

SANZ HERRAIZ, C. (2009): “Consecuencias geográficas del Cambio Climático”.
En RAMOS CASTELLANOS, P., *Cambio Climático, ¿un desafío a nuestro*
***alcance?*, Salamanca, Universidad de Salamanca: 47-81**

¿Qué me aconseja usted que visite ahora? –preguntó (el principito)-
La Tierra -le contestó el geógrafo-. Tiene muy buena reputación
Le Petit Prince, Antoine de Saint-Exupéry, 1943

Introducción

La superficie de La Tierra muestra una organización espacial dependiente de la compleja interacción de los sistemas físicos, biológicos y humanos que en ella se manifiestan. La esfera del paisaje, en la que concurren todas las esferas que entran en contacto en esa superficie, muestra en su diversidad actual esa complejidad. El sistema global de La Tierra y los de cada uno de los subsistemas que lo integran son dinámicos, manifiestan recurrencias cíclicas y procesos evolutivos; el cambio es una de las características esenciales de la superficie de La Tierra y de sus paisajes. A través de diversos testimonios del pasado, hemos podido realizar reconstrucciones más o menos hipotéticas de los climas, los relieves, las biotas y sobre todo de los paisajes, los cuales comienzan a configurarse desde el momento en que el hombre aparece sobre el planeta.

Cualquier cambio importante en un subsistema físico o biológico suele inducir cambios y ajustes en los restantes; por ejemplo, se sabe que los cambios geológicos en la distribución de Tierras y mares influyeron en la distribución de los climas y en la extinción, evolución y diversificación de los seres vivos, que modificaciones de las corrientes marinas favorecieron la expansión de la Criosfera, o que los cambios en las

condiciones climáticas y la vegetación modificaron las condiciones de vida y los hábitos de las sociedades prehistóricas. Contemplando la complejidad de sistemas y factores que afectan a la superficie terrestre y la interacción entre ellos sólo podemos hablar de *cambio climático* haciendo abstracción de la realidad para centrarnos en la consideración de un sistema; lo que en ella se manifiesta finalmente por la variación de un sistema o de varios que interactúan es un *cambio global*, aunque la primera o más evidente manifestación del mismo se refleje en la temperatura de la Atmósfera o en otros parámetros climáticos.

La Geografía es la ciencia que estudia las estructuras espaciales que se organizan y aprecian en la superficie de La Tierra como consecuencia de la interacción de todos los subsistemas que forman parte del sistema global Tierra. Esas estructuras están integradas por áreas de diversa localización y extensión y por los mosaicos de muy distinto carácter en los que estas se organizan. Identificar las áreas, ámbitos o lugares en las que se manifiestan los fenómenos, explicar su origen, evolución y caracteres, detectar, describir e interpretar las estructuras espaciales en las que se integran las áreas y los sistemas que las organizan constituyen tareas esenciales de la ciencia geográfica.

Los fenómenos geográficos tienen por tanto una dimensión espacial, se proyectan en la superficie de La Tierra y son perceptibles a diversas escalas; evidentemente la escala de percepción de la distribución de áreas continentales y marítimas es muy diferente de aquella que permite identificar el área de distribución de una especie endémica; la escala de percepción de la circulación atmosférica general es totalmente distinta a la de percepción de los llamados microclimas. De uno a otro extremo, desde la pequeña escala que permite contemplar globalmente la superficie del planeta para observar áreas y estructuras de grandes dimensiones, a la gran escala que permite observar las áreas en las que se manifiestan fenómenos de pequeña extensión, existe un extenso gradiente de escalas espaciales.

Esas distribuciones espaciales de los climas o de sus parámetros se representan en los mapas, documentos gráficos que reflejan la distribución de los mismos en un momento determinado, como una imagen espacial estática. No obstante, si exploramos ese espacio que reflejan los mapas, encontraremos que en él existen huellas de la acción de otros climas del pasado diferentes a los actuales: huellas geológicas y geomorfológicas como las rocas, sedimentos y sobre todo formas cuya génesis no se corresponde con los climas actuales;

huellas biológicas como los fósiles o los pólenes conservados en las turberas que constituyen registros de la evolución de la fauna y la vegetación en el área; huellas de la composición y temperatura de las aguas, preservadas en los depósitos del fondo marino o en los lagos, huellas de la composición y caracteres de la Atmósfera sepultadas en los hielos... En el espacio geográfico las huellas del tiempo nos permiten reconstruir la secuencia de climas del pasado y realizar hipótesis, más o menos fundamentadas, sobre las causas de los cambios y, a pesar de la complejidad de las dinámicas, teniendo en cuenta las peculiaridades de la situación actual, predecir las tendencias y los probables climas del futuro. El cambio climático¹ es un proceso físico-químico y geográfico, afecta a la superficie de la Tierra, el campo de acción de la Geografía, donde cada lugar impone sus propias leyes a la manifestación de los fenómenos vinculados al clima. El cambio climático, como cualquier cambio producido en un subsistema terrestre, puede ser mitigado o amplificado en su interacción con el resto de los subsistemas, en todo caso se traduce en un cambio global difícil de predecir por la cantidad de factores encadenados implicados en el mismo y por la diversa naturaleza de estos integrados en sistemas biofísicos y sociales.

Aspecto esencial de los paisajes que se aprecian en la faz de la Tierra es su carácter dinámico, están sometidos a cambios constantes cíclicos y evolutivos. Los paisajes actuales son el resultado de una larga historia de cambios geológicos, climáticos, hidrológicos, biológicos y humanos, una larga historia que se remonta a 4.600 millones de años. Es bien conocido que los diversos subsistemas que integran el sistema Tierra manifiestan sus cambios evolutivos a muy diversa escala temporal. Los cambios geológicos que conducen a la separación de las placas litosféricas, la formación de las cordilleras, la génesis de las rocas, ... requieren ámbitos temporales de millones de años (escala del tiempo geológico), aunque existen también procesos geológicos como las erupciones volcánicas o los terremotos de corta duración; los procesos geomorfológicos que dan forma final a la superficie de la Tierra, como la erosión y la sedimentación, pueden ser también de larga duración, aunque en general son más breves. Los cambios geológicos han inducido cambios climáticos muy importantes; no obstante se han producido también cambios climáticos a otras escalas temporales vinculados a la variabilidad de la energía solar emitida y recibida, a

¹ En el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático se reserva esta denominación para el cambio inducido por la actividad humana, empleándose el término "variabilidad climática" para las modificaciones debidas al funcionamiento natural del clima. "Por 'cambio climático' se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la Atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables"

modificaciones en la composición de la Atmósfera producidas por la actividad de la biosfera y, en periodos más recientes, en lo que podríamos llamar el tiempo histórico, un tiempo relativamente corto respecto de los anteriores, preocupa que los cambios que la actividad del hombre ha introducido en la biosfera y los que está introduciendo en la composición de la Atmósfera puedan desestabilizar el sistema y conducir a un cambio difícilmente predecible. El sistema global, como todo sistema complejo, puede encontrar su equilibrio en diversos estados, no obstante la naturaleza y velocidad del hipotético cambio introducido por el hombre crea incertidumbre porque no tiene antecedentes aparentes en la historia de la Tierra.

La evolución de los datos de los elementos climáticos (temperatura, humedad, precipitaciones, presiones y vientos), cada vez más abundantes y precisos, y los tipos de tiempo que se van haciendo habituales o frecuentes en un lugar determinado, permiten apreciar las tendencias de variabilidad climática. El clima se define por la sucesión de tipos de tiempo en un lugar y por los promedios de un conjunto de variables o parámetros; se ha dicho que es una abstracción matemática, una normalidad promediada. El clima no es por tanto una realidad perceptible; no obstante, es posible apreciar algunos de sus caracteres a través de indicadores climáticos como la vegetación natural, los procesos geomorfológicos, los suelos o los paisajes. Los tipos de tiempo habituales constituyen nuestra fundamental experiencia climática, sin embargo los esporádicos o los fenómenos atmosféricos extraordinarios, atribuidos actualmente con frecuencia al cambio climático, pueden no ser indicativos de ningún tipo de clima, ni de ningún cambio, frecuentemente sólo muestran la variabilidad caótica del clima², como la de muchos otros sistemas complejos, estos llegarán a ser indicativos del cambio si en un determinado lugar no existían o no eran habituales y pasan a serlo.

1. La complejidad del sistema global en la superficie de la Tierra. Cambios en el espacio y a través del tiempo

En esta superficie entran en contacto la Litosfera, capa sólida sometida a deformación continua y localizada por la acción de la tectónica terrestre, de la que sólo percibimos la parte más externa, modelada constantemente por procesos vinculados a la acción del sistema global que se manifiesta en superficie y en el que se integran también las

² Los resultados que consideramos caóticos ocultan muchas veces regularidades no controladas, debido frecuentemente a que se sitúan en escalas de tiempo diferentes a aquella en que estamos trabajando o a que son introducidos por factores del sistema Tierra no controlados que interactúan con el sistema climático.

restantes capas; la Atmósfera, cobertura gaseosa, espesa y estratificada de composición y caracteres dinámicos variables a lo largo del tiempo; la Hidrosfera, capa líquida fundamentalmente, aunque también sólida y gaseosa que se encuentra en todas las capas superficiales – Litósfera, Biosfera y Atmósfera- formando con esta última el motor fundamental del clima; por último la Biosfera, la esfera de la vida que comenzó en los mares y se fue expandiendo por el conjunto de la superficie de la Tierra, colonizando en diversas y múltiples formas la casi totalidad de la misma. Dentro de la Biosfera, el hombre (Antroposfera o Noosfera) constituye un elemento singular por su capacidad para transformar los caracteres, las estructuras y el funcionamiento de los sistemas naturales en la superficie terrestre.

En estas capas se han conservado huellas del pasado climático de la Tierra, datos indirectos (*proxy*), que permiten deducir los caracteres y la variabilidad de alguno de los parámetros fundamentales del clima y reconstruir secuencias temporales, más o menos precisas y largas, de la evolución de los mismos.

1.1 La Litósfera y la dinámica cortical en su relación con el clima y el cambio climático³

La Litósfera es la capa sólida más externa del planeta Tierra, a través de ella se emite a la superficie el calor interno del núcleo, la energía geotérmica, energía que es el motor de las placas litosféricas y por lo tanto de la diversa localización de Tierras y océanos a través de la historia de la Tierra, fenómeno que ha tenido una evidente influencia en los climas. Esta distribución ha cambiado en periodos de millones de años y los cambios climáticos que se relacionan con ella fueron importantes y lentos, apreciables a lo largo del tiempo geológico.

La Litósfera es rugosa e irregular (Toposfera), fuera de los océanos posee cordilleras cuyas cumbres se elevan a más de 8.000 m de altitud sobre el actual nivel del mar y elevadas y extensas mesetas en el interior de algunos continentes que confieren caracteres regionales a algunas masas de aire; elementos topográficos que interfieren la circulación atmosférica en superficie produciendo efectos climáticos notables. La posición, construcción y destrucción de cordilleras, mesetas y llanuras también ha variado a lo largo

3. No intentamos separar, de forma totalmente artificial, la influencia de cada una de las capas en la dinámica atmosférica, sino considerar aquellas influencias que tienen su origen en cada capa y contemplar, desde la consideración de las mismas, las respuestas generales que conducen al cambio climático o al cambio global

de grandes periodos de tiempo, y consecuentemente los climas de las regiones afectadas por estos cambios.

Si bien la actividad volcánica y la efusión de gases desde la Litosfera son casi constantes en la evolución de la Tierra, ha habido periodos de especial intensidad con importantes emisiones de gases y cenizas volcánicos que se han incorporado a la Atmósfera modificando, al menos temporalmente, algunos de los caracteres climáticos de la Tierra o de amplias regiones de la misma.

