

# Cambio climático global, ascenso del nivel de los mares y otras consecuencias: Una revisión y síntesis del conocimiento actual

Jorge Oyarzún M.



*El archipiélago de Kiribati en el Pacífico, zona amenazada por un ascenso del nivel del mar (Imagen<sup>1</sup>).*

## 1. Introducción

El tema del cambio climático global se ha constituido en la principal polémica científica del Siglo XXI por una serie de razones. En primer lugar, por la gravedad y extensión que podrían alcanzar sus consecuencias físicas y biológicas si las predicciones más pesimistas son correctas, o lo que es aún peor, si efectos no previstos llegan a sobrepasar esas predicciones. A ello se agrega su estrecha relación con el desarrollo económico, por las consecuencias que implicaría reducir las actuales emisiones de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>). Por otra parte, si bien la base física del fenómeno no está en duda, sí lo están las conclusiones de los modelos físico-matemáticos y los datos físicos sobre los cuales se sustentan (p.ej., Lillo y Oyarzun, 2009). Lo anterior dificulta también la modelización e interpretación de sus posibles efectos catastróficos, que implican sucesos de baja probabilidad pero elevado impacto, lo que plantea incertidumbres estadísticas de tipo estructural (Weitzman, 2009). Todo esto es consecuencia de la extrema complejidad de los sistemas naturales y del hecho de que están expuestos a mecanismos de retroalimentación en buena parte desconocidos. Por consiguiente, aún las predicciones

*Jorge Oyarzún se tituló de Geólogo en la Universidad de Chile, obtuvo un doctorado en geoquímica por la Universidad de París y posteriormente el Doctorado de Estado en Ciencias por la misma universidad, con una tesis sobre metalogénesis andina. También realizó una estancia postdoctoral Humboldt en metalogénesis en la Universidad de Heidelberg. Ha sido jefe de la División de Geoquímica del actual SERNAGEOMIN, profesor en las universidades de Chile, del Norte y de Concepción, consultor de UNESCO y de empresas mineras, y profesor invitado en universidades de Sudamérica y Europa. En particular, ha colaborado con cinco universidades argentinas en temas de minería sostenible. El año 2002 compartió el Premio Wardell Armstrong de la antigua Institución de Minería y Metalurgia de Gran Bretaña (IMM, hoy parte de la IOM3). Actualmente es Profesor Titular (Catedrático) del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena, Chile, y en calidad de tal participó en la organización del Centro de Investigaciones sobre Zonas Áridas, CEAZA y en la creación de la Carrera de Ingeniería Ambiental. También colabora externamente en proyectos del Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y El Caribe, CAZALAC. Jorge Oyarzún es además colaborador externo del IGeA de la Universidad de Castilla – La Mancha. E-mail: joyarzun@uls.cl*

más pesimistas en términos de la velocidad y consecuencias de sus efectos podrían ser sobrepasadas.

El pasado geológico ha revelado la magnitud de los efectos físico-biológicos atribuidos al incremento de CO<sub>2</sub> de fines del período Pérmico, 250 millones de años (Ma) atrás, el que dio lugar a la mayor extinción de especies biológicas. También cabe destacar el enorme aumento del nivel del mar, estimado en 300 a 500 m, debido a la fusión de los hielos polares en el período Cretácico (145 a 65 Ma). Eventos similares serían hoy catastróficos para la población mundial, considerando que un 10% de esta, así como un 13% de la población urbana habita en terrenos situados a menos de 10 m sobre el nivel del mar. En el caso de Chile, el principal riesgo es de carácter hidrológico y se relaciona tanto con un probable aumento de la aridez en el centro del país como con el ascenso de la isoterma de estabilidad de las precipitaciones nivales, lo que afecta la capacidad de almacenamiento de agua del macizo andino. También podría causar una intensificación de los procesos de remoción en masa de rocas y suelos e inundaciones durante las precipitaciones invernales.



*Representación de los bosques de la Antártica durante el período Cretácico, cuando el clima de la Tierra era mucho más cálido que el actual (Imagen<sup>2</sup>)*

Debido a las razones anteriores es importante comprender las causas y las características del fenómeno al que nos enfrentamos, en particular los riesgos de retroalimentación que pueden acelerar y magnificar sus efectos más allá de lo imaginado. El presente estudio tiene por objeto presentar una síntesis reflexiva y ponderada del conocimiento actual y de la evolución y efectos esperados de este complejo fenómeno. El estudio está basado en el examen de literatura actual, a la cual se refiere al lector a través de las referencias, las que incluyen artículos sobre temas específicos y libros de amplio enfoque, como los de Jacobson et al (2000) y de Solomon et al (2007).

