascendente igual al peso del fluido desalojado*”.

El hielo flotante, como ocurre con un iceberg, está en permanente equilibrio (con independencia de cual sea su tamaño) y flota en la superficie del mar por tener menor densidad que éste (0,92 g/cm³ del hielo frente a 1,03 g/cm³ del agua salada). Igualando peso y empuje se comprueba fácilmente como en un iceberg aproximadamente el 90% permanece sumergido bajo la superficie, emergiendo apenas un 10%.

⁶⁰ Rémy, F.; Ritz, C.: **Los casquetes polares**. Investigación y Ciencia, nº 305 (Febrero 2002).

⁶¹ “Las investigaciones más recientes parecen indicar que la principal contribución de los hielos continentales a la subida del nivel del mar se debería actualmente no a la Antártida ni a Groenlandia, sino a los glaciares de montaña que bordean el sur de Alaska” (Referencia de la nota 53). Según algunas estimaciones, que personalmente considero algo exageradas, el deshielo de Alaska podría representar la mitad del aumento mundial del nivel del mar.

No existe acuerdo entre cual de esos dos factores interviene más. Además, por sí solos no parecen justificar completamente la subida de nivel del mar observada (Cuadro III). Para algunos autores “cerca de tres cuartas partes de ese aumento se deben al hecho de que el agua se ha calentado, y por tanto se ha expandido”⁶². Para otros, sólo un tercio de esta alza se debería a la dilatación térmica de las aguas, mientras que otro tercio provendría del deshielo de los glaciares de montaña (principalmente de los de Alaska y la Patagonia), quedando un tercer tercio sin resolver, cuyo origen pudiera estar en los casquetes polares⁶³.

Cuadro III	PRINCIPALES CAMBIOS OBSERVADOS EN EL NIVEL DEL MAR A LO LARGO DEL SIGLO XX
<ul style="list-style-type: none"> • El nivel marino medio global ha aumentado a una velocidad media de 1 a 2 mm/año durante el siglo XX. Muy probablemente esto sea debido a la expansión térmica del agua y a la fusión del hielo continental (glaciares). • La tasa de elevación del nivel del mar durante el siglo XX fue más de 10 veces superior a la media de los últimos 3.000 años. 	

FUENTE: Elaboración propia, a partir de los datos del IPCC (2001).

“Los casquetes y el océano intercambian el equivalente a 8 mm/año del nivel de los océanos: en el equilibrio, la cantidad de nieve depositada en los casquetes es igual a la del hielo que se desliza [desde el interior de la Antártida y Groenlandia] hacia el océano. Cualquier variación de uno de estos dos términos tiene consecuencias sobre el nivel del mar.”⁶⁴. Los estudios de campo que se están haciendo sobre la inestable WAIS quizás nos deparen sorpresas en los próximos años. Por ahora, “la vinculación del calentamiento [global] con el movimiento de las corrientes de hielo en la Antártida Occidental se ha hecho cada vez más tenue”⁶⁵.

Si pensamos en la expansión térmica de los océanos como el principal factor a tener en cuenta en el medio marino, debido a su gran capacidad calorífica⁶⁶, la temperatura no sigue el mismo ritmo de calentamiento que en la atmósfera, por lo que se ha producido un aumento de la temperatura oceánica a nivel global sensiblemente inferior a la atmosférica⁶⁷. “El nivel medio del mar continuará subiendo cualquiera que sea la evolución de los gases de efecto invernadero, debido a la inercia de las masas oceánicas que todavía no han «digerido» (sic) el aumento de temperatura de los últimos 150 años. Aunque la temperatura media se estabilice, las aguas profundas seguirán calentándose y dilatándose, elevando así el nivel del mar”⁶⁸.

Al igual que ocurre con el resto de cuestiones relacionadas con el cambio climático (esté o no justificada dicha relación), con la cuestión del nivel del mar se

⁶² Referencia 35 de la bibliografía.

⁶³ Referencia de la nota 60.

⁶⁴ Rémy, F.: **El futuro incierto de los hielos del Polo Sur**. Mundo Científico, nº 210 (Marzo 2000).

⁶⁵ Schneider, D.: **La subida de los mares**. Investigación y Ciencia, nº 248 (Mayo 1997).

⁶⁶ El océano en su capa superficial (primeros cien metros) transporta tanto calor como toda la atmósfera.

⁶⁷ Del orden de 0,06 °C entre la superficie y los 3.000 metros de profundidad desde 1955. El calentamiento del océano se localiza principalmente en las capas más superficiales, habiéndose detectado en los primeros 300 metros una subida de aproximadamente 0,2 °C desde entonces (véase el Cuadro I). La temperatura de la superficie oceánica (SST) subió entre 0,4 y 0,8 °C desde finales del siglo XIX.

⁶⁸ Chevassus-au-Louis, N.: **El mar, al asalto de las costas**. Mundo Científico, nº 241 (Enero 2003).

emplea a menudo un tono catastrofista, desvirtuando sobremanera la realidad del hecho en sí. Cierto es que existen unas predicciones futuras (véase el capítulo 4) nada tranquilizadoras que de momento son sólo eso, predicciones a largo plazo que encierran no pocas incertidumbres.

Por ahora, la subida anual de entre uno y dos milímetros (Cuadro III) no parece ser un dato demasiado preocupante, siendo un incremento despreciable a escala geológica. Contamos con la capacidad tecnológica necesaria para lograr adaptarnos a ese lento pero inexorable cambio. De esto saben mucho los holandeses que desde hace décadas le vienen ganando la batalla al mar. El problema se complica al descubrir que el nivel marino no es el mismo en todas partes, estando sujeto a importantes variaciones locales y regionales.

Algunos de esos cambios relativos de nivel se comprenden bien y son tenidos en cuenta a la hora de hacer una estimación global. Hay zonas costeras que se elevan debido a la “recuperación postglacial”⁶⁹, mientras que otras se van hundiendo como los deltas de algunos grandes ríos⁷⁰. De cualquier forma, “ni siquiera teniendo en cuenta el movimiento vertical natural de las costas se consiguen explicar todas las variaciones observadas durante el pasado siglo”⁷¹.

Los pequeños estados insulares son especialmente vulnerables a una subida del nivel del mar, habida cuenta de que muchas de sus islas apenas emergen unos pocos metros sobre la superficie oceánica (Figura 2.15). Desde hace algunos años sus gobernantes reclaman medidas de urgencia a la comunidad internacional. Sus pequeñas islas y atolones de coral “parecen estar” sufriendo ya el imparable ascenso de las aguas. En octubre de 2001, las autoridades del pequeño archipiélago de Tuvalu, en el Pacífico Sur, llegaron a un acuerdo con Nueva Zelanda para facilitar la evacuación voluntaria de sus gentes ante la amenaza del mar. En 1999, en el vecino Kiribati, dos atolones deshabitados desaparecieron bajo las aguas. ¿Estamos ante una situación tan crítica como parece?

⁶⁹ Zonas que permanecieron aplastadas por el hielo durante la última glaciación y que a lo largo del actual periodo interglacial han ido emergiendo y continúan haciéndolo en la actualidad. Desde la última glaciación, hace unos 20.000 años, el nivel del mar en algunos lugares ha subido más de 120 metros debido a la fusión de las antiguas capas de hielo.

⁷⁰ En este caso, a consecuencia del peso de la gran cantidad de sedimentos que acumulan.

⁷¹ Referencia de la nota 65.



Figura 2.15

La desaparición bajo las aguas de los atolones de coral en los próximos años a causa del cambio climático no puede generalizarse. Actualmente se dan grandes diferencias de nivel marino entre unas zonas y otras, e incluso en el Pacífico Central se viene detectando una bajada del mismo.

Los datos no son concluyentes, ya que, si bien en algunas zonas del Pacífico se han medido elevaciones anuales del nivel del mar muy por encima del promedio mundial, en el caso concreto de Tuvalu el ritmo de subida rondó sólo los 0,07 mm al año. Como muy acertadamente declaraba, en febrero de 2002, al diario británico *The Guardian* la directora del observatorio meteorológico de ese pequeño estado insular: “Nuestras islas no corren peligro de desaparecer pura y simplemente bajo el agua. Es mucho más probable que la frecuencia y la violencia creciente de las tempestades y de las subidas excepcionales del nivel del mar hagan la vida insoportable”.

Ahí creo que reside la clave del asunto y por donde pueden estar llegando los problemas de adaptación de los isleños, ya que contra los elementos desatados de la Naturaleza no se puede luchar. El 20% de la población mundial vive en áreas costeras situadas a menos de tres metros sobre el nivel del mar. Éstas se ven permanentemente moldeadas por el oleaje y las corrientes marinas, sufriendo periódicamente el azote de los fuertes temporales. Los efectos de una tormenta tropical en un atolón del Pacífico superan, con creces, el impacto que pueda estar ocasionando el actual ritmo de subida del nivel del mar.

2.4.- Otros cambios “sintomáticos” detectados

Si bien la temperatura es una variable fácil de manejar por los climatólogos, no ocurre lo mismo con la precipitación, que se muestra bastante más esquiva cuando lo que se quiere es sacar algún tipo de conclusión en base a su comportamiento. La lluvia es el elemento del clima más aleatorio y el que está sometido a una mayor variabilidad,

presentándose además de forma discreta, lo que complica mucho más su tratamiento estadístico.⁷²

Podemos entender fácilmente la relación causa-efecto que existe entre la radiación solar y la temperatura de la superficie terrestre (el calor proveniente del Sol es algo que experimentamos de forma cotidiana sobre nuestra piel); lo que no es tan fácil de “visualizar” es la relación que hay entre la temperatura y la precipitación.

¿Llueve más o llueve menos en la actual fase de calentamiento global? Un aumento de la temperatura implica un aumento de la evaporación, que “inyecta” a la atmósfera una mayor cantidad de agua potencialmente precipitable, cerrándose así el conocido ciclo hidrológico. Ahora bien, en un nuevo escenario más cálido, cabe preguntarse también sobre las variaciones que puedan producirse en los patrones de precipitación. Los cambios en la dinámica atmosférica son los que influyen directamente en esto. Tan importante resulta conocer la cantidad de precipitación como su carácter (intensidad) y distribución espacial.

En latitudes medias y altas del hemisferio norte, los datos recogidos a lo largo del siglo XX parecen confirmar un aumento de la precipitación, así como algunos cambios en los regímenes pluviométricos, encerrando esta última “evidencia” un mayor grado de incertidumbre (Cuadro IV). Concretamente, en Europa la precipitación muestra una tendencia hacia extremos más húmedos.

Cuadro IV	PRINCIPALES CAMBIOS OBSERVADOS EN LAS PRECIPITACIONES Y HUMEDAD DE LA ATMÓSFERA A LO LARGO DEL SIGLO XX
<ul style="list-style-type: none"> • Probable incremento de los episodios de precipitaciones fuertes en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte. • Las precipitaciones han aumentado, muy probablemente, en un 0,5-1% por decenio durante el siglo XX, sobre la mayor parte de las áreas continentales de latitudes medias y altas del Hemisferio Norte. • Las precipitaciones han disminuido sobre muchas áreas continentales subtropicales durante el siglo XX (-0,3% por década). • En algunas regiones, como en partes de Asia y África, parece haberse acentuado la frecuencia e intensidad de las sequías los últimos decenios. • Aumento global del contenido de vapor de agua en la atmósfera desde 1980, con importantes variaciones regionales y desigual proporción en los distintos tramos de atmósfera. • Probable aumento de la cubierta de nubes, de un 2% desde principios del siglo XX, sobre las regiones continentales de latitudes medias y altas del Hemisferio Norte. 	

FUENTE: Elaboración propia, a partir de los datos del IPCC (2001).

La dificultad que conlleva la correcta caracterización del comportamiento de la precipitación impide llegar, por el momento, a conclusiones definitivas al respecto. Hoy en día existe un gran debate científico sobre la tendencia creciente en el número de episodios meteorológicos y climáticos extremos, asociados en la mayoría de los casos a las precipitaciones (lluvia, nieve, granizo...). Aunque en algunas regiones del globo y

⁷² Para profundizar más en este asunto puede consultarse, por ejemplo: González Hidalgo, J. C.; De Luis, M.; Raventós, J.; Sánchez, J. R.; Cortina, J.: **Aproximación metodológica al análisis de la estructura de las tendencias de lluvia**. Geographicalia, nº 37 (1999). (Disponible en Internet. URL: <http://www.unizar.es/geografia/geographicalia/gonzalezjc.pdf>).

para determinados periodos de tiempo se haya registrado un aumento en la frecuencia e intensidad de los episodios extremos, a nivel global no hay nada concluyente, siendo bastante complicado detectar tendencias significativas.

Sin una tendencia clara, lo único cierto es que “el impacto económico de los desastres naturales, en particular los relacionados con el agua, no ha parado de crecer durante los últimos 50 años”⁷³, siendo cada vez mayor el número de personas afectadas por las catástrofes naturales relacionadas con el tiempo y el clima. A pesar de los espectaculares avances de las últimas décadas en prevención, el número de pérdidas humanas por causa meteorológica ronda actualmente las 80.000 personas/año en todo el planeta⁷⁴.

Los tornados son un buen ejemplo de fenómeno natural extremo. En el famoso “corredor de los tornados” de los EEUU (la zona del mundo más castigada por estos destructivos vórtices) el número anual de tornados observados ha aumentado de forma significativa desde mediados del siglo XX, con un destacado repunte a partir de 1990 (Figura 2.16). Pese a todo, no hay que precipitarse a la hora de sacar conclusiones. No sabemos con certeza si se observan más tornados porque realmente han aumentado en número o si, por el contrario, dicho aumento es sólo una consecuencia de la mejora en las redes de observación (más medios técnicos, más gente pendiente del cielo...). Tal y como indicábamos anteriormente, a escala global no se detecta ningún cambio sistemático en la frecuencia de aparición de tornados, días de tormenta o granizadas.



Figura 2.16

Tornados como el de la imagen son observados cada vez más a menudo en los EEUU y en otros lugares del mundo, pese a lo cual es arriesgado afirmar que exista una tendencia al alza significativa en su frecuencia de aparición. Fuente: Storm Prediction Center.

⁷³ **El agua y los desastres.** Publicación OMM-nº 971 (2004). [Lema elegido por la OMM con motivo de la celebración del Día Mundial del Agua 2004].

⁷⁴ *Ibid.*

A idéntica conclusión llegan los expertos con respecto a los supuestos cambios en el comportamiento de los ciclones tropicales⁷⁵ y las borrascas (extratropicales): “La variabilidad multidecenal de las tempestades y los ciclones [tropicales] y las limitaciones de las series de datos existentes no permiten hasta ahora concluir que haya una tendencia significativa de su frecuencia y de su intensidad durante el último siglo”⁷⁶ (Figura 2.17).

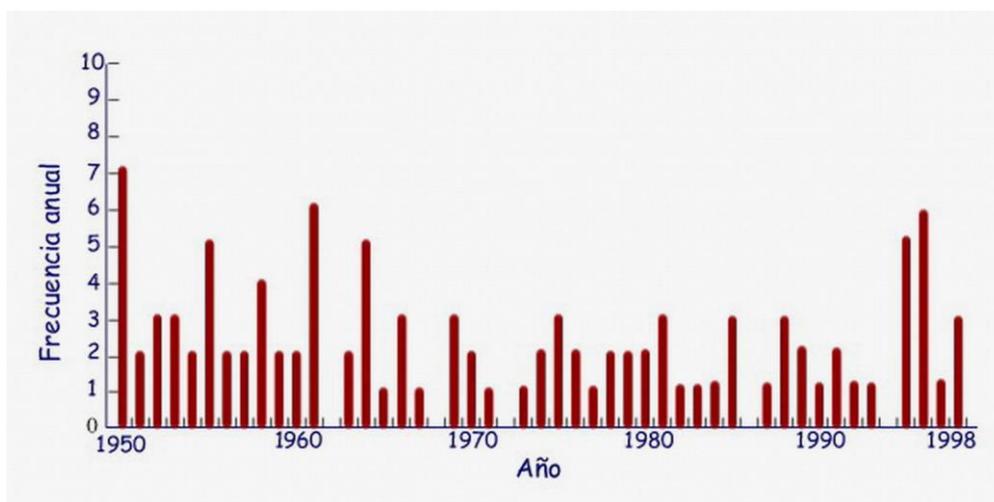


Figura 2.17

Frecuencia anual de huracanes fuertes (categoría 3 a 5 en la escala Saffir-Simpson) en el Atlántico durante el periodo 1950-1998.
Cortesía de Antón Uriarte.

Los ciclones tropicales (huracanes, tifones...) constituyen los fenómenos meteorológicos más devastadores de la Naturaleza, teniendo un gran impacto sobre la población y las economías de los países afectados. De los sesenta que se forman cada año por término medio en aguas tropicales, sólo un pequeño porcentaje acaba convirtiéndose en una amenaza directa para la población, dando lugar ocasionalmente (no todos los años) a un episodio catastrófico.

El que esto último ocurra o no, dependerá de tres importantes factores: la intensidad del huracán, su errática trayectoria y el grado de vulnerabilidad que tenga la zona afectada. Un huracán de categoría 5⁷⁷ que “toque tierra” siempre será destructivo, pero si además se encuentra en su camino con zonas especialmente vulnerables (áreas deforestadas, emplazamientos urbanos en cauces secos...) no tendrá piedad. No la tuvo el huracán Mitch en 1998 (Figura 2.18) cuando, al cruzar los estados de Honduras, El Salvador y Nicaragua, dejó una estela de destrucción y muerte, segando la vida de al menos 18.000 personas, entre muertos y desaparecidos.

⁷⁵ Dependiendo de su localización geográfica reciben diferentes nombres genéricos: *huracanes* (Atlántico Norte, Caribe, Golfo de México), *tifones* (Mar de China, oeste del Pacífico), *baguios* (Filipinas), *Willy-willies* (Australia)...

⁷⁶ Planton, S.; Bessemoulin, P.: **¿Se acelera el cambio climático?** Mundo Científico, n° 218 (Diciembre 2000).

⁷⁷ El grado máximo en la escala de Saffir-Simpson, con la que se mide la intensidad de los ciclones tropicales. La categoría 5 se aplica cuando los vientos sostenidos en torno al ojo del huracán superan los 250 km/h y la presión en su centro es inferior a 920 hPa.

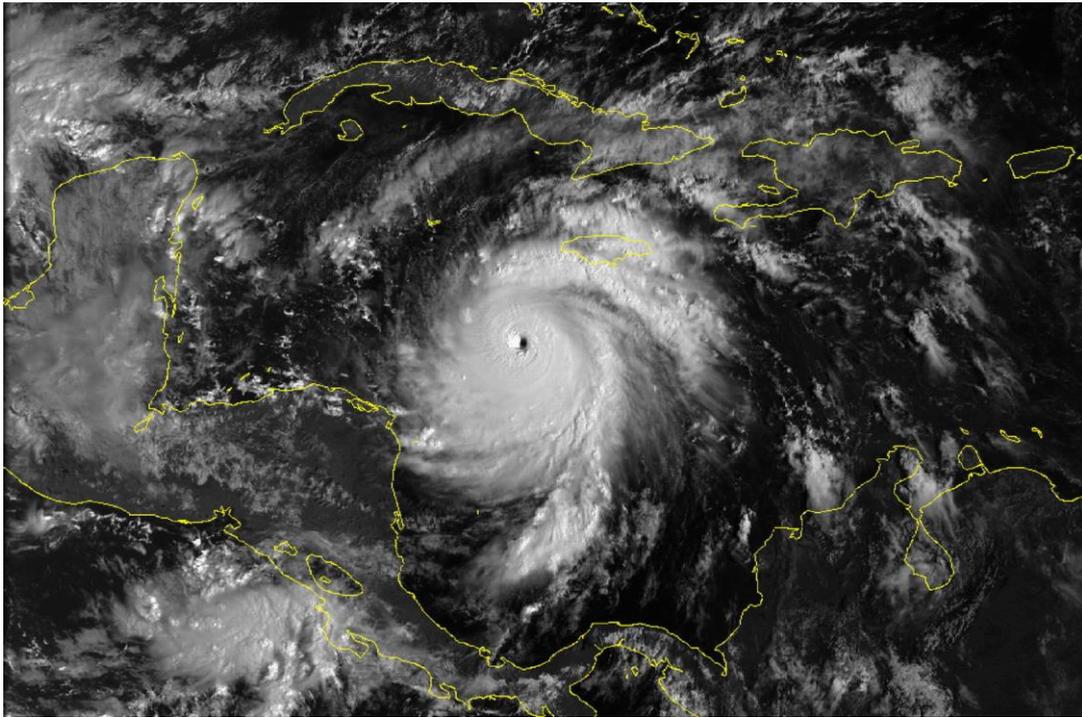


Figura 2.18

Imagen de satélite del huracán Mitch tomada el 26 de octubre de 1998, un par de días antes de que empezara a sembrar el caos en los pequeños estados centroamericanos. Fuente: NOAA.

De los tres factores indicados, sobre el único que podemos y debemos actuar es sobre el tercero, ya que la magnitud de las avalanchas de barro hubiera sido bien distinta de no haberse permitido desde hace años la tala indiscriminada de la masa forestal en amplias zonas de esos países centroamericanos. En el ámbito tropical, donde a menudo llueve torrencialmente, cuanto menos vegetación tenga un terreno, menor capacidad tendrá para retener y filtrar el agua de las lluvias, favoreciendo la escorrentía superficial y las posteriores riadas e inundaciones (Figura 2.19).

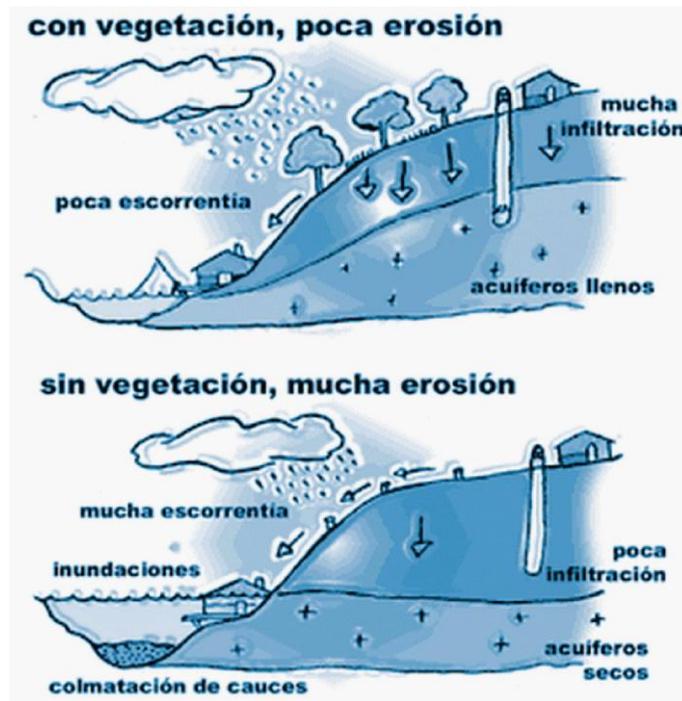


Figura 2.19

La erosión del terreno favorece que durante un episodio de lluvias intensas la escorrentía superficial y las avenidas de agua sean mayores. El resultado son unas inundaciones cada vez más catastróficas.

Fuente: CRIE (Centro Rural de Información Europea).

Los días posteriores a la catástrofe del Mitch no faltaron informaciones en la prensa donde se intentó relacionar el trágico suceso con el cambio climático. Lo único cierto es que durante 1998 se registró una actividad ciclónica en la franja tropical del océano Atlántico superior a la media. Ese comportamiento fue anómalo, ya que aquel año, al acontecer un episodio El Niño (recordemos que el de 1997-98 fue especialmente intenso), lo normal hubiera sido tener pocos huracanes y poco intensos. La temporada de 1998 encajaría mejor con las que suelen producirse durante las fases frías de ENSO (La Niña), cuando, estadísticamente, se registran un mayor número de huracanes en el Atlántico.

Hay que tener en cuenta que si la trayectoria del Mitch hubiera sido ligeramente distinta, sin atravesar de lleno aquellos pobres territorios, aunque seguiría estando en la lista de los huracanes más intensos del siglo XX, habría desaparecido ya de la memoria colectiva.

Aparte del Mitch, probablemente recordemos al huracán Georges, que atravesó Puerto Rico apenas un mes antes, o a otros huracanes de los últimos años como el Andrew (1992)⁷⁸, Hugo (1989), Gilbert (1988) o los más recientes Charley, Frances, Iván y Jeanne que, entre agosto y septiembre de 2004, afectaron también al área caribeña. Desplazándonos al Pacífico, ¿quién se acuerda del tifón Tip? Salvo los estudiosos de los ciclones tropicales, probablemente nadie, ya que no fue catastrófico; sin embargo es el más intenso y de mayor diámetro de los registrados hasta la fecha⁷⁹.

⁷⁸ Con unas pérdidas de 25.000 millones de dólares (de 1990) es, hasta la fecha, el huracán que más daños económicos ha causado. Afectó principalmente al estado norteamericano de Florida.

⁷⁹ En el centro de este tifón se midió una presión de tan solo 870 hPa (En el ojo del huracán Mitch se midieron 905 hPa), alcanzándose vientos superiores a los 300 km/h, con un radio de las ráfagas de 1.100 kilómetros.

Tip tuvo lugar en octubre de 1979, justo cuando arrancaba la actual fase de calentamiento (Figura 2.1). ¿Sería razonable relacionar este hecho con la aparición de tan extraordinario ciclón tropical? A mi entender no. Ahora bien, si el tifón Tip hubiera aparecido en 2004, habiendo, además, arrasado algún territorio y causado una masacre a su paso, entonces la conexión climática nos parecería de lo más razonable. De unos años a esta parte, “a pesar de las numerosas pruebas teóricas y observadas que lo niegan, la creencia popular en el aumento de tormentas y huracanes es mayor que nunca”⁸⁰.

Los ciclones tropicales llevan asociados toda una serie de fenómenos extremos como pueden ser los vientos huracanados, las “mareas de tormenta”⁸¹ o las lluvias torrenciales, que provocan a su vez corrimientos de tierra, riadas e inundaciones. Incluso, a veces, se generan a su paso tornados de efectos devastadores. Fuera del ámbito tropical, muchas otras zonas de la Tierra sufren periódicamente estos desastres naturales. Según una reciente estimación de la OMM⁸², durante el periodo 1991-2000, el número de personas afectadas (en mayor o menor grado) por catástrofes relacionadas con el agua se elevó a 1.500 millones.

El inicio del siglo XXI parece ir por los mismos derroteros: “El coste de las catástrofes meteorológicas se incrementó un 93% en 2002” (La Vanguardia, 27 de mayo de 2003). En 2002 las inundaciones fueron las catástrofes naturales por excelencia. Las imágenes de los desbordamientos de Praga dieron la vuelta al mundo (Figura 2.20). Muchas otras zonas de Austria y Alemania corrieron la misma suerte, sin olvidarnos tampoco de los tremendos episodios de China o la India.



Figura 2.20

Desbordamiento del río Moldava a su paso por Praga durante las inundaciones de agosto de 2002.

⁸⁰ Referencia 35 de la bibliografía.

⁸¹ La marea de tormenta o *surgencia* no es más que el efecto combinado de la marejada, que provoca el acercamiento de un ciclón tropical a la costa, y la pleamar, dando lugar a una repentina subida del nivel del mar de entre 4 y 5 metros. Las costas bajas que se extienden hacia el interior son zonas especialmente vulnerables a este fenómeno, convirtiéndose en la principal amenaza asociada al huracán.

⁸² Boletín de la OMM. Vol. 53; n° 1 (Enero 2004).

El debate sobre el cambio climático volvió a saltar a la palestra y de nuevo con las mismas connotaciones. Aunque pudiera existir algún indicio sobre una posible relación causal, todavía no hay suficientes pruebas científicas que lo avalen. En esta ocasión, suscribo todas y cada una de las palabras del hidrólogo francés Daniel Dubant al ser preguntado al respecto, y es que “por ahora no aparecen por ningún lado datos que demuestren una incidencia del cambio climático en un presunto aumento de las inundaciones. (...) Esta insistencia en el cambio climático [como causa primera de todos los episodios extremos] alentada también por los medios de comunicación, enmascara el problema de vulnerabilidad del territorio. (...) Cada vez somos más vulnerables a las riadas porque nuestro territorio está más ocupado. El urbanismo ha aumentado de forma importante y no siempre con las precauciones necesarias”.

En este mismo sentido se expresaba el informe “Catástrofes Naturales 2002” elaborado por la reaseguradora Munich Re, advirtiendo que las inundaciones catastróficas han ocurrido en el pasado, ocurren en el presente y lo seguirán haciendo en el futuro, por lo que hay que ponerse como objetivo el prepararnos de la forma más óptima posible para afrontarlas. Para ello tendríamos que “evitar por completo la construcción en zonas de riesgo, y ya que los asentamientos [actuales] no pueden simplemente trasladarse en su totalidad y de un día para otro, las medidas tecnológicas para el control de las inundaciones continuarán jugando un papel esencial”. La prevención resulta fundamental en este asunto.

España, y en especial su fachada mediterránea, es una zona especialmente vulnerable a las inundaciones. Existen en nuestro país no menos de 500 zonas con riesgo potencial de inundación. A diferencia de las riadas del norte y centro de Europa, caracterizadas por el enorme volumen de agua que gradualmente va desbordando los cauces, anegando a su paso las extensas llanuras circundantes, las crecidas de los ríos del sur del continente europeo son “explosivas”, como consecuencia de lluvias muy intensas que provocan un brusco aumento de los caudales, dando lugar muchas veces a violentas avenidas en cauces habitualmente secos.

En el apartado 1.1 hacíamos referencia al trabajo de la profesora Llasat. Según sus datos, en España, entre 1950 y 1999, del orden de 2.200 personas perdieron la vida como consecuencia de las inundaciones. En un reciente estudio regional (referido sólo a Cataluña) dirigido por ella, se concluía que “si incluimos todas las inundaciones, incluidas las ordinarias (que apenas producen daños), se observa un aumento [de estos episodios] hacia finales del siglo XX, que desaparece si nos referimos exclusivamente a las inundaciones extraordinarias y catastróficas”⁸³.

Si el efecto invernadero estuviera provocando ya un aumento de la frecuencia de aparición de inundaciones, ¿no sería razonable pensar que todas ellas, desde las pequeñas hasta las grandes, tendrían que aumentar en igual proporción? La explicación parece estar en nuestra negligencia a la hora de urbanizar el territorio. “Lo que en el pasado constituía una crecida fluvial moderada, sin afectaciones, hoy puede causar daños económicos o, en el peor de los casos, pérdida de vidas humanas”⁸⁴.