Tras las observaciones de científicos como Horace Bénédict de Saussure, Jean de Charpentier, Ignace Venet y otros en los glaciares de los Alpes y su interpretación de formas y depósitos, actualmente alejados de los hielos, como huellas del avance de los mismos, en 1837 Jean Louis Rodolphe Agassiz desarrolló la teoría científica sobre la expansión de los glaciares en los Alpes a cotas inferiores a las actuales. Las huellas del hielo se encontraban no sólo en las formas labradas sobre la Litosfera, sino en los depósitos morrénicos, los cantos erráticos, el pulido de las rocas, etc. y la posición en el espacio de esas huellas evidenciaba una mayor extensión del hielo en épocas relativamente recientes. El conocimiento de los glaciares (Criósfera) y el análisis del modelado en la superficie de la Tierra (Litosfera) llevaron al convencimiento de un probable cambio climático reciente (Atmósfera), el paso de un periodo frío, en el que los hielos habían descendido mucho más en los Alpes y, como se fue descubriendo posteriormente, en otras montañas del mundo, y en el que un casquete glacial se habría extendido hasta el norte de Alemania y, en América, hasta Nueva York; periodo al que había sucedido otro relativamente más cálido, el actual, en el que los hielos habían retrocedido.

Hoy sabemos, por otros tipos de huellas, que a lo largo del tiempo geológico los climas han cambiado varias veces en la superficie de la Tierra y podemos valorar, con mayor o menor precisión, como en esos cambios han influido la dinámica de la corteza terrestre, la intensidad de la radiación solar, la composición de la Atmósfera, los patrones de las circulaciones atmosférica y oceánica y los seres vivos.

La localización cambiante de océanos y masas continentales, la fragmentación y colisión de estas últimas con la apertura de océanos como el actual Atlántico, o su cierre, como es el caso del mar de Tethys o el Protoatlántico, son fenómenos que han modificado

los climas de la Tierra y su distribución en ella. Se considera que la colocación de masas terrestres en los polos como la actual Antártida o el conjunto continental de Gondwana en la era Primaria (Paleozoico), favorecieron la expansión del hielo continental en el polo sur. La circulación circunecuatorial y circuntropical, con escasos obstáculos continentales, y la agrupación de grandes masas continentales como la Pangea durante la era Secundaria (Mesozoico), favorecieron la expansión de los climas cálidos⁴.

Tres cuartas partes de la superficie terrestre son océanos y mares, sólo en una cuarta parte de la misma aflora en superficie la corteza continental, ésta se encuentra también parcialmente sumergida en los océanos formando las plataformas continentales. Donde estas terminan, a través de un inclinado plano, se localiza la llamada corteza oceánica, relativamente joven. La corteza oceánica se genera en las dorsales centrooceánicas y se destruye en las fosas tectónicas. El motor que pone en movimiento las placas es el calor del núcleo, adquirido en el momento de su formación y estimado en 4.500 °C, que genera en el manto corrientes de convección, motor del movimiento de las placas en superficie. A través de esta dinámica litosférica, del vulcanismo asociado a ella y de otros procesos se libera al exterior ese calor del núcleo (energía geotérmica). Una moderna teoría, nacida de la comparación de la Tierra con el planeta Venus, considera que si la superficie de la Tierra se calentase hasta 38 °C de forma prolongada, durante unos millones de años, por el incremento de los gases de “efecto invernadero” en la Atmósfera debido a la acción del hombre o a una intensa actividad volcánica, o por un aumento de la radiación solar incidente, la dinámica litosférica se detendría porque no existiría esa diferencia de calor entre el interior y el exterior de la Tierra que determina la liberación de energía geotérmica⁵. Es posible que la dinámica cortical, bien conocida actualmente, interpretada a través de la Teoría de la Tectónica de Placas, se haya detenido ya en algún momento de la evolución de la Tierra.

En el Precámbrico, el 90% de la historia de la Tierra (4.600 Ma - 570 Ma), se produjeron dos glaciaciones, la primera, llamada Huroniana tuvo lugar en la transición de la

⁴ CACHO LASCOR, I. (1999): “Mecanismos conductores del cambio climático. Registros paleoclimáticos e interferencia de la actividad antrópica”. <http://ice.d5.ub.es/conferencias/icacho.htm>

⁵ LENARDIC, A. (Rice University), JELLINEK, M. (University of British Columbia en Vancouver) & MORESI, L. (Monash University en Clayton, Australia) (2008): "A climate change induced transition in the tectonic style of a terrestrial planet." *Earth and Planetary Science Letters*, 271: 34-42

era Arcaica a la Proterozoica⁶, hace 2.700 Ma y duró 400 Ma, tuvo unas tres fases frías y pudo deberse a la reducción del metano (gas fundamental de “efecto invernadero”) en la Atmósfera por la incorporación del oxígeno producido por las cianobacterias. No se conoce el origen del calentamiento posterior. La segunda fue la más importante de la historia de la Tierra, se produjo a finales del Precámbrico, entre 750 (1.000) y 580 Ma, en el periodo Criogénico⁷ de era Neoproterozoica, tuvo al menos dos fases muy frías y se extendió por todos los continentes, hasta latitudes tropicales y no se sabe si también se heló por completo la superficie del mar; tuvo un gran impacto en la vida primitiva, entonces exclusivamente marina y fundamentalmente unicelular, no obstante, organismos pluricelulares que se habían ya diferenciado sobrevivieron en probables refugios de algunos mares ecuatoriales no helados, o en los fondos marinos⁸. Según una teoría esta glaciación finiprecámbrica fue global, la Tierra se convirtió en una “bola de nieve” y todos o casi todos los mares quedaron cubiertos de banquisas de considerable espesor. Existen diversas hipótesis sobre el origen de la gran glaciación que tuvo varias fases (Sturtian, Varanger), entre ellas la que atribuye el avance del hielo a la destrucción de los gases de “efecto invernadero”, la reflexión de la radiación solar, o el movimiento de las placas con la formación del supercontinente Rodinia y el inicio de la fragmentación y dispersión del mismo, las orogénias Panafricana y Cadomiense, etc.

⁶ Se ha señalado una glaciación anterior, en el Mesoarcaico, hace 3.200 Ma.

⁷ Llamado así por producirse en él esta intensa glaciación

⁸ El bajo contenido en el isótopo carbono-13 en los sedimentos marinos de fines del Precámbrico se relaciona con una baja actividad biológica; otros datos sobre la composición de los sedimentos precipitados en los océanos se han interpretado como las consecuencias del hielo y deshielo de la superficie oceánica

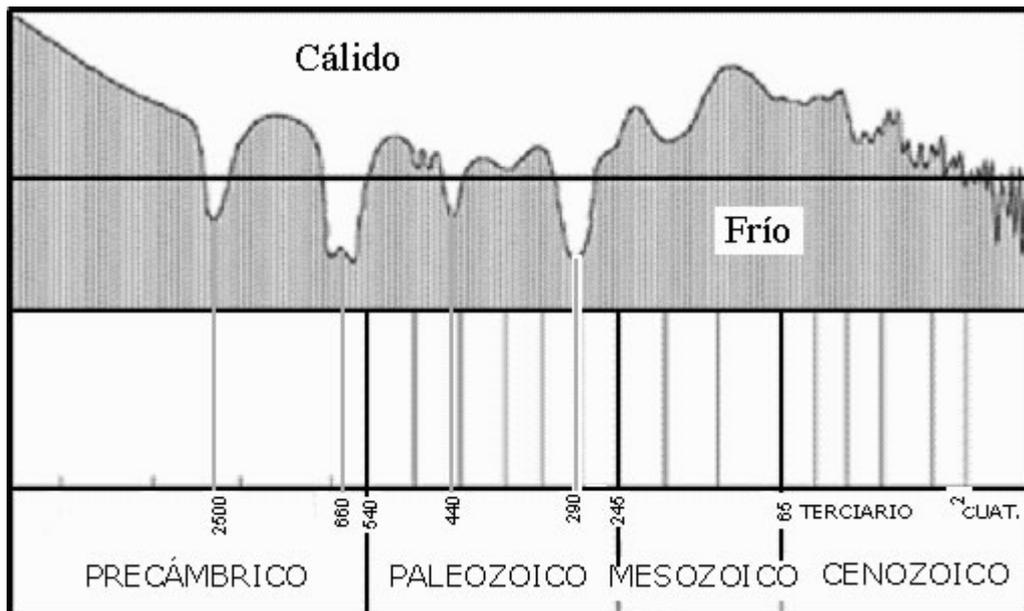


Fig. nº 1 Evolución de la temperatura a través de la historia de la Tierra⁹

En los restantes periodos la relación entre la posición de Tierras y mares y el cambio climático es más conocida. A comienzos del periodo Cámbrico se elevaron los mares, se inició un ciclo de Wilson que se cerraría a fines del Paleozoico con la agrupación de todos los continentes en la Pangea; se fueron separando hacia el norte grandes fragmentos continentales, los escudos de Laurentia, Báltica y Siberia que avanzaron a gran velocidad (15 cms por año) hacia el Ecuador desde el gran continente austral, Gondwana, formado tras la orogénesis panafricana y que se extendía desde el polo sur al ecuador. Se produjo una gran explosión de vida, la mayor de la historia de la Tierra, que parece coincidir con un periodo de bonanza climática, aunque la diversificación de biotopos, la abundancia de mares someros y el aislamiento de grandes fragmentos litosféricos también favorecerían esta diversificación. La apertura de mares entre las masas continentales y el desplazamiento de estas al norte pudieron dulcificar el clima; se ha calculado para este periodo una temperatura media de 22 °C. Durante el Ordovícico el clima fue de carácter tropical, las placas se fueron desplazando progresivamente, separándose otros segmentos continentales, como Iberia de Gondwana, y generándose geosinclinales que acumulaban sedimentos. En aquella deriva continental, ya en este periodo, se iniciaron aproximaciones entre bloques continentales produciendo orogenias que duraron varios periodos como la

⁹ Gráfico tomado de: BENED PÉREZ, M., Historia del clima, RAM, nº 49

Caledoniana¹⁰, y abundante vulcanismo. A finales del Ordovícico un gran ámbito continental de Gondwana se desplazó hacia el sur ocupando el polo. Este correspondería a los actuales noroeste africano y la desembocadura del Amazonas; se originó una gran glaciación que duró unos 20 Ma. y ha dejado depósitos y otras evidencias en África, especialmente en el Sahara, Arabia, Etiopía, Mauritania y Sudáfrica y también en América del Sur. A mediados del Silúrico los hielos se retiraron y predominó un clima cálido. Entre el Carbonífero y el Pérmico se produjo la mayor glaciación del Paleozoico, duró unos 100 Ma. El inicio del Carbonífero fue cálido, en los bloques continentales situados en torno al Ecuador, gran parte de la antigua América del Norte y parte de Europa se produjeron extensos bosques en ámbitos pantanosos que quedaron sepultados formando los actuales depósitos de carbón. Al mismo tiempo se formaron en las plataformas continentales muchos sedimentos calcáreos, todo lo cual pudo sustraer bastante CO₂ de la Atmósfera enfriando el clima de la Tierra; entre el Carbonífero medio y superior se produjo de nuevo una expansión de los glaciares en torno al polo sur en Gondwana, descendió el nivel del mar y tuvo lugar la orogenia Herciniana en el geosinclinal situado entre Laurasia (parte de Europa y América del norte) y Gondwana, soldando estas grandes masas continentales. El bloque de Siberia (antigua Asia) se había desplazado cerca del polo norte y se unió a Europa y América en el área de los Urales; a finales del Paleozoico las Tierras emergidas se habían unido formando la Pangea y cerrando el ciclo de Wilson de este periodo. La génesis del supercontinente Pangea produjo un importante cambio climático hacia la aridez en el interior del mismo y probablemente como consecuencia de este la gran extinción Pérmica.

Durante la era Mesozoica (248-65 Ma.) se extendieron los climas cálidos y no se produjo ninguna glaciación¹¹. Probablemente la separación de los diversos bloques que constituían la Pangea fue acompañada de una intensa actividad volcánica, y pudo producirse también el impacto de un gran meteorito. La separación del continente Pangea hizo que los mares jalonaran los nuevos continentes aislados y la aridez se fuera mitigando evolucionando el clima a más húmedo y templado. En el Jurásico se separaron Laurasia (continentes del hemisferio norte) y Gondwana (continentes del hemisferio sur) y dentro de ellos se fueron aislando los continentes actuales. En los periodos Jurásico y Cretácico se desarrollaron los orógenos del oeste de América, los Andes y posteriormente las Montañas

¹⁰ La orogenia Caledoniana se produjo por la colisión entre los bloques continentales de América del Norte (Laurentia) y la antigua Europa

¹¹ Es posible que se produjeran olas de frío por reducción del CO₂ temporalmente, como indican algunas investigaciones recientes

Rocosas. Se estableció la corriente circunecuatorial sin obstáculos, entre el Neotethys, y el Pacífico, océanos que procedían de la evolución del Tethys y Panthalassa, dos de los grandes océanos de la era Paleozoica. A finales del Jurásico se produjo una gran transgresión marina en el continente noratlántico y Europa se convirtió en un archipiélago. La elevación del nivel del mar en el Cretácico favoreció la expansión del agua cálida hacia los polos en los que no existían glaciares ni diferencias térmicas acusadas con las áreas tropicales; el calentamiento se relacionaba probablemente con la existencia de un potente “efecto invernadero” en la Atmósfera debido a los gases emitidos por el vulcanismo asociado a la separación de las placas.