## 2. Cambio climático y gases de efecto invernadero

El clima ha cambiado constantemente a lo largo de la historia geológica de la Tierra. Ello ha obedecido a factores tales como la deriva de los continentes, la intensificación del volcanismo basáltico rico en  $\text{CO}_2$ , los cambios astronómicos cíclicos, etc. Así, durante el período Cretácico llegaron a desaparecer las masas de hielo polares y el nivel del mar se elevó varios cientos de metros. En cambio, el mar llegó a estar 100 - 150 m bajo su nivel actual hace 18 mil años, cuando la última glaciación alcanzó su apogeo. Sin embargo, cuando se menciona el actual cambio climático, se alude generalmente a la elevación de la temperatura atmosférica media, atribuida al incremento en las emisiones de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), registrado desde el inicio de la revolución industrial a fines del Siglo XIX. Dicho cambio histórico, que tuvo lugar principalmente en Europa y Norteamérica, se basó inicialmente en las aplicaciones industriales del hierro y el carbón, con el agregado posterior del petróleo (Glick, 2004).



*Tierras emergidas (en verde) en el entorno de Irlanda, Gran Bretaña, Francia y Holanda hace unos 60.000 años en respuesta a la última gran glaciación: el Canal de la Mancha no existe (Imagen<sup>3</sup>).*

La combustión del carbón y la del petróleo producen emisiones de  $\text{CO}_2$ , un gas que se comporta de manera “transparente” respecto a las radiaciones de alta frecuencia recibidas del sol, pero que intercepta las de baja frecuencia emitidas hacia el espacio por la Tierra, en su condición de “cuerpo negro”. Al ser estas interceptadas estas últimas, aumenta la vibración de las moléculas de  $\text{CO}_2$ , y por lo tanto su temperatura. De ahí que el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CH}_4$  y otros gases se denominen por analogía “gases invernadero”, por su capacidad para elevar la temperatura atmosférica. El vapor de agua es también un importante gas de efecto invernadero, pero el incremento de su concentración en la atmósfera depende casi enteramente del aumento de la temperatura del mar y de la atmósfera.

El efecto específico del metano ( $\text{CH}_4$ ) es muy superior al del  $\text{CO}_2$ , pero su concentración atmosférica es mucho menor, de manera que su contribución al calentamiento global se estima entre un tercio y un cuarto de la del  $\text{CO}_2$ . Por otra parte, el ser humano ejerce poco control sobre su generación, la que tiene lugar principalmente en sedimentos reductores del fondo marino y de

pantanos, aunque sí es responsable de sus fugas desde exploraciones y explotaciones de petróleo, gas natural y carbón. En consecuencia, la mayor atención se centra en el CO<sub>2</sub>, por ser el principal producto de la combustión y sobre el cual existe el mayor poder de control.

Carbón, petróleo y otros combustibles fósiles se acumularon en las rocas a lo largo de cientos de millones de años por la acción combinada de procesos biológicos y geológicos. Los primeros retiraron CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través de la fotosíntesis de las plantas, combinándolo con agua para formar hidratos de carbono, utilizando la energía solar y el efecto catalítico de la clorofila. Si esos procesos no hubieran actuado, retirando el CO<sub>2</sub> aportado continuamente por el volcanismo, y los materiales orgánicos no hubieran sido enterrados en cuencas geológicas en hundimiento, la Tierra sería un planeta similar a Venus (p.ej., Oyarzun et al, 2008). En ese planeta, muy semejante en otros aspectos a la Tierra, la acumulación de CO<sub>2</sub> en su atmósfera es responsable de que se alcancen cientos de grados de temperatura y se produzcan continuos vientos huracanados. El problema actual radica en que la actividad humana está devolviendo a la atmósfera el CO<sub>2</sub> almacenado en la corteza terrestre, al extraer y quemar los combustibles fósiles. Como consecuencia de ello, el contenido de CO<sub>2</sub> de la atmósfera ha crecido continuamente desde 280 ppm en 1860 a unas 400 ppm en 2014, probablemente la concentración más alta de los últimos millones de años.