El aparente aumento de los episodios meteorológicos extremos quizás sea el resultado de una frecuencia e intensidad parecidas a las que teníamos en el pasado, pero con unas “bandas de tolerancia” (Figura 2.21) ante esos fenómenos cada vez más

⁸³ Llasat, M. C.; Barnolas, M.; Ceperuelo, M.; Llasat, M.; Prat, M. A.: **Algunos aspectos del impacto social de las inundaciones en Cataluña**. Revista electrónica RAM, nº 20 (Abril 2004). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero20/inundaciones.asp>

⁸⁴ Referencia de la nota 7.

pequeñas, como consecuencia de la presión creciente a la que sometemos al medio físico que nos rodea y a sus recursos.

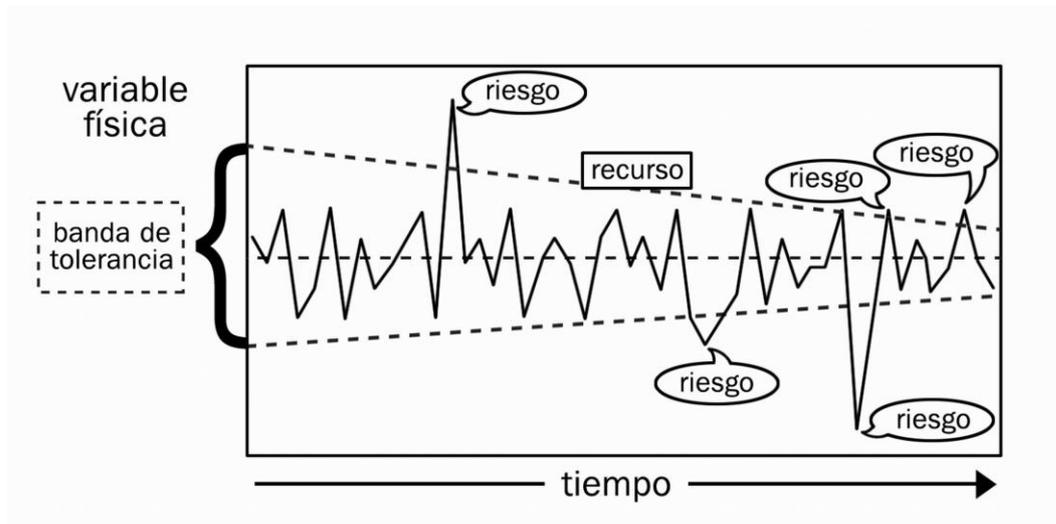


Figura 2.21

Esquema de la evolución temporal de un recurso, como el agua de un río, convertido eventualmente en riesgo, en forma de avenida o estiaje. Los riesgos aumentan con el tiempo si se estrecha la “banda de tolerancia”, definida en función de la presión antrópica sobre el agua y sus márgenes. Fuente: Martín Vide (2003), adaptado del modelo de K. Smith publicado en *Environmental Hazards*, Londres, Routledge, 1992.

En palabras de Rajendra Pachauri, actual Presidente del IPCC, “el reto actual es comprender si están cambiando los patrones de frecuencia e intensidad de las inundaciones y sequías catastróficas que se están registrando”⁸⁵.

Las alteraciones en el medio físico también modifican notablemente los hábitos y ciclos de la fauna y la vegetación. La biosfera, como parte integrante del sistema climático, no permanece ajena a los cambios detectados. A la vista de los datos que aparecen en el Cuadro V, el calentamiento global podría estar ya afectando a los seres vivos, incluidos nosotros mismos.

Cuadro V	PRINCIPALES CAMBIOS OBSERVADOS EN LA FAUNA Y LA FLORA A LO LARGO DEL SIGLO XX
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la época de crecimiento de los árboles entre 1 y 4 días por década durante los últimos 40 años en el Hemisferio Norte, especialmente en latitudes altas. • Desplazamiento de plantas, insectos, pájaros y peces hacia latitudes y altitudes más altas. • Adelanto de la floración, llegada de las primeras aves migratorias, época de cría y aparición de insectos en el Hemisferio Norte. • Mayor frecuencia de aparición de episodios de blanqueo (o decoloración) de los corales. 	

FUENTE: Elaboración propia, a partir de los datos del IPCC (2001).

⁸⁵ Aunque sólo hayamos hablado de inundaciones, no hay que olvidar que el 40% de las zonas terrestres continentales son vulnerables a la sequía.

“Los científicos han constatado ya decenas de casos, desde las regiones polares hasta los mares tropicales, de ecosistemas modificados por efecto del cambio global”. (El País, 10 de abril de 2002)⁸⁶

En los entornos rurales, donde todavía se practica el sano ejercicio de la observación atenta de la Naturaleza (algo que, por desgracia, se ha ido perdiendo en las ciudades a medida que se han hecho grandes), los comportamientos de muchos animales y plantas han ido cambiando con el paso de los años. El adelanto de la primavera meteorológica (que no astronómica) es cada vez más frecuente, lo que se pone de manifiesto por la aparición temprana de determinadas flores de especies arbóreas (almendros, cerezos...) o de insectos y aves migratorias.

Aunque las alteraciones climáticas parecen ser la principal causa de estos cambios, no deben descartarse otros factores. Por ejemplo, la presencia permanente de cigüeñas en muchos pueblos castellanos, que antaño emigraban hacia el sur durante el invierno, parece obedecer también a la proliferación de los vertederos (fuente de alimento).

En el apartado 2.2 apuntábamos cómo la fusión de la banquisa polar estaba comenzando a amenazar a la fauna ártica. A este problema habría que añadir el impacto que en latitudes altas está teniendo la contaminación procedente de los países industrializados del hemisferio norte, y la explotación sin demasiado control que se viene haciendo de los recursos del Ártico.

Las focas y los osos polares son dos de las especies más amenazadas. Según un informe de 2002 de WWF⁸⁷/Adena, el calentamiento ya estaría afectando a los osos polares de la Bahía Hudson en Canadá⁸⁸. En palabras de Lynn Rosentrater, co-autora del citado informe, “el hielo marino se derrite más temprano en la primavera, lo cual obliga a los osos a buscar tierra firme sin haber desarrollado la necesaria reserva de grasa para la temporada sin hielo. Al final del verano, los osos están muy delgados y ese estado puede afectar a su capacidad para reproducirse”.

Cambiando de escenario, en los mares tropicales las altas temperaturas del agua y su elevada concentración de dióxido de carbono parecen ser los principales responsables de la decoloración que están sufriendo los corales. Los arrecifes de coral, pese a cubrir sólo un 0,1% de la superficie del planeta, contienen el 5% del total de especies catalogadas en la actualidad.

⁸⁶ Véanse, por ejemplo:

Grossman, D.: **Pérdida de sincronía en los ecosistemas**. Investigación y Ciencia, nº 330 (Marzo 2004).

Peñuelas, J.: **Síntomas biológicos del cambio climático**. Referencia 43 de la bibliografía.

⁸⁷ Siglas con las que se conoce mundialmente a la Fundación (o Fondo) para la Protección de la Naturaleza.

⁸⁸ El 60% de los osos polares del mundo se encuentran en territorio canadiense.



Figura 2.22

Los corales de los mares tropicales se han convertido en un buen indicador del calentamiento global, aparte de desempeñar un importante papel en el ciclo del carbono.

En estas zonas de extraordinaria biodiversidad son cada vez más frecuentes los episodios de blanqueo (Cuadro V). El más intenso de los últimos años fue el de 1998, coincidiendo con el intenso episodio El Niño, llegándose a destruir hasta un 16% de la población mundial de corales. La causa de la decoloración está en la expulsión de las algas que conviven con los pólipos coralinos, esto provoca una pérdida de color, quedando entonces al descubierto el esqueleto calcáreo. “En general los corales se pueden regenerar y recuperar sus colores, pero si el estrés es demasiado importante, y sobre todo si persiste, provoca la muerte masiva de las colonias”⁸⁹, justamente lo que pasó en 1998.

Desde que se empezó a investigar la enfermedad degenerativa de los corales, ha cambiado nuestra comprensión del problema. Si en un primer momento se achacaba principalmente al impacto local de las actividades humanas (contaminación de las aguas, pesca, turismo...), hoy en día vemos al cambio climático como la principal amenaza. Sabemos que “todos los arrecifes de coral que se desarrollan a una temperatura próxima al límite tolerado [30 °C], son muy vulnerables a los aumentos puntuales de temperatura, cada vez más frecuentes”⁹⁰.

⁸⁹ Buddemeier, R. W.; Gatuso, J-P.: **Degradación de los arrecifes coralinos**. Mundo Científico, n° 217 (Noviembre 2000).

⁹⁰ Ibid.

También hay evidencias de cambios en la distribución y cantidad de otras especies marinas. En ambientes ricos en dióxido de carbono los organismos calcáreos reducen su capacidad de reproducción y desarrollo. Aparte de esto, determinados cambios en la dinámica atmosférica tienen sus implicaciones biológicas en el mar, habiéndose detectado una interesante relación entre la abundancia de fitoplancton marino (pequeños organismos unicelulares presentes en el medio acuático) en la fachada atlántica de Europa y el índice NAO⁹¹.

2.5.- El aumento de los gases de efecto invernadero

Para concluir este capítulo nos queda por ver de qué manera han evolucionado en los últimos años las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEIs de ahora en adelante); para la mayoría de científicos, los principales responsables del calentamiento global experimentado durante las últimas décadas.

De todos los GEIs, el dióxido de carbono (CO₂) es el más conocido por la opinión pública y sobre el que recae la culpa de casi todo. El registro de hielo de la estación antártica Vostok establece una buena correlación entre la concentración de dióxido de carbono y la temperatura de la superficie terrestre durante los últimos 420.000 años (Figura 2.23). La concentración actual de CO₂ no fue superada en ningún momento a lo largo de ese amplio periodo, algo que sí que ha ocurrido en épocas más remotas.

⁹¹ Siglas con las que se conoce internacionalmente a la “Oscilación del Atlántico Norte”. Una parte sustancial de la variabilidad climática sobre ambas costas del Atlántico Norte está asociada a esta oscilación tan de moda entre los climatólogos (Figura 3.2), cuyo índice está basado en la diferencia de presión atmosférica existente entre la zona de Islandia y la de Azores. Si el índice es positivo (NAO+), el anticiclón de las Azores está reforzado, lo que da como resultado un tiempo más seco de lo estadísticamente normal en la Península Ibérica. En este caso se intensifican los vientos del norte frente a las costas de Galicia y Portugal, aumentando los afloramientos costeros (véase la explicación a este mecanismo en el apartado 3.4), y dando lugar a una mayor fertilización de esas aguas por aporte de nutrientes de abajo a arriba.

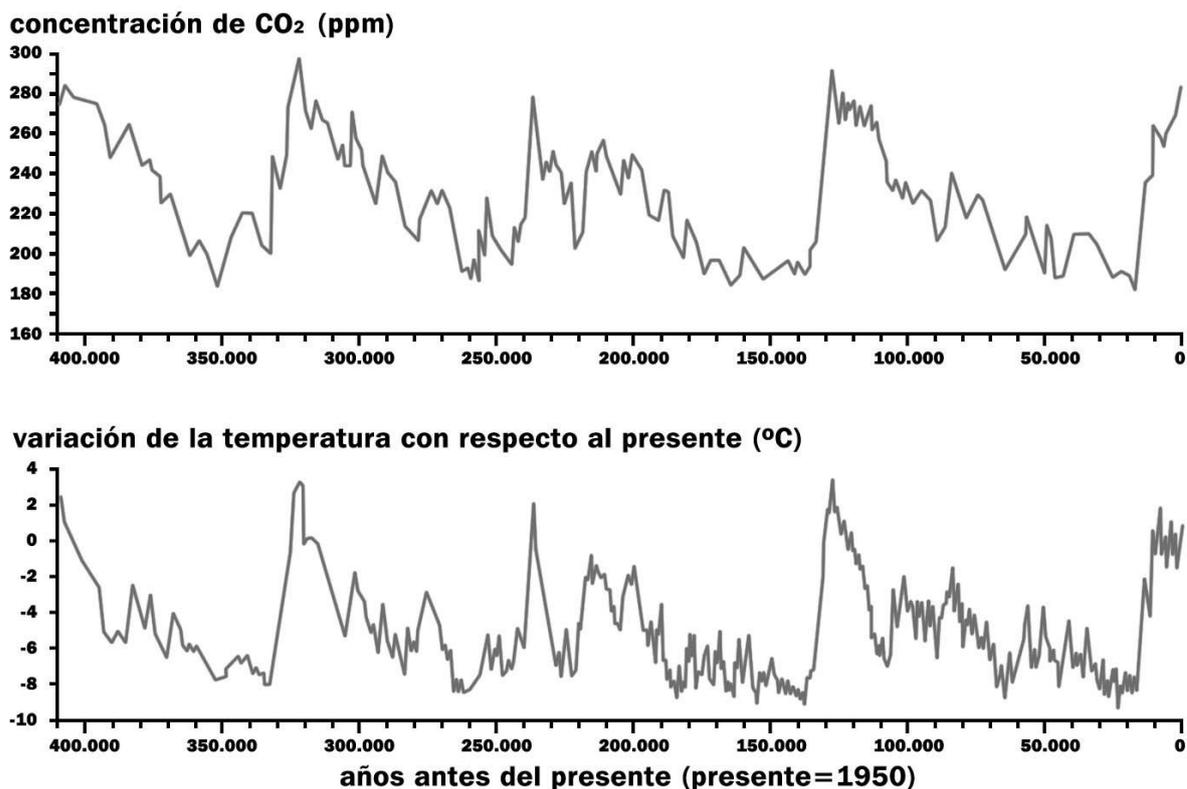


Figura 2.23

Evolución de la concentración atmosférica de CO₂ en ppm (partes por millón) y de la temperatura desde hace 420.000 años hasta nuestros días, obtenida a partir de la información isotópica de las burbujas de aire primitivo atrapadas en un testigo de hielo extraído en la estación rusa de Vostok, en la Antártida. Comprobamos la buena correlación existente entre las dos gráficas. Adaptado de Petit, J. R. y Jouzel, J. (1999).

Los datos recientes apuntan a una tasa de aumento del CO₂ y del resto de GEIs a lo largo del siglo XX sin precedentes en los últimos 20.000 años, si bien es cierto que ese aumento no ha sido uniforme, estando sujeto en el corto plazo, no lo olvidemos, a la variabilidad natural del clima.

El CO₂ es el GEI que más contribuye al efecto invernadero, seguido de lejos por el metano (CH₄)⁹², los halocarbonos y el óxido nitroso (N₂O) (Figura 2.24).

⁹² Uriarte, A.: **La influencia del metano en el clima**. Revista electrónica RAM, n° 19 (Marzo 2004). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero19/elmetano.asp>. Véase también la referencia 22 de la bibliografía.

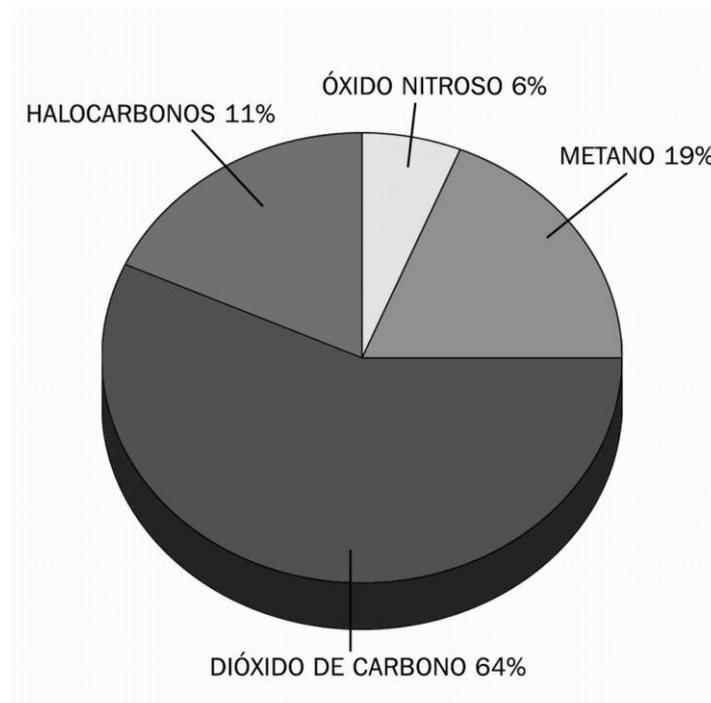


Figura 2.24

Contribución al calentamiento global de los principales gases de efecto invernadero. Adaptado del Segundo Informe del IPCC (1995).

Aparte de las emisiones directas de los GEIs a la atmósfera, las actividades humanas emiten también contaminantes y aerosoles con un impacto en el sistema climático difícil de evaluar. Por ejemplo, sabemos que los compuestos reactivos del nitrógeno (los NO_x ⁹³) interaccionan con los GEIs. Tanto las emisiones de NO_x como las de monóxido de carbono (CO) son casi en su mayoría de origen antrópico.

Si importante es conocer bien como evolucionan las concentraciones de los diferentes GEIs, no lo es menos saber cual será su comportamiento en la atmósfera. Cada GEI presenta un tiempo medio de residencia característico. Mientras que una molécula de CO_2 puede flotar en el aire como un gas inerte durante un periodo que oscila entre los 5 y los 200 años, para el metano el tiempo medio es de 12 años y para el óxido nítrico 114 años. Un caso extremo sería el del perfluorometano (CF_4), con más de 50.000 años de vida media, aunque, por suerte, sus emisiones son pequeñas en términos relativos.

Desde el inicio de la revolución industrial (hacia 1750) las emisiones de los principales GEIs no han parado de crecer. Los datos del Cuadro VI y las gráficas de la Figura 2.25 no dejan lugar a dudas. En el caso del CO_2 , la mayoría de las emisiones son debidas a la quema de los combustibles fósiles (con el petróleo, principal “motor” de nuestra economía, a la cabeza), con un importante porcentaje debido también a la deforestación. La distribución del dióxido de carbono es bastante homogénea, pudiéndose confeccionar gráficas similares a la de Hawai (véase la Figura 2.3 en el apartado 2.1) en otros observatorios repartidos por todo el mundo.

⁹³ NO y NO_2 .

Cuadro VI	CAMBIOS OBSERVADOS EN LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEIs)
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de un 30% en la concentración de dióxido de carbono (CO₂) desde 1750. • Aumento de un 150% en la concentración de metano (CH₄) desde 1750. • Aumento de un 17% en la concentración de óxido nítrico (N₂O) desde 1750. • Aumento durante los últimos 50 años en la concentración de halocarbonos y de hexafluoruro de azufre (SF₆). • Disminución del ozono estratosférico (O₃) en el periodo 1970-2000, con importantes variaciones altitud-latitud. 	

FUENTE: Elaboración propia, a partir de los datos del IPCC (2001).

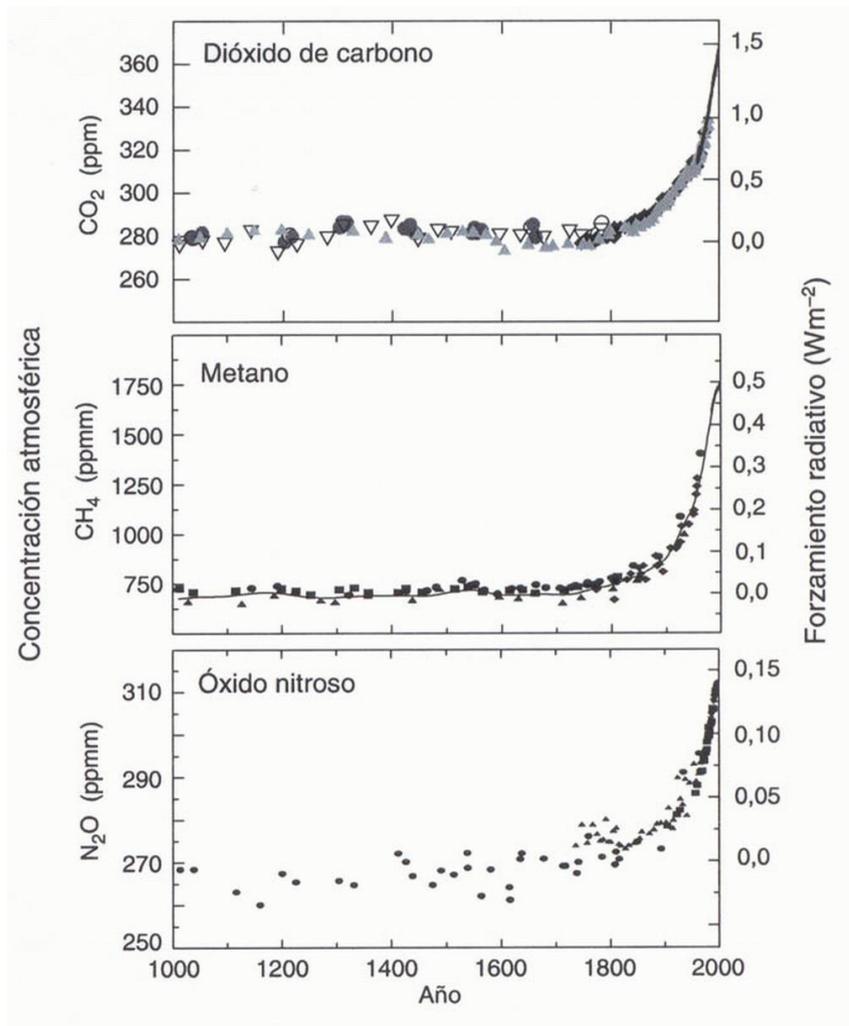


Figura 2.25

Evolución de la concentración atmosférica del dióxido de carbono, metano y óxido nítrico durante el último milenio. Obsérvese como a partir de 1750 (inicio de la Revolución Industrial) las tres curvas inician una tendencia al alza, suave al principio y muy acusada en las últimas décadas. Fuente: Tercer Informe del IPCC (2001).

La concentración que más ha aumentado es la del metano, pasando de 700 ppm⁹⁴ durante el periodo 1000-1750 hasta 1.750 ppm en el año 2000. Su procedencia no es sólo debida a las actividades humanas (agricultura, ganadería, vertederos, explotaciones de gas natural...) sino que también existen importantes fuentes naturales como los humedales. Pese al espectacular incremento de un 150% en los últimos 250 años (Cuadro VI), desde principios de la década de los 90 del siglo XX se detecta una estabilización en su tasa de crecimiento, que podría justificarse, en parte, por el cierre y abandono de muchas explotaciones de petróleo y gas tras la desintegración de la antigua URSS, así como a la mejora en las técnicas de cultivo de los campos de arroz asiáticos⁹⁵.

En cuanto al óxido nitroso, también de procedencia mixta, de momento no se conoce con exactitud la localización de todas sus fuentes, siendo mucho más difícil su estudio. Su tasa de aumento desde 1750 es casi diez veces menor que la del metano (Cuadro VI).

Los halocarbonos (compuestos halocarbonados) de origen exclusivamente antrópico, empezaron a sintetizarse bien entrado el siglo XX como alternativa de la industria química a las sustancias tóxicas que por aquel entonces (años 40 y 50) se usaban en los circuitos de refrigeración. Los CFCs (clorofluorocarbonos) entraron en escena, sustituyendo al tóxico amoniaco de los circuitos de todas las neveras y aparatos de refrigeración domésticos e industriales. Su concentración empezó a aumentar exponencialmente en la atmósfera, sin que nadie por aquel entonces viera inconveniente alguno a su uso. No fue hasta mediados de los años 80 cuando se detectó sobre la Antártida el famoso “agujero” de la capa de ozono (O₃) y se encontró una clara conexión entre este hecho y la liberación en la alta atmósfera de átomos de cloro procedentes de los CFCs, que en presencia de radiación solar rompían de forma muy efectiva las moléculas del ozono.

Ante la inminente amenaza que suponía para toda la humanidad una reducción tan drástica en la concentración del ozono estratosférico (sin ozono a esos niveles de la atmósfera las radiaciones ultravioletas más peligrosas logran alcanzar el suelo), se firmó a finales de 1987 el Protocolo de Montreal, que limitaba el uso de esas sustancias prohibiendo muchas de ellas.

La celeridad, sin precedentes, con la que se firmó aquel acuerdo internacional invita al optimismo sobre la llegada a acuerdos similares a corto plazo, que limiten de forma efectiva la emisión de GEIs a la atmósfera. Para la especialista en Química de la Atmósfera Sherry Rowland: “Tal vez haga falta una sorpresa climática para que se empiece a prestar atención a la salud del planeta”⁹⁶. Sin duda, el “efecto sorpresa” que provocó en la opinión pública el tema del ozono, precipitó los acontecimientos, tomándose medidas urgentes por parte de los políticos.

El ritmo de destrucción del ozono alcanzó su máximo a mediados de la década de los 90, detectándose una disminución desde entonces. No obstante, hay que tener en cuenta que algunos CFCs tienen un tiempo de residencia en la atmósfera de varias décadas, por lo que sus efectos perniciosos seguirán notándose aún algunos años más.

Como alternativa a los CFCs empezaron a usarse principalmente los hidrofluorocarbonos (HFCs, HCFCs...) que, aunque no destruyan ozono, no hay que olvidar que son GEIs y que como tales contribuyen al calentamiento global.

⁹⁴ Es decir, 700 moléculas de CH₄ por cada mil millones de moléculas de aire. En los textos anglosajones la unidad ppm es equivalente a ppb (partes por billón), ya que un billón americano equivale a mil millones de los nuestros.

⁹⁵ Referencia de la nota 92.

⁹⁶ National Geographic España – Septiembre 2002.

Mientras que el ozono en la estratosfera, que se comporta como un GEI, ha disminuido su concentración desde 1970 (Cuadro VI), el ozono troposférico, contaminante secundario (no directo) de la combustión, ha aumentado un 35% desde ese mismo año, registrándose las mayores concentraciones en las grandes áreas urbanas, sobre todo en época estival.

Una vez enumerados y analizados los principales cambios que se registran en el sistema climático, nos queda por ver cuales son las características (componentes, mecanismos, ciclos...) de tan extraordinario y complejo engranaje, para entender de qué forma están influyendo esos cambios y poder cuantificar así cuál es nuestra parte de culpa en este delicado asunto.

3. La ciencia del clima terrestre y sus variaciones.



3.1.- El sistema climático

Tradicionalmente los estudios del clima se ocupaban sólo de la atmósfera, una tarea a la que se dedicaban en exclusiva meteorólogos y climatólogos. A medida que fue aumentando nuestro conocimiento del medio físico que nos rodea, se fue teniendo cada vez más claro que la atmósfera no actúa de forma aislada, sino que forma parte de un entramado global, al que llamamos sistema climático.

El sistema climático está formado por cinco componentes o subsistemas bien diferenciados que interactúan entre sí, intercambiando entre ellos masa, energía y movimiento (Figura 3.1). Cada uno de ellos presenta un tiempo de respuesta característico ante una misma perturbación o forzamiento. Esta variedad de escalas introduce bastantes incertidumbres en las predicciones climáticas tan de moda.

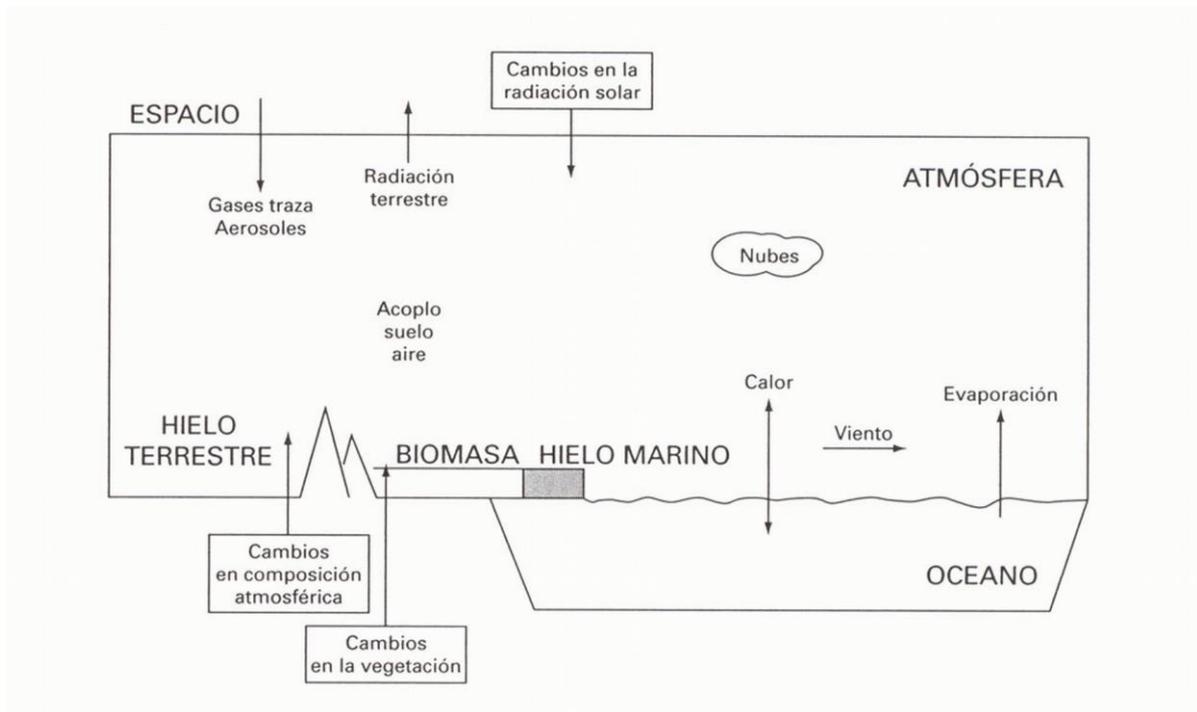


Figura 3.1

Representación esquemática de los principales componentes del sistema climático terrestre y los procesos implicados. Las múltiples interacciones existentes entre todos y cada uno de los subsistemas dan como resultado un sistema natural enormemente complejo.

Fuente: Ruiz de Elvira (1999) [Referencia 36 de la bibliografía].

Los cinco componentes son los siguientes:

- Atmósfera
- Hidrosfera
- Criosfera
- Litosfera
- Biosfera

Cualquier estudio serio sobre el cambio climático deberá tener en cuenta, en mayor o menor medida, cada una de las partes. Los cinco componentes deben considerarse como un todo, acoplados entre sí, y no de forma separada. Ante este nuevo enfoque, la investigación en cualquiera de las ramas del saber implicadas es tan importante como el ensamblaje final de todas las piezas (los diferentes resultados).

Obtener una visión conjunta del clima está, hoy por hoy, al alcance de muy pocas personas en todo el mundo. Probablemente James Hansen, Director del Instituto Goddard de la NASA, sea una de ellas. En un reciente artículo afirmaba que: “El análisis objetivo del calentamiento global requiere un conocimiento cuantitativo de tres cuestiones: la sensibilidad del sistema climático a las perturbaciones inducidas, la magnitud de las agresiones provocadas por la actividad humana y el tiempo que el clima tarda en reaccionar ante tales perturbaciones”⁹⁷. Hablaremos de todo esto a lo largo del presente capítulo.