En la era Cenozoica los continentes se fueron desplazando a sus situaciones actuales; estos desplazamientos expandieron los mares entre ellos y generaron también diversas colisiones continentales y orogénicas. A comienzos de esta era, en los periodos Paleoceno y Eoceno, las temperaturas fueron elevadas, el Ártico no tuvo hielo hasta el periodo Cuaternario; este calentamiento pudo deberse a que la circulación atmosférica y marina fueron más zonales o a una mayor concentración de gases de “efecto invernadero” en la Atmósfera. La compresión del gran geosinclinal del sur de Asia por la colisión del continente indio dio origen a la orogénica que había de levantar la cordillera del Himalaya y otras montañas de Asia elevando también la meseta del Tibet, con evidentes repercusiones climáticas. En la segunda parte del Eoceno la temperatura descendió, Arabia colisionó con Eurasia cerrándose el mar de Tethys (35-10 Ma. BP), del que quedaría un pequeño resto, el mar Mediterráneo, en su sector más occidental, y se interrumpió en este sector la circulación zonal circuntropical. El continente Antártico quedó aislado en el polo sur al desplazarse Australia hacia el norte y abrirse el pasaje de Drake entre el extremo sur de América y la Antártida (38 Ma. BP), África colisionó con Europa desplazándose hacia el noroeste y comprimiendo el geosinclinal en el que se formarían los Alpes, los Pirineos, las cordilleras Béticas, el Atlas, el Cáucaso, los Balcanes, etc. (37-24 Ma.), cuyo levantamiento principal, como el de los Himalayas y las cordilleras del oeste americano, se produciría durante el Mioceno (25-6 Ma. BP). En el Oligoceno se inició la primera glaciación cenozoica, hace 30 Ma., formándose el casquete glacial antártico. Este enfriamiento se considera relacionado con un cambio en las corrientes marinas propiciado por los desplazamientos de las placas. El aislamiento de la Antártida en el polo generó la corriente marina circunantártica que enfrió el océano y aisló este continente impidiendo el paso de

las corrientes cálidas australes¹² y acumulando un importante casquete de hielo. El polo norte, marítimo, no se heló, se encontraba rodeado de masas continentales y era más pequeño que el actual, con estrechos pasillos de comunicación con los otros océanos. No fue una glaciación continua, la Antártida estuvo descongelada entre 22 Ma. - 13 Ma. BP. El enfriamiento se acompañó de un descenso casi continuo en el CO₂ atmosférico.

En el periodo Cuaternario, hace 3 millones de años, se cerró la comunicación Atlántico-Pacífico al formarse el istmo de Panamá; la corriente circunecuatorial al encontrar este obstáculo en el Atlántico occidental se desvió hacia el norte formando la Corriente del Golfo que llevó calor y humedad a zonas elevadas del círculo polar Ártico. El hielo, que se había empezado a formar ya, se incrementó al elevarse las precipitaciones sólidas debido a una mayor evaporación.

El Mediterráneo es el resto occidental del océano llamado “mar de Tethys”; éste, situado en el extremo oriental de la Pangea, evolucionó en el Cretácico reduciéndose notablemente. La colisión de la India con Asia, a comienzos del Cenozoico, cerró el Tethys en ese sector, abriendo el océano Índico; la colisión de Arabia con Eurasia en el Mioceno convirtió el sector occidental del mar de Tethys en un extenso Mediterráneo unido a los mares Negro y Caspio y comunicado con el Atlántico. La evolución en el área del orógeno Alpino, con la elevación de las cordilleras del norte de África y el sur de Europa, fue convirtiendo en mares interiores aislados el Negro y el Caspio y fue cerrando la conexión con el Atlántico que en el Mioceno se realizaba a través de los valles béticos y los valles del Rift. El cierre del geosinclinal alpino interrumpió la circulación marina intertropical en el área. A finales del Mioceno, en el Mesiniense, el Mediterráneo cerró varias veces su conexión con el Atlántico y, bajo condiciones de gran aridez, en las cuencas en que se dividió el Mediterráneo se depositaron gran cantidad de sales que fueron sustraídas de las aguas oceánicas. Se calcula que la salinidad de los océanos pudo descender en un dos por mil. Este descenso favorecería la formación de hielo en el Ártico al elevarse el punto de congelación del agua marina. En el Plioceno (5-3 Ma.) una acción tectónica abrió de nuevo el Mediterráneo, estableciéndose la situación actual en la que el nivel del mar se mantiene

¹² El enfriamiento de la Antártida, según otra hipótesis, no se debió al cambio en las corrientes marinas de superficie sino de las profundas. Antes del enfriamiento el calor de los mares antárticos era mantenido por el afloramiento en superficie de una corriente que procedía de las plataformas marinas del mar de Tethys, situadas en el trópico. La reducción de estas plataformas por la orogenia Alpina fue reduciendo la masa de agua que se hundía allí y se desplazaba al sur emergiendo en el océano antártico dejó de funcionar

más o menos estable porque la corriente superficial Atlántica compensa el balance negativo de este mar que pierde más agua por evaporación de la que recibe por precipitaciones y escorrentías.

1.2 La Atmósfera. Hipótesis de cambio climático por la diversa recepción de la energía solar y el “efecto invernadero”

La Atmósfera envuelve a la Tierra y se estructura en altura en una serie de capas de composición y caracteres térmicos y dinámicos diversos. La Troposfera, capa más baja, directamente en contacto con la superficie de la Tierra, es la que ejerce una mayor influencia en la diversidad climática espacial, aunque, de forma más o menos directa, todas las capas como conjunto transmisor e intercambiador de la energía solar incidente y reflejada, tienen su importancia.

La primitiva Atmósfera de la Tierra debió tener una composición similar a la de la nebulosa inicial, sufriendo un proceso de “desgasificación” por el que perdió parte de sus elementos más volátiles H_2 y He. Estos gases serían sustituidos por los procedentes de las erupciones volcánicas, entre ellos CO_2 y otros gases con “efecto invernadero” como el vapor de agua, que escapaba de la corteza al solidificarse; gases que contribuirían a calentar la superficie de la Tierra, mientras que los óxidos de azufre y otros aerosoles que emitirían los volcanes y se producirían también por los impactos de asteroides, contribuirían a enfriarla al reflejar parte de la radiación solar incidente. El vapor de agua almacenado en la Atmósfera, al que también se incorporó el procedente de los meteoritos, precipitó formando los océanos y mares hace 4.200 - 3.800 Ma., en ellos surgió la vida, protegida de la radiación de onda corta en las aguas profundas y utilizando la energía geotérmica que afloraba fundamentalmente en las chimeneas volcánicas submarinas. En la composición de esta segunda Atmósfera dominarían probablemente amoníaco, metano, vapor de agua, anhídrido carbónico y nitrógeno; no existía el oxígeno libre, éste formaba parte del agua y de algunos minerales superficiales. No obstante, los cambios de composición realizados por la actividad de los seres vivos fueron los de mayor interés, especialmente la oxidación de la Atmósfera, desencadenada por la actividad fotosintética de las cianobacterias (2.400 Ma. BP), y la formación de la capa de ozono en la Estratosfera (600 Ma BP), porque transformaron los continentes y las islas en ámbitos habitables, en potenciales biotopos que serían colonizados y progresivamente transformados por diferentes formas de vida adaptadas a las particularidades de los mismos, entre ellas el hombre.

La Tierra recibe energía del exterior, del sol, en forma de radiación a través del espacio interestelar y de la Atmósfera que son transparentes a la misma. Esta energía se transforma en energía térmica en la Atmósfera y la superficie de la Tierra (Litosfera-Hidrosfera) y es en parte absorbida y en parte reflejada como radiación de onda larga¹³. La energía que emite el sol varía a lo largo de grandes periodos de tiempo debido a la propia dinámica solar. La recepción total de energía es variable en distintas áreas de la Tierra en relación con la posición de estas respecto al sol. Cambios en la emisión o recepción de esta energía son fuente de cambios climáticos en la Tierra. La energía solar se produce en el núcleo del sol en un proceso de fusión nuclear (transformación del hidrógeno en helio) a una temperatura de 15 millones de °C, esta se propaga a la superficie visible o fotosfera donde las “manchas solares” y las “regiones activas” que envuelven a las anteriores, constituyen buenos indicadores de la cantidad de energía emitida. Las primeras son áreas de menor energía, pero están rodeadas por las segundas en las que se encuentran las “fáculas”, manchas brillantes, y otras perturbaciones, a través de las cuales se emiten radiaciones de mayor energía, que superan el déficit de las primeras¹⁴. Debido a la escasa variación, en cortos espacios de tiempo, de la radiación solar incidente por unidad de superficie en la parte externa de la Atmósfera, se denomina a su valor “constante solar”¹⁵. No obstante, la variabilidad de la irradiación solar total puede apreciarse en el clima de la Tierra en periodos de cientos, miles o millones de años. Parece existir una relación entre los cambios climáticos históricos y la frecuencia de “manchas solares”; no obstante el número de variables que determinan los climas y su distribución en la Tierra es elevado y no se puede atribuir a uno solo, aunque el influjo de la radiación solar es importante porque constituye el término positivo fundamental del balance térmico de la Tierra¹⁶.

¹³ El albedo o parte de radiación reflejada total es del 30 %, aunque es variable en cada superficie

¹⁴ Las manchas solares fueron descubiertas por Galileo hacia 1600 y se registran desde el siglo XVIII como indicador de la actividad solar. No obstante sólo es posible una buena medición de la radiación solar desde el espacio (se realiza desde 1978). En DOMINGO, V., “Influencia del Sol en el Cambio Climático”. En *Reflexiones sobre el Cambio Climático*, Cátedra de Eméritos de la Comunidad Valenciana, Comunidad Valenciana, Valencia

¹⁵ Actualmente 2 cal/cm²/minuto. Variación de 0,1 a 0,15 entre el mínimo y el máximo en periodos de 11 años. En DOMINGO, V., op. cit.

¹⁶ Existen además otros mecanismos vinculados a la dinámica del viento solar y su interacción con el campo magnético terrestre, la incidencia de los rayos cósmicos galácticos controlada por la actividad del sol, etc. aunque la incidencia de estos en el forzamiento climático no es bien conocida. DOMINGO, V., op. cit

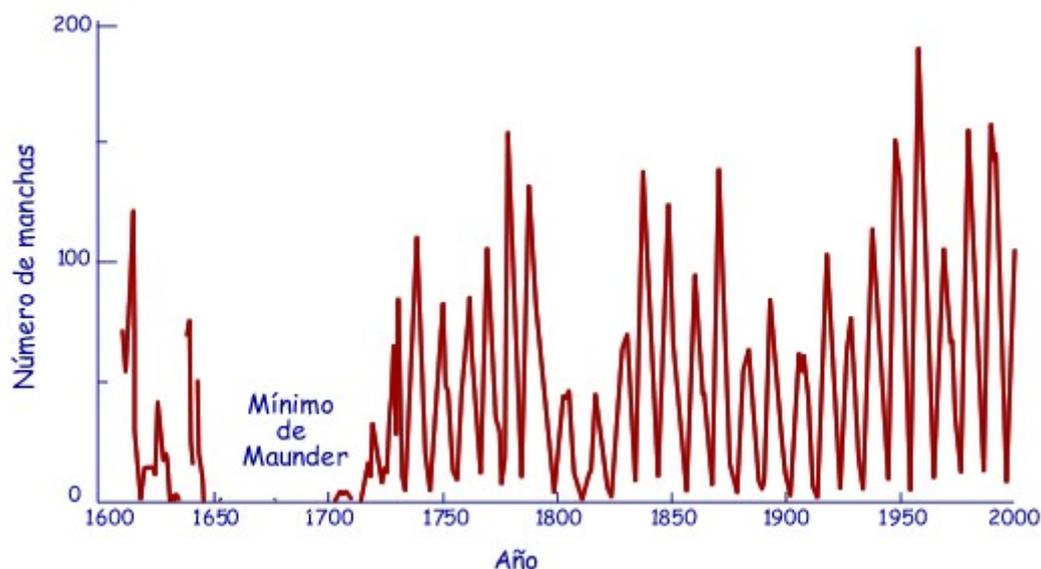


Fig. nº 2. Variación del número de manchas solares¹⁷. Mínimo de Maunder 1645-1715, Mínimo de Dalton 1800-1830. Inviernos muy crudos en Europa 1694-1695

La radiación solar es parcialmente absorbida y reflejada en las distintas capas de la Atmósfera y en la superficie terrestre. La ionosfera y la capa de ozono interceptan y absorben la radiación de onda corta y alta energía, letal para los seres vivos, que no llega a la superficie de la Tierra. Las nubes blancas, el polvo atmosférico y otros elementos reflejan la luz solar y, junto a ellos el vapor de agua, el CO₂ y, en menor medida, otros gases absorben la radiación de onda larga emitida por el sol, la Atmósfera y la Tierra, calentando la Atmósfera y evitando la pérdida de calor en las capas bajas (“efecto invernadero”). Sin este efecto la temperatura media de la superficie de la Tierra sería 33 °C más baja que la actual¹⁸. Las distintas latitudes y regiones de la Tierra reciben diversa energía en función de su posición respecto al sol que varía en ciclos cortos a lo largo del día y del año y en ciclos largos, decenas de miles de años¹⁹. La superficie de la Tierra refleja o absorbe dicha radiación incidente en función de la oblicuidad de los rayos solares, la propia naturaleza de

¹⁷ Fuente Sunspot. En DOMINGO, V., op. cit., pág. 66.