Aunque el incremento de la temperatura media atmosférica desde 1860 se estima en sólo un grado, algunos especialistas calculan que aumentos de unos pocos grados pueden dar lugar a efectos de retroalimentación catastróficos. El hecho de aceptar tal posibilidad implica la necesidad de evaluar las probables consecuencias futuras considerando distintos escenarios de crecimiento, los que a su vez están directamente ligados a las previsiones de crecimiento económico. Así se han modelizado escenarios que consideran las consecuencias del mantenimiento o aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros “forzadores climáticos”. Para los primeros 50 años del presente siglo se estima que el actual desbalance energético de 1W/m<sup>2</sup> llegaría a unos 2 W/m<sup>2</sup> considerando sólo el CO<sub>2</sub>, y a 3 W/m<sup>2</sup> si se agregan otros gases y aerosoles (Hansen, 2004). En este sentido, aunque las consecuencias negativas del cambio climático son actualmente reconocidas, los gobiernos no se han mostrado dispuestos a tomar medidas efectivas debido al alto costo económico que ello implicaría. Por otra parte, ha ganado terreno la disposición a aceptar que estamos viviendo en una nueva edad geológica: el Antropoceno (Ruddiman, 2003, 2005).



*Una era profundamente intervenida por la acción humana: el Antropoceno (Imagen<sup>4</sup>).*

Esa idea ha llevado a algunos sectores a plantear que el cambio climático debería ser aceptado como una característica ya implantada, centrando los esfuerzos en la adaptación a ese cambio

(lo que sería muy difícil de lograr por los países más pobres y vulnerables). Alternativamente, se han expuesto planes sectoriales como el “Plan de Potencia Limpia” del Presidente Obama, que busca reducir el papel de las termoeléctricas a carbón, que proporcionan un 39% de la potencia eléctrica de los Estados Unidos pero son responsables del 75% de sus emisiones de CO<sub>2</sub> (Grunwald, 2014). En efecto, cuando se quema carbón, toda la energía térmica que se obtiene implica la liberación de CO<sub>2</sub>. En cambio, en la combustión del metano un 50% de la energía producida proviene de la combinación de los cuatro átomos de hidrógeno que contiene con oxígeno, reacción exotérmica que sólo genera agua. De ahí que el actual auge en los Estados Unidos de la extracción de metano de rocas sedimentarias carbonosas mediante fracturación hidráulica (“fracking”) sea vista positivamente en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, pese a los riesgos de contaminación del agua subterránea que ella implica. En cuanto al Protocolo de Kyoto y otros intentos internacionales, sus logros han sido muy limitados y son más bien de naturaleza cosmética. En las palabras de Stern (2006), asesor del Reino Unido en materias de cambio climático, el control de los gases de efecto invernadero es un tema serio y urgente, cuyos posibles impactos permanecen inciertos y sujetos a amplios márgenes de error, tanto en términos de su naturaleza como de su escala. Destaquemos aquí que los principales contribuyentes a las emisiones y su crecimiento son la generación de electricidad y el transporte, seguidos por el efecto combinado de la deforestación y la agricultura.



*Planta eléctrica a carbón en Council Bluffs, Iowa (Estados Unidos) (Imagen<sup>5</sup>).*

Conforme al Panel de Expertos en Cambio Climático (IPCC; Alley et al, 2007), aun en el caso de que las emisiones de CO<sub>2</sub> se estabilizarán, sus efectos retardados continuarían afectando el clima mundial durante el Siglo XXII, con sus consecuencias en términos de sequías, inundaciones, frecuencia y magnitud de las tormentas, y ascensos del nivel del mar. Para una concentración de CO<sub>2</sub> de 400 ppm (ya alcanzada) se espera que en el año 2100 la temperatura atmosférica media supere en 1,2-2,5 °C a la actual, y si la concentración alcanzara 550 ppm ese incremento podría alcanzar valores de 1,5-3,2 °C. Lo anterior, sin considerar los efectos de retroalimentación. Conforme al estudio de testigos de hielo, la actual concentración de CO<sub>2</sub> supera los valores alcanzados durante los últimos 650 mil años. Por otra parte el panel de expertos concluyó que los países más industrializados continuarán generando las mayores emisiones, pero que las de algunos países en desarrollo crecerán más rápidamente. Para 2025

se pronostica un crecimiento de emisiones de un 39% en los Estados Unidos y de 145% por parte de China, los cuales se igualarán en torno a las 8 Gt, sobrepasando largamente a los demás países. Si a lo anterior se agrega el crecimiento de la población, la que se espera alcance unos 9 mil millones de personas (unos 2 mil millones más que la actual, Cohen, 2005; Musser, 2005), las perspectivas son muy negativas.