⁹⁷ Hansen, J.: **El calentamiento global**. Investigación y Ciencia, nº 332 (Mayo 2004).

La definición de clima que dábamos al principio del apartado 1.1 podemos ampliarla ahora, y decir que el clima sería el comportamiento medio del sistema climático (no sólo de la atmósfera) durante periodos largos de tiempo.

La *atmósfera* es el componente central del sistema climático y el que presenta unas escalas de movimiento más rápidas y diferentes, que van desde los segundos en los que puede evolucionar un pequeño remolino turbulento en el aire, hasta las dos o tres semanas de vida media de una borrasca típica atlántica.

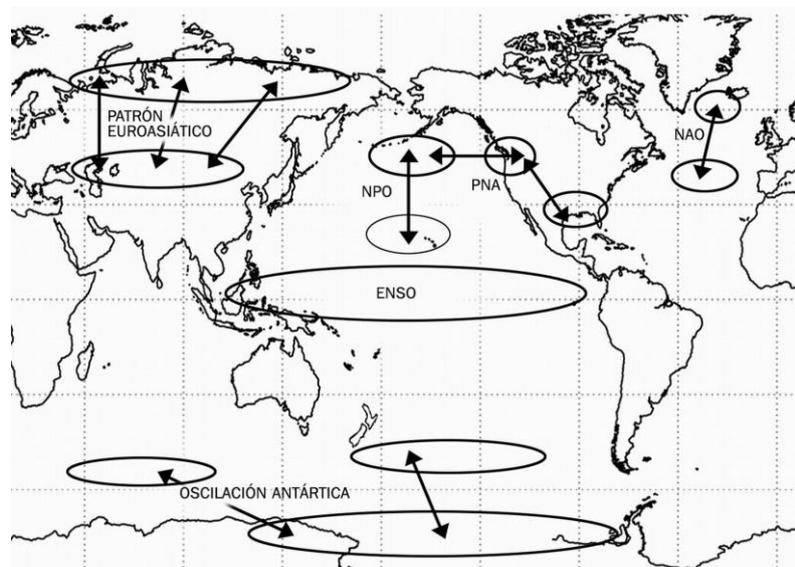
Esos movimientos en el seno de la atmósfera están inducidos principalmente por el calentamiento desigual que se produce entre unas zonas y otras de la superficie terrestre, siendo muchos y muy variados los factores secundarios que intervienen además del Sol.

Aparte del estudio de la atmósfera, el de los océanos y las zonas polares puede ayudarnos a resolver la complicada ecuación que rige el comportamiento global del clima.

La *hidrosfera* incluye toda el agua líquida que hay en la Tierra (océanos, ríos, aguas subterráneas...), y en ella los movimientos son mucho más lentos que en la atmósfera. Ante un forzamiento, como puede ser un aumento de la temperatura, el tiempo de respuesta varía desde las semanas o meses en los primeros cien metros del océano (capa superficial) hasta los siglos o milenios en las capas más profundas.

Los océanos presentan una gran inercia térmica; es decir, tienen una gran capacidad de retener calor sin apenas elevar su temperatura, justo lo contrario que ocurre en la atmósfera, que distribuye rápidamente ese calor. Ambos están fuertemente acoplados, y mientras que los océanos son los verdaderos reguladores de la temperatura planetaria, captando la mayor parte de la energía solar incidente⁹⁸, la atmósfera es el “gran comunicador” del sistema climático.

Aunque tanto el aire como el agua son medios fluidos continuos, esa noción de continuidad queda un poco difuminada cuando observamos algunos comportamientos “a distancia” (teleconexiones) en la atmósfera. Son varias las teleconexiones detectadas (Figura 3.2) y representan en la actualidad un interesante campo de estudio, de cara a perfeccionar nuestro entendimiento sobre las circulaciones atmosférica y oceánica.



⁹⁸ Los océanos cubren aproximadamente el 71% de la superficie terrestre y contienen el 97% del agua del planeta.

Figura 3.2

Las principales teleconexiones climáticas. De todas ellas las más conocidas son el ENSO (teleconexión asociada al fenómeno El Niño) y las oscilaciones del norte del Atlántico (NAO) y del Pacífico (NPO).
Cortesía de José Antonio Palao.

La *criosfera*, como ya hemos visto, está constituida por todas las masas de hielo y la cubierta de nieve del planeta, e influye decisivamente en el sistema climático, sobre todo a través del albedo, pues la mayor o menor cobertura de hielo y nieve supone una mayor o menor cantidad de radiación solar reflejada, con las implicaciones que esto tiene en el balance global de energía. Las grandes masas de hielo juegan un papel clave a escalas de tiempo de varios miles de años. En las épocas frías (periodos glaciales) las capas de hielo cubren una mayor superficie del planeta, reduciendo su tamaño y extensión durante los periodos cálidos (interglaciales) como el actual.

Los tiempos de residencia de una molécula de vapor de agua oscilan entre los apenas nueve días en la atmósfera, dos meses en la capa superficial marina, cientos a miles de años en el océano profundo y hasta 100.000 años en el casquete polar antártico, de lo que dan fe las burbujas de aire primitivo atrapadas en los testigos de hielo de Vostok.

La *litosfera* sería la capa superior de la parte sólida de la Tierra, tanto continental como oceánica, que comprende todas las rocas de la corteza terrestre y la parte fría, principalmente elástica, del manto superior⁹⁹. Este componente es el que tiene el mayor tiempo de respuesta (millones de años), pudiéndolo considerar, salvo a escala geológica, como un invariante. La litosfera interacciona de forma importante con la atmósfera, por ejemplo a través del rozamiento con el suelo, lo que provoca una importante disipación de energía cinética (asociada al movimiento de las masas de aire).

El quinto componente del sistema climático es la *biosfera*, de la que formamos parte como seres vivos que somos, e incluye desde las pequeñas bacterias hasta los grandes animales y plantas de los continentes y mares. En el apartado 3.3 veremos la influencia que tienen los bosques, junto a los océanos, en el llamado “ciclo del carbono”.

El sistema climático es un sistema abierto para la energía y cerrado para el intercambio de masa con el exterior. Los diferentes subsistemas nunca están en equilibrio entre sí, siendo este hecho lo que determina la variabilidad natural que observamos a todas las escalas, y que puede decirse que es “lo único constante en el clima”¹⁰⁰. En los últimos tiempos se ha empezado a detectar también un desequilibrio energético que preocupa a los científicos, por las repercusiones que pudiera tener en el futuro inmediato.

Las variaciones en el sistema climático son la respuesta conjunta de los cinco componentes a forzamientos externos o a causas internas generadas por inestabilidades y mecanismos de realimentación, dando lugar estos últimos a procesos no lineales que en algunos casos modifican incluso los forzamientos externos (aquellos que permanecen inalterables aunque cambie el clima). Estos forzamientos pueden ser de tipo astronómico (variaciones en la radiación solar incidente, en los parámetros orbitales terrestres o el impacto de grandes meteoritos¹⁰¹) o terrestre (por ejemplo, el aumento de las emisiones antropogénicas de GEIs).

⁹⁹ Definición tomada del glosario de términos elaborado por el IPCC.

¹⁰⁰ Referencia 5 de la bibliografía.

¹⁰¹ Como el que hace aproximadamente 65 millones de años pudo haber provocado la desaparición de los dinosaurios, entre otras muchas especies, a causa del brusco enfriamiento global inducido por la inyección a la atmósfera de una enorme cantidad de aerosoles tras el brutal impacto. Con un diámetro

Entre los forzamientos internos, mucho más difíciles de analizar, podríamos citar las variaciones de la temperatura superficial del mar, los cambios de salinidad en determinadas zonas del océano, los cambios en el albedo (reflectividad superficial) o la probable “cuasi-intransitividad” del sistema climático. Detengámonos en esto último.

Un sistema natural puede ser *transitivo*, *intransitivo* o *cuasi-intransitivo*. Los sistemas transitivos o estables son aquellos que una vez sometidos a una perturbación, pasado un tiempo, vuelven a su situación inicial. En el lado contrario tendríamos los sistemas intransitivos, que una vez alterados se dirigen hacia un nuevo estado de equilibrio, diferente del original. Según parece, el sistema climático no se ajusta de forma permanente a ninguno de esos dos modos de actuación, pero sí que lo hace de forma transitoria, pudiendo comportarse durante ciertos periodos de tiempo como un sistema transitivo, y de vez en cuando, por sorpresa, cambiar hacia un nuevo estado. En resumen: “La casi intransitividad es una característica inherente del sistema climático que, por razones [aún] desconocidas, provoca que algunas componentes (...) adopten patrones climáticos antes desconocidos”¹⁰².

Este comportamiento caótico, que no aleatorio, aparece de forma muy clara en la atmósfera y, desde que el meteorólogo Edward N. Lorenz lo descubriera en 1962, ha supuesto una verdadera revolución en el campo de la Física.

Todo sistema caótico es extraordinariamente sensible a las condiciones iniciales (las que definen su estado en un determinado instante), lo que impone un límite a su predecibilidad. En palabras del propio Lorenz: “La dependencia sensible de las condiciones iniciales en sistemas dinámicos no lineales [como la atmósfera] es la responsable de la aparente aleatoriedad en los procesos observados”. Es precisamente esa no linealidad (el comportamiento más común en la Naturaleza) la que hace que pequeñas fluctuaciones en una parte del sistema se conviertan en cambios desproporcionados a medida que pasa el tiempo. Lorenz ilustró a la perfección esta idea con su famoso “Efecto Mariposa”, preguntándose si el aleteo de una mariposa en Brasil podría originar un tornado en Texas.

El concepto de caos no es fácil de entender, pues es algo que parece azar pero no lo es. Debemos de aceptar que existe en la Naturaleza un orden superior que escapa a nuestra percepción (subjetiva) de la realidad. Podríamos decir que se trata de un tipo de orden sin periodicidad alguna, que lo impregna todo en el medio natural, dotándolo de una belleza sin parangón, sea cual sea la escala en la que nos movamos.

Lorenz, en un intento por simplificar al máximo el problema de la predicción meteorológica, estableció un sencillo modelo hidrodinámico de atmósfera y planteó un sistema no lineal de tres ecuaciones diferenciales a resolver (véase el pie de la Figura 3.3). Siguiendo la premisa de Bjerknes¹⁰³, bastaba con establecer un conjunto de ecuaciones que dieran cuenta de las leyes básicas que operan en el aire para, a partir de un conjunto simultáneo de observaciones meteorológicas (estado inicial), obtener un pronóstico del tiempo.

Con ese planteamiento determinista, Lorenz se puso manos a la obra y partiendo de unas condiciones iniciales obtuvo una solución a su sistema de ecuaciones, pero al repetir el cálculo varió, sin darse cuenta, una cifra decimal en uno de los datos de entrada, y la nueva solución poco tenía que ver con la primera. Al advertir este

estimado de 10 kilómetros, dio lugar al gigantesco cráter de Chicxulub, localizado al norte de la actual península de Yucatán, en México.

¹⁰² Tomado de una clase magistral de Eugene S. Takle, profesor de la Universidad Estatal de Iowa. URL: http://www.meteor.iastate.edu/gccourse/model/basic/basic_lecture_es.html

¹⁰³ Vilhelm Bjerknes (1862-1951): Meteorólogo noruego, considerado el padre de la Meteorología moderna.

sorprendente hecho, Lorenz optó por representar en una gráfica (espacio de fases) las diferentes soluciones (puntos en ese espacio) que iba obteniendo al ir modificando infinitesimalmente los datos de partida. Cuál debió ser su sorpresa al comprobar que los diferentes puntos no se distribuían aleatoriamente, sino que iban agrupándose en órbitas, dibujando a su vez una extraña figura en forma de mariposa (toda una premonición). Acababa de descubrir lo que desde entonces se conoce como “el atractor de Lorenz” (Figura 3.3). El caos llamaba a su puerta y hacía temblar por tercera vez en el siglo XX los pilares de la Física clásica¹⁰⁴.

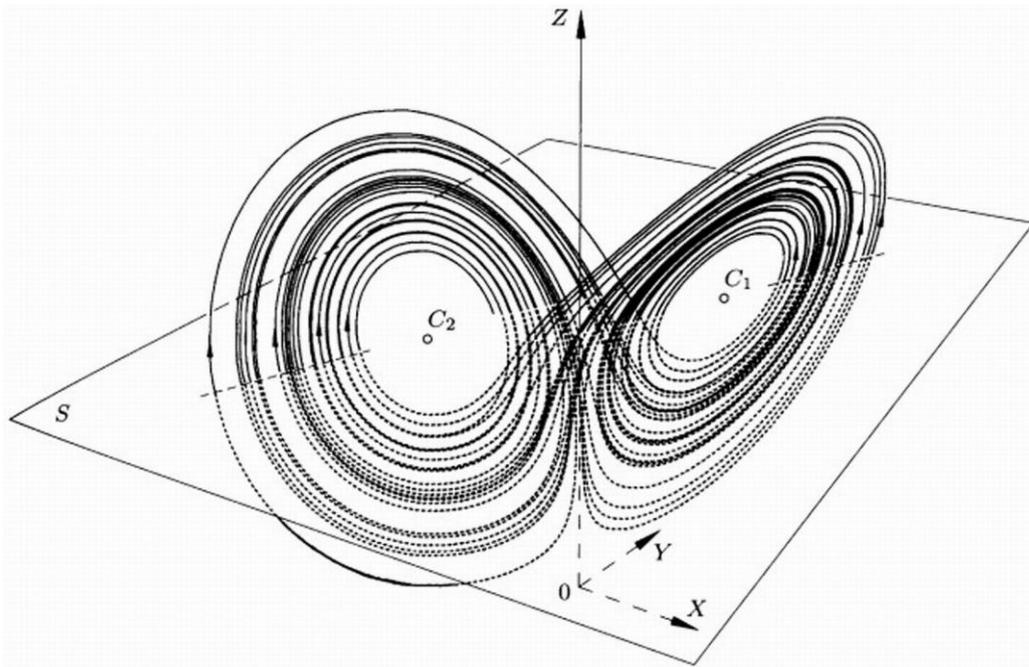


Figura 3.3

Representación gráfica tridimensional del atractor de Lorenz. Para los amantes de las matemáticas, las diferentes soluciones (x, y, z) del siguiente sistema no lineal de ecuaciones: $dx/dt = -x+ay$; $dy/dt = bx-y-xz$; $dz/dt = xy-cz$, tomando como valores de las constantes: $a=10$, $b=28$ y $c=8/3$, forman en el espacio de fases el atractor de la figura.

Fijándonos ahora en el sistema climático, el atractor de Lorenz impone una clara restricción a los posibles cambios que se puedan producir en el clima, pues las únicas soluciones (estados futuros) posibles son las que forman parte del atractor. El problema es que el atractor es tan grande como queramos (presenta infinitas órbitas y bucles), sin que sepamos de antemano donde caerá la solución correspondiente a unas determinadas condiciones iniciales.

La cuasi-intransitividad del sistema climático se entiende ahora mejor si pensamos que durante una fase estable del clima todas las posibles soluciones del sistema quedan restringidas a una determinada órbita en el espacio de fases. En esta situación los cambios que se produzcan serán bastante previsibles. Sin embargo, nada impide, a priori, que en un determinado momento una solución salte de una órbita a otra, cambiando el clima.

¹⁰⁴ Las otras dos revoluciones de la Física fueron la Mecánica Cuántica y la Relatividad

Bajo este nuevo enfoque, “las transiciones entre las condiciones glacial e interglacial representan saltos entre dos modos de comportamiento, estables pero muy diferentes, del sistema océano-atmósfera”¹⁰⁵. Este tipo de cambios bruscos, como el ocurrido al final de la última glaciación, hace unos 13.000 años, aparece en multitud de indicadores climáticos y plantea un interesante debate en la actualidad (véase el apartado 3.5).

Llegados a este punto, podemos plantearnos la pregunta que da título a este libro de la siguiente manera: ¿Las actividades humanas son capaces de inducir cambios orbitales en el espacio de fases? Tenemos conocimiento de la gran variedad de flujos que existen entre los cinco componentes climáticos, así como de la presencia de forzamientos externos (Figura 3.1). Aunque entendamos bien cada uno de ellos por separado, teniendo en cuenta, incluso, la influencia antropogénica, la cosa se complica enormemente al intentar analizar todo el conjunto, pues nos vemos obligados a determinar el signo, positivo o negativo, de los diferentes bucles de realimentación que tienen lugar en el sistema.

3.2.- Los mecanismos de realimentación

Un mecanismo de realimentación o *feedback* es aquel que modifica la “sensibilidad climática” del sistema, definiendo esto último como la respuesta del sistema climático ante un determinado forzamiento. Las anomalías o fluctuaciones que continuamente tienen lugar en la atmósfera, se ven reforzadas o amortiguadas por estos mecanismos compensatorios, garantizando así la estabilidad global del clima (equilibrio dinámico permanente).

Los mecanismos de realimentación pueden ser negativos o positivos, dependiendo de que contrarresten o tiendan a amplificar esas anomalías. Mientras que los negativos son los responsables de mantener el clima equilibrado (comportamiento restringido a una órbita del atractor de Lorenz), los positivos están siempre intentando lo contrario; es decir, desestabilizar al sistema, llevándolo hacia un nuevo estado de equilibrio.

Un ejemplo típico de realimentación positiva es el que ocurre habitualmente en la criosfera, donde un calentamiento/enfriamiento anómalo se refuerza por la contracción/expansión de los casquetes polares y los glaciares. Como ya hemos comentado con anterioridad, en la elevada reflectividad del hielo está la clave del asunto.

Si los *feedbacks* de un signo compensan a los otros, la estabilidad del sistema climático no se verá amenazada. El problema puede venir cuando alguna anomalía descompense el equilibrio existente, de manera que empiecen a dominar los mecanismos de realimentación positivos sobre los negativos. El resultado final de este proceso “sin control” será un cambio climático en el sistema¹⁰⁶.

Tenemos constancia de cambios climáticos ocurridos en el pasado como resultado de algunas anomalías extraordinarias de origen natural, pero lo que no sabemos aún es si las anomalías que actualmente estamos detectando en el clima pueden llevarnos hacia cambios de idéntica o parecida magnitud.

Pensando en el dióxido de carbono que emitimos a la atmósfera, al ser un GEI contribuye al aumento de la temperatura superficial planetaria, lo que implica a su vez una mayor evaporación de los océanos que aportan más vapor de agua a la atmósfera que, al ser también un GEI, contribuirá igualmente al calentamiento global. Estaríamos

¹⁰⁵ Broecker, W. S.; Denton, G. H.: **¿Qué mecanismo gobierna los ciclos glaciales?** Referencia 42 de la bibliografía.

¹⁰⁶ Referencia 32 de la bibliografía.

ante otro mecanismo de realimentación positivo, cuyo origen está en nuestras emisiones contaminantes.

La subida de la temperatura también es el origen de un bucle negativo, pues al calentarse el suelo se favorece la convección y la formación posterior de tormentas, que contribuyen a refrescar el ambiente (descenso térmico).

Estos sencillos bucles de realimentación se relacionan a su vez con otros muchos que habitualmente conectan la atmósfera con el océano. Así, por ejemplo, la mayor evaporación de los océanos, como resultado del calentamiento superficial, dará lugar también a cambios en las condiciones meteorológicas, que a su vez provocarán cambios en la dinámica atmosférica (Figura 3.4), con las implicaciones tan importantes que esto tiene en el clima de una determinada región.

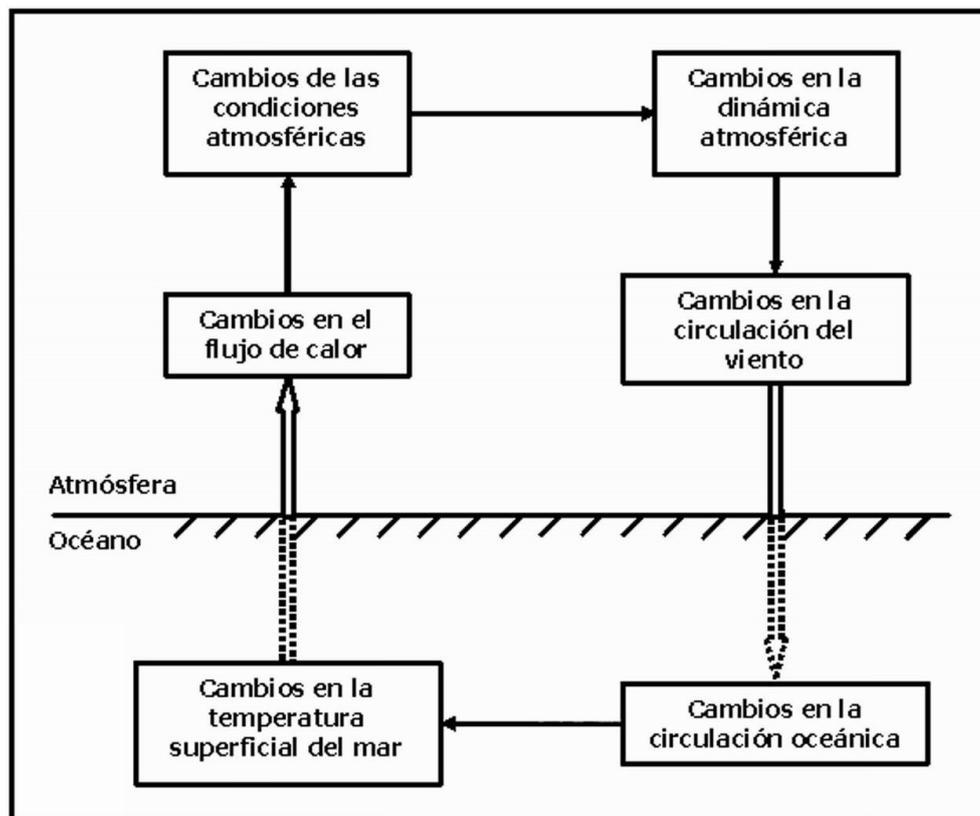


Figura 3.4

Realimentación a gran escala del sistema océano-atmósfera. Adaptado de Teramoto (1981).

Tal y como se comentó al principio del apartado 2.4, esta conexión “dinámica” entre la temperatura y los patrones de precipitación o, yendo más allá, entre las emisiones de GEIs y el comportamiento de la lluvia o los temporales de viento, no es fácil de cuantificar por el solapamiento existente entre los diferentes mecanismos de realimentación implicados.

Como primer paso hacia una comprensión de esta compleja dinámica interna, tenemos que ser capaces de estimar bien cuáles son los forzamientos radiativos (en términos de energía) de los diferentes actores que entran en escena.

El balance energético del sistema Tierra-Atmósfera establece que la energía entrante al sistema (de onda corta y proveniente del Sol) debe ser igual a la saliente (de

onda larga y emitida por todo el planeta hacia el espacio). Si el total de energía solar que incide en el techo de la atmósfera (equivalente a 340 W/m^2 de radiación neta incidente) lo dividimos en 100 unidades; en números redondos, 50 son absorbidas por la superficie terrestre, 20 por la atmósfera y 30 son devueltas al espacio, lo que se conoce como albedo planetario. Sumando a estas 30 unidades otras 70 provenientes de la radiación terrestre, obtenemos las 100 unidades que buscamos.

El problema que nos plantean algunos científicos es que “la Tierra está ahora energéticamente desequilibrada”¹⁰⁷, y si bien nos llegan del Sol 340 W/m^2 , devolvemos al espacio una cantidad ligeramente inferior (entre $0,5$ y 1 W/m^2 menos). En consecuencia, el planeta se está calentando. Aunque sería un error pensar que ese exceso de energía “atrapada” es debido sólo al efecto invernadero de origen antrópico, en la actualidad nuestra influencia sobre el clima excede a la del resto de factores naturales¹⁰⁸, encontrándonos, quizás, cerca del umbral de estabilidad del sistema.

Se han calculado razonablemente bien algunos forzamientos radiativos ocurridos durante la época instrumental (Figura 3.5). Aunque los valores correspondientes a los GEIs se estimaron con bastante precisión en general, otros forzamientos, como el efecto global de algunos aerosoles, están sujetos a revisión en el futuro, cuando comprendamos mejor el comportamiento climático.

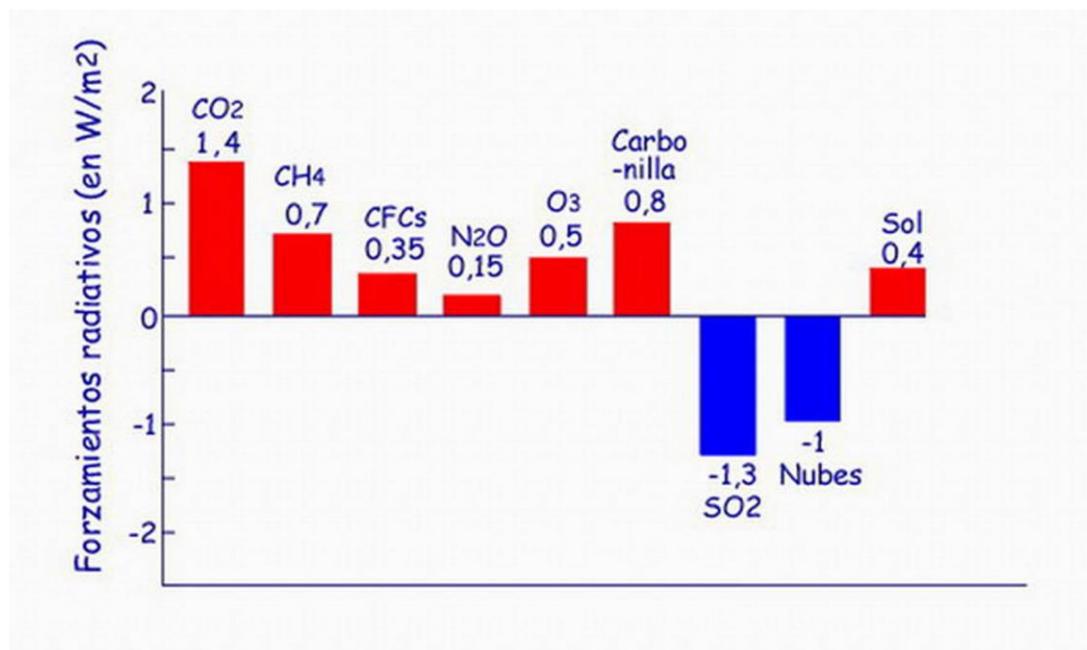


Figura 3.5

Estimación de los principales forzamientos radiativos en superficie (en W/m^2) ocurridos entre los años 1850 y 2000. El forzamiento de la carbonilla (aerosol de origen antrópico) y el de la nubosidad son los más inciertos. Fuente: Hansen, J. E. y Sato, M. (2001). Cortesía de Antón Uriarte.

Salvo en el forzamiento solar ($+0,4 \text{ W/m}^2$), en todos los demás interviene en mayor o menor medida el ser humano. Los dos únicos que contribuyen negativamente, compensando en parte el calentamiento debido a los GEIs, al ozono (troposférico) y a la carbonilla (hollín), son la presencia de sulfatos (SO_2) en la atmósfera y las nubes.

¹⁰⁷ Referencia de la nota 97.

¹⁰⁸ Ibid.

Hay que advertir que estas últimas pueden contribuir de forma positiva (calentamiento) o negativa (enfriamiento) dependiendo de la altura a la que se encuentren y de cuál sea su espesor (véanse las figuras 3.6 y 3.7). El vatio por metro cuadrado con signo negativo que aparece en la Figura 3.5 se refiere al forzamiento neto de las nubes a escala global. “En conjunto, las nubes enfrían el planeta más de lo que lo calientan, pero las características de las nubes y su efecto sobre el clima podrían cambiar imprevisiblemente en un mundo de invernadero”¹⁰⁹.



Figura 3.6

Las nubes altas provocan un calentamiento neto de la superficie terrestre. En la imagen, bandas de cirros cruzando los cielos de Madrid. Autor: Francisco José Rodríguez.



Figura 3.7

¹⁰⁹ Schneider, S. H.: **Un clima cambiante**. Referencia 42 de la bibliografía.

Las nubes bajas y las de evolución provocan un enfriamiento neto de la superficie terrestre. En la imagen, cielo amenazante con varias estructuras globulares (*mammals*) descolgándose de una nube de tormenta. Fotografía tomada desde Coslada (Madrid) el 26 de mayo de 2004. Autor: Francisco José Rodríguez.

En un planeta equilibrado desde el punto de vista energético, los forzamientos positivos compensan a los negativos, no existiendo más anomalías en el sistema climático que las debidas a la variabilidad natural. Si los positivos empiezan a dominar sobre los negativos, la Tierra retendrá cada vez más calor y la nueva fase cálida nos conducirá hacia una nueva realidad climática que, hoy por hoy, sólo podemos intuir.

Volviendo al dióxido de carbono que, proveniente de la quema de los combustibles fósiles, liberamos a la atmósfera, veamos ahora de que manera este forzamiento está alterando el “ciclo del carbono”, o lo que es lo mismo, sepamos si los bosques y los océanos; los principales protagonistas junto a la atmósfera de este ciclo, son capaces de absorber el excedente de CO₂ de origen antrópico.

3.3.- El ciclo del carbono: Fuentes y sumideros de CO₂

El ciclo del carbono es un mecanismo regulador complejo debido a la enorme cantidad de transformaciones que sufre el carbono en nuestro planeta¹¹⁰. Se han identificado numerosos procesos naturales que suministran cantidades importantes de dióxido de carbono a la atmósfera, mayores que las debidas a la quema de combustibles fósiles o a la deforestación.¹¹¹

Nosotros analizaremos únicamente los principales mecanismos y las claves que éstos encierran, teniendo en cuenta que cuanto mayor sea nuestro conocimiento de este importante ciclo natural, en mejor disposición estaremos de saber si nuestras emisiones representan o no una amenaza real para el equilibrio del sistema climático.

El ciclo del carbono puede descomponerse a su vez en dos ciclos acoplados que suceden a diferentes velocidades (algo parecido a lo que ocurre entre el plato y el piñón de una bicicleta de carreras). El ciclo más rápido es el biológico, dominado por la actividad fotosintética de las plantas y el fitoplancton marino. El más lento es el biogeoquímico, encargado de regular la transferencia entre los suelos y la atmósfera.

Sabemos que “aproximadamente las tres cuartas partes de las perturbaciones directas causadas por el hombre al ciclo del carbono se deben a la quema de combustible fósil, cuyas emisiones superan actualmente las 6 Gt C/año¹¹² y siguen aumentando”¹¹³.

De los 7.600 millones de toneladas de CO₂ que anualmente emitimos a la atmósfera, algo menos de la mitad (47,4%) se queda retenido en ella, actuando como GEI¹¹⁴, y el resto (4 Gt) es absorbido a partes iguales por los bosques y los océanos.¹¹⁵ Ambos atrapan, por tanto, aproximadamente la mitad del carbono que emitimos, actuando como sumideros. La cuestión está en saber si han alcanzado o no su capacidad límite de absorción.