¹⁸ El físico-químico sueco Svante Arrhenius, fue el primero que propuso en 1896, en el marco de la investigación sobre las causas de las glaciaciones, que un incremento del CO₂, emitido por la combustión del carbón, podría incrementar la temperatura de la Tierra.

¹⁹ La teoría astronómica sobre las causas de los cambios climáticos del Cuaternario, basada en la diversa recepción de la energía solar en distintos puntos de la Tierra por los cambios en la posición del planeta respecto del Sol, fue desarrollada por el astrofísico serbio Milutin Milankovitch (1930-1947). Un mínimo de radiación solar en el verano del hemisferio N impide la fusión de nieve del invierno y favorece el crecimiento del hielo. Este fenómeno se produce en ciclos temporales de decenas de miles de años cuando coinciden la máxima excentricidad de la órbita terrestre y por tanto su mayor alejamiento del sol, la mínima inclinación del eje de rotación de la Tierra y el perihelio en el invierno boreal.

la superficie -agua, nieve o hielo, roca, vegetación...-, según su cromatismo, topografía, etc. El desigual calentamiento de la superficie de la Tierra por efecto de la diversa radiación solar incidente es en parte compensado por los flujos de vientos y corrientes marinas. La variabilidad natural del clima mantenía el balance térmico de la Tierra más o menos estable; el actual desequilibrio de este balance²⁰ que tiende al calentamiento global con importantes diferencias regionales se atribuye a la actividad humana, especialmente a la quema de combustibles fósiles.

La energía solar constituye hoy una fuente natural de energía limpia y prácticamente inagotable para producir electricidad (conversión fotovoltaica). Las dificultades técnicas y económicas de esta producción, sobre todo del almacenamiento y traslado de la misma, se irán resolviendo.

Como consecuencia del cambio climático los mapas de climas del mundo sufrirán modificaciones en cuanto a la distribución de dos de sus elementos fundamentales, las temperaturas y las precipitaciones, y también de los restantes elementos. Se desplazarán las bandas de circulación atmosférica lo que tendrá consecuencias sobre la distribución de climas húmedos y áridos continentales. Se producirá un desplazamiento de las grandes zonas térmicas del mundo y se elevarán en altitud los pisos bioclimáticos en las áreas de montaña. Se incrementarán los fenómenos climáticos extremos, sequías persistentes y lluvias torrenciales (Somalia, Etiopía, Kenia y Ruanda, 2006); se adelantará la primavera con repercusiones sobre la fenología de plantas, los patrones migratorios de las aves y los ciclos reproductivos de algunos animales

1.3 La Hidrosfera/Criosfera. Las corrientes marinas. El avance y retroceso del hielo²¹ y el nivel del mar

La interacción entre Hidrosfera y Atmósfera es muy estrecha, en este sentido se habla de la “máquina térmica oceánico-atmosférica”²², las dos son las capas fluidas de la superficie de la Tierra y tienen la capacidad de absorber, intercambiar y distribuir el calor

²⁰ Incremento de 0,7 °C de la temperatura en el último siglo, para algunos investigadores –Hansen, 2006- el incremento ya es de 1 °C y los últimos pronósticos para el siglo actual son de una elevación mayor 1,9 a 4,6 °C, en función de los gases de “efecto invernadero” que se introduzcan en la Atmósfera)

²¹ Véase MARTINEZ DE PISÓN, E y ÁLVARO, S. (2007): El libro de los hielos, Madrid, Desnivel; MARTINEZ DE PISÓN, E (2007): “Cambios en los glaciares”, *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 31-45.

²² DÍEZ, J. J. (2007): “El agua y el cambio climático”, *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 67-80

hasta grandes distancias. El agua que constituye esta capa está presente también en la Atmósfera y Litosfera en sus tres estados – sólido, líquido y gaseoso - y en la biosfera en los dos primeros. La superficie de la Tierra es en sus tres cuartas partes agua de océanos y mares, aunque el agua está también presente en los continentes en ríos y mares, suelos y sedimentos, conductos subterráneos y en los seres vivos²³.

Los cambios en la extensión y volumen de la Criosfera, capa de hielo y nieve, la variación de temperatura de las aguas superficiales, los movimientos eustásicos del nivel del mar, los cambios en la circulación e intensidad de las corrientes marinas se consideran importantes indicadores de cambio climático. La Criosfera encierra en su masa burbujas en las que se conserva aire de atmósferas anteriores, el fondo del océano posee registros sedimentarios que permiten interpretar las condiciones climáticas e hidrológicas en las que fueron depositados. En la Hidrosfera podemos leer el clima del pasado y a través de sus tendencias dinámicas inducir algunos caracteres de los climas del futuro. La Hidrosfera se calienta y enfría más lentamente que la Litosfera en la superficie de la Tierra por lo que es un regulador térmico de los climas litorales que, por esta y otras características se diferencian generalmente bien de los climas continentales.

Las corrientes marinas superficiales y profundas transportan masas de agua y energía de unas regiones a otras. Están influenciadas por las corrientes aéreas y por las diferencias térmicas y de salinidad de las aguas oceánicas. La circulación marina superficial guarda relación con la circulación atmosférica y con la estructura de la Litosfera, especialmente con la distribución de tierras y mares que permite o interfiere la circulación zonal, como ya se ha considerado en el capítulo correspondiente. La corriente profunda termohalina conduce las aguas frías y salinas del Atlántico norte, que se hunden en profundidad por su mayor peso, a través del océano hasta el Atlántico sur, donde también las aguas frías y salinas superficiales se hunden y, como una cinta transportadora arrastra estas aguas frías profundas hasta los océanos Índico y Pacífico, donde emergen a la superficie; esta corriente funciona bien en los periodos interglaciares, en los glaciares la circulación termohalina se perturba o reduce, debido a que la fusión de los hielos genera mucha agua dulce en las altas latitudes atlánticas y esta agua no se hunde.

²³ Distribución del agua en la Hidrosfera: océanos y mares, 97 %; Criosfera, campos de hielo y glaciares 2,2%; suelo, acuíferos 0,71%; lagos y ríos, 0,013%; Atmósfera 0,0009%

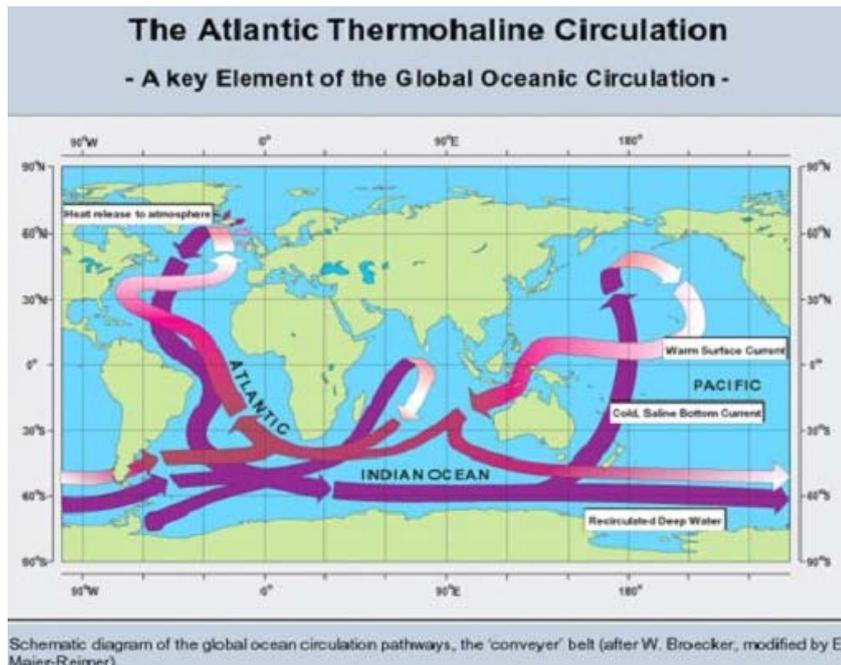


Fig. nº 3. Circulación termohalina

Los movimientos del nivel del mar constituyen un buen indicador de cambio climático. Durante las épocas glaciares parte del agua quedó retenida en la Criosfera y descendió el nivel del mar (regresión marina) disminuyendo también su temperatura en superficie; por el contrario, en épocas de bonanza climática, el nivel del mar subió (transgresión marina). Sin embargo la variación del nivel del mar puede obedecer a otras causas como los movimientos tectónicos o isostásicos de la Litosfera, el hundimiento del subsuelo por extracción de combustibles fósiles, la elevación de las aguas por acumulación de sedimentos en el fondo de los mares; también puede estar producida por causas atmosféricas como la incidencia de las diversas presiones del aire y sobre todo por los vientos que acumulan el agua en algunos sectores cuando son intensos y constantes²⁴;

²⁴ La acumulación de aguas que se produce en el golfo de Méjico como consecuencia del arrastre que producen los vientos alisios en la franja tropical del océano Atlántico provoca una gran corriente marina que se desplaza hacia el norte y es desviada por efecto de la rotación de la Tierra hacia el este, hasta las costas de Europa, es la Corriente del Golfo. El evento de El Niño y la Oscilación Austral (ENOS) se produce en el Pacífico tropical cuando se debilitan los alisios. En condiciones normales el arrastre de las aguas superficiales hacia el oeste por estos vientos hace que al este, frente a las costas de Perú y Ecuador se eleve la termoclina y las aguas frías profundas, ricas en nutrientes, afloran en superficie enfriando el aire y produciendo sequías; en el sureste asiático y noreste de Australia, por el contrario, el agua cálida arrastrada se acumula, se eleva la temperatura y son abundantes las precipitaciones. El evento del Niño se produce cuando disminuye la fuerza de los alisios, las temperaturas son anómalamente elevadas durante varios meses (hasta un año) en el este del Pacífico tropical, el aire cálido y húmedo provoca precipitaciones en Perú y Ecuador y sequías en el sureste asiático. El evento extremo del anterior es La Niña que se produce como consecuencia del reforzamiento de los vientos alisios con un enfriamiento anómalo y persistente en el Pacífico tropical oriental y central. Estos eventos tienen repercusiones climáticas, en otras áreas del mundo como la India, el este de Africa, América...