### 3. Otras explicaciones para el cambio climático

Aunque los detractores de la hipótesis del cambio climático ligado a los “gases invernadero” son cada vez más escasos y menos representativos, es interesante analizar sus argumentos. Desde luego tienen razón en señalar que el aumento de temperatura constatado podría obedecer también a otras causas. Una principal es de carácter astronómico y se relaciona con cambios cíclicos propuestos por Milankovitch, cuya duración se estima actualmente en 26 mil años (precesión del eje de rotación de la Tierra), 41 mil años (su grado de oblicuidad) y 100 mil años (excentricidad de la órbita de rotación de la Tierra en torno al Sol). El resultado combinado de los tres ciclos da como resultado máximos de temperatura (determinados por mediciones isotópicas en burbujas de aire de los hielos de la Antártica) separados por 100 mil años durante los últimos 400 mil años. Estos máximos coinciden con altos contenidos de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub>, probablemente debido al efecto del calentamiento de los mares y del permafrost que facilitó el paso a la atmósfera de estos gases.

Lo complicado de la situación actual radica en que la Tierra justamente pasa por un alto del ciclo astronómico, a lo que se agrega la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de origen antrópico, que no existía cuando se produjeron los máximos térmicos anteriores (la concentración de CO<sub>2</sub> no pasaba de 280 ppm contra las 400 ppm actuales, Hansen, 2004).

Respecto a la hipótesis del calentamiento que explica el aumento de la temperatura atmosférica por efecto de una posible intensificación de la radiación solar, esta no pone en duda la física del efecto invernadero. En consecuencia, si llega más energía del Sol, el alto contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera impedirá radiar la energía en exceso al espacio exterior, agravando el efecto de la intensificación de la energía solar que llega a la Tierra.

### 4. Efectos directos e indirectos del cambio climático

Entre los efectos directos mejor conocidos del cambio climático está la fusión de las masas de hielo del Ártico, Groenlandia y en menor grado, de la Antártica (Appenzeller, 2007). El fenómeno ha alcanzado una velocidad superior a la prevista inicialmente, en particular en Groenlandia, donde el agua infiltrada a través de las grietas del hielo ha actuado como lubricante en su base, acelerando el movimiento de los glaciares. A diferencia de los hielos del Ártico, los hielos continentales de la Antártica presentan una mayor resistencia a la fusión al encontrarse sobre sus alturas continentales. Por otra parte, este fenómeno ya ha empezado a suceder en los hielos continentales de Groenlandia.



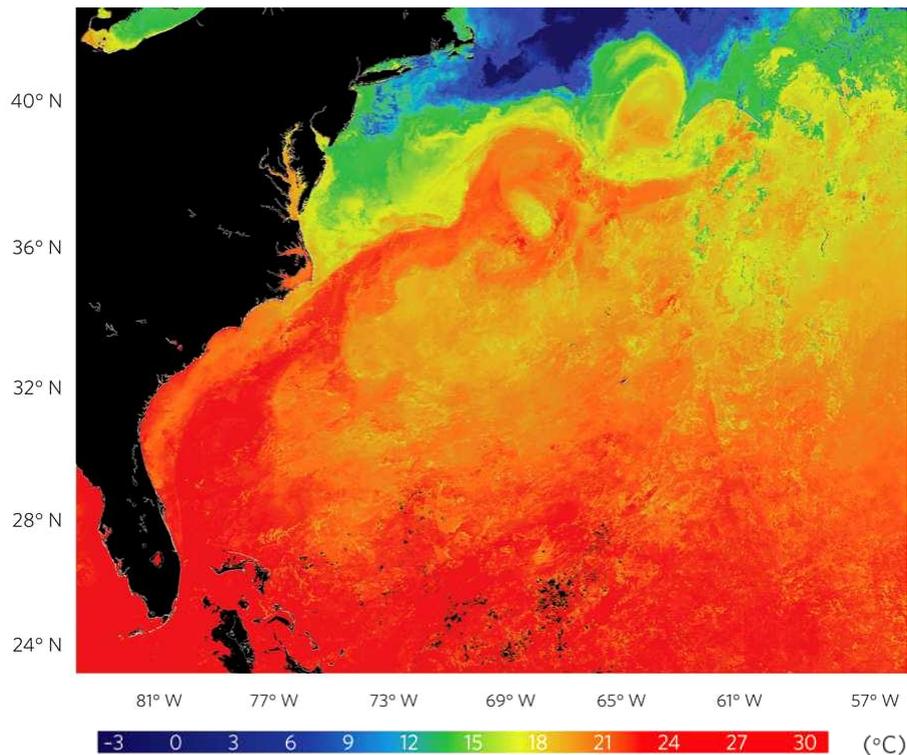
*Fusión de los hielos continentales de Groenlandia (Imagen<sup>6</sup>).*