Pensando en los bosques, lo primero a tener en cuenta es que la capacidad de los árboles para absorber CO₂ varía dependiendo de cual sea su etapa de desarrollo. Es

¹¹⁰ http://www.puc.cl/sw_educ/contam/cont/cont171.htm

¹¹¹ http://www.meteor.iastate.edu/gccourse/chem/carbon/carbon_lecture_es.html

¹¹² 6 gigatoneladas (métricas) de carbono al año, equivalentes a 6.000 millones de toneladas.

¹¹³ Apps, M. J.: **Bosques, el ciclo del carbono y el cambio climático**. Disponible en Internet. URL: <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS14-S.HTM>

¹¹⁴ Este CO₂ ocupa sólo un 0,032% del volumen total de la atmósfera, constituida en su mayor parte por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%).

¹¹⁵ Tréguer, P.: **¿El océano austral, pozo o fuente de CO₂?** Mundo Científico, nº 218 (Diciembre 2000).

conocido el hecho de que las plantas crecen más vigorosamente en ambientes ricos en dióxido de carbono. “Un ecosistema forestal actúa como *sumidero* (eliminación neta de CO₂ atmosférico) cuando hay un aumento de la suma de las existencias totales retenidas en la misma vegetación forestal [árboles y plantas] y las existencias derivadas de carbono orgánico en otros reservorios [el *humus* del suelo]”¹¹⁶.

Mientras que los bosques jóvenes usan el carbono de la atmósfera para crecer, los viejos dejan de absorber dióxido de carbono y pasan a liberarlo (Figura 3.8). “La vegetación terrestre consume anualmente para crecer 60.000 millones de toneladas de carbono, en un proceso que libera oxígeno. La demanda agotaría el carbono atmosférico si no fuera por el continuo abastecimiento a través de la respiración de las plantas y la descomposición de la materia orgánica [lo que ocurre en los bosques viejos]”¹¹⁷.



Figura 3.8

Aunque a nivel global los bosques absorben CO₂ de la atmósfera, únicamente los jóvenes actúan como “pozos” netos de carbono, justo lo contrario que los milenarios como el de la imagen: el bosque de árboles gigantes de Muir Woods, en las afueras de San Francisco, California (EEUU).

Teniendo en cuenta que los bosques se van haciendo cada vez más mayores y que los problemas de la deforestación y los incendios forestales están lejos de resolverse, parece claro que la capacidad de los bosques para actuar como sumideros de CO₂ es limitada, atrapando como máximo un 20% de nuestras emisiones a la atmósfera¹¹⁸.

Aunque una política internacional común en materia forestal pudiera compensar en parte nuestros excesos, la clave probablemente se encuentre en el mar, donde la cantidad de carbono disuelto es unas cincuenta veces mayor que la cantidad presente en la atmósfera¹¹⁹. Estamos por tanto ante la mayor reserva natural de carbono del planeta,

¹¹⁶ Referencia de la nota 113.

¹¹⁷ Appenzeller, T.: **El caso del carbono desaparecido**. National Geographic España – Febrero 2004.

¹¹⁸ Tomado de unas declaraciones del ex-Presidente del IPCC Robert Watson (ABC, 22 de julio de 2001).

¹¹⁹ Minster, J-F.; Merlivat, L.: **¿A dónde va el gas carbónico? El papel de los océanos**. Referencia 39 de la bibliografía.

un elemento químico que, además de formar parte del CO_2 , está presente en los carbonatos y compuestos orgánicos que contienen los océanos.

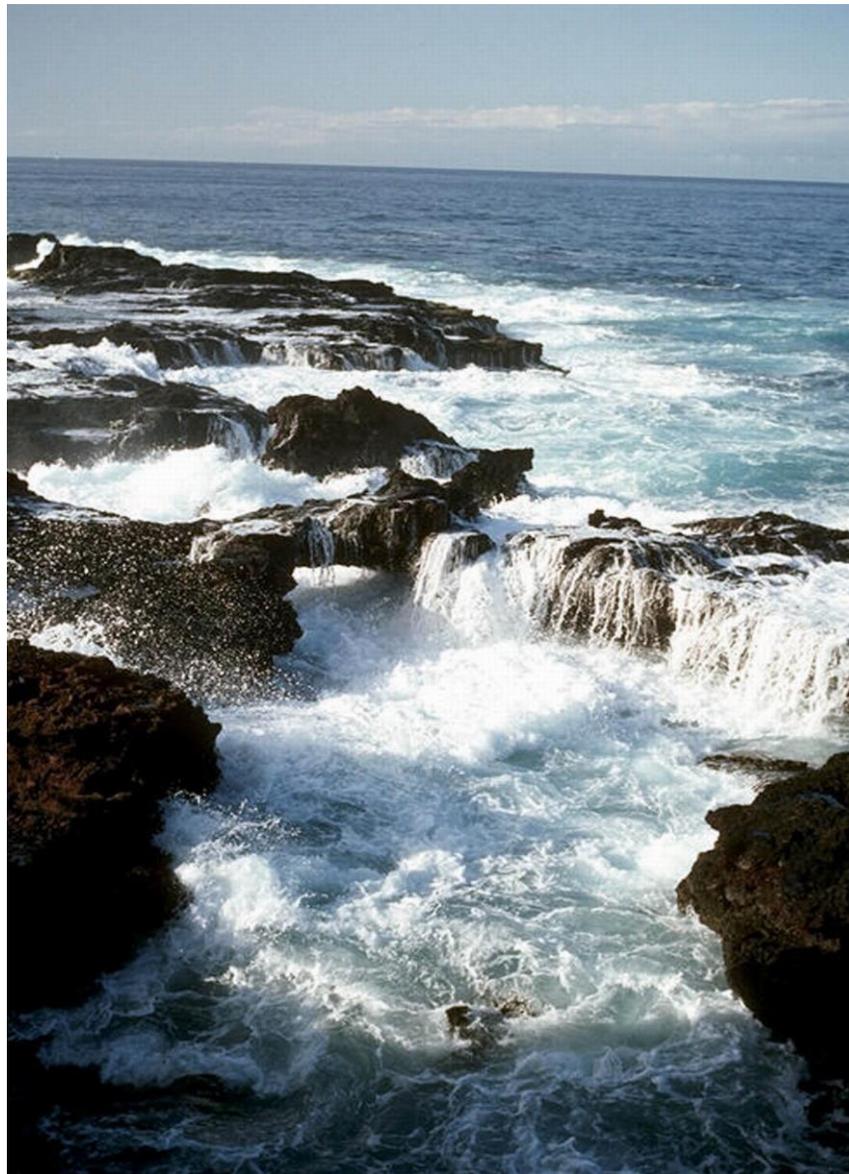


Figura 3.9

Los océanos y su intensa actividad biológica desempeñan un papel clave en el ciclo del carbono.

El dióxido de carbono es menos soluble cuanto mayor sea la temperatura del mar, de donde se deduce que las aguas tropicales actúan como fuentes de carbono y los mares fríos como sumideros. A nivel global, el océano se comporta como un pozo de carbono, “robando” a la atmósfera del orden de 2.000 millones de toneladas al año. Este enriquecimiento oceánico de CO_2 provoca importantes alteraciones en los procesos químicos involucrados.

Si bien hasta 1995 los científicos pensaban que la vegetación influía mucho más que el océano en el ciclo del carbono, una serie de campañas de observación a través de satélite, llevadas a cabo durante la segunda mitad de los años 90, desterró esta idea, llegándose a la conclusión de que el fitoplancton marino extraía casi tanto CO_2 de la

atmósfera y de la capa superficial del océano, como el conjunto de toda la vegetación terrestre.

Este dato tan revelador sigue siendo revisado en la actualidad, aunque todo apunta a que “la materia orgánica que más influye en el clima es la que se sumerge hasta las profundidades del océano antes de descomponerse”¹²⁰. Este mecanismo, conocido como “bomba biológica”, culmina con la formación de inmensos depósitos de sedimentos y de las bolsas de petróleo y gas natural que existen en el subsuelo oceánico.

El fitoplancton atrapa el CO₂ en las capas superficiales y lo va distribuyendo de arriba a abajo. A través de la cadena trófica, esos pequeños microorganismos sirven de alimento a otras especies de orden superior, que a su vez constituyen el sustento de otras mayores y así sucesivamente, de acuerdo con la famosa ley natural que establece que “el pez grande se come al chico”. El carbono pasa entonces a formar parte del carbonato cálcico de los esqueletos, caparazones y conchas de la fauna submarina y una vez concluido el ciclo vital de los diferentes individuos, esas estructuras calcáreas se hunden en las oscuras regiones abisales, depositándose en el fondo (Figura 3.10).



Figura 3.10

Conchas y restos calcáreos de diferentes moluscos cubriendo el lecho marino.

En los mares tropicales poco profundos, una fracción importante de dióxido de carbono se incorpora directamente a los esqueletos de los corales (grandes sumideros de CO₂), formándose los gigantescos arrecifes que, como vimos en el apartado 2.4, se encuentran en la actualidad seriamente amenazados. Una vez muerto un coral, su estructura osea corre igual suerte que las de las demás especies, pasando a formar parte de la capa de sedimentos carbonatados del fondo del mar.

Tanto el carbono de los taludes oceánicos, como el que se disuelve eficazmente en los mares fríos que rodean la Antártida, tienen por delante un largo camino que recorrer antes de volver a la atmósfera y cerrar el ciclo.

¹²⁰ Falkowski, P. G.: **El bosque invisible de los océanos**. Investigación y Ciencia, n° 313 (Octubre 2002).

Tras una lenta maceración de varios millones de años, parte de los sedimentos sepultados bajo el lecho marino se transforma en material rocoso (rocas carbonatadas) e hidrocarburos (petróleo y gas natural). La liberación de ese carbono fósil a la atmósfera puede ser debida a causas naturales (principalmente a través de los volcanes y a los procesos de subducción en las fallas oceánicas)¹²¹ o a la quema de combustibles fósiles por parte del hombre, lo que, como ya hemos visto, descompensa el ciclo natural del carbono.

¿Cuál es por tanto el problema que se plantea con el CO₂ en la actualidad?, pues que al quemar carbón, gasolina o gas natural estamos “desenterrando” carbono que llevaba muchísimo tiempo inerte bajo tierra, y lo hacemos además a una velocidad extraordinaria, sin que ni los bosques ni el fitoplancton puedan absorberlo al mismo ritmo.

El océano tiene una capacidad limitada para almacenar dióxido de carbono, repartiéndose éste de forma bastante lenta por todo el medio marino. “[Son] principalmente las corrientes oceánicas las que transportan el carbono disuelto en el agua y lo distribuyen por todo el océano. ¡Pero éstas invierten entre quinientos y mil años en renovar las aguas profundas a partir de las aguas de la superficie!”¹²², lo que podría estar enmascarando la verdadera magnitud del cambio climático.

“Algunos expertos estiman que aproximadamente la mitad del reforzamiento del efecto invernadero producido hasta ahora está todavía *en la recámara* (sic) del océano e inevitablemente se *disparará* (sic)” (El País, 25 de marzo de 2000).

3.4.- El papel termorregulador de los océanos

Tanto el agua de los océanos como el aire de la atmósfera se ven sometidos a fuerzas de diferente naturaleza. El comportamiento de ambos fluidos geofísicos puede estudiarse a través de las mismas ecuaciones del movimiento, cambiando únicamente las condiciones de contorno y usando para el caso del océano la variable salinidad (cantidad de sales marinas por unidad de volumen, expresada en tantos por mil) en lugar de la presión, empleada como sabemos para describir los cambios atmosféricos.

Cada una de estas variables se relaciona a su vez con la densidad y la temperatura, cuyas alteraciones son la principal causa de los grandes movimientos verticales en el seno de la atmósfera y del océano.

En el caso del medio marino, tenemos por un lado las corrientes inducidas por la circulación general de la atmósfera, de manera que el viento que sopla sobre el mar es el responsable de las corrientes oceánicas superficiales. Esa influencia eólica (Figura 3.4) se hace evidente al comparar los patrones globales de circulación atmosférica y oceánica (Figuras 3.11 y 3.12).

¹²¹ “Aproximadamente 1/6 de las rocas presentes en la corteza terrestre son de naturaleza carbonatada, lo que supone un enorme almacén de CO₂ fósil.”

(Aurell, M.: **Sedimentación marina y cambio climático**. Artículo publicado en el suplemento *Ciencia y Salud* de La Vanguardia. URL: <http://www.lavanguardia.es:8000/ciencia/medi/ART/m38.html>).

¹²² Referencia de la nota 119.

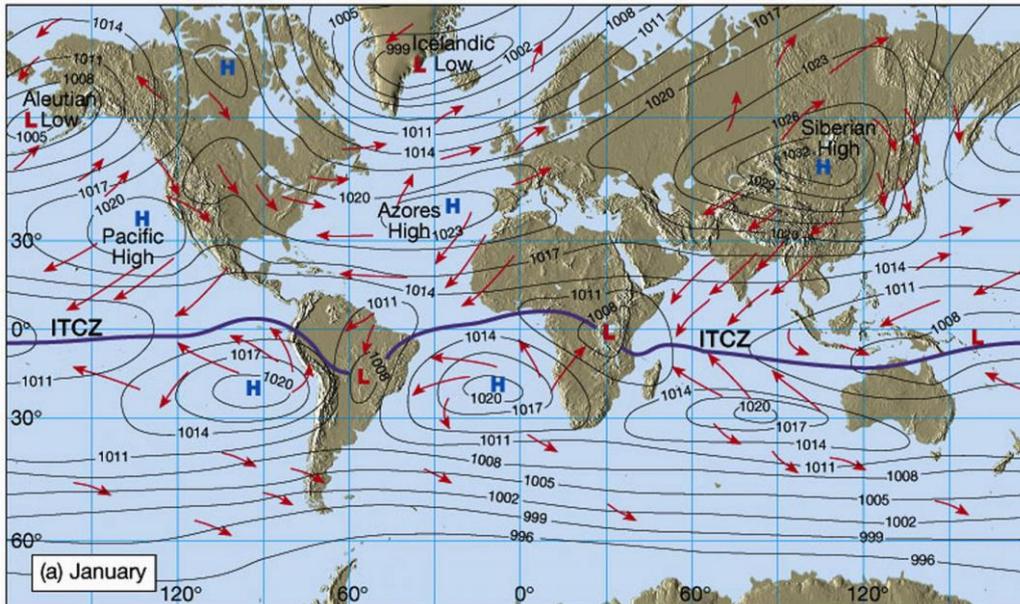


Figura 3.11

Mapamundi con la presión y los vientos en superficie correspondientes al mes de enero. Se indican con H los principales centros de alta presión (anticiclones), con L los de baja presión y con ITCZ la posición que ocupa la “zona de convergencia intertropical”.

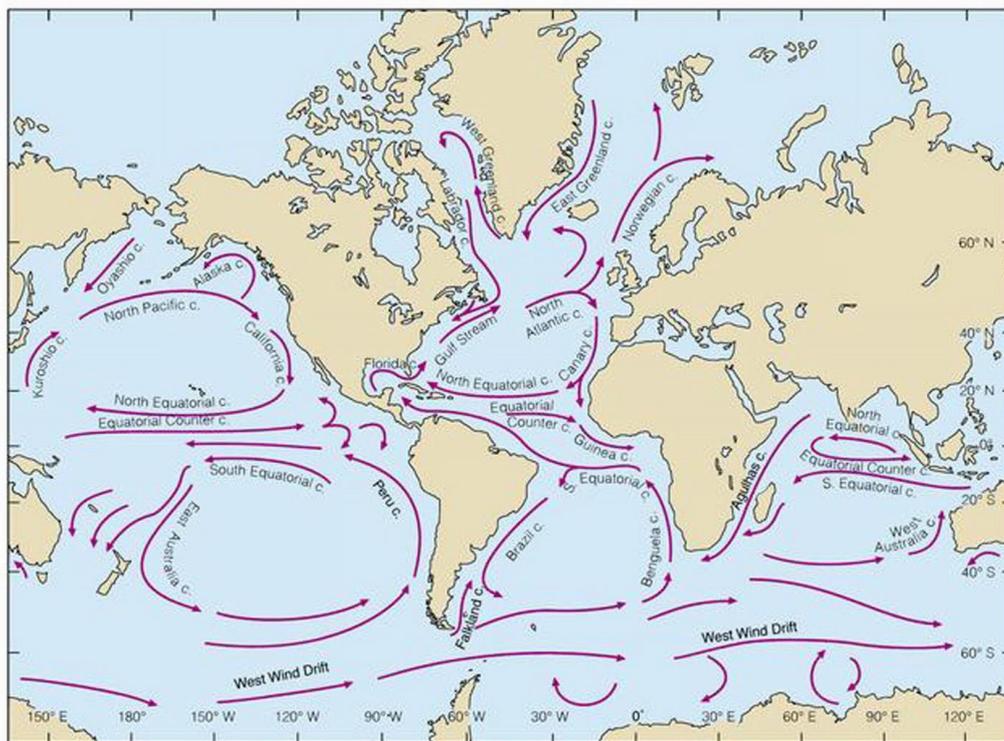


Figura 3.12

Principales corrientes superficiales oceánicas de la Tierra.

Si nos fijamos, por ejemplo, en el famoso anticiclón de las Azores, localizado como sabemos en el océano Atlántico, comprobaremos como tanto los vientos que giran

a su alrededor (Figura 3.11) como las corrientes marinas que lo rodean (Figura 3.12) se mueven en el sentido de las agujas del reloj, algo que siempre ocurre en torno a las altas presiones en el hemisferio norte (HN). Al desplazarnos al hemisferio sur (HS) y observar ahora el anticiclón del Pacífico que domina la costa oeste de Sudamérica (Figura 3.11), vuelve a haber una buena correspondencia entre los vientos y las corrientes, girando en este caso en sentido levógiro¹²³.

Si somos un poco más finos a la hora de comparar ambas figuras, nos daremos cuenta de que no coinciden exactamente las direcciones de los vientos en superficie con las de las corrientes marinas, formando un cierto ángulo entre ellas. Esa diferencia es debida a la fuerza de Coriolis¹²⁴ que actúa sobre la corriente inducida por el viento, desviándola a derechas o a izquierdas dependiendo del hemisferio donde nos encontremos.¹²⁵

Existe, además, otro efecto a tener en cuenta en la capa superficial del océano que provoca una desviación progresiva en la dirección de la corriente según vamos ganando profundidad: el efecto de la fricción. La combinación de ambos da como resultado un flujo neto de agua, en los primeros 150 metros del océano, perpendicular (90° a derechas en el HN o a izquierdas en el HS) a la dirección del viento, lo que se conoce como “transporte de Ekman” (Figura 3.13).

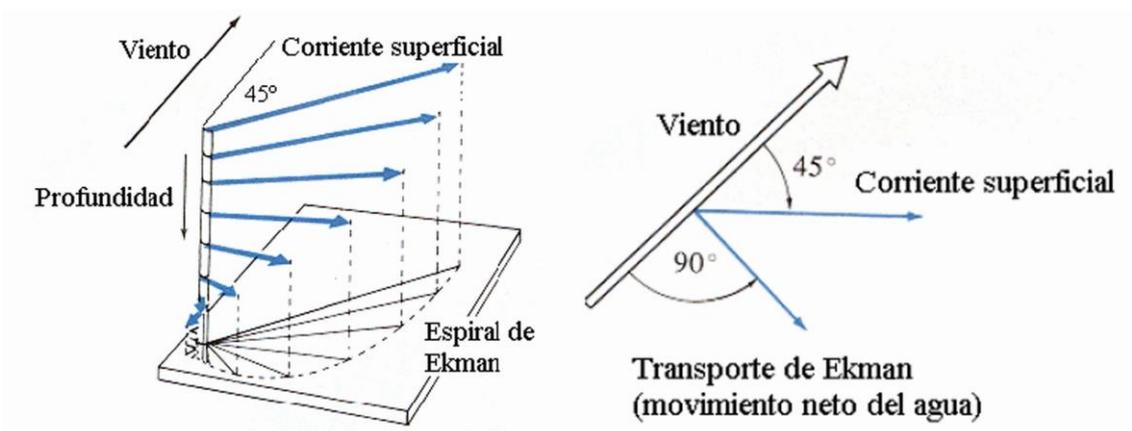


Figura 3.13

Representación esquemática del transporte horizontal de una masa de agua marina inducido por la fuerza desviadora de Coriolis. Fuente: CIMAR (Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología-Universidad de Costa Rica).

Aunque el arrastre del viento cause movimientos básicamente horizontales en la superficie del mar, el fenómeno descrito da lugar en determinadas zonas a importantes afloramientos o *upwelling* (movimientos verticales ascendentes) que desempeñan un

¹²³ Contrario a las agujas del reloj.

¹²⁴ Fuerza aparente, debida a la rotación de la Tierra, que tiende a desviar la trayectoria de los objetos que se desplazan sobre la superficie terrestre. La forma característica de las borrascas o el sentido de giro de las grandes corrientes oceánicas son una consecuencia directa de esta fuerza que desvía a las partículas fluidas hacia la derecha en el HN y hacia la izquierda en el HS.

¹²⁵ Hace ya más de un siglo, el explorador noruego Fridtjof Nansen (1861-1930), en uno de sus viajes por el Ártico se percató de este hecho tan singular, al observar como los témpanos de hielo flotante no se desplazaban en la misma dirección del viento, sino que derivaban a derechas entre 20 y 40 grados.

papel clave en el clima. Las aguas someras cercanas a algunos litorales son empujadas hacia alta mar, dejando un “hueco” que es rellenado por agua fría y profunda.

Es justamente en los bordes orientales de los océanos, frente a las costas azotadas casi siempre por vientos paralelos a ellas (del sur en el HN y del norte en el HS), donde se producen esos afloramientos que inyectan agua fría, rica en nutrientes, desde las profundidades hasta la superficie, localizándose en esas zonas importantes bancos de pesca como el sahariano, en las cercanías de Canarias, o el de las costas del Perú.

Las zonas continentales limítrofes, al estar influenciadas por esas corrientes frías, se cuentan entre las más secas de la Tierra¹²⁶, como ocurre al norte de Chile con el desierto de Atacama (corriente de Perú) (Figura 3.14), en el Sahara Occidental (corriente de Canarias) o en el desierto de Namibia (corriente de Benguela) (ver la Figura 3.12).



Figura 3.14

Salar de Atacama (Chile). El desierto de Atacama es una de las zonas más secas del planeta, sucediéndose a menudo varios años seguidos sin precipitación alguna. Fotografía de W. Griem (1989).

Parece claro que las corrientes superficiales frías definen y condicionan los climas de determinadas regiones del planeta, hasta el punto de que cuando esas corrientes se ven alteradas, como ocurre los años con El Niño, las anomalías climáticas se suceden, apareciendo las lluvias en zonas habitualmente secas, llegando incluso a florecer el desierto, lo que constituye en sí mismo una rareza natural que no debería relacionarse con el cambio climático.

¹²⁶ La capacidad de una masa de aire para retener vapor de agua (potencialmente precipitable) aumenta exponencialmente con la temperatura. El aire en contacto con una superficie marina fría apenas retendrá vapor de agua en su seno, justo lo contrario que ocurre sobre los mares templados o tropicales.

Detengámonos ahora en las corrientes cálidas que transportan calor desde la zona ecuatorial hacia latitudes más altas de ambos hemisferios. Por encima de todas ellas destaca la corriente del Golfo (*Gulf stream*) en el océano Atlántico, y su particular influencia en el clima global. En la Figura 3.12 vemos como dicha corriente inicia su recorrido en las cálidas aguas del Golfo de México, bordeando la costa este de los EEUU y desplazándose hacia Europa, donde se divide en dos ramas, una de ellas asciende desde las Islas Británicas hasta la costa de Noruega, y la otra vira hacia el sur bajando hasta Canarias, donde como hemos visto llega convertida en una corriente fría.

Aunque tradicionalmente se ha responsabilizado a la corriente del Golfo de ser la principal causa de que el clima de la fachada atlántica europea sea mucho más suave que el de su homóloga norteamericana¹²⁷, un reciente estudio¹²⁸ ha quitado parte del protagonismo al papel termorregulador de dicha corriente, dando una mayor relevancia a la dinámica atmosférica que tiene lugar en el HN, como medio de transporte efectivo del calor que al final del verano comienzan a liberar las capas superficiales del Atlántico Norte.

A falta de más estudios sobre esta importante cuestión, nos quedamos con la duda de saber si fue antes el huevo o la gallina, ya que el fuerte acoplamiento existente entre la atmósfera y el océano nos impide separar por completo una cosa de la otra.

Donde sí que parece tener una importancia capital la corriente del Golfo es en la “cinta transportadora” del océano, conocida también como circulación termosalina¹²⁹. Tendremos que viajar hasta las profundidades submarinas para encontrarnos con el principal mecanismo regulador de la temperatura planetaria (Figura 3.15).

Mientras que el viento era el impulsor de las corrientes superficiales, las corrientes profundas del océano están regidas por los cambios de temperatura y de salinidad; las dos variables que sabemos que influyen en la densidad de una determinada masa de agua, haciéndola más o menos ligera y, en consecuencia, provocando en ella un movimiento ascendente o descendente.

¹²⁷ En Lisboa (38°46'N) la temperatura media del mes de enero es de 14° C, no registrándose nevadas, mientras que en Nueva York (40°38'N) tenemos para ese mismo mes 3° C de media, nevando 30 días al año. Muchas veces las nevadas neoyorkinas vienen acompañadas de los temibles *blizzards* (tormentas de nieve) que azotan todos los inviernos el NE de los EEUU.

¹²⁸ Seager, R.: **La corriente del Golfo**. Mundo Científico, n° 244 (Abril 2003).

¹²⁹ En la mayoría de los textos de referencia en castellano suele emplearse la expresión “circulación termohalina” (traducción literal del término anglosajón *Thermohaline circulation*).

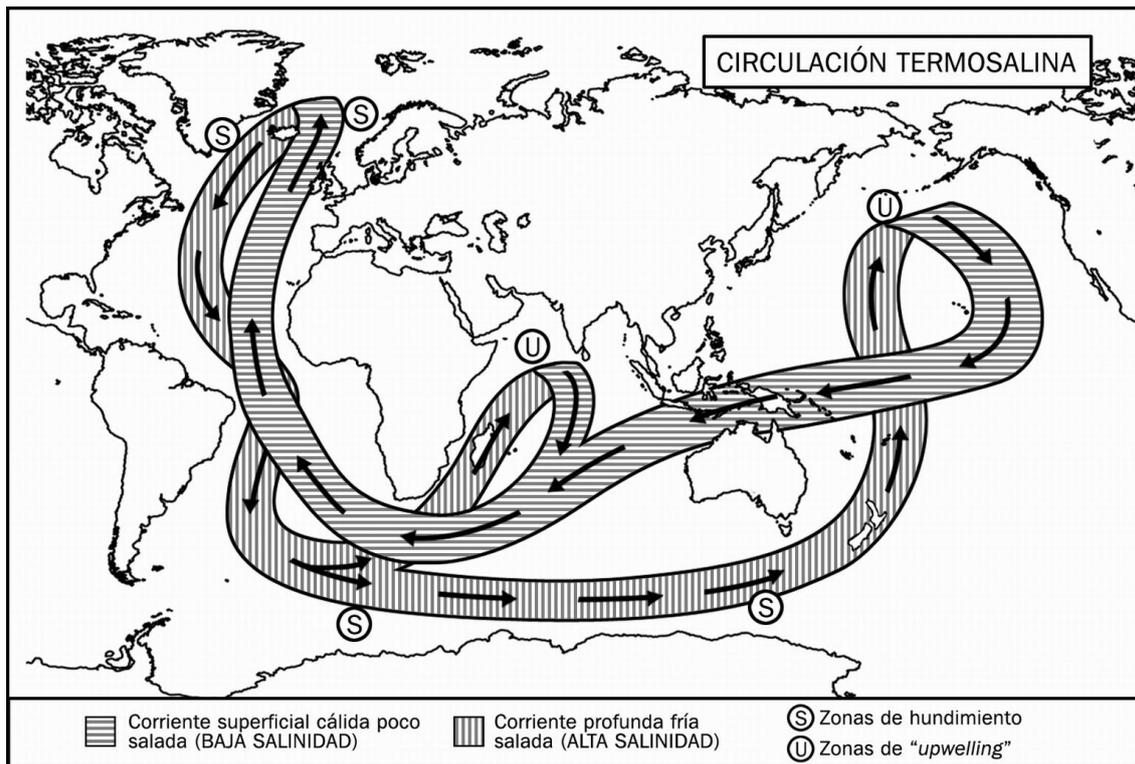


Figura 3.15

La circulación profunda del océano según el esquema clásico del investigador norteamericano Wallace S. Broecker.

La “cinta transportadora” inicia su periplo en el Atlántico Norte, en el límite de la banquisa polar, con dos zonas de hundimiento de agua localizadas frente a Groenlandia y en el mar de Noruega (indicadas con una S en la Figura 3.15). “En ese lugar [del Atlántico Norte] un promedio de 10 a 15 millones de metros cúbicos de agua por segundo, equivalentes a más de 10 veces toda el agua que entra al océano por los ríos, es llevada a profundidades de varios miles de metros”¹³⁰.

¿Por qué ahí y no en otra parte del océano tan inmensa cantidad del agua se hace pesada y cae hacia el fondo? En el hielo flotante está la respuesta. La formación de la banquisa ártica provoca un aumento de la concentración de sal del agua circundante, al expulsar el hielo la sal que contenía cuando estaba en estado líquido. El agua fría superficial aumenta aún más su densidad e inicia su hundimiento, siendo su lugar ocupado por el agua proveniente de la corriente del Golfo, en un ciclo que necesita cerca de 1.000 años para renovar toda el agua de los océanos.

El agua fría y profunda comienza un lento viaje hacia el sur, cruzando el Ecuador y dirigiéndose hacia la Antártida. Allí se une a la corriente circumpolar antártica; la mayor corriente fría del planeta, con un caudal de 100 millones de metros cúbicos por segundo, desplazándose juntas hacia el este, en el sentido del “cinturón de borrascas” que permanentemente rodea el continente blanco (Figura 3.15).

Desde ahí surgen dos ramas ascendentes que surcan los océanos Índico y Pacífico, ganando “altura” a medida que se desplazan hacia el norte. Tras aflorar hasta la capa superficial, convertidas en corrientes cálidas y “poco saladas”, inician el camino

¹³⁰ Ribbe, J.: **Cambio Climático: ¿Qué está pasando en el océano?** CIENCIA AL DÍA Internacional, nº 2, Vol. 4 (Noviembre 2001). (Disponible en Internet. URL: <http://www.ciencia.cl/CienciaAlDia/volumen4/numero2/articulos/articulo6.html>).

de retorno hacia el sur, para girar al norte una vez rebasado el cabo de Buena Esperanza¹³¹, cerrándose el ciclo en las frías aguas del Atlántico Norte.