puede deberse también a la propia expansión térmica del agua con descenso de su densidad. Esta complejidad de potenciales factores hace que existan diferencias regionales respecto a los registros de desplazamiento del nivel del mar, no obstante, cuando son coincidentes en amplios sectores distantes entre sí y se acompañan de cambios térmicos apreciables de la superficie del mar pueden considerarse movimientos eustásicos, asociados frecuentemente a la fusión de los hielos y a la componente termostérica (expansión térmica del agua). La mayor transgresión marina debió producirse a fines del Cretácico cuando Europa era una especie de archipiélago. Se constata actualmente una elevación del nivel del mar de 17 cms. en los últimos 100 años. El más reciente pronóstico para el siglo XXI es de una elevación de 28 a 43 cms²⁵. Las consecuencias geográficas del avance del mar se manifestarán principalmente en los litorales donde quedarán sumergidas algunas franjas costeras y desaparecerán algunas islas, se salinizarán muchos biotopos, se intensificará el oleaje y la altura de las olas extremas, etc.; no obstante, las consecuencias, debido a la compleja interacción existente en la superficie de la Tierra, tendrán un carácter más global, se incrementará la recepción de la radiación solar, disminuirá la capacidad erosiva de los ríos al elevarse su nivel de base, se intensificarán los monzones, los huracanes y tifones que podrán desplazarse de las latitudes actuales, etc.²⁶

La Criosfera es una capa discontinua formada por el agua en estado sólido: el hielo marítimo y continental –inlandsis (mantos o campos de hielo)-, los icebergs, los glaciares y el permafrost (suelo helado), incluso la nieve estacional forma también parte de la Criosfera. El hielo de las regiones frías puede permanecer millones de años, como sucede con parte del hielo antártico. Actualmente el 10% de la Tierra está cubierta por el hielo y este constituye el 98 % de sus reservas de agua dulce; en la Antártida se encuentra el 85% del hielo del planeta. El actual retroceso de los hielos constituye uno de los más evidentes e

incluso se han señalado algunas sequías relacionadas con El Niño en el Mediterráneo. Ángel Rivera (AEMET) ha vinculado las irregularidades climáticas del otoño de 2008 en la Península Ibérica, el más frío desde 1996 y el noveno más frío desde 1965, al fenómeno de La Niña del océano Pacífico combinado con la Oscilación del Atlántico Norte que mantiene los anticiclones en el Atlántico norte y en el centro de Europa generando un pasillo por el que penetra el aire frío en altura por el norte. En estos eventos se pone de manifiesto la interacción Atmósfera-Hidrosfera aunque los efectos de los mismos son globales, se reflejan también en la Biosfera, la economía, la expansión de enfermedades, etc. Véase CAPEL MOLINA, J. J. (1999): *El Niño y el Sistema Climático terrestre*. Barcelona, Ariel.

²⁵ Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), de Naciones Unidas. (Cuarto informe)

²⁶ Véase DÍEZ, J. J. (2007): “El agua y el cambio climático”, *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 67-80

invocados indicadores del cambio hacia un calentamiento global del clima. La influencia de la Criosfera sobre las restantes capas del planeta hace que hayan quedado en las rocas, los sedimentos, los suelos, los fósiles, las turberas, las formas de la superficie de la Tierra, los yacimientos paleontológicos y arqueológicos y hasta en los documentos históricos numerosas huellas de los climas fríos del pasado geológico e histórico.

Por datos indirectos podemos reconstruir en el espacio y en el tiempo las diversas glaciaciones que han acontecido en la historia de la Tierra y los cambios climáticos que generaron la expansión o el retroceso de los hielos sobre áreas marinas y continentales²⁷. La relación de los movimientos del nivel del mar con las fluctuaciones del hielo fue propuesta por Charles Lyell en los años 30 del siglo XIX. La expansión del hielo en la superficie de la Tierra y la consiguiente contracción de la superficie oceánica (glaciación), así como la situación contraria (periodo cálido, interglaciar) constituyen importantes factores del clima global ya que la Criosfera incrementa el albedo global reduciendo la recepción de energía solar en la superficie terrestre, lo que influye en los caracteres de las masas de aire y en la circulación atmosférica.

Tras el óptimo eoceno, se inició, hace unos 30 Ma., una era glacial que ha llegado hasta nuestros días. Como ya se ha señalado el aislamiento del continente antártico por la separación de Australia y posteriormente de Suramérica, reforzó la corriente marina circumpolar antártica, aislando el continente de las corrientes cálidas, lo que favoreció la acumulación del hielo en él. En la isla de Groenlandia la acumulación de hielo se inició hace unos 7 Ma. Este proceso no fue continuo en ninguno de los dos casos. Tras la bonanza climática de finales del Oligoceno y la primera mitad del Mioceno, se produjo una disminución de las temperaturas que se hizo más acusada en el periodo Cuaternario. La primera época de este periodo, el Pleistoceno, se inició hace unos 2,588 Ma. y terminó con el fin del Younger Drías, fase fría más reciente de la última glaciación, hace 11.800 años. En los periodos glaciares se formaban extensos casquetes de hielo en el océano Glacial Ártico y en los continentes e islas que lo rodean (América del norte y Eurasia) y masas de hielo y glaciares en las altas montañas, disminuyendo de manera apreciable el nivel y la temperatura de las aguas oceánicas; en los interglaciares se reducían estas masas de hielo hasta su desaparición. La oscilación térmica de estos ciclos glaciares se fue incrementando

²⁷ Véase el capítulo 1.1 La Litosfera y la dinámica cortical en su relación con el clima y el cambio climático

temporalmente, fue de unos 40.000 años a comienzos del Pleistoceno y de 80.000 a 120.000 años desde hace 600.000 años. En los últimos 400.000 años ha habido 4 ciclos glaciares separados por periodos interglaciares de unos 10.000 años de duración²⁸

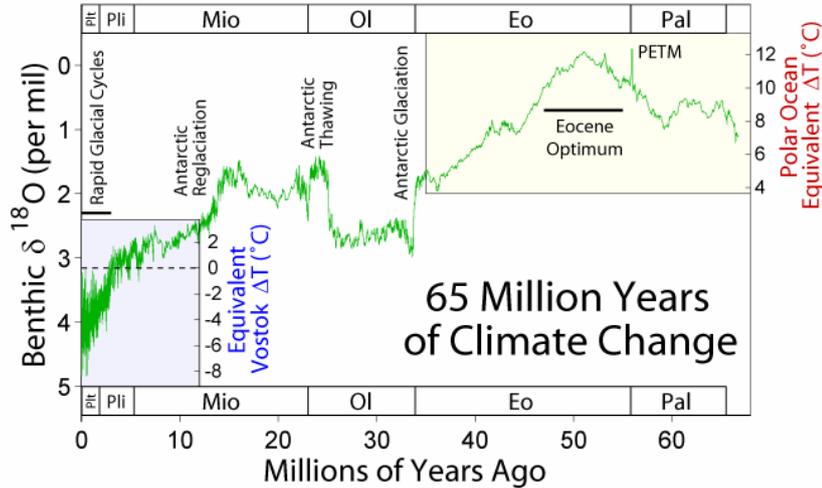


Fig. nº 4. Cambios climáticos

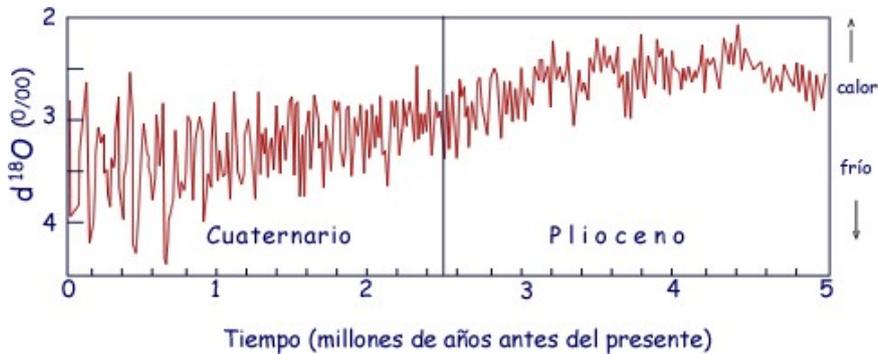


Fig nº 5 Plioceno y Cuaternario. Evolución de la concentración de oxígeno-18²⁹ en las conchas de los foraminíferos benthicos (de aguas profundas) durante los últimos 5 millones de años. La tendencia a un aumento de la concentración de oxígeno-18 (la escala está invertida) indica una tendencia general al frío y a una mayor acumulación de hielo en los continentes. Obsérvese también el aumento de la oscilación térmica de los ciclos glaciares durante el Cuaternario, especialmente en el último millón de años. Los datos de $\delta^{18}O$ son la media resultante en diversos sondeos del programa ODP (*Ocean*

²⁸ BONED PÉREZ, M.: La historia del clima. Instituto Nacional de Meteorología.

²⁹ El isótopo de oxígeno ^{16}O se evapora con el agua marina del océano en periodos más húmedos, precipita en la nieve y queda retenido en los glaciares, por lo que en las glaciaciones el agua se enriquece en el isótopo de oxígeno más pesado ^{18}O que se conserva en mayores proporciones en las conchas de los organismos vivos.

Drilling Project).³⁰

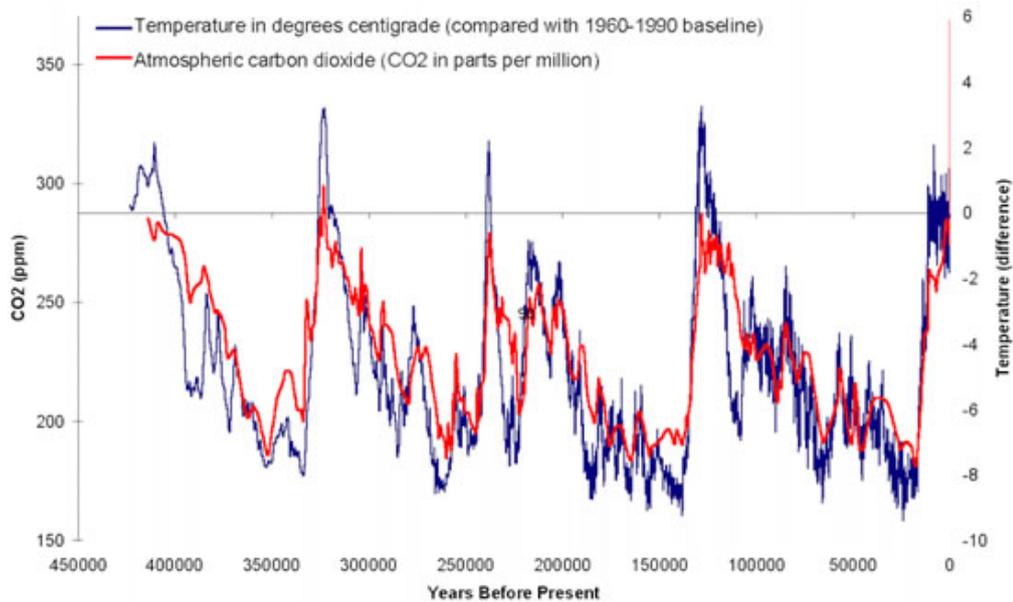


Fig. nº 5 Temperatura y concentración de CO₂ medidos en el sondeo de hielo de Vostok (Antártida). Completada con datos de CO₂ de Law Dome y de Mauna Loa (los más recientes). Se distinguen cuatro periodos glaciales y cinco interglaciales más breves.³¹

El avance del hielo se produjo cuando en las altas latitudes el clima fue más húmedo y frío, con más precipitaciones nivosas en invierno y veranos menos cálidos; la nieve acumulada en invierno no se fundía en verano y se iba acumulando. Este proceso estuvo relacionado probablemente con causas astronómicas. La última glaciación (Würm o Wisconsin) comenzó hace 115.000 años, se refleja en el incremento del isótopo ¹⁸O en las conchas de los foraminíferos béticos, indicativa de condiciones más frías y de aguas menos profundas por descenso del nivel del mar probablemente unos 50 m³²; en el último máximo glaciario, hace unos 18.000 años, el nivel del mar llegó a descender unos 120 m. De esta glaciación conservamos magníficas huellas en las montañas, en forma de valles

³⁰ URIARTE CANTOLLA, A. (2003): *Historia del clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 306 págs.

³¹ BONED PÉREZ, M.: *La historia del clima...* Op. Cit..

³² URIARTE CANTOLLA, A. (2003). Op. Cit.

glaciares, depósitos morrénicos y cantos erráticos desplazados por el hielo, rocas aborregadas, estrías, lagos de origen glaciar, etc.