Las plataformas flotantes de la Antártica (*ice shelves*; Bindshadler y Bentley, 2002) sí están sujetas a importantes procesos de deshielo, y constituyen hoy por hoy los sectores más amenazados. Sin embargo sólo la fusión los hielos continentales contribuye a la elevación de los niveles oceánicos. Esto es así porque los hielos de las plataformas ya flotan en el agua, y se comportan como un cubo de hielo derritiéndose en un vaso de agua: su fusión no modifica el volumen total. No obstante, es probable que la fusión descontrolada de los hielos flotantes árticos pueda alterar la salinidad de las aguas oceánicas, en un grado tal que afecte, por ejemplo, a los mecanismos de circulación de la Corriente Marina del Golfo, que conduce calor del Caribe al Atlántico Norte y de la corriente fría profunda de retorno en dirección suroeste, cuya densidad sería afectada por la dilución.

El calentamiento de los océanos se puede manifestar como un incremento en la frecuencia y magnitud los fenómenos ciclónicos (p.ej., huracanes). En efecto, estas perturbaciones se originan en latitudes bajas donde los mares aportan calor y humedad al aire. Cuando el aire húmedo asciende, el agua contenida se condensa y entrega al aire el calor recibido, lo que causa su expansión y rápido ascenso y rotación en torno a una columna central (Hoffman, 2004). En consecuencia, es razonable esperar que mientras más calientes estén las aguas marinas, más energía y agua podrán aportar al proceso descrito. El efecto de los fenómenos ciclónicos sobre las costas bajas se refuerza por el hecho que la expansión térmica de la atmósfera caliente hace bajar la presión atmosférica, lo que descomprime y eleva el nivel de las aguas ("storm surges"), aumentando la gravedad de los daños.

Sin embargo las probables consecuencias del cambio climático no se restringen al ascenso de nivel del mar o a los incrementos en frecuencia y magnitud de los fenómenos ciclónicos. También pueden afectar la biodiversidad (Heller y Zavaleta, 2009) y la distribución y retención nival de las precipitaciones atmosféricas. Respecto a este último aspecto, el estudio de Vicuña y Meza (2012) analizó los desafíos que implica para el centro y sur de Chile (30°S-42°S) la

reducción de las precipitaciones en torno a un 30%, cifra estimada para fines del Siglo XXI, junto a un aumento de temperatura de 2°-4°C. Tanto o más serio puede ser el descenso de la isoterma de estabilidad nival, puesto que la Cordillera de los Andes actúa como un gran embalse al retener parte de las precipitaciones invernales bajo la forma de nieve. Lo anterior implica igualmente riesgos de inundaciones por las precipitaciones invernales, fenómenos de remoción en masa, pérdida de la capacidad de generación hidroeléctrica, etc. En consecuencia, el cambio climático no solamente afectará a los puertos, poblaciones costeras de cotas bajas y balnearios, sino que también a nuestra disponibilidad de agua, que ya es escasa en buena parte del país.



*Corriente del Golfo a su paso por la costa atlántica de los Estados Unidos. El gradiente de colores del azul al rojo indica mayores temperaturas: ver escala (Imagen<sup>7</sup>).*

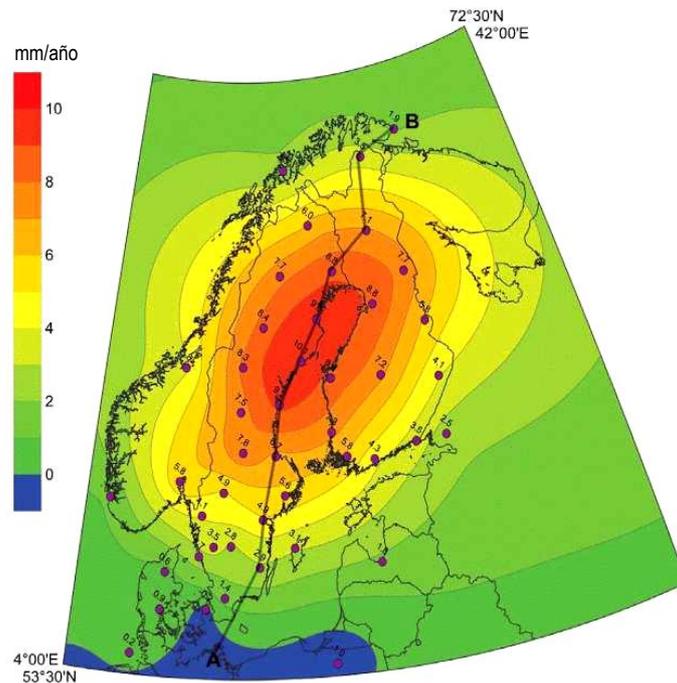
## 5. El cambio climático y el nivel de los mares