Los afloramientos del Índico y del Pacífico Norte obedecen a diferentes causas. En la zona tropical del Indico la fuerte evaporación reinante da lugar a unas aguas más saladas y por ende más densas. Lo que ocurre en este caso es que el calentamiento es el factor dominante.

El afloramiento del norte del Pacífico no es tan evidente. ¿Por qué allí no tiene lugar un hundimiento similar al del Atlántico Norte? La respuesta parece estar en la mayor salinidad de las aguas del Atlántico, debido a que actualmente la evaporación allí es algo mayor. “La pérdida de calor que en el Atlántico es suficiente para producir las aguas más densas que se hundan, no lo es en el Pacífico”¹³².

La circulación termosalina depende del balance de los flujos de calor y agua dulce en el Atlántico Norte y cualquier cambio en dicho balance alteraría el ritmo de la “cinta”, pudiendo en un caso extremo detenerla, lo que tendría importantes e imprevisibles consecuencias en el sistema climático. Como veremos en el apartado 3.5, se tiene constancia de varios colapsos de la circulación profunda del océano ocurridos en el pasado, que vinieron acompañados de notables anomalías en el clima terrestre.

Justo al escribir estas líneas (mediados de 2004) la NASA alertaba sobre un debilitamiento en la corriente del Golfo detectado por sus satélites de observación terrestre¹³³, probablemente debido a una alteración en el intercambio de calor entre la atmósfera y el océano. No son pocos los científicos que responsabilizan a nuestras emisiones de GEIs de dicho desequilibrio.

¿Podemos esperar un colapso de la “cinta transportadora” similar a los ocurridos en el pasado?, ¿en qué plazo y a qué ritmo podría ocurrir dicho colapso?, ¿cómo afectaría este hecho al clima y de qué forma alteraría la actual fase de calentamiento global? La hipótesis de un cambio climático brusco a consecuencia del colapso de la circulación termosalina va ganando adeptos en los últimos tiempos, aunque la ciencia todavía no puede responder con seguridad a estas preguntas.

3.5.- Cambios bruscos en el clima

Ante un hipotético cambio brusco en el clima (un salto repentino en el espacio de fases, en la línea de lo que comentábamos en el apartado 3.1), quizás lo primero que deberíamos de hacer es reflexionar sobre el significado que tienen para nosotros los términos “brusco” y “repentino”. Acostumbrados como estamos a usar la escala de tiempo humana (años, decenios, siglos), la gente sólo entiende climáticamente la brusquedad como un cambio poco más que de un año para otro.

Los ancianos, haciendo gala de su memoria histórica (que no meteorológica), acostumbran a recordarnos que el clima de su niñez era bastante diferente al actual (“¡antes nevaba más!”, nos recuerdan con insistencia), algo que no parecen corroborar del todo los datos de los observatorios. Nuestra percepción de la realidad climática es, como ya dijimos, bastante subjetiva y caprichosa, no siendo capaces de distinguir entre un periodo de años secos o húmedos, fríos o calurosos, y un verdadero cambio climático.

¹³¹ Extremo sur del continente africano.

¹³² Parrilla, G.: **El papel de los océanos en el cambio climático**. Referencia 1 de la bibliografía.

¹³³ http://www.meteored.com/ram/numero22/nasa_corriente.asp

Volviendo a la brusquedad o no del cambio, todo lo que no se parezca al escenario apocalíptico de la película *El día de mañana*¹³⁴ no lo entenderemos como un cambio brusco sino gradual, cuando lo cierto es que en la historia climática de la Tierra (de unos 4.000 millones de años¹³⁵) un periodo de 1.000 años se convierte en un instante, por no hablar ya de 100 años o menos (véase la Figura 3.21 en el apartado 3.7).

Pese a todo, lo cierto es que ha habido ocasiones en el pasado donde los acontecimientos se han precipitado en un tiempo récord, lo que hace pensar a algunos científicos en la posibilidad real de un cambio en el plazo de unas pocas décadas. Todas sus miradas se dirigen hacia el Atlántico Norte y la circulación termosalina.

El experto medioambiental venezolano Erik Quiroga¹³⁶ ha acuñado el término “Efecto Ártico”, en un intento por explicar lo que podría acontecer bruscamente en nuestra zona geográfica. Según su propia teoría, el deshielo del Ártico podría afectar a la corriente del Golfo, alterando el clima de toda la cuenca del Atlántico Norte, dando lugar a ciclos de veranos muy cálidos que se extenderían cada vez más hacia el otoño e intensos inviernos que podrían prolongarse hasta la primavera, lo que podría crear condiciones climáticas árticas en esas regiones¹³⁷.

Para dicho especialista, “las evidencias científicas sobre el calentamiento global, el deshielo del Ártico y la alteración del clima en Europa y la región este de Norteamérica, observado a partir de 1997, (...) deben ser estudiados como las condiciones mínimas para el inicio del “Efecto Ártico”, lo que nos puede alertar sobre los cambios climáticos en esa área durante los próximos diez años”.

El precedente más inmediato nos lleva hasta el final de la última glaciación, cuando los grandes mantos de hielo empezaron a retirarse hacia las actuales regiones polares, subiendo la temperatura de forma acusada en todo el planeta. En ese ambiente cada vez más cálido que dio inicio al Holoceno¹³⁸, se produjo un brusco e inesperado cambio en el clima. Las temperaturas medias bajaron hasta 7 °C en amplias zonas del HN en poco más de 20 años, según una reciente estimación (Figura 3.16). Ese periodo de intenso frío en Europa recibe el nombre de *Younger Dryas* y duró casi 1.500 años (aproximadamente desde el 13.000 hasta el 11.600 BP¹³⁹).

¹³⁴ Dirigida por Roland Emmerich y estrenada en 2004, se trata de la primera película de la historia inspirada en la problemática del cambio climático y en la posibilidad (llevada al extremo) de que éste sea brusco, lo que pone en serios aprietos a los protagonistas.

¹³⁵ Ésta sería la edad aproximada de la atmósfera y los océanos, existiendo la Tierra como planeta desde hace unos 4.600 millones de años.

¹³⁶ Promotor también de la celebración del Día Internacional de la Preservación de la Capa de Ozono, que tiene lugar el 16 de septiembre de cada año.

¹³⁷ <http://www.bnv.bib.ve/efectoartico.htm>

Véanse también las siguientes páginas web con información adicional sobre el “Efecto Ártico”:

<http://www.meteored.com/ram/numero19/efectoartico.asp>

http://www.futurovenezuela.org/_Eventos/ErikQuirogaEfectoArtico.ppt

¹³⁸ Actual periodo interglacial.

¹³⁹ Antes del presente (*Before Present*). Presente=1950.

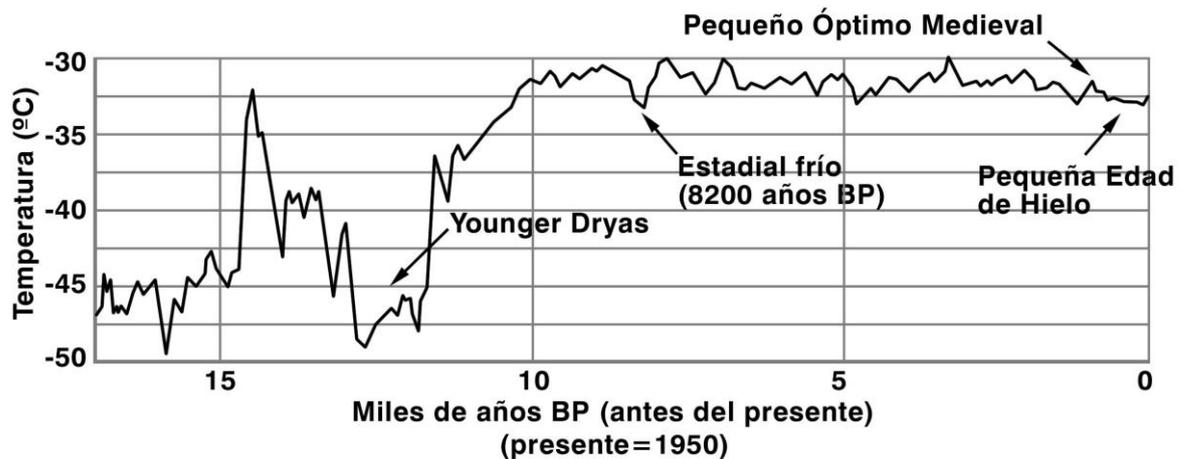


Figura 3.16

Evolución térmica durante los últimos 17.000 años en la parte central de Groenlandia. La información se obtuvo a partir de un testigo de hielo extraído en la zona. Compárense la magnitud y la brusquedad del descenso de temperatura en el *Younger Dryas* y en la *Pequeña Edad de Hielo*. Adaptado de Cuffey y Clow (1997).

El origen de dicho descalabro de las temperaturas parece encontrarse en los aportes de agua del deshielo postglacial que se produjeron en el Atlántico Norte, procedentes en su mayoría del extinto y gigantesco lago Agassiz, que ocupaba por aquel entonces una extensa área de Canadá y del norte de los EEUU (Figura 3.17). La llegada del agua dulce (poco densa) al Atlántico Norte fue debilitando la circulación termosalina y, en consecuencia, el transporte de calor atmósfera-océano (Figura 3.18).

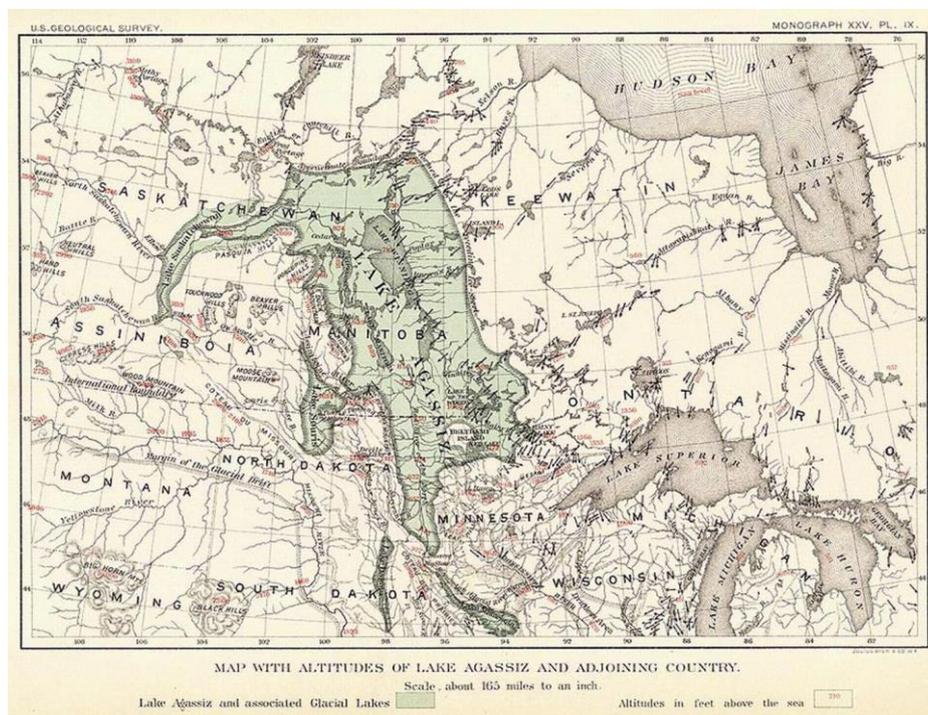


Figura 3.17

Mapa donde aparece la localización y la extensión máxima que ocupaba el lago Agassiz. Compárense su tamaño con el de los Grandes Lagos, situados en la parte inferior derecha.



Figura 3.18

Hipótesis que explica la aparición del *Younger Dryas*. El retroceso del frente de la capa de hielo que cubría la mitad norte de Norteamérica (Manto Laurentino) hizo que el agua dulce del Lago Agassiz fuera a parar, a través del Río San Lorenzo, al norte del Atlántico en vez de al Golfo de México, frenando de esta manera la circulación termohalina y ocasionando el retorno del frío glacial.

Fuente: Broecker, W. S. (1989). Cortesía de Antón Uriarte.

El final del *Younger Dryas* fue tan brusco como su entrada en escena. A partir de ese momento “las corrientes oceánicas adoptaron el modo de funcionamiento más o menos parecido al que hoy conocemos. Las aguas superficiales del Atlántico Norte se volvieron a calentar y las temperaturas, especialmente en Europa, ascendieron de nuevo varios grados en unas pocas décadas”¹⁴⁰.

Tan excepcional estadal frío ocurrido en Europa y en otras zonas del HN, fue perdiendo fuerza y cambiando de signo en el HS. Al comparar los testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida se ha comprobado como, ante este tipo de eventos rápidos, el clima de ambos lugares se comporta de forma antagónica. “El calentamiento quedó paralizado en la Antártida durante intervalos de tiempo en los que se produjeron aumentos rápidos de temperatura en Groenlandia y viceversa”¹⁴¹. Este comportamiento

¹⁴⁰ Uriarte, A.: **El Younger Dryas**. Revista electrónica RAM, nº 11 (Mayo 2003). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero11/pdf/YoungerDryas.pdf>. Véase también la referencia 22 de la bibliografía.

¹⁴¹ Alley, R. B.; Bender, M. L.: **Testigos de hielo de Groenlandia**. Investigación y Ciencia, nº 259 (Abril 1998).

asincrónico norte-sur queda reflejado hoy en día en las tendencias contrarias de la temperatura en los dos polos (véase el apartado 2.2).

Han sido precisamente las elevadas tasas de calentamiento registradas en las regiones árticas, las que han llevado, con el habitual alarmismo, los temores de los científicos hasta los titulares de prensa y las pantallas de los cines. Ocurra o no el “Efecto Ártico” en los plazos que predice Quiroga, de lo que no cabe duda es de que la llegada de más cantidad de agua dulce hasta el Atlántico Norte¹⁴² irá modificando la corriente del Golfo y la circulación profunda del océano.

3.6.- La influencia solar

No podíamos olvidarnos en este capítulo del que para muchos es el principal agente modulador del clima, que no es otro que el Sol. Tan extraordinaria fuente de calor puede considerarse como el verdadero “motor” del sistema climático y la causa primera de la dinámica de sus componentes. “La reducción de sólo un 2% de la intensidad de la radiación solar podría causar un enfriamiento muy acusado en todo el planeta, determinando la aparición de una nueva glaciación”¹⁴³. Sin la presencia del Sol, la Tierra pasaría en poco tiempo a convertirse en una enorme roca helada, sin movimiento alguno en el seno de la atmósfera.

De la misma forma que ocurre con la actividad volcánica o con la caída de un meteorito (fenómenos naturales imprevisibles contra los que nada podemos hacer), el ser humano tampoco tiene la capacidad de influir sobre el flujo de energía solar incidente, de ahí que en muchos estudios se considere al Sol como un factor constante en el clima. Donde sí que influimos es en el balance energético del sistema Tierra-atmósfera, al inducir cambios en el albedo planetario.

Parece claro que cualquier cambio que se produzca en la actividad de nuestra estrella tendrá su reflejo en el clima terrestre al variar el flujo de entrada de energía, conocido como constante solar o *irradiancia*¹⁴⁴. Sin embargo, las variaciones en esa “constante” no se reflejan con la nitidez que debieran en las series climatológicas.

Este tipo de variaciones se ajusta muy bien al conocido ciclo de 11 años de las manchas solares (Figura 3.19) que, pese a su incuestionable influencia en el clima, no nos ha ofrecido hasta la fecha una prueba definitiva de la conexión climática Tierra-Sol, al menos en lo que se refiere a la evolución del clima a corto plazo.

¹⁴² Procedente no solo de la fusión de la banquisa ártica, sino también de la del hielo continental de Groenlandia, de los aportes de los grandes ríos siberianos y, sobre todo, del aumento de las precipitaciones que, a consecuencia de la mayor evaporación provocada por el calentamiento global, se ha comenzado a producir en latitudes altas del HN.

¹⁴³ Trigo Rodríguez, J. M.: **El sol y el clima terrestre**. Mundo Científico, nº 187 (Febrero 1998).

¹⁴⁴ Flujo de radiación solar por unidad de superficie, medida en el tope de la atmósfera (por encima de toda la masa atmosférica). Toma el valor de 1.366 W/m², oscilando mínima pero significativamente (entre un 0,1 y un 0,2%) en torno a esa cantidad.

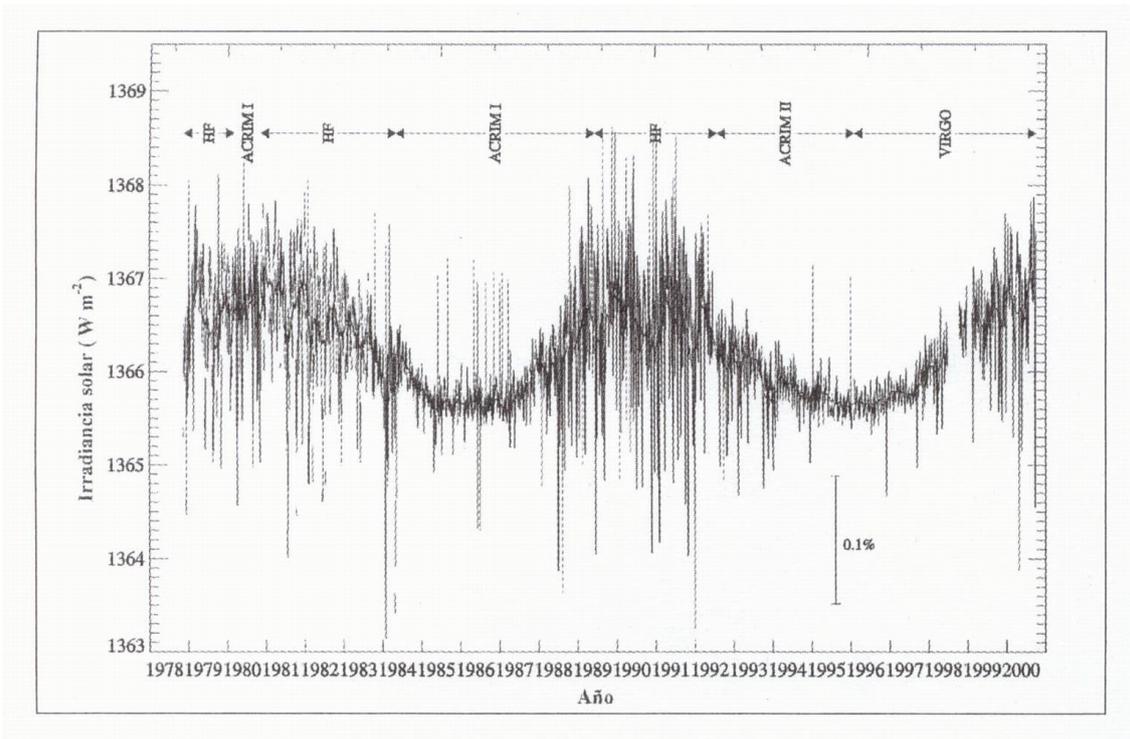


Figura 3.19

Variación de la irradiancia solar a lo largo de los dos últimos ciclos solares (desde 1978 hasta 2000).

Fuente: Fröhlich, C. y Lean, J.; adaptado por Manuel Vázquez Abeledo (2002).

Con una perspectiva temporal mucho más amplia, la conexión se hace más borrosa si cabe. Así, por ejemplo, las siete grandes eras glaciares ocurridas hasta la fecha en nuestro planeta (véase el siguiente apartado) no parecen corresponderse con épocas de baja actividad solar, si bien en algunos episodios menores, como ocurrió con la PEG, sí que parece haber una buena correlación.

Si existiera una relación directa y sencilla entre la radiación solar incidente y la temperatura de la superficie terrestre, entonces esta última tendría que haber ido aumentando de forma bastante regular desde hace unos 4.000 millones de años hasta nuestros días. Por aquel entonces el Sol brillaba un 30% menos que en la actualidad¹⁴⁵, pese a lo cual, el ambiente reinante era mucho más cálido. La respuesta a esta “paradoja del Sol débil” parece estar, al menos en parte, en la eliminación natural de una importante fracción del CO₂, que en la atmósfera primitiva alcanzaba unas tasas muy superiores a las actuales.

En los últimos años, aparte de la influencia directa de la radiación solar, se están abriendo nuevas líneas de investigación que pueden ayudarnos a comprender mejor la conexión climática Tierra-Sol. Una de ellas se inició en 1997, al descubrirse una buena correlación entre la intensidad de los rayos cósmicos (partículas muy energéticas de origen extrasolar) que alcanzan la Tierra y la nubosidad.

Cuando la irradiancia y el número de manchas solares alcanzan un mínimo (Figura 3.19), la actividad solar es baja y el flujo de partículas emitidas por el Sol (“viento solar”) es más débil, “atrapando” menos rayos cósmicos en su recorrido hasta la Tierra, y permitiendo la llegada hasta las capas altas de la atmósfera de más partículas

¹⁴⁵ Referencia 23 de la bibliografía.

ionizantes. Éstas influyen directamente en el proceso de formación de los cristales de hielo, que son la semilla que da origen a las nubes y a la precipitación.

Se ha podido comprobar como el aumento de rayos cósmicos va acompañado de un aumento global de nubes bajas (las de mayor grosor) que, tal y como dijimos en el apartado 3.2 (Figura 3.7), contribuyen negativamente al calentamiento global (enfriamiento neto). El periodo frío que experimentó el planeta entre los años 1945 y 1970 (Figura 2.1) podría deberse, en parte, a la estabilización de la actividad solar (con un ligero declive) iniciado en aquella época.

Pero probablemente el mejor ejemplo que ilustra la influencia solar en el clima sea el del “mínimo de Maunder” y la PEG, sobre los que ya hemos hecho alguna referencia en el libro. Aunque a finales del siglo XIX el británico E. Walter Maunder encontró en los archivos de su observatorio astronómico un periodo histórico sin apenas manchas solares que abarcaba toda la segunda mitad del siglo XVII, no fue hasta 1976 cuando el astrónomo solar John A. Eddy relacionó dicho periodo¹⁴⁶ con la miniglaciación que vivió Europa en aquella época.



Figura 3.20

Las manchas solares están íntimamente relacionadas con la actividad magnética de nuestra estrella a través del ciclo undecenal de máximos y mínimos. Las anomalías en este comportamiento cíclico, como ocurrió durante la PEG, influyen notablemente en el clima terrestre.

En su interesante trabajo de investigación¹⁴⁷ comentaba con acierto como “la cantidad de radiación emitida por el Sol podría ser casi enteramente independiente de la fase del ciclo undecenal de manchas solares”, detectándose durante el mínimo de

¹⁴⁶ Al que el propio Eddy bautizó como “mínimo de Maunder”.

¹⁴⁷ Eddy, J. A.: **La desaparición de las manchas solares**. Investigación y Ciencia, nº 10 (Julio 1977).

Maunder un cambio en la rotación solar diferencial¹⁴⁸, que debió de influir decisivamente en la actividad anómala de nuestra estrella.

Si exceptuamos este tipo de anomalías que de vez en cuando tienen lugar en el Sol, podemos considerarle como una fuente energética tremendamente regular y constante. Si esto es así, ¿a qué causas obedecen los ciclos climáticos y la alternancia de periodos fríos y cálidos?, ¿por qué se producen las glaciaciones?

3.7.- Los ciclos climáticos: La Teoría Astronómica de Milankovitch

Cuando se empezaron a analizar con técnicas modernas los grandes cambios climáticos ocurridos en el pasado, pronto se detectaron pautas regulares de comportamiento que llamaron la atención de los científicos. Concretamente, durante el Cuaternario¹⁴⁹ se ha producido una sucesión bastante regular (aproximadamente cada 100.000 años) de periodos fríos (glaciaciones), separados por periodos más cálidos (interglaciales) de menor duración. Veremos más adelante como el último de ellos, el actual Holoceno, podría estar tocando a su fin.

¿Qué mecanismos modulan el clima a escala geológica? Son muchos y muy variados, aunque podemos dividirlos en dos grandes grupos; uno que englobaría a todos aquellos que están relacionados directamente con la dinámica terrestre (tectónica de placas), y el otro a los que no lo están.

Entre los primeros tendríamos la elevación de cadenas montañosas (clave en la configuración que adoptan a escala global las corrientes atmosféricas), los cambios en el nivel del mar (véase el apartado 2.3) y la distribución de los continentes y océanos (determinante en la ocurrencia de episodios de “Tierra Blanca”¹⁵⁰), mientras que entre los segundos estarían los cambios en la composición de la atmósfera y los factores astronómicos, introduciendo estos últimos la ciclicidad observada en algunos periodos de la historia climática de la Tierra.¹⁵¹

Pensando únicamente en los factores astronómicos, estamos abocados a un nuevo ciclo glacial, en el que nuestra civilización tendrá que pasar una dura prueba de fuego (o “de hielo” más exactamente). No obstante, y dejando a un lado la posibilidad de un brusco “Efecto Ártico”, lo que ahora está en boca de todos no es la llegada del frío, sino la amenaza real de un calentamiento que ya ha comenzado, según se desprende del análisis de las series instrumentales de temperatura.

En la década de los 70 del siglo XX, y tras unos años ciertamente fríos a escala global (véase el apartado anterior), los climatólogos veían cerca el final del actual Holoceno y el inicio de una nueva glaciación. Esto tuvo su reflejo en la literatura científica de la época¹⁵², lo que coincidió en el tiempo con el inicio del movimiento

¹⁴⁸ A diferencia de lo que ocurre con la atmósfera terrestre, que gira solidariamente con el planeta, las capas exteriores del Sol rotan a mayor velocidad en el ecuador solar que en latitudes más altas. Durante el mínimo de Maunder se produjo además una aceleración extra sobre la zona ecuatorial “en un factor tres” (referencia de la nota anterior).

¹⁴⁹ Última era geológica, iniciada aproximadamente hace 2 millones de años.

¹⁵⁰ Conocidos también como *snowball* (bola de nieve), en ellos el manto de hielo y nieve alcanzó latitudes cercanas al Ecuador, cubriendo la mayor parte de la superficie terrestre. Se tiene constancia de al menos tres de estos episodios en el pasado. Véanse, por ejemplo, las siguientes referencias:

González Fairén, A.: **La Tierra blanca**. Tribuna de Astronomía y Universo, II Época; n° 58 (Abril 2004).

Le Meur, H.: **¿El globo terrestre una bola de nieve?** Mundo Científico, n° 217 (Noviembre 2000).

¹⁵¹ Meléndez Hevia, A.: **Indicios geológicos de los cambios climáticos a lo largo de los mil últimos millones de años**. Referencia 40 de la bibliografía.

¹⁵² Véase, por ejemplo:

Roselló Verger, V. M.: **El interglacial actual y su fin próximo**. Estudios Geográficos, Vol. XXXV, pp 657-668 (1974).

ecologista, que empezaba a ver en la contaminación atmosférica y de las aguas la principal amenaza para el futuro del planeta.¹⁵³

Los escépticos de la actual teoría del efecto invernadero (cada vez menos, todo hay que decirlo) critican a los científicos que, en poco más de treinta años, hayan pasado de hablar de una inminente edad de hielo a pronosticar un calentamiento poco menos que imparable, cuando lo cierto es que una cosa no excluye a la otra. Mientras que la primera, como veremos a continuación, no es más que la consecuencia directa de determinadas configuraciones periódicas en los parámetros de la órbita terrestre (causa natural), el calentamiento global difícilmente puede explicarse sin relacionarlo con nuestras emisiones de GEIs a la atmósfera.

De momento, en los próximos cien años, lo único que cuenta en las apuestas es el progresivo aumento de la temperatura media planetaria, aunque, ampliando un poco más nuestro horizonte temporal, los hielos de los casquetes avanzarán de nuevo hacia latitudes más bajas, cambiando también la actual dinámica atmosférica y oceánica¹⁵⁴. Hasta que esto último sea una realidad pasaremos, probablemente, por una fase de cambios bruscos (tipo “Efecto Ártico”), que históricamente han caracterizado las transiciones glacial-interglacial y viceversa. “En escasos decenios, a veces incluso en intervalos de pocos años, se produjeron cambios de 5 a 10 grados o más (...)”¹⁵⁵.

Volviendo la vista al pasado, resulta muy interesante observar cual ha sido, a grandes rasgos, el comportamiento climático de nuestro planeta. Lo primero que llama nuestra atención (Figura 3.21) es lo poco representativo que es el clima que nos ha tocado vivir. “Los seres humanos nunca han experimentado el clima normal de la Tierra. Durante la mayor parte de sus 4.600 millones de años de existencia, el clima ha sido caluroso o seco y el planeta ha estado desprovisto de hielo glaciar”¹⁵⁶.

¹⁵³ Voigt, J.: **La destrucción del equilibrio ecológico**. *El Libro de Bolsillo*, nº 294. Alianza Editorial (1971) [3ª edición 1987].

¹⁵⁴ Ya que las glaciaciones no solo se caracterizan por un enfriamiento general. Véase: Kotlyakov, V. M.: **El cambio climático y el futuro del entorno humano**. Publicación de la UNESCO disponible en Internet. URL: <http://www.unesco.org/issj/rics150/kotlyakov150.htm>

¹⁵⁵ Referencia de la nota 141.

¹⁵⁶ Chorlton, W.: **Las edades del hielo**. *Col. Planeta Tierra*. Planeta (1987). [No confundir con el libro del mismo título de Jon Erickson, publicado en la Serie Mac Graw Hill de divulgación científica en 1992].