Durante las glaciaciones se modificó la localización y extensión de las grandes áreas climáticas de la Tierra y consecuentemente las de las áreas de vegetación y distribución de las especies. Se considera que éstas se desplazaron en el hemisferio norte de 10 a 20 grados al sur, y en las montañas las áreas bioclimáticas descendieron entre 600 y 1.500 m.

El Holoceno es un periodo muy corto (11.500 años) en el que el clima ha variado poco; constituye más bien una parte del interglaciar que ha sucedido a la última glaciación. Sin embargo, es la etapa mejor conocida y permite analizar bien las pequeñas oscilaciones del clima. Desde que se iniciara el deshielo, hace 11.500 años se observa un “óptimo climático holoceno” hace unos 6.500 años en el que se desarrollaron las culturas Mesopotámica y Egipcia, una época de bonanza climática con abundantes lluvias y una temperatura de 2 - 3 °C más elevada que la actual. Hace 3.500 años el clima se hizo más frío y seco en las áreas tropicales y se extendieron los desiertos. Entre los siglos X-XI (IX a XIII), en el periodo cálido medieval la temperatura fue 1,5 °C más elevada que la actual, los vikingos islandeses colonizaron Groenlandia asentándose en la costa sudoeste. Durante la Pequeña Edad del Hielo (1550-1850, periodo álgido 1600-1750) se produjo un enfriamiento del clima que se acusó en el siglo XVII cuando en algunas regiones llegó a ser de 2 °C por debajo de la temperatura actual. Fue una oscilación térmica compleja que pudo guardar relación con algunos periodos de menor actividad solar (periodos de Spörer (1450-1510), Maunder (1643-1715), Dalton (1790-1820), especialmente con el segundo. Las consecuencias ambientales y geográficas fueron notables y se pueden seguir a través de muy diversas fuentes: los glaciares avanzaron hasta alcanzar valles, granjas y pueblos en numerosas regiones de Escandinavia y los Alpes, el mar se congeló hasta rodear casi Islandia y alcanzar las costas escocesas, ríos europeos, como el Támesis, se helaban en algún periodo durante el invierno, retrocedieron algunos cultivos que se habían expandido en el periodo cálido medieval, como la vid, se perdieron las cosechas y el hambre y las enfermedades se extendieron por Europa.... A finales del siglo XVIII se inició el calentamiento, con oscilaciones y variaciones en distintas áreas, este se intensificó en el siglo XX, con un periodo de relativo enfriamiento entre 1940 y 1970, intensificándose la

elevación de la temperatura a finales del siglo XX³³. El retroceso de las masas de hielo en el mundo constituye un claro indicador de la elevación de las temperaturas y consecuentemente del cambio climático, la velocidad a la que se produce excede las dinámicas naturales de retroceso glaciar e introduce riesgos evidentes, el proceso podría terminar con algunos de los más bellos paisajes de la Tierra, con una fuente importante de recursos hídricos de agua dulce que se encuentran almacenados y podría destruir algunos de los hábitats extremos colonizados actualmente por especies muy sensibles a estos cambios, con escasa capacidad de adaptación.

1.4 La Biosfera. Los seres vivos y el clima de la Tierra

Las primitivas células debieron originarse hace unos 3.500 Ma. en torno a las chimeneas volcánica submarinas, probablemente eran procariotas, células con membrana que no poseían núcleo y son las antecesoras de la vida, utilizaban el ADN como código genético y el ARN para sintetizar las proteínas y transferir información, además de los enzimas para catalizar reacciones; su fuente de alimento y energía eran todas las moléculas orgánicas. Cuando estos recursos disminuían desarrollaban estrategias para sobrevivir, una de las más importantes fue el uso de la energía solar; hace 3.450 años se produjo la colonización biológica de la zona fótica y se empezaron a formar los estromatolitos³⁴. 3.000 Ma BP los seres vivos habían desarrollado una función similar a la fotosíntesis que había de transformar profundamente la Atmósfera; consumían CO₂ y agua produciendo, con la energía solar, moléculas ricas en energía, los carbohidratos; esta fotosíntesis sin oxígeno se hizo oxigénica antes de iniciarse el Proterozoico (2.800 Ma.). El oxígeno reaccionaba al principio con minerales (oxidación de azufre y hierro), era consumido por los seres vivos, absorbido por los fondos marinos y la superficie continental, hasta que esos sumideros se colmataron (hace 2.400 Ma.) y comenzó a invadir la Atmósfera cambiando definitivamente la composición de esta al cabo de millones de años. La radiación ultravioleta transformó el oxígeno en ozono que se fue acumulando en la parte superior de la Atmósfera bloqueando en gran medida el paso de dicha radiación y permitiendo la colonización de la superficie del

³³ BONED PÉREZ, M.: La historia del clima... Op. Cit..

³⁴ Los estromatolitos son estructuras calcáreas generadas por las cianobacterias en simbiosis con otros microorganismos en costas fangosas de poca profundidad.

océano y la de los continentes. El oxígeno en cantidades importantes era tóxico para algunos seres vivos y produjo probablemente una selección a favor de aquellos que supieron adaptarse utilizándolo eficazmente, como las cianobacterias que fueron las principales productoras de oxígeno y probablemente las primeras colonizadoras de la zona terrestre.

Los primeras células eucariotas (1.800 Ma. BP) y los primeros organismos pluricelulares aparecieron cuando se acumuló el oxígeno libre, los primeros fósiles de estos últimos son de hace 760 Ma., aunque deben haber evolucionado antes. En el inicio del Fanerozoico, en el periodo Cámbrico, aparecen los primeros animales, entre ellos los trilobites, hace 530 Ma., eran marinos aunque temporalmente salían a las costas; en este periodo se acumularon por primera vez sedimentos marinos carbonáticos y aparecieron los animales con caparzones y esqueleto externo cuyos restos constituirán uno de los fundamentales registros paleoclimáticos. La llamada “explosión de vida” en el Cámbrico se ha interpretado también como una consecuencia de la abundancia de oxígeno en la Atmósfera generado por los propios seres vivos. Prosiguió la diversificación de la vida bajo climas tropicales en el Ordovícico, entre otros surgieron los corales y animales con esqueleto. La extinción de vida marina que se produjo a finales del Ordovícico se atribuyó al cambio climático durante la glaciación Ordovícico-Silúrica, aunque algunos investigadores consideran que se debió a causas astronómicas³⁵. Las primeras plantas terrestres aparecieron en el Silúrico y algunos animales invertebrados como los miriápodos y escorpiones y se diferenciaron mucho los peces; se produjo esta expansión de la vida bajo condiciones de clima cálido. En el Devónico se expandieron notablemente los arrecifes en las aguas marinas, y se produjo una progresiva población de los continentes por los seres vivos; además de la expansión de las plantas primitivas del periodo anterior, aparecieron las plantas con semillas, los primeros árboles y los animales vertebrados; también, impulsados por la aridez, algunos habitantes de las aguas se convirtieron en anfibios debido al desecamiento de las charcas. En el Carbonífero se expandieron los grandes bosques pantanosos de helechos, equisetos, selaginelas, etc. y los anfibios que posteriormente empezaron a ser reemplazados por los reptiles. La unión de los continentes en la Pangea a finales de la era Primaria (Carbonífero Pérmico) produjo grandes zonas áridas en el interior

³⁵ Probable invasión de rayos gamma debida a la explosión de una estrella situada lejos de la Tierra. Esta enérgica radiación electromagnética pudo destruir gran parte de la capa de ozono produciendo la desaparición de muchas especies marinas, las únicas existentes de las que conservamos fósiles.

de los mismos y la extinción del 95% de las especies marinas y del 75% de las continentales.

A comienzos del Mesozoico la aridez se mantuvo en el interior de los continentes pero en los bordes de los mismos existían algunos bosques de coníferas que habían evolucionado hace 300 Ma., y restos de vegetación tropical. El clima se fue haciendo progresivamente más húmedo y templado desarrollándose ampliamente la vegetación; las grandes coníferas (araucariáceas, taxodiáceas, pináceas, cupresáceas, etc.), las ginkgoáceas y otras gimnospermas evolucionaron y aparecieron las angiospermas a fines de la era, fue una época más cálida y húmeda que el Pérmico y el Triásico, los reptiles se diversificaron, es la era de los dinosaurios que se expandieron fundamentalmente en el Jurásico, empezaron a evolucionar los mamíferos y las aves y se extendieron ampliamente los vertebrados. La extinción de los dinosaurios a finales del Cretácico coincide con la presencia de una capa geológica con iridio en Yucatán y Golfo de México que se atribuye a un gran meteorito que pudo interferir, junto a los materiales expulsados a la Atmósfera por los volcanes, durante un tiempo la recepción de la energía solar. Descendió la temperatura y disminuyeron las plantas, pervivieron animales más pequeños que resistieron el frío³⁶. El 90% de las especies terrestres se extinguieron lo que constituyó una oportunidad para los mamíferos que se diversificaron y expandieron durante los periodos Oligoceno y Mioceno; hace 30 Ma. surgieron los primeros primates superiores y, por evolución de estos, hace 200.000 años el Hombre (*Homo sapiens sapiens*).

Entre el Paleoceno y el Eoceno, hace unos 55 Ma., se elevó mucho la temperatura y se produjo un periodo corto de extinción de fauna en los océanos y en los continentes, apareciendo varios órdenes de mamíferos nuevos que, desde entonces, dominarían el reino animal. La vegetación se adaptó y expandió sus áreas hacia latitudes más elevadas. Este calentamiento se ha atribuido a la liberación de metano de los fondos marinos.

La interacción del subsistema biológico con los otros subsistemas es evidente; como ellos constituye un importante factor del clima y ha contribuido a su diversidad espacial y a sus cambios a través del tiempo. A modo de ejemplo, los procesos evolutivos se han visto favorecidos por la división cortical, en las épocas calidas se multiplicaron los

³⁶ Algunos investigadores han señalado la no coincidencia de este impacto (unos 300.000 años antes) con la extinción de fines del Cretácico, atribuyéndose esta a otras causas como el ascenso del nivel del mar

seres vivos, en las épocas glaciares se produjeron extinciones y migraciones de los seres vivos, se incrementó el endemismo y el relictismo; en conjunto, el cambio global en la superficie de la Tierra ha sido motor de procesos evolutivos y asociativos en la biosfera y a su vez los cambios biológicos han sido motores del cambio global. Los seres vivos han cambiado la composición de la Atmósfera y la Hidrosfera, la vegetación ha modificado el albedo de la Tierra y, en el último tercio del Cenozoico, bajo condiciones de clima cálido y tras diferenciación de los biotopos por causas tectónicas, en relación con el desarrollo de biotopos húmedos y semiáridos, evolucionaron los homínidos en el este de África.

Los cambios climáticos constituyen un riesgo para los seres vivos. A la escala temporal en que se han producido de forma natural muchas especies se han adaptado o han emigrado a lugares donde se daban condiciones similares a las anteriores. El cambio climático acelerado por el hombre incrementará los riesgos para las especies: aumentarán las tasas de extinción, se modificarán las áreas de distribución de especies y comunidades – fenómenos ya parcialmente desencadenados por influencia humana- se producirá la expansión de especies invasoras y plagas y se apreciarán cambios fenológicos, ajustes fisiológicos, morfológicos y adaptativos. El cambio climático exigirá velocidades de desplazamiento elevado para los seres vivos, como no se contempla en el registro fósil, y es de suponer que la mayoría de las especies no serán capaces de seguir este ritmo y se extinguirán lo que por otra parte permitirá la expansión colonizadora de otras más resistentes que puedan ocupar sus funciones en los ecosistemas. La *presión de selección* hará que la vegetación sea menos diversa y más “herbácea”, con numerosas especies pioneras y con gran capacidad de dispersión. Las velocidades de desplazamiento serán frecuentes en latitudes y altitudes elevadas. Dominarán los *ecosistemas subtropicales y áridos* que no sufrieron las glaciaciones porque se expandirá la zona de los climas cálidos³⁷

Las consecuencias geográficas del cambio climático para los seres vivos, además de las ya apuntadas respecto a los desplazamientos latitudinales y altitudinales de las áreas de distribución, serán la multiplicación de áreas disjuntas debido a las dificultades de los desplazamientos y a la falta de conectividad, la desaparición de algunas áreas y la génesis de otras nuevas.