Se estima que hace 140 mil años atrás el nivel medio de los mares estuvo unos 150 m por debajo del actual, en el curso del último ciclo glacial. Después (130 a 115 mil años atrás) subió a los niveles actuales, para fluctuar posteriormente y caer a -125 m hace unos 30 mil años atrás, alcanzando una estabilidad en torno al nivel medio actual hace 3 mil años. (Lambeck y Chappel, 2001). Sin embargo, los niveles de los mares se elevaron durante el siglo pasado y con seguridad continuarán el ascenso durante el siglo actual, lo que se acelerará durante el Siglo XXI, aunque la velocidad y el ritmo del cambio es incierta (Nichols y Cazenave, 2010). Al respecto hay que considerar que no se trata de un nivel homogéneo, dependiente sólo del volumen de las aguas oceánicas. Por el contrario, los efectos locales son importantes y los cambios medidos son en parte reversibles. Como señalan los autores citados, los niveles del mar dependen también de la temperatura del agua a través de su expansión térmica. También

influyen su salinidad (afectada por la dilución producto de la fusión de las masas de hielo), así como las variaciones de presión, las que pueden generar efectos catastróficos sobre las costas bajas en el curso de los huracanes, elevando el nivel del mar en varios metros (“olas de tormenta” o *storm surges*).

Otro factor importante es la subsidencia local de terrenos costeros, que responde a factores causales distintos como la sobreexplotación de las aguas subterráneas, pero que igualmente puede agravar las consecuencias del ascenso del nivel del mar. En cambio, la isostasia glacial tiene un efecto local inverso (Lambeck y Chappel, 2001), esto es, induce el ascenso continental como consecuencia de la fusión de las grandes masas de hielo que dejan entonces de ejercer presión sobre la corteza terrestre. Este hecho se pudo constatar en Escandinavia donde la masa continental se alzó unos 200 a 300 m con posterioridad a la última glaciación.

Nichols y Cazenave (2010) señalan que el ascenso del nivel del mar no ha sido uniforme y que en el Pacífico occidental ha ocurrido hasta tres veces más rápido que en otros sectores, de manera que su efecto debería analizarse a la escala de varias décadas. Al respecto, Sallenger et al (2012) indican que en la costa atlántica de Norteamérica al norte del Cabo Hatteras (a lo largo de unos 1000 km), el nivel del mar aumentó 3 a 4 veces más que el promedio mundial. Los autores explican este “hot spot” de ascenso acelerado en términos de factores dinámicos como la circulación de corrientes marinas, efectos de salinidad y temperatura.



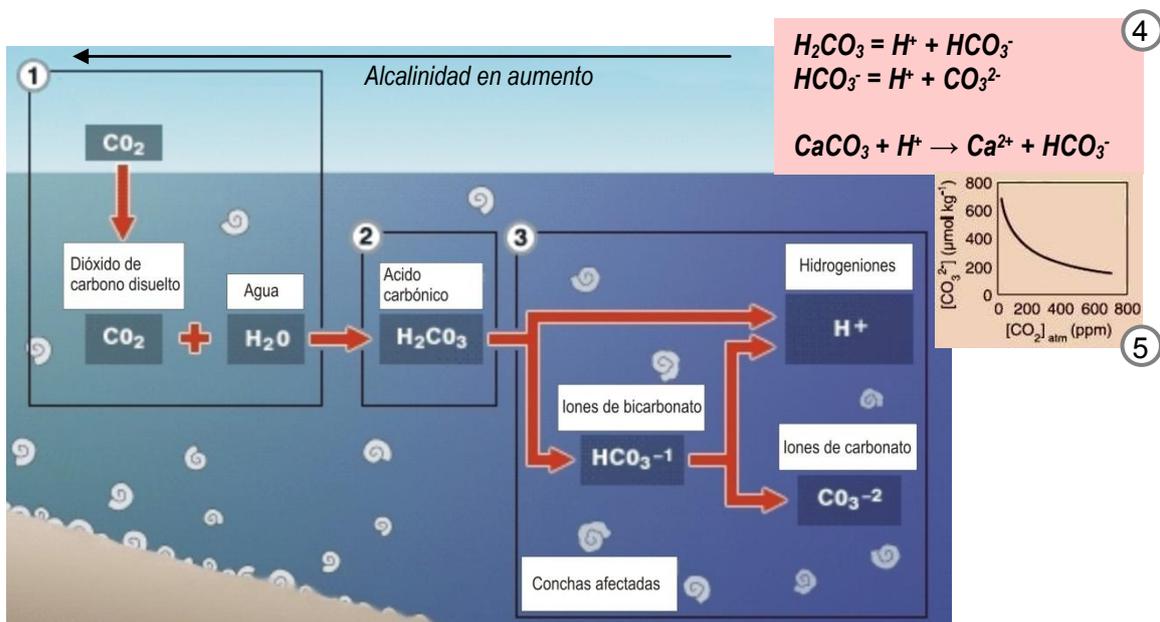
*Ascenso isostático de Escandinavia como consecuencia de la fusión de los hielos que la cubrían durante la última glaciación. Un fenómeno similar ocurriría con Groenlandia si se fundiera su cubierta de hielos como producto de un alzamiento continuo de las temperaturas (Imagen<sup>8</sup>).*