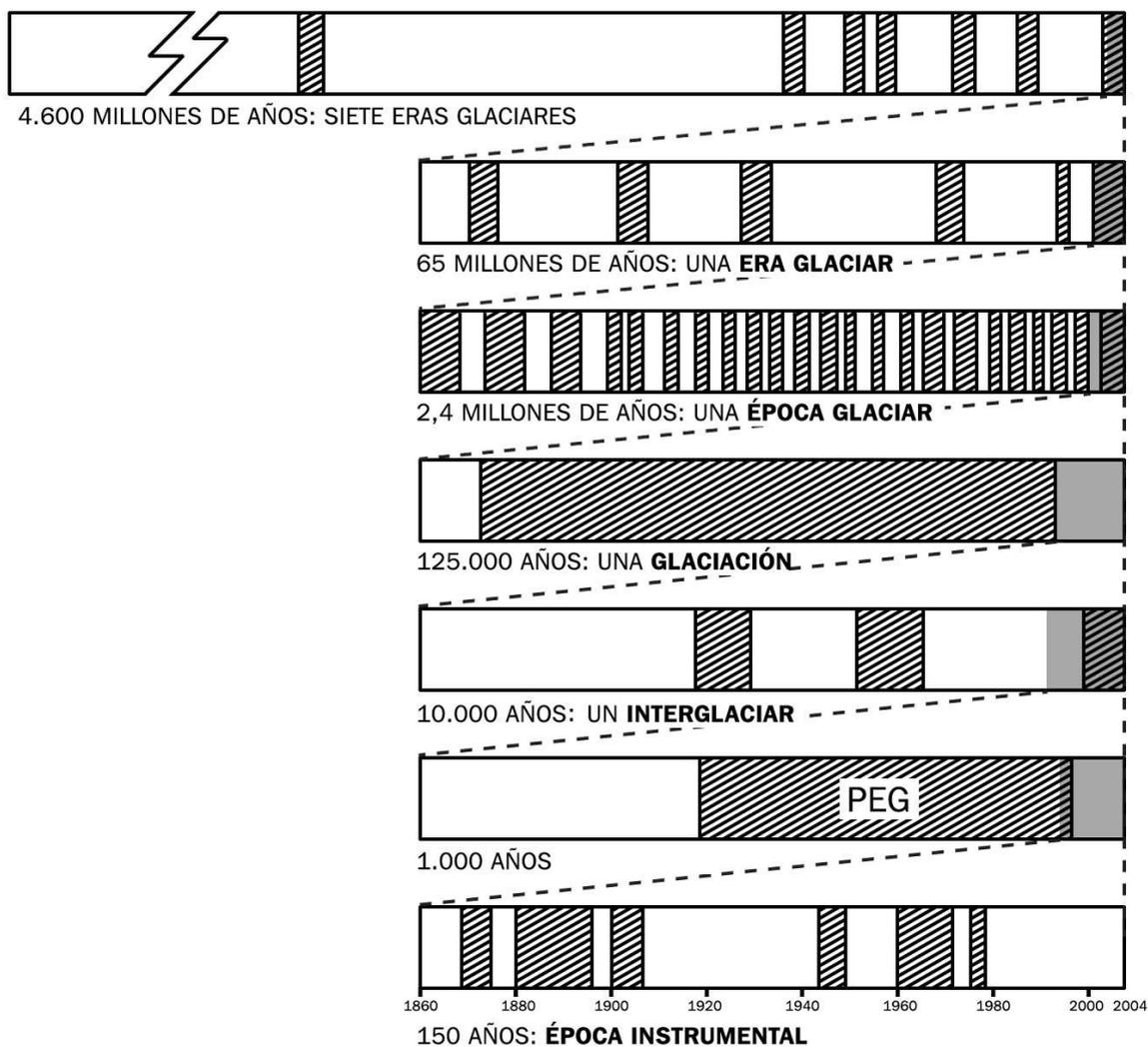


Figura 3.21

La historia climática de la Tierra. Viendo esta serie de diagramas cronológicos (cada uno de ellos ampliando una sección del anterior [en gris]) nos hacemos una idea de cuál ha sido la alternancia de épocas frías (a rayas) y cálidas (en blanco) que han caracterizado el clima de la Tierra desde sus orígenes. Adaptado de Chorlton, W. (1983). Libro: *Las Edades del Hielo*.

De mayor a menor duración, podemos hablar de *eras glaciares*, *épocas glaciares* y *glaciaciones*, aunque no son pocas las veces en las que usamos indistintamente dichos términos o el genérico “edades de hielo” para referirnos a la misma cosa. En la Figura 3.21 vemos con claridad cuales son sus diferentes órdenes de magnitud.

Aunque cada una de las siete eras glaciares (banda superior de la Figura 3.21) representa un vasto periodo de tiempo que alcanza en promedio los cincuenta millones de años, juntas apenas suman el 8% de la edad de la Tierra. Tengamos en cuenta, además, que cada era glaciación está constituida a su vez por una serie menor de periodos cálidos y fríos. Estos últimos representarían las épocas glaciares.

Como vemos en la segunda banda de la citada figura, la última era glaciación, iniciada hace unos 65 millones de años¹⁵⁷, se divide a su vez en seis épocas glaciares. La

¹⁵⁷ Numerosas pruebas apuntan a que el impacto de un enorme meteorito contra la Tierra fue el causante de esta era glaciación, provocando la famosa extinción de los dinosaurios (véase la nota 101).

más reciente recibe el nombre de Pleistoceno y, como ya hemos dicho, se ha caracterizado por una alternancia bastante regular entre glaciaciones y periodos interglaciares (3ª banda).

La última glaciación se inició hace aproximadamente 125.000 años (4ª banda), y hace poco más de 10.000 comenzó el actual Holoceno (5ª banda) que, pese a ser considerado en su conjunto como una fase cálida, comprobamos también como ha tenido al menos tres periodos fríos. Uno de ellos es la PEG, que como sabemos marcó climáticamente buena parte del último milenio (6ª banda).

Con esta perspectiva tan amplia, el análisis de la época instrumental (la banda inferior de la Figura 3.21) cuanto menos nos hace reflexionar sobre nuestra modesta contribución, hasta la fecha, en el clima terrestre. En 1999, el oceanógrafo George H. Philander comentaba al respecto que “la Tierra está aquí desde hace miles de millones de años y nosotros sólo llevamos en ella un segundo, como quien dice. El planeta es muy resistente: han desaparecido los dinosaurios, pero la Tierra continua. Lo que estamos haciendo con ella es trivial con lo que ya ha sufrido antes. La Tierra sobrevivirá, pero nosotros quizá no.” (El País, 20 de marzo de 1999).

Vistos los hechos vayamos a las causas de esos ciclos climáticos y, en particular, al mecanismo que dio origen a la aparición periódica de las glaciaciones durante el Pleistoceno. El matemático y astrónomo serbio Milutin Milankovitch (1879-1958) dedicó gran parte de su vida a este asunto, estableciendo una elegante teoría astronómica capaz de explicar el comportamiento observado en los ciclos glaciales.

Debido al escaso desarrollo en su época de las técnicas de datación paleoclimática, no fue hasta bien entrada la década de los 70 del siglo XX cuando su teoría fue plenamente aceptada por la comunidad científica internacional.

La Teoría Astronómica de Milankovitch establece que las variaciones en la órbita terrestre modifican a largo plazo el clima, al ir alterando la cantidad de energía solar que recibe la Tierra a distinta latitud y en diferentes estaciones¹⁵⁸. Estas variaciones escapan a nuestra percepción, muy limitada, de la realidad climática.

Son tres los parámetros orbitales a considerar (Figura 3.22):

- 1) **Precesión** de los equinoccios
- 2) **Inclinación** del eje de rotación
- 3) **Excentricidad** de la órbita

¹⁵⁸ Covey, C.: **Órbita terrestre y periodos glaciares**. Referencia 37 de la bibliografía.

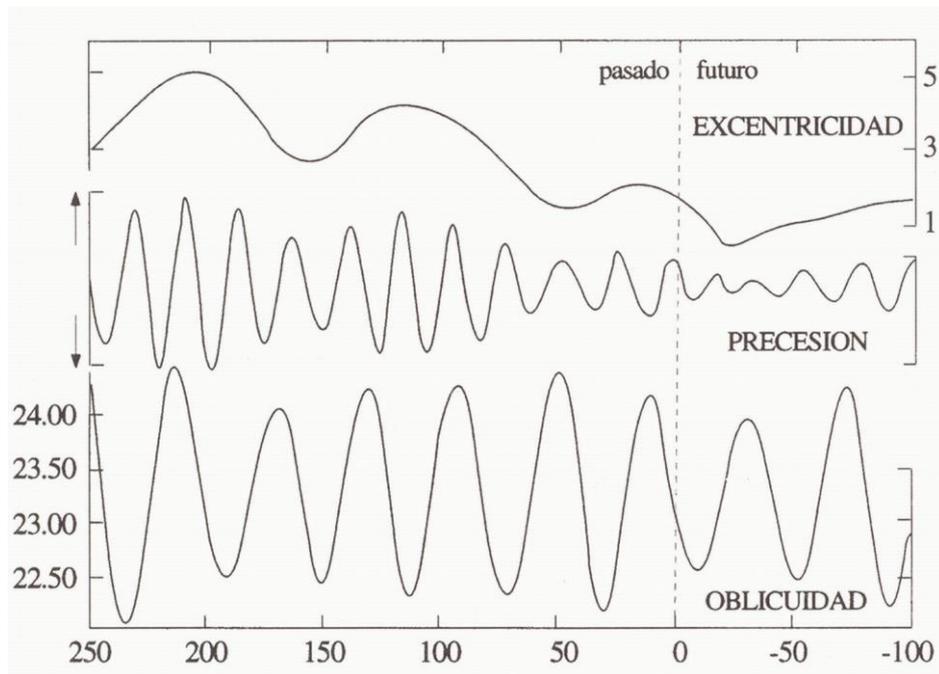


Figura 3.22

Ciclos de excentricidad, precesión y oblicuidad de la órbita de la Tierra con los valores de los últimos 250.000 años y los previstos para los próximos 100.000. Fuente: Berger (1988), tomado de Meléndez Hevia, A. (1999) [referencia 40 de la bibliografía].

La precesión es el resultado del movimiento basculante al que se ve sometido el eje de rotación terrestre (algo parecido al cabeceo en el giro de una peonza), que tarda en completar un ciclo 26.000 años. La inclinación de ese eje con respecto al plano de la eclíptica (el de la órbita de la Tierra alrededor del Sol) tampoco se mantiene fija, sino que oscila entre los 22 y los 25 grados¹⁵⁹ en un nuevo ciclo de 41.000 años. La causa de dicha oscilación reside en la influencia gravitatoria que ejerce el resto de planetas del Sistema Solar sobre el nuestro.

Un último factor a tener en cuenta es la fluctuación periódica del tamaño de la órbita terrestre, estirándose y contrayéndose ligeramente en un nuevo ciclo de 100.000 años. Esta última variación es la única de las tres que provoca cambios, aunque muy pequeños, en la cantidad total de radiación solar incidente (del orden de un 0,2% de la insolación total).

La variación en la excentricidad de la órbita no sería capaz por sí sola de provocar glaciación alguna, pero modulada por los otros dos factores (precesión e inclinación) sí que lo consigue, al cambiar la distribución de la insolación en latitudes altas del HN y desencadenarse cada cierto tiempo el esperado cambio de clima.

Milankovitch desarrolló un modelo matemático con el que poder relacionar los cambios latitudinales de radiación solar con los grandes periodos fríos que se conocían por entonces, pero la imprecisión en las dataciones de la época le impidió obtener una prueba concluyente de su teoría¹⁶⁰.

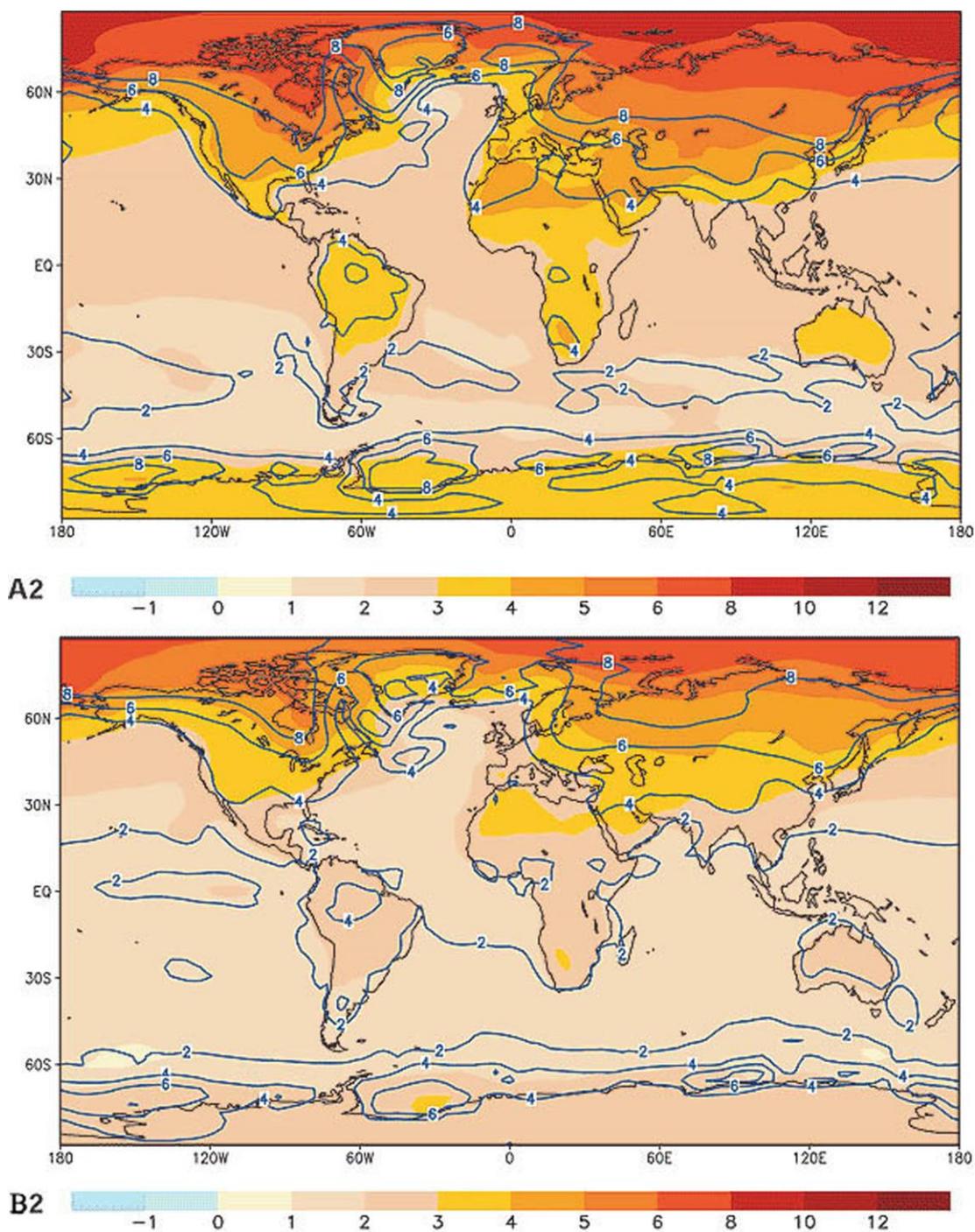
A la espera de que la mecánica celeste vuelva a ser favorable y de lugar a una nueva glaciación, lo que ahora preocupa a los científicos es la evolución de signo

¹⁵⁹ Esa inclinación ronda en la actualidad los 23,4°.

¹⁶⁰ Véanse más detalles de la misma en la referencia 22 de la bibliografía.

contrario que tome el clima durante el presente siglo. A ello dedicaremos el cuarto y último capítulo.

4. Las predicciones del clima futuro.



Cambios en la temperatura media anual planetaria y sus márgenes de variación (incertidumbre) en °C para los escenarios A2 y B2. Comparación de los valores previstos para el periodo 2071-2100 con los del periodo 1961-1990. Fuente: Tercer Informe del IPCC (2001).

Hasta ahora hemos hablado del pasado climático de la Tierra y del clima más reciente que nos está tocando vivir y que estamos alterando a un ritmo sin precedentes. Demos ahora un salto hacia adelante en el tiempo y sepamos qué sorpresas climáticas nos deparará el futuro. Para ello, las únicas herramientas válidas que tenemos son los

modelos de predicción climática, cuyos resultados más destacados se encarga de publicar periódicamente en sus informes el IPCC. Este organismo, creado en 1988 y dependiente de la ONU, recoge los trabajos de los mejores especialistas mundiales en cambio climático, por lo que sus conclusiones son una referencia obligada en cualquier estudio serio que aborde esta temática. Se han publicado hasta la fecha tres grandes informes (años 1990, 1995 y 2001) y actualmente se está dando forma al cuarto, que verá la luz en 2007. Nuestra mejor referencia será por tanto el Informe de 2001¹⁶¹.

Aparte de dar a conocer una serie de resultados científicos, el IPCC trata con sus informes de concienciar a los políticos de la necesidad de tomar medidas urgentes (en los plazos adecuados) y efectivas para frenar el calentamiento global, reduciendo las emisiones de GEIs a la atmósfera. A finales de 1997 se consiguió dar un primer paso en este sentido, al comprometerse más de un centenar de países a firmar el Protocolo de Kyoto. No obstante, el rechazo al mismo de algunos “pesos pesados” como Rusia y los EEUU (el país que más contribuye al calentamiento global) ha restado efectividad a dicho compromiso, impidiendo por ahora su entrada en vigor y dejándolo en poco más que una declaración de buenas intenciones.¹⁶²

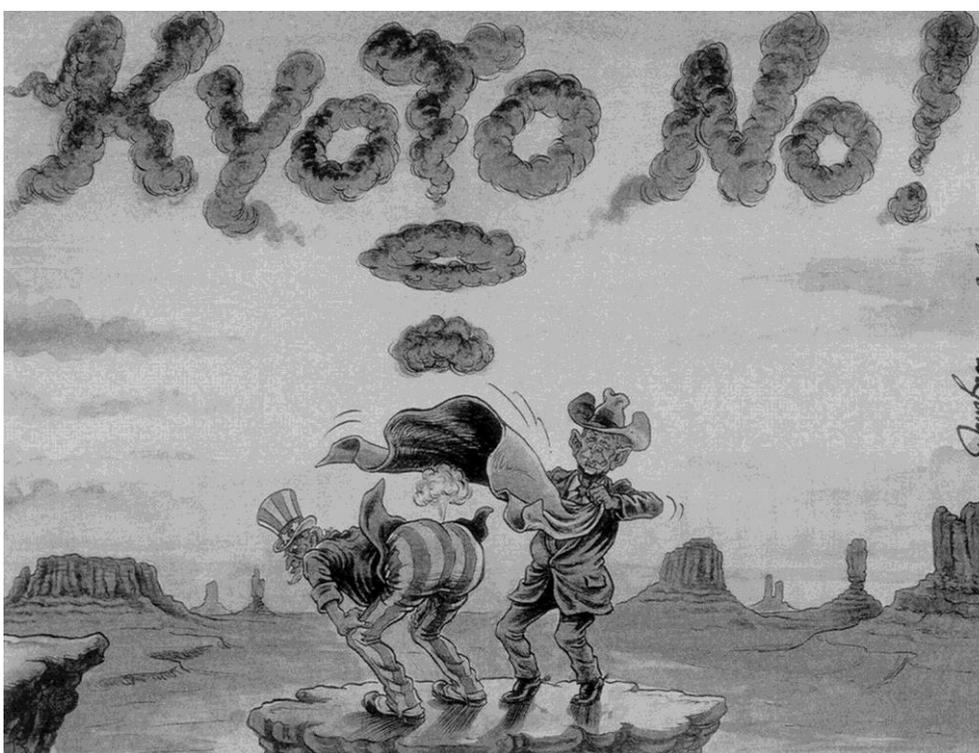


Figura 4.1

Viñeta cómica publicada en el diario británico *The Independent*. Autor: Dave Brown.

Se cumplan o no en los plazos requeridos los acuerdos de Kyoto, tenemos por delante un largo camino que recorrer y cada vez menos tiempo para reaccionar¹⁶³. El

¹⁶¹ Referencia 9 de la bibliografía.

¹⁶² Véanse más detalles sobre este asunto tan de actualidad en la referencia 19 de la bibliografía y en el siguiente artículo: Uriarte, A.: **Estrategias de reducción de las emisiones de gases invernadero y el Protocolo de Kyoto**. Revista electrónica RAM, nº 14 (Octubre 2003). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero14/estrategias.asp>

¹⁶³ Respecto a la urgencia en la toma de medidas, aunque existe un acuerdo general sobre la necesidad de actuar rápido, el profesor de estadística danés Bjørn Lomborg nos ofrece en su reciente y polémico libro “El ecologista escéptico” (Referencia 35 de la bibliografía) unas interesantes reflexiones que chocan

permanente tira y afloja entre los distintos países en materia de cambio climático nos está llevando a un callejón sin salida. Los países desarrollados no quieren abandonar su privilegiada posición de cabeza, los que están en vías de desarrollo aspiran legítimamente a alcanzar a los primeros (a contaminar más en definitiva), y los más pobres se llevan como casi siempre la peor parte.

Difícil ecuación a resolver la del desarrollo sostenible. Si por ejemplo se apuesta decididamente por las energías renovables (eólica, solar, hidráulica, biomasa...) en detrimento de los combustibles fósiles, la medida implicará sacrificios que el primer mundo no parece estar dispuesto a asumir. Tampoco son fáciles de aceptar los riesgos que conllevaría el uso extendido de la energía nuclear. Por otro lado, ¿cómo reaccionarían los más de 1.000 millones de chinos si los países occidentales imponen un freno a su espectacular desarrollo basado en la quema de carbón y petróleo?, ¿qué actitud mostrarían los actuales países exportadores de petróleo frente a un cambio radical en nuestros hábitos energéticos?

Complicadas cuestiones las que habrá que ir resolviendo en los próximos años. “Determinar el clima futuro más probable es un reto extraordinario porque obliga a enlazar dos perspectivas que son complejas en sí mismas: la perspectiva científica y la de las posibles vías de desarrollo de la sociedad futura”¹⁶⁴, por lo que, aparte de contar con unos buenos modelos de predicción, necesitamos establecer de la forma más realista posible los escenarios donde tendrá lugar la acción, una tarea que no resulta nada fácil.

¿Cuántos habitantes tendrá la Tierra en 2100?, ¿cuál será nuestra principal fuente de energía?, ¿qué cantidad de CO₂ contendrá por entonces la atmósfera?, ¿cuánto emitiremos nosotros al aire? Las diferentes y difíciles respuestas a estas preguntas nos ofrecen un amplio abanico de posibilidades (escenarios), a partir del cual hay que intentar saber cuál será el clima más probable a finales de siglo. De todo ello se encarga el IPCC en su último informe.

4.1.- El último informe de los expertos

Con el debate sobre el cambio climático más vivo que nunca, el Informe de 2001 era esperado “como agua de mayo” por los científicos y el público en general, y ciertamente no defraudó ni a unos ni a otros, cumpliendo las expectativas. De todas sus conclusiones probablemente la más significativa e inquietante a la vez, aparte de que el nivel del mar suba unos cuantos centímetros o de que cada vez tengamos veranos más calurosos, sea la demostración científica, avalada por el trabajo de miles de investigadores en todo el mundo, de la influencia del hombre en el clima, confirmándose así las sospechas que teníamos desde hace tiempo.

En la realización del Informe, a la hora de establecer los diferentes escenarios futuros de emisiones a la atmósfera¹⁶⁵, se tuvieron en cuenta tres factores clave: el crecimiento económico, la demografía y el tipo de consumo energético. La incertidumbre que, desgraciadamente, encierra cada uno de ellos tiene su reflejo en las predicciones finales que nos ofrece el IPCC, aunque todas ellas muestran, de forma clara, una tendencia general hacia el calentamiento.

frontalmente contra esos planteamientos. Para el citado autor, “necesitamos ser muy cuidadosos con nuestras iniciativas a la hora de actuar frente al calentamiento global”, ya que “los análisis económicos muestran claramente que resultará más caro reducir las emisiones de CO₂ de forma radical que pagar los costes de la adaptación al incremento de las temperaturas”. Por último, indica también que una disminución drástica de las emisiones de CO₂ frenaría el desarrollo económico mundial, lo que restaría efectividad a las políticas medioambientales (impulsadas únicamente por los países desarrollados), llevándonos, en definitiva, a contaminar más.

¹⁶⁴ Balairón, L.: **Día Meteorológico 2003. Nuestro clima futuro**. Calendario Meteorológico 2003. INM.

¹⁶⁵ Hasta 40 diferentes llega a considerar el IPCC.

El peor de todos los escenarios posibles sería el de un planeta superpoblado, con sus habitantes abocados al consumismo más atroz y dependientes casi en su totalidad de la quema de combustibles fósiles, lo que pasaría factura en el clima. En el otro extremo tendríamos un mundo sostenible regido por una política común en materia medioambiental que promoviera, entre otras cosas, el consumo racional de las diferentes energías.

Si complicado es hacer una predicción sobre cuál será la población mundial dentro de cien años o sobre el ritmo al que crecerá la economía en un intervalo tan amplio de tiempo, la cuestión energética no se queda atrás y plantea numerosos interrogantes. Parece claro que con la mitad de la población viviendo en las grandes ciudades¹⁶⁶, el transporte (Figura 4.2), la movilidad y el suministro de electricidad serán algunas de las cuestiones más críticas. Previsiblemente, en los próximos veinte años la demanda de energía crecerá entre un 50 y un 60%.



Figura 4.2

El tráfico habitual de las grandes ciudades es especialmente caótico en los países en vías de desarrollo. En la imagen, monumental atasco en las calles de Taipei (Taiwán) en mayo de 1994.

Las diferentes gráficas del Informe del 2001 muestran para cada tipo de escenario la predicción de la variable correspondiente (temperatura, nivel del mar, CO₂...) y su rango de variación en función del modelo climático utilizado. Al que no esté muy familiarizado con esas gráficas, no le resultará fácil asimilar a primera vista toda la información que contienen (saber, por ejemplo, qué es un escenario A1FI o un B2), por lo que trataré aquí de explicar brevemente los principales detalles.

Con el fin de simplificar un poco las cosas, el IPCC reduce el conjunto de escenarios a cuatro grandes familias (A1, A2, B1 y B2), que engloban a todos aquellos

¹⁶⁶ Estimación hecha para 2100, considerando que el éxodo rural y el crecimiento urbano continúen al ritmo actual.

considerados factibles a priori, aún existiendo grandes diferencias de unos a otros. Los grupos A1 y A2 presuponen unas elevadas tasas de crecimiento económico. La principal diferencia entre ambos está en el factor poblacional. Mientras que los escenarios A1 consideran una población mundial que alcanzaría su máximo hacia 2050, disminuyendo a partir de ahí, los A2 tienen en cuenta un imparable aumento de la población hasta finales del siglo.

Dentro del grupo A1 se establecen a su vez tres escenarios diferentes, en función de las fuentes energéticas utilizadas. El A1FI representaría un mundo todavía dependiente del carbón y el petróleo, el A1T sería, por el contrario, un mundo que apuesta decididamente por las energías no fósiles, mientras que el escenario A1B (quizás el más realista de los tres) sería el intermedio, sin una dependencia de una fuente de energía concreta, sino de un conjunto de ellas (fósiles, renovables...).

En los escenarios B1 y B2 lo que prima es el desarrollo sostenible, por lo que se estaría considerando la aplicación inmediata de unas políticas eficaces en materia medioambiental, con la puesta en marcha de tecnologías limpias; lo que actualmente estaría exigiendo el Protocolo de Kyoto y que debería tener su continuidad en los próximos años con la firma de nuevos acuerdos más vinculantes.

Entendida esta nomenclatura estaremos en mejor disposición de analizar cualquiera de las gráficas del Informe y sus curvas, representando, cada una de ellas, el comportamiento de una determinada variable en un tipo de escenario.

Una vez establecidos los diferentes escenarios, la primera tarea que aborda el IPCC es el cálculo de los niveles de emisión de GEIs correspondientes a cada uno de ellos. En la gráfica de emisiones de CO₂ a la atmósfera (Figura 4.3) comprobamos como las únicas proyecciones que indican una disminución en 2100 con respecto a los niveles de 1990 son las de los escenarios A1T y B1.

Nuestro conocimiento (parcial, no lo olvidemos) del ciclo del carbono (véase el apartado 3.3) permite hacer una estimación de las concentraciones futuras de CO₂ (Figura 4.4) a partir de las emisiones de ese gas a la atmósfera. Al analizar la gráfica de la figura 4.4 comprobamos como, pese a que las curvas de esos dos escenarios (A1T y B1) son las que nos llevarían en 2100 a una menor cantidad de dióxido de carbono, en ambos casos las concentraciones se sitúan bastante por encima de las 354 ppm que teníamos en 1990 o de las 380 ppm actuales¹⁶⁷.

¹⁶⁷ No bajando en el mejor de los casos (escenario B1) de las 550 ppm en 2100. Esta sería la previsión más optimista que hoy por hoy podemos concebir.

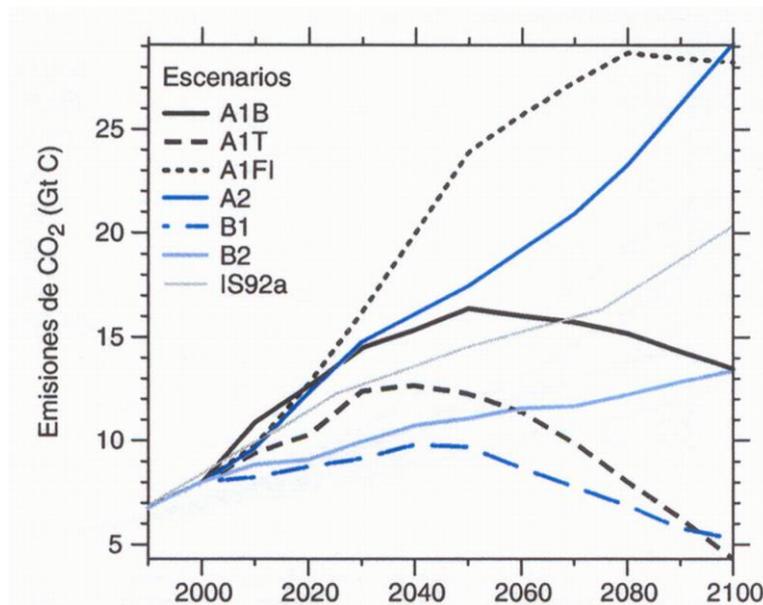


Figura 4.3

Emisiones a la atmósfera de CO₂ de origen antrópico previstas para diferentes escenarios futuros.

Fuente: Tercer Informe del IPCC (2001).

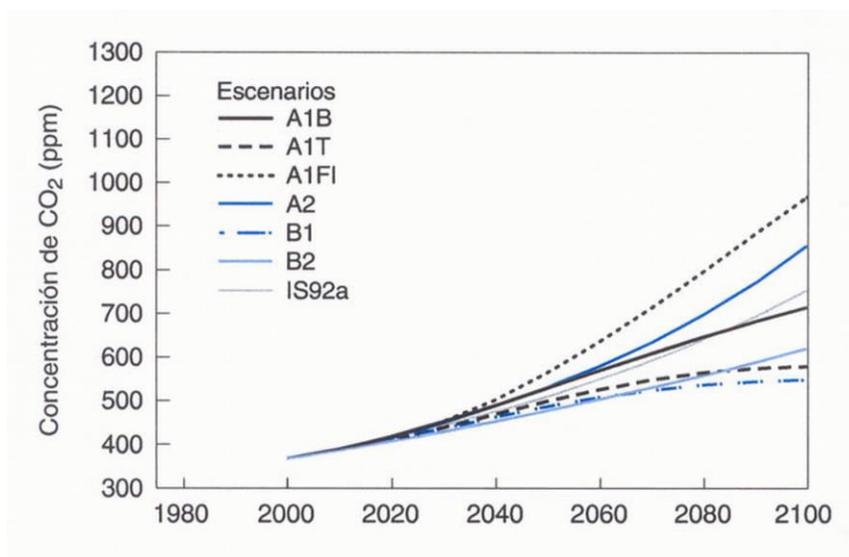


Figura 4.4

Concentraciones atmosféricas de CO₂ previstas para diferentes escenarios futuros.