³⁷ Malcolm, J. R., Liu, C., Millar, L. B., Hansen, L., y Allnutt T. (2002): “*Global Warming and Species Loss in Globally Significant Terrestrial Ecosystems*”, WWF/Adena

Algunos ecosistemas son especialmente frágiles, por ejemplo los corales que son comunidades complejas con gran riqueza biológica y ecológica. Se localizan en los mares tropicales con alta salinidad, a profundidades menores de 20 m. donde existe buena iluminación y escasa turbidez y dependen de olas y corrientes que arrastren el plancton. La elevación de la temperatura en estos mares destruiría las algas adheridas a las construcciones coralinas y favorecerían la aparición de algas destructoras. La destrucción de los corales supondría la pérdida de biodiversidad de estos ecosistemas, además de una pérdida de los bancos de peces asociados a ellos. Los registros climáticos coralinos muestran que los océanos tropicales han incrementado su temperatura de 0,5 a 2 °C desde mediados del siglo XIX

En algunas regiones también existe una mayor vulnerabilidad ante el cambio climático. La región **Mediterránea** constituye un área de frontera geográfica de gran complejidad; se localiza al sur de Europa, hacia donde se han desplazado las floras y la vegetación templada, boreal e incluso ártica durante las glaciaciones; a fines del Terciario el Mediterráneo se desecó extendiéndose hacia el oeste la flora estépica del centro de Asia; la flora tropical precuaternaria encontró numerosos refugios en valles abrigados y húmedos, en los litorales y las islas³⁸. Esta gran diversidad biológica podrá verse afectada por un cambio climático en el que probablemente se incrementarán las temperaturas y disminuirán las precipitaciones³⁹. En la península Ibérica lo primero afectará más a las áreas del norte y a las montañas, especialmente a sus pisos más elevados, lo segundo a la mitad sur y a toda el área mediterránea, con una tendencia a la “mediterrización” en el ámbito septentrional y a una aridización en el meridional.

2. La influencia del hombre en el sistema Tierra

³⁸ Véase COSTA, M., GARCÍA ANTÓN, M., MORLA, M., SAINZ, H. (1990): “La evolución de los bosques en la Península Ibérica: una interpretación basada en datos paleobogeográficos”, *Ecología*, Fuera de serie, I. 31-58C.

SAINZ OLLERO, H., FRANCO MÚGICA, F. (2007): “Evolución y tendencias de la vegetación y el clima en los últimos milenios” *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 81-99.

Para la fauna véase VIEJO MONTESINOS, J. L. *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 115-130

³⁹ Para la vegetación en la Península Ibérica véase FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F., LOIDI, J., MORENO SAINZ, C. “Impactos sobre la biodiversidad vegetal”. En MORENO RODRÍGUEZ, J. M. (2005) *Evaluación preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*, cap. 5:183-247. Para la fauna en la Península Ibérica véase MORENO, J., GALANTE, E., RAMOS, M^a A. (2005) “Impactos sobre la biodiversidad animal” En MORENO RODRÍGUEZ, J. M. (2005) *Evaluación preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*, cap. 6: 249-302

Los homínidos (*Australopithecus*) aparecieron hace unos 4 Ma. y desaparecieron hace 1 Ma; de ellos evolucionó el género *Homo* hace 2,5 Ma., a comienzos del Pleistoceno (periodo Paleolítico), este había desarrollado la inteligencia y era capaz de tallar instrumentos punzantes para cazar con mayor facilidad (*Homo habilis*); tras su aparición se produjo un notable cambio climático. *Homo erectus*/ *Homo ergaster* se diferenció hace unos 1,8 Ma. y se expandió desde África a Eurasia (Caúcaso, Italia, España (en Atapuerca era algo más evolucionado ya, *Homo antecesor*), a China e Indonesia. Hace unos 600.000 años *Homo neanderthalensis* evolucionó en África, era más corpulento que nosotros y estaba adaptado al frío glacial; fue cazador y recolector y usaba el fuego, se extendió por Europa y Asia occidental. Hace unos 200.000 (250.000)-100.000 años, durante la 3ª glaciación (Riss), evolucionó *Homo sapiens* en el Paleolítico medio en África y llegó a Europa hace 40.000 años durante la glaciación Würmiense. En el Paleolítico superior, hace 35.000 años, *Homo sapiens sapiens* tenía una superioridad cultural y técnica frente a *Homo neandertalensis*, ambos convivieron con mamuts, elefantes rinocerontes, leones, bisontes, renos y antílopes, pero el primero se extendió por todos los continentes, excepto por la Antártida, reemplazando a *Homo neandertalensis* en Europa. La especie *Homo*, y más concretamente el *Homo sapiens*, es por tanto un “recien llegado” a la historia de la Tierra, no obstante su capacidad para influir en los caracteres y las dinámicas de las distintas capas o esferas de la Tierra es importante, y probablemente también para modificar el sistema global. Parece que de forma directa e indirecta el hombre está forzando el clima, acelerando o perturbando su dinámica natural, y se tratan de prever y mitigar las consecuencias negativas de este forzamiento. Los cambios climáticos han influido en la historia del hombre y el hombre parece también haber influido en el clima y en sus cambios. Según W. F. Ruddiman el “efecto invernadero” producido por las prácticas humanas, agrarias y forestales, desde hace 5.000 años evitó que desde ese momento se iniciara una nueva glaciación⁴⁰

La primera influencia en este sentido fue probablemente a través del fuego controlado (Paleolítico) con el que la acción del hombre comenzó a incorporar CO₂ a la Atmósfera. La llamada Revolución Neolítica coincide con el periodo de bonanza climática que siguió a la última glaciación; los recursos vivos, la vegetación y la fauna se incrementaron y el hombre se hizo sedentario llevando a cabo una importante deforestación para extender los pastos y abrir las tierras al cultivo. Deforestación,

⁴⁰ RUDDIMAN, W.F. (2006): “Calentamiento antropogénico preindustrial. *Cambio Climático. Temas de Investigación y Ciencia*, 45, Barcelona, Prensa Científica: 14-21. Cit. En OLCINA, J. (2007): “El calentamiento terrestre y sus efectos: certezas e incertidumbres”, *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 47-64

agricultura (el cultivo del arroz pudo iniciarse ya hace unos 9.000 años en Indonesia) y ganadería, incorporaron a la Atmósfera CO₂ y metano CH₄, otro gas con importante “efecto invernadero”. En el óptimo climático del Neolítico (hace 6.500 años) la temperatura fue de 2 a 3 °C superior a la actual, en oriente Medio con abundantes lluvias se desarrollaron, como ya se ha indicado, las culturas Mesopotámica y Egipcia que entraron en la Historia⁴¹. Hace 3.500 años el clima se hizo más frío y árido, disminuyeron las lluvias en las zonas tropicales y se expandieron por ellas los desiertos actuales, son los tiempos bíblicos desde la instalación en Palestina y los de la antigua Grecia y antigua Roma con regímenes autoritarios y guerras de conquista. La expansión de Roma coincidió con un periodo de clima más benigno, mientras que la invasión de los pueblos germánicos desde el norte fue probablemente impulsada por un periodo frío y seco. El periodo Cálido Medieval y la Pequeña Edad del Hielo constituyen eventos históricos del clima mejor conocidos.

La segunda gran influencia del hombre en el clima se produjo con la Revolución Industrial iniciada en la segunda mitad del siglo XVIII. Hasta este periodo la bioenergía utilizada era la madera. El uso del carbón mineral inició un cambio significativo en la emisión de CO₂ a la Atmósfera por el hombre, que se completó con el uso posterior de otros combustibles fósiles (petróleo y gas natural)⁴². Emitimos a la Atmósfera CO₂ también a través de la respiración de los seres vivos, en procesos industriales como la producción de cemento, a partir de algunos usos del suelo, en los incendios provocados... y no sólo este gas sino otros que no existían antes y son muy activos. Se considera actualmente que la contaminación industrial, producida por la emisión de gases con “efecto invernadero”, es la causa fundamental del forzamiento climático debido a la acción humana. Las emisiones de gases y la deforestación se han incrementado tanto que ya parece difícil que se reduzcan estos gases en la Atmósfera a corto y medio plazo.

2.1 Ciencia y política en la Conservación de la Naturaleza

Los trabajos de los científicos han precedido siempre a la acción política mostrando los valores de la naturaleza y alertando sobre los peligros que la amenazan. Los amantes de la naturaleza en general: exploradores, viajeros, naturalistas, deportistas, artistas.... han

⁴¹ CUENCA, J.: “Historia del clima en la Humanidad”. *Reflexiones sobre el cambio climático*. Cátedra de Eméritos de la Comunidad Valenciana, Generalitat Valenciana

⁴² “Actualmente se queman aproximadamente 10.000 Mtm de combustibles fósiles al año (4.500 Mtm de carbón, 3.750 Mtm de petróleo y 1.730 Mtm de gas natural) que arrojan unos 30.000 Mtm de CO₂ a la Atmósfera”. CUENCA, J. Op. Cit., pág. 29

impulsado también de diversas formas las políticas de conservación de la naturaleza. Diversos elementos del patrimonio natural de la Tierra han sido desvelados y catalogados asegurándose su conservación como un patrimonio heredado que debe disfrutarse y ser transmitido a futuras generaciones.

Existe una percepción científica y una alerta social sobre las probables consecuencias del papel incontrolado del hombre en la alteración de las dinámicas naturales, especialmente sobre la tendencia al cambio climático inducido o acelerado por él. El cambio climático es un problema global, afecta a todas las regiones del mundo por lo que las políticas se orientan por tratados internacionales. Actualmente ya ciencia y política caminan juntas. El IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático) está integrado por científicos de todo el mundo que aportan sus investigaciones a partir de las que se obtienen conclusiones y se realizan predicciones “por consenso”⁴³ sobre los riesgos del cambio climático; es el organismo científico del Convenio Marco sobre Cambio Climático (1992) y fue promovido en 1988 por la OMM (Organización Meteorológica Mundial) y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Se estructura internamente en cuatro grupos dedicados al estudio de: los impactos científicos, los impactos económicos y sociales y la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales, las opciones para limitar emisiones de gases con “efecto invernadero” y el cuarto lleva a cabo la contabilidad e inventarios nacionales de emisiones. Ha realizado cuatro Informes (1990, 1994, 2001 y 2007) y promueve el Protocolo de Kioto (1997) por el que los países industrializados se comprometen a llevar a cabo medidas para reducir la emisión de gases con “efecto invernadero”. Se trata de favorecer el avance científico en el conocimiento de los problemas, los riesgos y los posibles impactos; se ha avanzado mucho en el conocimiento del balance de la radiación solar y el transporte latitudinal de calor, el conocimiento de la estructura, composición y circulación de la Atmósfera, y en la modelización simple y compleja del funcionamiento del subsistema climático y del sistema global. Han avanzado los métodos científicos que permiten hacer predicciones con rigor, la obtención de multitud de datos mediante la observación sistemática de los fenómenos y la simulación utilizando las posibilidades que brinda la “revolución computacional”. Se multiplican los organismos, los sistemas de observación (WWW -Vigilancia meteorológica mundial-, GAW -Vigilancia de la Atmósfera Global-, las fuentes de datos con la

⁴³ Véase GARCÍA OLMEDO, F. (2007): “El calentamiento global: año 200”, *Revista de libros*, 127-128: 6-11.

información de los satélites y nuevos sistemas mundiales de observación integrados), las conferencias y programas científicos (Conferencia mundial sobre el clima, Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP), Programa Geosfera/Biosfera para la investigación del cambio climático a escala global...).

Los cambios introducidos por el hombre en el sistema natural, entre ellos el cambio climático, constituyen no sólo un problema científico, tienen también otras dimensiones como la ética o moral, ya que puede comprometer la sostenibilidad, la transmisión a las generaciones futuras de un planeta habitable, con recursos naturales. El cambio climático puede tener impactos negativos y también algunos positivos, parece que serán negativos para los países en vías de desarrollo en general, será negativa también para todos la mayor frecuencia de los eventos meteorológicos extremos que ya se dejan sentir y que constituyen riesgos notables para muchas poblaciones...No obstante el calentamiento global será positivo para los países fríos y para algunas regiones de montaña. En el año 2000 se convocó una reunión en Fröberg (Suecia), con integración de científicos de ciencias naturales y ciencias sociales; su objetivo era proponer “Como la ciencia y la tecnología pueden facilitar una transición hacia la sostenibilidad”. Este objetivo refleja la idea de que no es ese el camino que siguen las políticas actuales en el mundo. Se trataría de ver como la ciencia y la tecnología pueden facilitar a las políticas actuales ese filtro ético que permitiera usar y conservar los recursos que hacen posible la vida, evitando el despilfarro, para transmitir a las generaciones futuras una Tierra habitable.