A todo esto hay que agregar la acelerada pérdida de masa de hielo en Groenlandia. Se estima que este factor contribuyó en un 15% al ascenso del nivel del mar entre 1993 y 2003, y que desde entonces la contribución de la fusión del hielo se ha doblado alcanzando un 60%. Por su parte la expansión térmica de los océanos ha contribuido en un 30% y otros factores menores en

un 10% (Nichols y Cazenave, 2010). Se estima que el nivel del mar había permanecido estable desde hace unos 3 mil años atrás y que los cambios en curso lo elevarán entre 0,6 y 1m en el curso del presente siglo (Panel del IPCC, 4º informe, en Nichols y Cazanave, 2010). A este respecto, Rahmstorf (2011) ha propuesto una aproximación semi-empírica para estimar los futuros niveles del mar, cuyo resultado es una constante de proporcionalidad de 3,4 mm por año y por grado de aumento de la temperatura. Su aplicación le entrega una proyección de 0,5 a 1,4m sobre el nivel de 1990 para el año 2100, cifras muy similares a las calculadas por el Panel IPCC.

## 6. El efecto amortiguador de los océanos

Al analizar los efectos del exceso de energía retenida por la Tierra como resultado del aumento de la concentración de los gases invernadero en la atmósfera (en particular  $\text{CO}_2$ ), es necesario recordar que los sistemas naturales cuentan con mecanismos de amortiguación que tienden a contrarrestar el efecto de las variables que se apartan de las condiciones de equilibrio dinámico. En el caso del cambio climático global, los océanos tienen el mayor potencial homeostático y lo ejercen en particular respecto al almacenamiento del  $\text{CO}_2$ , al control del pH de las aguas resultante del incremento en concentración del  $\text{CO}_2$  y a la temperatura de las aguas oceánicas superficiales y profundas. Respecto al primer punto, se estima los océanos almacenan unas 37.300 Gt de  $\text{CO}_2$ , contra sólo 750 Gt contenidas en la atmósfera (Holmén, 2000).



*Ciclo del  $\text{CO}_2$  y de sus especies acuosas en los océanos. 1) Hasta la mitad del  $\text{CO}_2$  liberado por la quema de combustibles fósiles durante los últimos 200 años ha sido absorbido por los océanos del mundo; 2) El  $\text{CO}_2$  en el agua de mar forma ácido carbónico (reducción del pH); 3-5) Esto limita la concentración de carbonato, que es clave para los organismos que lo fijan como  $\text{CaCO}_3$ , por ejemplo, corales y moluscos con concha. El actual pH medio de los océanos es 8,1 y se estima que para el año 2100 este podría alcanzar un valor de 7,8 (Imágenes<sup>9,10</sup>).*

En principio, se podría pensar que la concentración de  $\text{CO}_2$  en las aguas debería comunicar a éstas un pH ácido ( $< 7$ ), pero como resultado del contenido de cationes “fuertes” en el agua de

mar, como Na, Mg y Ca, ésta adquiere un pH moderadamente alcalino. Puesto que el sistema  $\text{H}_2\text{CO}_3\text{-HCO}_3\text{-CO}_3^{2-}$  es un amortiguador ("buffer") muy efectivo, el "exceso" de  $\text{CO}_2$  agregado a los mares no genera propiamente una acidificación (Doney, 2006) sino solamente una disminución de su alcalinidad.