Fuente: Tercer Informe del IPCC (2001).

La prensa se hizo eco rápidamente de estos resultados y leíamos, recién publicado el Informe, titulares como éste: “Los científicos prevén un cambio climático incluso si se reducen las emisiones de CO₂” (El País, 25 de septiembre de 2001).

Al ciudadano de a pie lo que realmente le interesa saber es cuál será el comportamiento del clima futuro en el lugar donde vive habitualmente; es decir, si hará más o menos calor o si será más o menos lluvioso. Las herramientas con las que cuenta el IPCC para tal fin son los modelos globales de circulación (conocidos como MGCs) y, en concreto, los MGCs acoplados atmósfera-oceano que, utilizando como base para sus

cálculos una malla tridimensional, representan matemáticamente los procesos físicos implicados en y entre ese par de subsistemas climáticos. Esa malla cubre toda la superficie terrestre y la atmósfera, dividiendo la primera en celdillas, cuyo tamaño representa la resolución espacial del modelo, y la segunda en varios niveles.

Actualmente, las resoluciones de los MGCs más avanzados rondan los 100 kilómetros (celdillas de 100 km²), algo bastante meritorio pero insuficiente para reproducir los detalles que caracterizan el clima a escala regional. Para intentar afinar un poco más en las predicciones se usan diferentes métodos de reducción de escala¹⁶⁸, cuya complejidad técnica escapa al objetivo de este libro¹⁶⁹. No obstante, trataré de explicar a continuación cuáles son los principales problemas a los que se enfrenta en la actualidad la modelización del clima.

A la hora de calcular los diferentes flujos de energía que existen entre los componentes del sistema climático, nuestro limitado conocimiento del papel que desempeñan las nubes, el vapor de agua y los aerosoles en la atmósfera añade incertidumbre a los modelos.

En la actualidad, alrededor de un 65% del planeta está cubierto por nubes¹⁷⁰, sin que podamos considerar a ese porcentaje de nubosidad media como una variable meteorológica más. El problema de las nubes ya lo hemos comentado con anterioridad, y es que dependiendo de su naturaleza, espesor y altura tendremos forzamientos radiativos diferentes. Las nubes situadas en las capas bajas de la atmósfera se encargan de enfriar la superficie terrestre, mientras que las nubes altas y de poco espesor contribuyen a su calentamiento. En definitiva, “las nubes y sus interacciones con la radiación [solar y terrestre] son probablemente los factores que generan la mayor incertidumbre en las proyecciones del clima futuro”¹⁷¹.

Aparte de esto, la irregular distribución espacial de la nubosidad dificulta aún más la tarea, no siendo del todo realistas las simulaciones llevadas a cabo por los diferentes modelos, lo que nos conduce hasta al segundo de los problemas comentados, el del vapor de agua.

Sabemos que la capacidad del aire para retener vapor de agua depende directamente de la temperatura, de manera que al calentarse una determinada masa de aire, de abajo a arriba, incrementa “sustancialmente” su contenido de humedad en las cercanías del suelo (los primeros 1.000 a 2.000 metros de atmósfera)¹⁷². Sin embargo, a mayores altitudes, donde el vapor de agua actúa como un GEI muy efectivo, la situación es más compleja y no es bien captada por las diferentes simulaciones numéricas. En concreto, el intercambio de humedad entre las nubes y el aire que las rodea “sigue siendo un factor bastante incierto y existen divergencias entre la distribución de vapor de agua que indican los modelos y la que se observa en realidad”¹⁷³.

¹⁶⁸ Entre los que destacan, aparte de los métodos estadísticos, las modernas técnicas de *downscaling*, a partir de las cuáles se construyen los modelos regionales de área limitada (LAM en sus siglas inglesas).

¹⁶⁹ Para el lector interesado, incluyo aquí las referencias de un par de artículos introductorios disponibles en Internet:

García-Moya Zapata, J. A.: **Los modelos numéricos de predicción del tiempo**. Revista electrónica Tethys, nº 2. ACAM. URL: <http://tethys.acamet.org/num02/articles/art0205esp.htm>

López Álvarez, L. A.: **La predicción del tiempo a partir de modelos numéricos**. Revista electrónica RAM, nº 22 (Junio-Julio-Agosto 2004). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero22/modelos.asp>

¹⁷⁰ Referencia 35 de la bibliografía.

¹⁷¹ Referencia 9 de la bibliografía.

¹⁷² Las fuertes lluvias de los Trópicos o las que en ocasiones afectan a nuestras regiones mediterráneas se justifican en parte por la presencia de mares de aguas cálidas (véase la nota 126).

¹⁷³ Referencia 9 de la bibliografía.

En cuanto a la presencia de partículas sólidas y gotitas en suspensión en la atmósfera, entendemos bien, por ejemplo, el efecto refrigerante que provocan los aerosoles emitidos por las grandes erupciones volcánicas (véase el apartado 2.1), pero se nos escapa un poco la magnitud del forzamiento antropogénico debido a nuestras emisiones de partículas contaminantes, aunque todo apunta a que “sus efectos a nivel mundial son relativamente pequeños”¹⁷⁴.

De cualquier forma, también debemos considerar los aerosoles de origen natural y la evolución que éstos vayan teniendo en los años venideros. Si damos por buenas las predicciones del IPCC, el calentamiento global contribuirá, entre otras muchas cosas, a reforzar los vientos alisios en el Atlántico Norte, depositándose una mayor cantidad de polvo sahariano en el citado océano (Figura 4.5), además de reforzar también los mecanismos de *upwelling* frente a las costas africanas, potenciándose con ambos procesos la fertilización oceánica en esa zona.

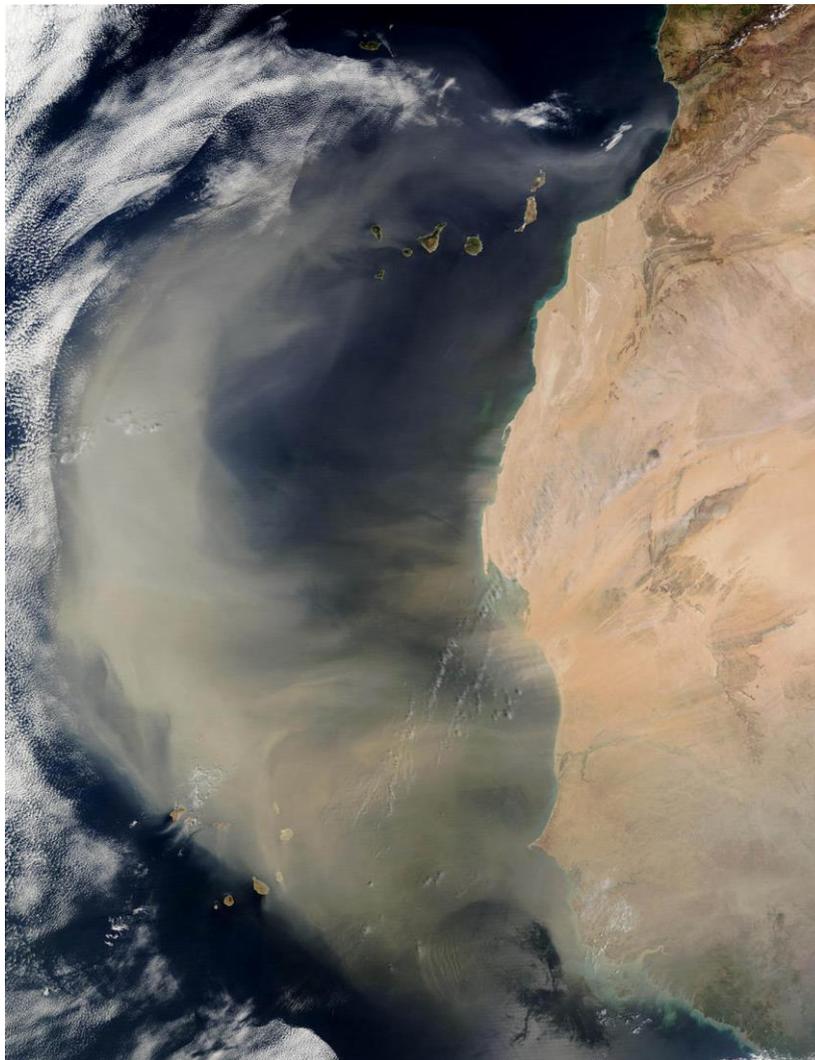


Figura 4.5

Intensa tormenta de polvo desplazándose desde el Sahara Occidental hacia el interior del océano Atlántico. La frecuencia de este tipo de episodios, responsables de las características calimas en las islas Canarias, podría aumentar en el futuro. Imagen tomada desde el satélite Terra de la NASA. Fuente: <http://earthobservatory.nasa.gov>

¹⁷⁴ Ibid.

Aparte de la incidencia directa que tenga sobre el mar el ascenso térmico previsto, los cambios en los patrones de la circulación general de la atmósfera provocarán cambios en los aportes atmósfera-océano, con las grandes implicaciones que esto puede tener en la biología marina y, en consecuencia, en el ciclo del carbono.

Pese a todas las dificultades comentadas, el IPCC nos ofrece en su último Informe una serie de conclusiones bastante sólidas sobre el clima futuro. Las principales aparecen agrupadas en el Cuadro VII y, aunque repetidas hasta la saciedad por la prensa, conviene matizar algunos aspectos normalmente mal divulgados y por ende mal entendidos.

Uno de los que crea mayor confusión es el de la subida del nivel mar. La falta de datos históricos suficientes del océano impide al IPCC ofrecernos un menor rango de variación en sus predicciones del nivel marino para 2100, oscilando éste entre los 9 y los 90 centímetros¹⁷⁵ con respecto al nivel de 1990, en función de los escenarios y de los modelos utilizados.

Con el habitual tono catastrofista que impregna las informaciones del cambio climático, se suele enfatizar mucho más el dato de la elevación máxima prevista (de casi un metro en promedio) que los apenas 9 centímetros de la predicción más conservadora, omitiéndose también el hecho de que la subida no será uniforme en todas las costas del planeta. Al igual que ocurre en la actualidad, se prevén importantes diferencias de unas zonas a otras, con distintos niveles de impacto sobre los litorales.

El IPCC nos advierte que “será cada vez más frecuente que la línea de pleamar [marea alta] suba a niveles extremos como consecuencia de la elevación del nivel medio del mar. La frecuencia de este fenómeno puede aumentar aún más si las tormentas se hacen más frecuentes o intensas”¹⁷⁶.

La causa principal de la subida será la expansión térmica de los océanos, seguida a bastante distancia por la fusión de los glaciares de montaña, que continuarán perdiendo masa durante los próximos decenios.

¹⁷⁵ El dato exacto de la elevación máxima que aparece en el Informe es 0,88 m, equivalente a 88 centímetros.

¹⁷⁶ Referencia 9 de la bibliografía.

Cuadro VII	PRINCIPALES CONCLUSIONES DEL TERCER INFORME DEL IPCC (Año 2001)
<ul style="list-style-type: none"> • Las concentraciones de CO₂ seguirán aumentando durante el siglo XXI debido, principalmente, a la quema de combustibles fósiles. • La estabilización de las concentraciones de CO₂ a 450 ó 650 ppm (en la actualidad se alcanzan las 380 ppm) requerirá que las emisiones descendan por debajo de los niveles de 1990 en el plazo de unos pocos decenios o de un siglo, disminuyendo a partir de entonces hasta una pequeña fracción de las emisiones actuales. • Durante el siglo XXI la temperatura media mundial de la superficie aumentará a un ritmo sin precedentes en los últimos 10.000 años. Para el periodo 1990-2100 se prevé un aumento que oscilará aproximadamente entre 1,5 y 6 °C. El ascenso térmico será especialmente acusado en latitudes medias y altas del HN. • Aumento considerable del nivel medio del mar (entre 9 y 90 cm) a lo largo del siglo XXI, que proseguirá en siglos posteriores. • Aumento del promedio de la precipitación a nivel mundial con acusadas diferencias regionales y con un mayor número de episodios extremos en muchas áreas. • Aumento del riesgo de sequía, especialmente en áreas interiores continentales de latitudes medias. 	

FUENTE: IPCC (2001).

En cuanto a los cambios de temperatura, las variaciones regionales previstas son también muy importantes, mostrando todos los modelos un ascenso térmico generalizado y coincidiendo en señalar a las latitudes medias y altas del HN como las zonas del planeta donde el calentamiento alcanzará una mayor magnitud (Cuadro VII).

Además, las mayores subidas de temperatura que muestran los escenarios A1FI y A2 frente a los B1, A1T y B2, indican de forma clara que dicho aumento está íntimamente relacionado con nuestro ritmo de emisiones contaminantes a la atmósfera, lo que muy probablemente está influyendo en la magnitud alcanzada durante la fase cálida actual.

El aumento de las temperaturas medias vendrá también acompañado de una tendencia al alza en los valores extremos (temperaturas mínimas y máximas), registrándose menos días de helada y más jornadas calurosas en casi todas las regiones de la Tierra.

¿Qué ocurrirá con las precipitaciones en un mundo más cálido? Los modelos llegan al mismo resultado que si aplicamos la lógica deductiva: a mayor temperatura se producirá más evaporación, registrándose una mayor precipitación a escala global. A diferencia de lo que ocurrirá con las temperaturas medias, que aumentarán en todas las regiones del planeta, la distribución espacio-temporal que adopte la precipitación a finales de siglo es mucho más complicada de predecir. Dicha distribución “viene determinada no sólo por procesos locales, sino también por la velocidad de evaporación y las corrientes atmosféricas que transportan humedad”¹⁷⁷.

Además, serán más frecuentes el número y la intensidad de los episodios de precipitaciones intensas, aumentando también las zonas de riesgo de aparición de sequía. En resumen, lloverá más en promedio pero lo hará de una forma mucho más irregular, agudizándose las diferencias regionales. Por el momento no resulta fácil determinar el comportamiento que tendrá la lluvia o la nieve en una pequeña comarca,

¹⁷⁷ Kart, T. R.; Nicholls, N.; Gregory, J.: **El clima que viene**. Investigación y Ciencia, nº 250 (Julio 1997).

provincia o región de un determinado país. En el próximo apartado veremos qué tipo de conclusiones pueden sacarse para el caso concreto de España.

Otra de las conclusiones a la que llega el IPCC es la del progresivo debilitamiento de la circulación termosalina oceánica, aunque de momento los diferentes modelos no son capaces de advertir un colapso en dicha corriente en los próximos cien años. Esto es así, probablemente, a causa de la falta de datos del océano profundo (procedentes de unas pocas campañas oceanográficas). En cualquier caso existen, como hemos visto, teorías que sitúan a más corto plazo una parada de la “cinta transportadora” y el consiguiente cambio climático brusco (véase el apartado 3.5).

Podríamos seguir enumerando aquí toda una larga lista de conclusiones a las que va llegando el Tercer Informe del IPCC, pero me parece más apropiado invitar al lector a consultar directamente la información original, disponible en castellano y de fácil acceso a través de Internet¹⁷⁸. Lo que sí que haré para terminar este apartado será tocar someramente la cuestión de los impactos climáticos; en concreto, la forma en la que la salud humana pueda verse afectada.

Este tipo de cuestiones, como también puede ser el impacto del cambio climático en la agricultura, una vez puestas sobre la mesa las predicciones del clima futuro, cuyas principales conclusiones acabamos de ver, es la última tarea que acomete el IPCC a través de uno de sus grupos de trabajo.

De todos los impactos posibles, uno de los que más directamente puede influir sobre los seres humanos es el de la salud, pues tengamos en cuenta que cerca de la cuarta parte de las enfermedades en la actualidad están vinculadas a factores ambientales¹⁷⁹.

“Los científicos asocian el cambio climático con efectos catastróficos para la salud” (El Mundo, 5 de noviembre de 1998).

Puesto que las previsiones hablan de un aumento de las olas de calor, amén de otros episodios extremos, y teniendo aún fresco en nuestra memoria el balance final de víctimas mortales que dejó el excepcionalmente cálido verano de 2003 (véase el apartado 1.2), podemos pensar que las altas temperaturas son la mayor amenaza por impacto climático directo en la salud humana, sin embargo “suele olvidarse que en un mundo más cálido también habría menos muertes por las temperaturas extremadamente bajas. En general, no hay duda de que muere más gente por temperaturas bajas que por temperaturas altas. La tasa de mortalidad en invierno es entre un 15 y un 20 por 100 superior a la del verano”¹⁸⁰.

Los impactos climáticos sobre la salud pueden ser también indirectos, aumentando previsiblemente el número de enfermedades infecciosas en los próximos años. Las variaciones de temperatura y los cambios en los patrones de precipitación inciden en la abundancia y la distribución de los pequeños insectos portadores de ciertas enfermedades, así como en los microbios responsables de las mismas. No resulta nada fácil predecir cómo irán cambiando en el futuro esos vectores de transmisión de enfermedades, pero merece la pena investigar este asunto de cara a la prevención.

España, por su proximidad al continente africano (foco de numerosas infecciones, especialmente en su franja tropical), puede ser una de las zonas más afectadas por la presencia de nuevas enfermedades. El cambio climático podría

¹⁷⁸ Referencias 9, 16 y 17 de la bibliografía, aparte de los trabajos publicados de 2002 en adelante que incluyan datos del Tercer Informe del IPCC sobre Cambio Climático.

¹⁷⁹ <http://www.buenosdiasplaneta.org/rm2000/indigen.htm>

¹⁸⁰ Referencia 35 de la bibliografía.

potenciar el desarrollo de enfermedades vectoriales poco comunes en nuestro país como el cólera, el dengue o la malaria.

Veamos qué otros cambios podemos esperar en la Península Ibérica, un territorio singular, a caballo entre el norte y el sur, con influencias atlánticas y mediterráneas y con un relieve muy particular, lo que introduce no pocos problemas a cualquier predicción meteorológica o climática que se precie.

4.2.- El porvenir climático de España

La España peninsular se ha ganado mercedamente el calificativo de “minicontinente” por parte de los estudiosos del clima, y no es para menos. En pocos lugares de la Tierra de extensión similar existe una variedad climática parecida, de lo que puede percatarse cualquiera que haya viajado por España. Los cambios de paisaje en pocos kilómetros reflejan la existencia de numerosos climas locales.

Tan asombrosa variedad es el resultado de la interacción de los cambiantes flujos atmosféricos de latitudes medias con los diferentes elementos del relieve. La presencia del Mediterráneo y el fuerte contraste térmico existente entre este mar cálido y las tierras ibéricas bañadas por él, adquieren también una especial relevancia. Su influencia se siente en gran parte del territorio peninsular, lo que introduce multitud de matices y dificulta sobremanera su caracterización climática.

La pluviometría refleja con especial claridad los grandes contrastes existentes entre unas zonas y otras, siendo precisamente esta variable la que, como veremos, presenta más incertidumbre en las predicciones futuras. Encontramos en la Península Ibérica todo tipo de regímenes de precipitación, existiendo zonas muy lluviosas como el norte de Navarra, donde se superan con holgura los 2.000 mm de precipitación media anual¹⁸¹, y otras de extraordinaria sequedad como el cabo de Gata, en Almería (el lugar más seco del continente europeo, con apenas 200 mm/año). Tampoco es raro encontrarse pequeñas zonas con mínimos relativos de lluvia (las conocidas “sombras pluviométricas”) localizadas en áreas de mayor extensión y pluviometría.

Las lluvias alcanzan a menudo elevadas intensidades, siendo de carácter torrencial las que en otoño afectan al área mediterránea, asociadas en ocasiones al conocido fenómeno de *gota fría*. De cara al futuro, no únicamente nos interesa conocer cuál será el nuevo mapa pluviométrico español (la nueva distribución espacial de las lluvias), sino también de qué forma cambiará el carácter (intensidad, frecuencia...) de las precipitaciones y si éstas se volverán más o menos extremas.

Todo esto tendrá su repercusión en algo tan vital como las reservas de agua. Una reciente predicción apuntaba a que la reducción media de los recursos hídricos disponibles para toda la Península Ibérica alcanzará el 17% hacia el año 2060, con relación a las reservas de 1996¹⁸² (Figura 4.6). Esta proyección podría quedarse corta si hacemos caso al último informe sobre cambio climático publicado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, en agosto de 2004, que confirma una disminución cercana al 50% en los caudales de los ríos del sur de Europa hacia esas fechas.

¹⁸¹ Son varias las estaciones meteorológicas de Navarra con precipitaciones medias anuales bastante por encima de esos 2.000 mm, destacando la de Artikutza, con 2.555 mm/año de media durante el periodo 1931-1997 (Fuente: <http://meteo.cetenasa.es>). No obstante, algunas series incompletas de registros sugieren que en la zona de Belagua, el valle pirenaico navarro más oriental, todavía llueve y nieva más, alcanzándose probablemente los 3.000 mm de precipitación media anual.

¹⁸² Ayala-Carcedo, F. J.: **Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad física y ecológica del Plan Hidrológico Nacional 2001**. La Directiva Marco del Agua: Realidades y Futuros. Actas del III Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas (Sevilla 2002), pp 253-271, Arrojo y Del Moral eds. Fundación Nueva Cultura del Agua, Zaragoza (2003). (Disponible en Internet. URL: http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/sevillaponenayala.pdf).



Figura 4.6

Reducción de los recursos hídricos prevista para 2060 por cuencas hidrográficas y en porcentajes respecto a las cantidades de 1996. El descenso de las precipitaciones y la mayor evaporación supondrán una disminución significativa de los recursos hídricos en todas las cuencas ibéricas, con especial incidencia en las del sur y sureste. Fuente: Ayala-Carcedo (2003).

Muchos de los cambios “recientes” ocurridos en el clima a escala global, que comentábamos en el capítulo 2, han sido también detectados en España, pudiéndose afirmar que el comportamiento climático a lo largo del siglo XX en la Península Ibérica está en consonancia con el ocurrido en el HN.

En uno de sus últimos trabajos, el insigne y recordado meteorólogo Inocencio Font Tullot quiso comparar los diferentes elementos climáticos de los principales observatorios españoles acontecidos durante los tres últimos periodos estándar (de 30 años) establecidos por la OMM, encontrando una “notable diferenciación de las peculiaridades climáticas del periodo 1961-1990 con respecto a las de los dos periodos anteriores [(1901-1930) y (1931-1960)]: mientras éstos no presentan entre sí diferencias significativas, salvo en la pluviosidad, el periodo 1961-1990 se manifiesta como claro exponente de la «crisis climática del siglo XX» (sic), tanto por el ascenso térmico, debido fundamentalmente a la mayor templanza de los inviernos, como por la inusitada

frecuencia de acontecimientos meteorológicos extraordinarios que durante su transcurso tuvieron lugar”¹⁸³.

La pregunta que podríamos hacernos es si nuestra percepción de la realidad se corresponde con ese aumento de los fenómenos extremos. ¿Sufrimos cada vez un mayor número de tormentas severas?, ¿está aumentando en España la frecuencia de aparición de tornados? Si bien algunos datos apuntan en este sentido¹⁸⁴, se echan en falta en nuestro país estudios que analicen en profundidad estas importantes cuestiones.

A la espera de un mayor apoyo oficial a las investigaciones sobre los fenómenos meteorológicos adversos, han comenzado a surgir en España, de forma espontánea y con Internet como nexo de unión, los primeros grupos de aficionados a la Meteorología en su faceta más extrema, convertidos todos ellos, cámara fotográfica en mano, en auténticos “kazadores” (empleando su argot) de este tipo de episodios¹⁸⁵ (Figura 4.7).



Figura 4.7

Bosque arrasado en la comarca soriana de Tierra de Pinares al paso de un tornado severo el 1 de junio de 1999. En España cada vez se documentan más episodios tornádicos, lo que podría o no (no se sabe a ciencia cierta) estar revelando una mayor frecuencia de aparición de unos años a esta parte. Autor: Vicente Sandoval Altelarrea.

Font Tullot vaticinaba al final de su trabajo que “es de prever que las condiciones climáticas de los periodos de 30 años posteriores al de 1961-1990 presenten diferencias notablemente mayores que las habidas en los periodos anteriores”, en la línea de los resultados a los que llega el IPCC.

Recientemente, Ayala-Carcedo acometió una labor parecida, al analizar los datos registrados en una selección de observatorios principales del INM durante el periodo

¹⁸³ Referencia 33 de la bibliografía.

¹⁸⁴ http://www.geocities.com/geo_info/geo/tornado/tornado.htm

¹⁸⁵ Podemos disfrutar de sus entusiastas reportajes en la web: <http://www.spainsevereweather.com>

1971-2000¹⁸⁶. Entre sus principales conclusiones destaca la subida de la temperatura media anual en la España peninsular en grado y medio a lo largo de dicho periodo¹⁸⁷, así como el aumento de las extremas (máximas y mínimas) y del número de días al año en los que la temperatura media superó los 25 °C.

El trabajo no es concluyente en cuanto a la precipitación, ya que no llega a detectar una tendencia estadísticamente significativa de la misma, aunque en algunos observatorios, especialmente del sur peninsular, sí que se han reducido ligeramente los totales anuales de precipitación, debido sobre todo a que llueve menos en invierno y primavera¹⁸⁸.

Esta última evidencia encajaría con la tendencia negativa de la precipitación en latitudes subtropicales que apunta el IPCC en su Tercer Informe, aunque, en la línea de lo comentado en el apartado anterior, no hay que olvidar que los MGCs no alcanzan la resolución espacial suficiente para discernir lo que pueda llegar a ocurrir en un ámbito geográfico tan reducido como la Península Ibérica. Recordemos, no obstante, que a nivel global los modelos indicaban para el presente siglo un aumento de las precipitaciones.

“Desestimada la idea de una reducción significativa de las precipitaciones, los modelos actuales de cambio climático hablan, para la península Ibérica, de una acentuación de los rasgos climáticos, que se traduciría en sequías mayores y en episodios de lluvias intensas con efectos de inundación”¹⁸⁹.

Exista o no una mayor o menor relación entre los cambios detectados en las temperaturas y precipitaciones y las emisiones de GEIs a la atmósfera, la evolución que estas últimas están teniendo en España merece un alto en el camino y una reflexión con la vista puesta en el futuro, antes de pasar a comentar el porvenir climático que nos espera en el siglo XXI.

Con la firma del Protocolo de Kyoto, la Unión Europea (UE) adquirió un compromiso, a alcanzar en el periodo 2008-2012, de reducción de sus emisiones contaminantes en un 8% con respecto a los niveles de 1990. Tras pactar cada estado miembro de la UE cuál debía de ser su tope de emisiones, a España se le autorizó a aumentarlas en un 15%. Esto, que en principio daba cierto margen a nuestro país, se ha convertido a día de hoy en algo inalcanzable.

La falta de un equilibrio adecuado entre el consumo de energía y el desarrollo económico comienza a pasarnos factura en términos de los GEIs, con un aumento espectacular de las cantidades emitidas que, de no dar España un giro radical a su política energética y medioambiental, le puede suponer fuertes sanciones económicas.

Tomando siempre como referencia el año base de 1990, en España prácticamente se han duplicado las emisiones de CO₂ en los últimos cinco años, pasando de un aumento del 23% a finales de 1999 a uno superior al 40% en 2003,

¹⁸⁶ Ayala-Carcedo, F. J.: **La realidad del cambio climático en España y sus principales impactos ecológicos y socioeconómicos**. Revista electrónica RAM, nº 21 (Mayo 2004). URL: <http://www.meteored.com/ram/numero21/cambioclimatico.asp>

¹⁸⁷ Este dato debemos de considerarlo meramente orientativo, pues de haberse elegido una selección diferente de observatorios dicho valor diferiría en algunas décimas de grado, mostrando en cualquier caso la tendencia positiva en la temperatura.

¹⁸⁸ Lo que parece estar relacionado con el mayor número de fases positivas de la NAO que se detecta en los últimos años.

¹⁸⁹ Toharia Cortés, M.; Olcina Cantos, J.; Rico Amorós, A. M.: **Certezas e incertidumbres sobre la hipótesis del cambio climático por efecto invernadero y sus posibles consecuencias en la Península Ibérica**. Investigaciones Geográficas, nº 20 (1998), pp 63-97. (Disponible en Internet. URL: <http://www.cervantesvirtual.com/portal/IIGG/catalogo.shtml>). En este interesante artículo los autores dan un repaso general a las principales conclusiones de las investigaciones sobre el cambio climático, criticando el exceso de catastrofismo que impregna algunas informaciones relacionadas con el tema.

siendo el país industrializado donde más han crecido estas emisiones. De seguir así las cosas, en el periodo 2008-2012 el aumento de las emisiones podría superar el 54%.¹⁹⁰

¿Seremos capaces de estabilizar nuestras emisiones de GEIs a la atmósfera? Como ocurre casi siempre, las políticas son las que al final arrastran a los ciudadanos, pues de nada sirve la concienciación colectiva del problema medioambiental si los políticos de turno no toman cartas en el asunto. En el caso concreto de España, se requiere un plan integral de modernización de la industria, la reconversión del sector energético (el que más contamina) y una mayor eficiencia en los transportes.

El auge que están teniendo en nuestro país las energías renovables abre un mundo de posibilidades y supone una alternativa real a los combustibles fósiles que, aparte de contribuir al efecto invernadero, se irán encareciendo cada vez más¹⁹¹. El objetivo que se ha marcado la UE para 2100 es la obtención del 12% de la energía de fuentes renovables como el viento (Figura 4.8) o la radiación solar.

¹⁹⁰ Información tomada del Informe: **Evolución de las Emisiones de GEIs en España (1990-2003)**, de Nieto, J. y Santamarta, J.

¹⁹¹ En el momento de escribir estas líneas (agosto de 2004) el precio del barril de petróleo supera los 40 \$, alcanzando máximos históricos y apuntando una tendencia alcista preocupante. Entre los múltiples frentes abiertos destacan la creciente demanda de la cada vez más motorizada China o los conflictos bélicos que permanentemente afectan a los países productores de petróleo de Oriente Próximo.



Figura 4.8

La proliferación de parques eólicos en España pone de manifiesto el auge que la energía eólica está teniendo en nuestro país, convirtiéndose cada vez más en una alternativa al uso de combustibles fósiles.

En España, la presencia de parques eólicos es cada vez mayor, siendo en la actualidad, con 6.500 MW, el tercer país del mundo, tras Alemania y los EEUU, en potencia eólica instalada. En estos momentos, la demanda real de electricidad en nuestro país ronda los 35.000 MW, de los que apenas 500 (de los 6.500 teóricos) son aportados por los aerogeneradores. Al ritmo actual de crecimiento, en ocho años se duplicará la potencia eólica instalada (Objetivo 2012: 13.000 MW).