El cambio global tiene también repercusiones sociales, económicas y culturales. Puede afectar a las condiciones de vida, al desarrollo económico, al paisaje... Existe una interconexión muy profunda entre los sistemas biofísicos y los sistemas sociales con dependencias mutuas e impactos recíprocos.

2.2 Política, población y desarrollo

La población actual en expansión creciente ejerce una presión cada vez mayor sobre los recursos (alimentos, agua, energía, espacio) y genera más contaminación. La población mundial del planeta es cercana a los 6.671 millones en 2008, con las debidas reservas se ha estimado que, en función de los recursos disponibles, la capacidad de carga del planeta sería de unos 15.000 millones. El año 1965 la población mundial era aproximadamente de 3.335 millones lo que permite apreciar globalmente la velocidad de este crecimiento. La presión

que sobre los recursos ha realizado el hombre a lo largo de la historia no es comparable con la actual, a modo de ejemplo del año 1700 a la actualidad la extensión de la superficie domesticada ha pasado del 6% al 40% (Goldewikj y Battjes, 1997)⁴⁴.

El crecimiento de la población urbana es imparable y nuestro modelo urbano no es muy sostenible; en el medio urbano se produce una gran transformación del medio natural, se incrementa la contaminación y se modifica el clima produciéndose lo que se ha llamado “clima urbano”, cuyo rasgo característico es la “isla de calor”. No obstante, existen actualmente medidas de mitigación y prevención, tanto en el medio rural como en el urbano, que tratan de mejorar las condiciones ambientales⁴⁵

Los cambios medio ambientales tendrán sin duda repercusiones en la actual distribución de la población mundial. La elevación del nivel del mar, comprometerá la existencia de muchas ciudades y núcleos rurales litorales donde existen importantes concentraciones de población, especialmente en las desembocaduras de los ríos. Desde los ámbitos menos favorables para la vida, calurosos, áridos o insalubres, desde aquellos que queden sometidos a riesgos persistentes por la inestabilidad del clima y la incidencia de eventos extremos, y en general desde las áreas sin recursos se producirán importantes movimientos migratorios⁴⁶.

2.3 Política económica. Los recursos ambientales bienes públicos⁴⁷

El Protocolo de Kioto ha sido la “agenda ambiental internacional” para luchar contra el cambio climático mediante el compromiso de los países de reducción de sus emisiones de gases con “efecto invernadero”. Una de las causas del fracaso parcial de la ratificación del mismo se debe probablemente a la falta de información económica sobre

⁴⁴ El Informe del Fondo de Población de las Naciones Unidas: “El Estado de la población Mundial” (2007) predice para 2008 que: Más de la mitad de la población vivirá en zonas urbanas 3.300 millones (el 52% en ciudades de más de 500.000 habitantes) y que esto supondrá elevados costes ambientales ya que en las ciudades se consumen tres cuartas partes de la energía mundial y se emite el 80% de los gases de “efecto invernadero”. Nuestro modelo urbano promueve el consumismo y el derroche y nuestras ciudades son “islas de calor”

⁴⁵ Véase FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2006): “Impactos del cambio climático en las áreas urbanas y rurales”, *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza*, 66-67: 171-181

⁴⁶ La disminución del área dedicada a cultivos alimenticios, que en extensas zonas está siendo sustituida por el cultivo de agrocombustibles, puede producir también desplazamientos importantes.

⁴⁷ “Se definen como bienes públicos aquellos bienes cuyo consumo es no excluyente y no rival”. SAN MARTÍN GONZÁLEZ, E. y GARCÍA-VERDUGO SALES, J. (2006): “Kioto y los bienes públicos globales”, *Revista del Instituto de Estudios Económicos. Mitos y realidades del Cambio Climático*, 3-4: 237-242

los costes y beneficios del cambio climático que puedan justificar la adopción de las medidas propuestas en dicho Protocolo. Se habría tratado de internalizar a través de él los costes externos de la emisión de gases de “efecto invernadero”. La naturaleza de “bienes públicos” de los recursos ambientales no incentiva su conservación, no obstante, cada vez somos más conscientes de la dimensión planetaria de los problemas ambientales. El principal problema del cambio climático es la falta de acuerdo científico sobre la influencia de la actividad humana en el calentamiento global. No ha sido ratificado por países muy contaminadores como EEUU y Australia. Los costes son elevados y los beneficios aparecen como algo incierto⁴⁸.

Sería interesante evaluar lo que puede costar a distintos países evitar la inundación de sus tierras bajas litorales, lo que cuestan los eventos extremos del clima o la prevención de los riesgos climáticos. Para algunos es más rentable permitir las emisiones y pagar las consecuencias y para otros las consecuencias no serán tan intensas ni tan costosas⁴⁹. Las consecuencias del cambio climático se producirán a una escala de tiempo que no se corresponde con la escala de la política. En este ámbito se pueden adoptar tres posturas: negar el calentamiento del clima por causas humanas, tratar de adaptarse a estos cambios o intentar atajarlos considerando que somos bastante responsables de los cambios globales del planeta⁵⁰. Los estudios del IPCC sobre los costes económicos de las políticas de mitigación concluyen que en el corto y medio plazo “existe el potencial económico para mitigar las emisiones de gases invernadero hasta eliminar el crecimiento proyectado de emisiones globales e incluso reducirlas por debajo de los niveles actuales”⁵¹, y se proponen políticas, medidas e instrumentos para conseguirlo⁵².

⁴⁸ El antecedente del Protocolo de Kioto fue el Protocolo de Montreal (1987) para limitar las emisiones de los gases que destruyen la capa de ozono (clorofluorcarbonados). El problema fue descubierto en 1985 y la causa fue demostrada científicamente. Los gastos no eran excesivos y los resultados parciales fueron apreciables

⁴⁹ LOMBORG, B. (1998): *El ecologista escéptico*. Cit. GARCÍA OLMEDO, F. (2007). Op. cit.

⁵⁰ GARCÍA OLMEDO, F. (2007). Op. cit

⁵¹ GARCÍA OLMEDO, F. *El problema del calentamiento global*. Colegio de Eméritos, pág. 59

⁵² “En el ámbito del IPCC no se han cuantificado las posibles consecuencias económicas de no mitigar, pero sí se ha hecho en el informe Stern. En el resumen de dicho informe se señala que “si no se actúa ya, los costes y riesgos globales del cambio climático serán equivalentes a una pérdida del 5% de PIB global cada año, ahora

2.4 Los caminos de la ciencia y la política en el campo de la divulgación, educación y sensibilización

Las creencias públicas basadas en el conocimiento científico constituirían un importante punto de partida para aplicar políticas de mitigación y adaptación efectivas como las políticas energéticas. La difusión de estas ideas ha de hacerse a través de la educación fundamentalmente y también de la divulgación. La divulgación a través de los medios de comunicación es generalmente poco rigurosa porque el cambio climático se ha convertido en una noticia “estrella” y con frecuencia se trata de captar la atención a través de frases con fuerte impacto y, a veces, falta de rigor. Suelen atribuirse al cambio climático eventos esporádicos que nada tienen que ver con el mismo, pero que atraen mucho la atención de los lectores⁵³. Los científicos, generalmente realizan, junto a su producción científica, una producción divulgativa que constituye la mejor fuente para la educación.

La prensa o la televisión llevan a cabo recientemente resúmenes breves de los logros científicos publicados por los investigadores en revistas como Science o Nature. A través de la red es fácil acceder a la información científica, aunque se requiere tener nivel para asimilar esos conocimientos, buen criterio para seleccionarlos y juicio crítico sobre la información disponible.

La mejor sensibilización de la población nace de la aplicación de políticas coherentes que promueven modelos de conducta responsable o sostenible.

3. Las evidencias y las dudas

Pocos dudan actualmente del calentamiento global porque son evidentes sus efectos: se registran elevaciones de las temperaturas medias⁵⁴, se funden los hielos y en algunas regiones se está elevando el nivel marino; se observan desplazamientos de las áreas

y para siempre. Si se tiene en cuenta un repertorio más amplio de riesgos e impactos, las estimaciones del daño podrían elevarse al 20% o más”, algo que el autor acaba equiparando a las pérdidas económicas asociadas a las grandes guerras mundiales o a las de la gran depresión del primer tercio del pasado siglo” GARCÍA OLMEDO, F. *El problema del calentamiento global*. Colegio de Eméritos, págs. 69-70

⁵³ J. Martín Vide señala que el cambio climático reúne seis condiciones para ser tema *estrella*: que es nuevo, no es efímero, es medioambiental, tiene morbo, puede formularse sencillamente y a la vez es complejo. Véase MARTÍN VIDE, J. (2006): “Un decálogo del cambio climático”, *Revista del Instituto de Estudios Económicos. Mitos y realidades del Cambio Climático*, 3-4: 3-23. OLCINA CANTOS, J. (2007). Op. cit

⁵⁴ La temperatura media en la superficie de la Tierra se ha elevado unos 0,7 °C en el siglo XX

de las especies y cambios fenológicos diversos en la floración, la foliación, la invernación, los ciclos reproductivos de las especies, etc.

No sabemos bien que parte de este cambio corresponde a la variabilidad natural del clima y cual a la acción del hombre. Svante August Arrhenius introdujo en la literatura científica el término “efecto invernadero” (1896) para nombrar el efecto que producía el CO₂ emitido y acumulado en la Atmósfera por la combustión de los combustibles fósiles, al que consideró responsable de la fusión de los hielos, como ya se ha indicado. La concentración de este gas en la Atmósfera se ha incrementado en más de un 30% desde 1750 y es actualmente de aproximadamente 370 ppm (partes por millón) siendo los países industrializados los que emiten más cantidad de éste y otros gases de “efecto invernadero”. En 2001 el IPCC concluyó: “hay nuevas y más sólidas evidencias de que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años es atribuible a las actividades humanas» y en el último informe (2007) ha cuantificado la alteración que supone la presencia de gases con “efecto invernadero” en el balance energético global. Parece que el hombre tiene cierta capacidad para modificar el clima de la Tierra, hasta ahora de forma bastante incontrolada y en escalas temporales propias del cambio climático (cientos o miles de años) y de la naturaleza del cambio.

Los ecosistemas y las especies son sensibles a los cambios climáticos y a los ritmos de los mismos. Pueden adaptarse, desplazarse, desaparecer o extinguirse, en el caso de las especies. Biotopos o nichos vacíos constituirán oportunidades para otras especies, como ha sucedido a lo largo de la historia de la Tierra, sin embargo, las primeras que los ocuparán serán especies de amplia distribución, competitivas, lo que constituirá una pérdida de biodiversidad. Desde que el hombre ha aparecido en la superficie de la Tierra ha ejercido una influencia notable sobre las especies, los ecosistemas y sus áreas de distribución; el cambio climático será un factor más de esa influencia que se traducirá en efectos desconocidos hasta ahora, probablemente más vinculados a los cambios climáticos del pasado. Especialmente importante para la salud humana será la expansión de enfermedades nuevas o ya erradicadas.

Entre los *objetivos del milenio* para resolver los problemas de la humanidad (Cumbre del Milenio, Nueva York, septiembre 2000) se encuentran algunos que pueden estar amenazados por el cambio climático, aunque sin duda lo están más por las políticas

medioambientales y económicas a nivel mundial, como: erradicar la pobreza extrema y el hambre, reducir la mortalidad infantil, combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades o garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.

Tal vez la duda que más inquieta a los científicos y a la gente en general es si sabrá y podrá el hombre manejar los cambios que está introduciendo. El cambio climático puede incrementar o disminuir la disponibilidad de algunos recursos como el agua, el viento, la energía la producción de determinados alimentos... Este cambio favorecerá económicamente a unas regiones y perjudicará a otras. Actividades económicas como el turismo, la agricultura, la explotación forestal... se pueden desplazar en función de las nuevas potencialidades. No obstante estos cambios no serán bruscos sino muy lentos y sin duda las sociedades humanas sabrán adaptarse a las nuevas oportunidades y buscarán nuevas formas para conservar las anteriores.