Cuanto mayor sea el protagonismo de este tipo de alternativas energéticas, menor será, a priori, nuestro impacto en el sistema climático y menos catastrofistas los escenarios previstos. En el Cuadro VIII aparecen algunos de los hechos que con mayor probabilidad caracterizarán el clima de la Península Ibérica a lo largo del presente siglo.

La principal fuente de información consultada ha sido un trabajo elaborado a partir de los datos del Segundo Informe del IPCC (1995) y publicado en 1999¹⁹².

Cuadro VIII	PRINCIPALES PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA EL SIGLO XXI EN LA PENÍNSULA IBÉRICA
<ul style="list-style-type: none"> • Subida generalizada de las temperaturas medias anuales, mayor cuanto más hacia el sur y hacia el este y especialmente fuerte en los meses de verano. • La tendencia al alza en las temperaturas extremas será más acusada en el interior peninsular que en las zonas costeras del Mediterráneo. • Reducción de las precipitaciones, con inviernos más húmedos y el resto de estaciones más secas que en la actualidad. • Aumento de la variabilidad interanual de la precipitación, con una mayor frecuencia y severidad de las inundaciones y las sequías. • Mayor escasez de los recursos hídricos. • Aumento del nivel del mar entre los 20 y los 110 cm en promedio. 	

Los modelos indican una subida del nivel mar superior al promedio global, que recordemos oscilaba entre los 9 y los 90 centímetros (véase el Cuadro VII en el apartado 4.1) dependiendo de los escenarios que eligiéramos. Para el caso concreto de la Península Ibérica, en el escenario B1, el más favorable, las predicciones apuntan una subida de 2 cm por década, lo que para 2100 nos daría como resultado los 20 cm que aparecen en el Cuadro VIII. Esta subida, a pesar de ser la mínima predicha¹⁹³, podría empezar a afectar seriamente a humedales costeros como los del Parque Nacional de Doñana o los del Delta del Ebro.

En esta última zona de alto valor ecológico, al igual que a lo largo del litoral levantino (área turística por excelencia), el impacto probablemente sea mayor, debido a las mayores subidas que se prevén en el Mediterráneo, una de las zonas del mundo que se verá más afectada por el lento pero seguro ascenso del nivel del mar.

Pese a las noticias catastrofistas que podamos leer al respecto en la prensa (“El litoral valenciano puede desaparecer hacia 2100”; Las Provincias, 6 de abril de 1998), todavía son muchas las incógnitas que encierra una predicción de esta naturaleza, existiendo un amplio margen entre lo que pueda pasar y lo que finalmente suceda.

Sobre el ascenso de las temperaturas a lo largo del presente siglo existen pocas dudas, si bien la magnitud del mismo varía considerablemente dependiendo de los escenarios que consideremos. Hacia 2080 y en el escenario B1, el aumento de la temperatura media anual oscila entre 1,5 °C en el noroeste y 1,8 °C en el sur, mientras que si elegimos el escenario menos favorable, el A2, la subida rondará los 6 grados en Andalucía (Figura 4.9).

Estos resultados nos llevan a pensar que la época del año en la que se podrían alcanzar los terribles 40 °C se extendería más allá del verano, hasta los meses de abril, mayo y septiembre, alargándose e intensificándose el estiaje estival en todo el interior peninsular, donde cada vez sería más habitual registrar máximas en torno a los 45 °C, acercándonos en ocasiones a los 50. En palabras de John Houghton, el que fuera

¹⁹² Hulme, M.; Sheard, N.: **Escenarios de cambio climático para la Península Ibérica**. Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia, Norwich, Reino Unido (1999). (Disponible en Internet. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/iberia.pdf>).

¹⁹³ En promedio para todo el litoral peninsular.

principal responsable científico del Segundo Informe del IPCC (1995), “España sufrirá más sequía y más calor durante el próximo siglo”.

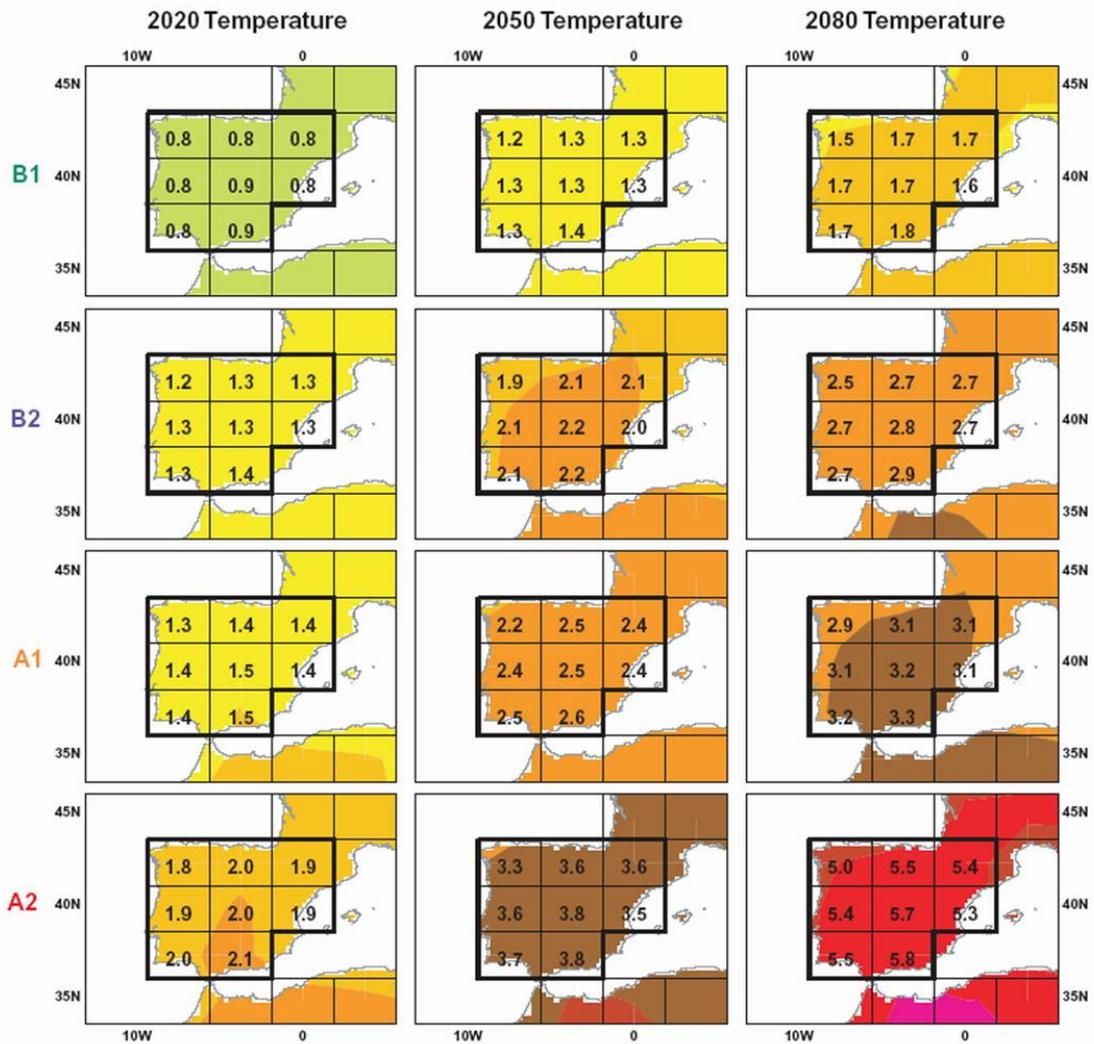


Figura 4.9

Cambios en la temperatura media anual (en grados centígrados con respecto a los valores promedio del periodo 1961-90) para periodos de 30 años centrados en las décadas de 2020, 2050 y 2080, para los escenarios B1, B2, A1 y A2. Cada una de las celdillas consideradas tiene asignado un número que refleja el cambio de temperatura estimado para cada caso. Fuente: CRU (Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia). [Véase la referencia de la nota 192].

Respecto a la disminución prevista de las precipitaciones (Cuadro VIII), en promedio anual y para toda la Península Ibérica, alcanzará entre un 5 y un 15 por ciento, como siempre dependiendo de los escenarios elegidos, aunque su variabilidad, tanto espacial como temporal, impide por el momento sacar grandes conclusiones acerca de su comportamiento a escala regional.

Es de esperar que la constante mejora en los MGCs y el desarrollo de los modelos regionales de área limitada (LAM)¹⁹⁴, de mayor resolución espacial, vayan aportando predicciones mucho más ajustadas a la realidad climática española. Pese a los avances de los últimos años, aún queda mucho trabajo por hacer. Descender de escala en las proyecciones futuras supone un reto tecnológico de primer orden y el esfuerzo conjunto de toda la comunidad científica.

Saber con garantías si en una determinada comarca española lloverá un 15% menos en 2100, y los impactos que eso acarreará, es algo tan difícil de conocer en la actualidad como necesario. ¿Seremos capaces de predecir acertadamente la evolución de los climas de España a tan largo plazo?, ¿se pondrán en marcha políticas efectivas de adaptación a los cambios?, ¿seguirán dichos cambios las pautas que actualmente sugieren los modelos o surgirán a lo largo del siglo XXI “sorpresas” imprevistas en el clima? y, de ocurrir esto último, ¿lograremos detectarlas a tiempo?

¹⁹⁴ En un LAM la zona de interés (la Península Ibérica en nuestro caso) es cubierta por una malla de mayor resolución (celdillas más pequeñas) que la correspondiente al MGC, logrando así un mayor nivel de detalle y un resultado final más ajustado a la realidad. De todas formas, la técnica en cuestión no logra corregir los errores de predicción que pudiera introducir el MGC original.

Epílogo y agradecimientos.



Autor: Francisco José Rodríguez.

Con todas estas reflexiones y cuestiones abiertas llegamos al final de un libro, necesariamente introductorio, que espero que haya despertado su interés y curiosidad. Si esto es así habrá cumplido su misión y como autor del mismo me sentiré satisfecho.

Aunque son muchas las incertidumbres que sigue encerrando el cambio climático, quizás la principal conclusión que tendríamos que sacar es la de que los seres humanos somos los principales responsables de las alteraciones que se vienen detectando en el sistema climático en los últimos años, las cuales tendrán su incidencia en el clima futuro.

A causa de nuestras emisiones de GEIs a la atmósfera hemos empezado a desequilibrar energéticamente el planeta, y aunque éste cuente con mecanismos naturales que traten de compensar ese desequilibrio, en esta ocasión podrían mostrarse ineficaces debido a la magnitud de los cambios de origen antrópico y al ritmo al que se están produciendo, ¡¡un hito en la historia de la Tierra!!

Salvo que en las próximas décadas se llegara a colapsar la circulación profunda del océano y se iniciara un periodo frío similar al *Younger Dryas*, todo apunta a que el calentamiento global marcará climáticamente el resto de siglo XXI. El incremento de temperatura que finalmente se alcance dependerá de la manera y la rapidez con la que cambiemos nuestro actual modo de vida. Salvo que todos los gobernantes, sin excepción, den un giro radical a sus políticas energéticas, el escenario que alcancemos a finales de siglo será el más catastrofista de todos los previstos por el IPCC y no nos resultará nada fácil adaptarnos a él.

También debemos ser conscientes de que podríamos estar llegando a un peligroso punto de no retorno, de manera que ni alcanzando un nivel cero en nuestras

emisiones de GEIs a la atmósfera (algo técnicamente imposible) se estaría garantizando una vuelta a la “normalidad” en el clima, ya que el océano, con su mayor tiempo de respuesta, seguirá distribuyendo el calor almacenado desde 1750¹⁹⁵.

Uno de los problemas que surgen cuando intentamos analizar qué hay de verdad en todo esto del cambio climático es, y parece una contradicción, la enorme cantidad y variedad de informaciones y enfoques que existen al respecto, lo que en más de una ocasión en vez de aclararnos las ideas las dispersa, convirtiendo el asunto en inabordable por el ciudadano de a pie.

Se agradece, por tanto, cualquier esfuerzo dirigido a establecer unas claves del tema, y es aquí donde cobra importancia el papel de la divulgación científica y, en particular, la brillante labor llevada a cabo por el profesor Javier Martín Vide, prestigioso climatólogo de la Universidad de Barcelona quien, demostrando una excelente capacidad de síntesis, ha establecido el siguiente *Decálogo del cambio climático*¹⁹⁶, sobre el que haré algunos comentarios a modo de conclusión:

1. La variabilidad es una de las características esenciales del sistema climático

He insistido deliberadamente sobre este asunto a lo largo del libro con la intención de que esta idea nos quede clara. Cualquier parámetro meteorológico o climático que se nos ocurra muestra una variabilidad a todas las escalas, con independencia o no de las tendencias en su comportamiento cronológico.

2. A lo largo de la historia geológica del planeta ha habido cambios climáticos numerosos y de notable magnitud

Debemos ser conscientes de que los grandes cambios son una constante en la historia climática de la Tierra y de que nosotros hemos empezado a influir sólo durante una pequeñísima fracción de tiempo de esa historia. Sin querer restar importancia a la influencia antrópica, lo cierto es que ni los peores escenarios previstos por el IPCC son comparables a algunos episodios ocurridos en el pasado.

3. La brevedad de las series meteorológicas instrumentales para el análisis de las variaciones y tendencias climáticas obliga al empleo de los proxy data

La época instrumental, iniciada en 1860, no es un periodo suficientemente representativo del clima terrestre. Los cambios climáticos sólo pueden dibujarse y comprenderse en un marco temporal al menos plurisecular.

4. La composición química de la atmósfera se ha modificado desde el inicio de la Revolución Industrial por causa antrópica

En el apartado 2.5 dimos buena cuenta de ello. Quedan pocas dudas sobre nuestra responsabilidad directa en el incremento de GEIs en la atmósfera y el consiguiente aumento de la temperatura media planetaria.

¹⁹⁵ El inicio de la Revolución Industrial.

¹⁹⁶ Martín Vide, J.: **Diez miradas diferentes sobre el cambio climático**. Recerca i innovació a l'Aula de Ciències de la Natura pp 33-47. VI Simposi sobre l'Ensenyament de les Ciències de la Natura, Balaguer (2002).

Martín Vide, J.: **Decàleg del canvi climàtic**. En J. Vilà Valentí (Coord.) Medicina, Medi ambient i clima. Investigacions punta per al 2000, pp 217-242, Barcelona, Fundació Catalana per a la Recerca (1999).

Consúltese también una interesante y extensa entrevista realizada al profesor Martín Vide a principios de 2004: <http://www.meteored.com/ram/numero20/entrevista1.asp>

5. **A lo largo del último siglo la temperatura media planetaria se ha incrementado en, aproximadamente, 0,5 °C**

En este punto el profesor Martín Vide nos indica que “el valor de 0,5 °C/siglo [0,6 °C desde 1860] como incremento térmico está en el límite de lo que puede asumir el sistema climático en su comportamiento normal. Por tanto, no sería necesario todavía recurrir a la explicación antrópica, (...) aunque las evidencias se acumulan a su favor”.

6. **Las anomalías y los episodios meteorológicos extremos no tienen que ver con el cambio climático, aunque, probablemente, un aumento o intensificación de los mismos sea indicio de cambio climático**

Importante cuestión ésta, que como hemos visto confunde a menudo a la opinión pública, al no saber (o no querer) ver nuestra responsabilidad en la magnitud final que alcanza una catástrofe natural. Los fenómenos meteorológicos extremos han existido siempre, formando parte del comportamiento normal de la atmósfera.

7. **La percepción climática difiere a menudo de la realidad climática, por lo que los presuntos cambios “percibidos” casi nunca cuentan con el aval de los registros instrumentales**

Debo recurrir aquí también a la exquisita prosa de Martín Vide, cuando afirma que “la memoria humana es siempre selectiva: olvida o, en un sentido contrario, magnifica ciertos hechos pasados, y agranda y detalla lo más reciente, con un calendario propio de cada sujeto”.

8. **El cambio climático antrópico (si se confirma su realidad) es uno de los pocos asuntos que afecta y ha de interesar a toda la humanidad**

Quizás este carácter universal ayude a concienciar a los políticos a la hora de tomar las medidas que, con carácter urgente, les piden los científicos y parte de la ciudadanía. El interés común debe primar sobre los intereses particulares.

9. **El cambio climático reúne las condiciones de tema “estrella” para los medios de comunicación**

La prensa nos ofrece casi a diario noticias relacionadas con el cambio climático, si bien éstas pecan a menudo de sensacionalismo, adoptando casi siempre un tono catastrofista. Internet también está plagado de contenidos sobre el tema¹⁹⁷ y es que “el cambio climático y, especialmente, el calentamiento global, se han convertido en el tema medioambiental más comentado desde la década de los noventa”¹⁹⁸.

10. **Las incertidumbres sobre la realidad climática y las consecuencias del cambio climático requieren aún la consideración de éste como área prioritaria de investigación**

Poco a poco esto se va consiguiendo. En una lista, que publicaba la revista *Science* a finales de 2003, sobre los diez avances científicos más importantes de ese año, el impacto del cambio climático ocupaba un destacado tercer puesto, algo impensable hace unos pocos años. “El cambio climático «actual» (sic) encierra incógnitas que es preciso desvelar para poder avanzar en el estudio del sistema climático terrestre, evitando caer en dogmatismos catastrofistas que obstaculicen la

¹⁹⁷ Introduciendo en el buscador Google el término *Climate Change* aparecen nada menos que ¡¡11.500.000 enlaces!! Al restringir nuestra búsqueda al término en castellano (*Cambio Climático*) la cosa se reduce “sólo” a 121.000 (búsqueda efectuada en agosto de 2004).

¹⁹⁸ Referencia 35 de la bibliografía.

elaboración de investigaciones serias sobre una cuestión de tanta importancia para el futuro de nuestro planeta”¹⁹⁹.

Le invito, por último, a ampliar los contenidos abordados en el libro usando la bibliografía. En ella se incluyen una serie de lecturas complementarias para poder profundizar en todos estos temas y seguir, con mayor interés si cabe, la siempre apasionante actualidad meteorológica y climática.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi mujer, Susana, el apoyo constante recibido durante la redacción del libro, así como sus útiles sugerencias y la revisión del manuscrito final, que corrió a su cargo. Gracias amor mío por estar a mi lado en este 2004, año sabático “a la fuerza”, tan triste y tan feliz a la vez. También debo agradecer en lugar destacado al editor de este libro y amigo mío, Jorge Ruiz, el haberme dado la oportunidad de publicar este trabajo. Aunque con algún retraso según lo previsto, aquí está el libro que en su día te prometí. Al director de la colección, Bartolo Luque, le agradezco la confianza y el interés mostrado cuando en el otoño de 2002 le hablé de mi proyecto de libro.

Son varias las personas, grandísimos profesionales todos ellos, que han aportado su granito de arena a esta obra y a las que estaré eternamente agradecido. En ellos he encontrado todas las buenas cualidades que definen a la gente de bien. Es un honor haber contado con la colaboración altruista del catedrático de la Universidad de Barcelona D. Javier Martín Vide, quien respondiendo con rapidez a mi petición, me permitió incluir en el epílogo su *Decálogo del Cambio Climático*. Tampoco puedo olvidarme del también catedrático D. Antón Uriarte Cantolla, de la Universidad del País Vasco, por haberme cedido cuantas figuras de su página web le solicité para ilustrar el texto.

Agradezco a mi buena y admirada amiga Mayte Piserra, jefa de Negocio Internacional de MAPFRE Agropecuaria (ocupando hasta abril de 2004 la subdirección de Riesgos de la Naturaleza en MAPFRE Re), su permanente ayuda en cualquier cuestión que se tercié. Las diferentes informaciones sobre riesgos naturales y cambio climático que me fue facilitando me ayudaron a preparar algunas partes del libro, sin olvidarme tampoco de sus precisos comentarios finales sobre el libro, tanto en la forma como en el contenido.

Mención especial merecen también Manuel Palomares, Paco Martín León y Ricardo Torrijo, meteorólogos del INM que, aparte de ofrecerme sus amplios conocimientos en materia meteorológica, me brindan desde hace tiempo su aprecio y amistad. Les agradezco de corazón el tiempo que dedicaron a la lectura crítica del manuscrito y, al primero de ellos, también el generoso prólogo que me regaló.

En la parte gráfica no me olvido de Nacho, ex-compañero de Antena 3, y de su dominio del Adobe Photoshop, cuyo resultado final salta a la vista al ver las figuras que amablemente adaptó para el libro (2.21, 2.23, 2.24, 3.2, 3.15, 3.16 y 3.21). Un recuerdo especial también para José Antonio Palao, mi último becario en la “tele”, que puso a mi disposición su interesante trabajo sobre teleconexiones climáticas, y para Manuel Vázquez Abeledo por facilitarme la fuente de la figura 3.19.

Agradezco la participación activa de un fantástico grupo de aficionados a la Meteorología en la elección de algunas de las fotografías que aparecen en el libro, incluida la portada. Aprovecho estas líneas para decirles a todos ellos, foreros del portal

¹⁹⁹ Referencia de la nota 189.

meteored (<http://www.meteored.com>), que *spissatus* os da las gracias por haberle mandado vuestras fotografías y por compartir tan buenos ratos con todos vosotros. Agradezco especialmente a Francisco José Rodríguez (*mammatus*) su colaboración.

El último recuerdo es para mi familia, en especial para mis padres y suegros, a quienes espero que les guste el libro. En el futuro me gustaría seguir contagiándoles mi enorme curiosidad e interés por las ciencias atmosféricas y continuar siendo su *hombre del tiempo* particular, lo que me llena de satisfacción.

José Miguel Viñas Rubio
jmvinasrubio@yahoo.es

Madrid, septiembre de 2004

Bibliografía.

La presente bibliografía no pretende ser exhaustiva pero sí lo suficientemente amplia como para ofrecer al lector una visión completa y pluridisciplinar sobre el cambio climático. He establecido una división en tres categorías: *Libros I (monografías)*, *Libros II (no monografías)* y *Lecturas complementarias*, estando las referencias ordenadas alfabéticamente y por autor o institución, salvo en la última categoría, donde el orden es cronológico.

Libros I (monografías)

1. Balairón, L. (Coord.): **El cambio climático**. El campo de las Ciencias y las Artes nº 137. Servicio de Estudios del BBVA (2000).
2. Creus Novau, J.; Beorlegui Zozaya, M.; Fernández Cancio, A.: **Cambio Climático en Galicia**. Xunta de Galicia (1995).
3. Duplessy, J-C.; Morel, P.: **Temporal sobre el planeta**. Acento (1993).
4. Font Tullot, I.: **Historia del clima de España. Cambios climáticos y sus causas**. INM (1988).
5. Garduño, R.: **El veleidoso clima**. Col. *La ciencia para todos* nº 127. Fondo de Cultura Económica (1998).²⁰⁰
6. Godrej, D.: **Cambio Climático**. Intermón Oxfam (2002).
7. Gribbin, J.: **El efecto invernadero y Gaia**. Col. *Ciencia Hoy*. Pirámide (1991).
8. Gribbin, J.: **El clima futuro**. Biblioteca científica Salvat (1994).
9. IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático): **Tercer Informe de Evaluación. Cambio Climático 2001. La base científica. Resumen para Responsables de Políticas y Resumen técnico**. IPCC (2001).²⁰¹
10. Le Roy Ladurie, E.: **Historia del clima desde el año 1000**. Fondo de Cultura Económica (1991).
11. Llebot, J. E.: **El cambio climático**. *Cuadernos de Medio Ambiente*. Rubes Ed. (1998).
12. Linés Escardó, A.: **Acción del hombre en el clima y contaminación**. INM (1985).
13. Linés Escardó, A.: **Cambios en el sistema climático. Una aproximación al problema**. INM (1990).
14. Martín Chivelet, J.: **Cambios climáticos. Una aproximación al sistema Tierra**. Col. *Mundo vivo*. Eds. Libertarias (1999).
15. Montón Chiva, E.; Quereda Sala, J.: **¿Hacia un Cambio Climático? La evolución del clima mediterráneo desde el siglo XIX**. Fundación Dávalos-Fletcher (1997).
16. OECC: **Cambio climático: Ciencia, impactos, adaptación y mitigación (Principales conclusiones del tercer informe de evaluación del IPCC)**. M° de Medio Ambiente (2002).
17. Pons, G. X.; Guijarro, J. A.(eds.): **El canvi climàtic: Passat, present i futur**. Monografías de la SHNB nº 9 (2002).

²⁰⁰ Disponible en Internet.

URL: <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/127/htm/veleidos.htm>

²⁰¹ Disponible en Internet. URL: <http://www.ipcc.ch/pub/un/ipccwg1s.pdf>

NOTA: En esta monografía se incluye un amplio *Resumen del tercer informe científico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)* elaborado por José Antonio Guijarro (en castellano).²⁰²

18. Quereda Sala, J.; Montón Chiva, E.; Escrig Barberá, J.; Gil Olcina, A.; Olcina Cantos, J.; Rico Amorós, A.: **Nuestro porvenir climático: ¿Un escenario de aridez?** Publicaciones de la UJI (2001).
19. Rivera, A.: **El cambio climático: El calentamiento de la Tierra.** Col. *Temas de debate*. Debate (2000).
20. Ruiz de Elvira, A.: **Quemando el futuro. Clima y cambio climático.** Col. *Matices*. Nívola (2001).²⁰³
21. Sadourny, R.: **El clima de la Tierra.** Col. *Dominós*. Debate (1994).
22. Uriarte Cantolla, A.: **Historia del Clima de la Tierra.** Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco (2003).²⁰⁴
23. Vázquez Abeledo, M.: **La historia del sol y el cambio climático.** Serie McGraw-Hill de divulgación científica (1998).
24. VVAA -Gribbin, J. (Coord.): **El planeta amenazado.** Col. *Guías científicas*. Pirámide (1987).
25. VVAA -Torrego Giralda, A. (Coord.): **Cambio climático. Hacia un nuevo modelo energético.** COFIS (1999).
26. VVAA: **La energía y el cambio climático.** *XII Jornadas Nacionales sobre Energía y Educación*. FAE (1995).
27. VVAA: **Energía y cambio climático.** *Serie Monografías*. Mº de Medio Ambiente (1998).

Libros II (no monografías)

28. Ayala-Carcedo, F.; Olcina Cantos, J. (Coords.): **Riesgos naturales.** *Ariel Ciencia*. Ariel (2002). *Varios capítulos*.
29. Barry, R. G.; Chorley, R. J.: **Atmósfera, tiempo y clima.** Omega (7ªed.-1999). *Capítulo 11: El cambio climático*.
30. Casas Castillo, M. C.; Alarcón Jordán, M.: **Meteorología y clima.** Edicions UPC (1999). *Capítulos 5 (Física del clima) y 6 (Modelización del clima)*.
31. Catalá, J.: **Contaminación y conservación del medio ambiente.** Col. *A.J. Alhambra* (1989). *Capítulo 4: Contaminación y cambios climáticos*.
32. Cuadrat, J. M.; Pita, M. F.: **Climatología.** Cátedra (2000). *Capítulo 2: El sistema climático y Capítulo 7: Los cambios climáticos*.
33. Font Tullot, I.: **Climatología de España y Portugal** (Nueva versión). Eds. Universidad de Salamanca (2000). *Apéndice 3: Examen comparativo de las normales climáticas correspondientes a los periodos 1901-1930, 1931-1960 y 1961-1990, a la vista del "cambio climático"*.
34. García-Legaz Martínez, C.; Valero Rodríguez, F. (Editores): **Riesgos climáticos e impacto ambiental.** Ed. Complutense-Madrid (2003). *Selección de artículos de VVAA*.
35. Lomborg, B.: **El ecologista escéptico.** Espasa Hoy (2003). *Capítulo 24: El calentamiento global*.

²⁰² Disponible en Internet. URL: <http://home3.worldonline.es/jaguijar/ipcc.html>

²⁰³ Consúltense también la página web personal del autor, con informaciones muy variadas sobre el cambio climático y otros temas afines. URL: <http://www.not-clima.net>

²⁰⁴ Gran parte del contenido de este libro se encuentra disponible en la web personal del autor. URL: <http://homepage.mac.com/uriarte/>

36. Novo, M. (Coord.): **Los desafíos ambientales. Reflexiones y propuestas para un futuro sostenible.** Universitas (1999). *Capítulo 7: Clima y cambio climático (Antonio Ruiz de Elvira).*
37. Sagan, C.; Turco, R.: **Un efecto imprevisto: El invierno nuclear.** *Biblioteca de divulgación científica MUY.* RBA (1993). *Apéndice A (El clima: La máquina de energía global).*

Lecturas complementarias

38. **El clima.** Libros de Investigación y Ciencia. Selección e Introducción de Manuel Puigcerver Zanón (1991).
39. **El efecto invernadero.** Especial de Mundo Científico. Vol. 12; nº 126 (1992).
40. **El clima y sus efectos: Conocimientos e incertidumbres.** Monográfico de la Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 93; nº 1 (1999).
41. **Cambio climático: Las lecciones del pasado.** Dossier de Mundo Científico. Nº 204 (Septiembre de 1999).
42. **El clima.** Temas de Investigación y Ciencia nº 26. (2001).
43. **Cambio climático.** Dossier de Mundo Científico. Nº 236 (Julio de 2002).
44. Boletín de la OMM. Vol. 52; nº 3 (Julio de 2003).
45. **Cambio climático. Hacia el calentamiento global.** National Geographic España. Vol. 15; nº 3 (Septiembre de 2004).

Nota final del autor:

A finales del mes de octubre de 2004, unos días antes de que el manuscrito original de este libro fuera entregado a la editorial Equipo Sirius para su publicación, saltaba a las primeras páginas de los periódicos una noticia de gran trascendencia en relación con el cambio climático: la ratificación por parte de Rusia del Protocolo de Kyoto, lo que definitivamente dará luz verde a la entrada en vigor de dicho acuerdo internacional.

El rechazo que mantenían EEUU y Rusia, que comentamos al principio del capítulo 4, mantenía en suspenso la aplicación del tratado, al no sumar entre todos los países firmantes el 55% del total de emisiones de GEIs, tal y como establece el citado Protocolo. Tengamos en cuenta que en 1990 (año de referencia) sólo EEUU emitía a la atmósfera el 36% del total.

Aunque el cumplimiento del Protocolo de Kyoto no conseguirá detener el ascenso de las temperaturas a lo largo del presente siglo, sí que obligará a muchos países a reducir sus emisiones, para lo que tendrán que apostar definitivamente por nuevas fórmulas energéticas.

Si bien es positivo haber conseguido dar ese primer paso, las cosas no serán fáciles y todavía son muchas las dificultades que hay sobre la mesa. Es previsible que EEUU, aún sin firmar el Protocolo de Kyoto, vaya reduciendo también sus emisiones, pues su avanzada tecnología se lo irá permitiendo. El problema más grave lo tenemos actualmente en países como China o la India, donde las emisiones contaminantes crecen a un ritmo sin precedentes que, a finales de 1997 (hace apenas 7 años), en la cumbre de Kyoto, nadie cuantificó en su justa medida.