La situación es aún más compleja en cuanto a la temperatura de las aguas oceánicas superficiales y profundas, y tiene una especial importancia respecto a las discusiones sobre el cambio climático global. En efecto, el hecho de que las temperaturas atmosféricas no hayan mostrado el cambio esperado desde principios del presente siglo, pese al continuo incremento de concentración de  $\text{CO}_2$ , ha planteado una interrogante importante. En general los especialistas concuerdan respecto al probable papel de las aguas oceánicas en esta materia, y han tendido a considerar que el océano Pacífico, por su gran volumen y el control que ejerce sobre el fenómeno de El Niño, podría jugar un papel principal como "almacenador" del exceso de entalpía. Al respecto, Chen y Tung (2014) citan el evento de liberación de calor asociado al episodio de El Niño del 1997/98 en el que  $0,42 \times 10^{23}$  J de energía calórica pasaron de los 300 m superiores del océano Pacífico a la atmósfera. Sin embargo estos autores indican que estas retenciones superficiales de calor no llegaron a detener el aumento de temperatura de la atmósfera, y que su efecto amortiguador es limitado tanto en términos de magnitud como de duración del efecto, lo que es comprensible dado el carácter relativamente superficial de los niveles oceánicos involucrados. En cambio, los mismos autores muestran el probable papel determinante que puede tener la corriente cálida y salina superficial procedente de los Mares del Sur que transporta calor hacia el Atlántico Norte. Su salinidad, que es resultado de su mayor temperatura y la consiguiente evaporación, facilita su inmersión en el Atlántico norte, llevando con ella el calor a niveles oceánicos situados entre 300 y 1500 m de profundidad, donde puede permanecer secuestrado por períodos de 20 a 35 años.

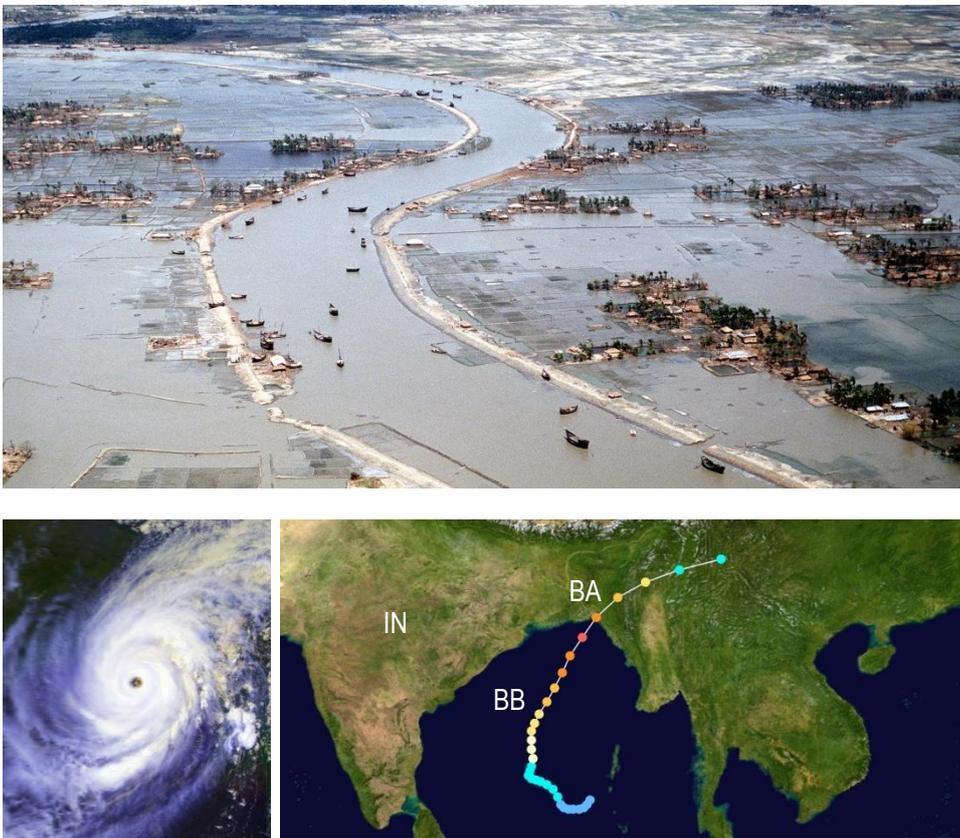
La hipótesis de Chen y Tung tiene en cuenta la información entregada por el proyecto Argos, que obtiene perfiles térmicos de todos los océanos del Mundo hasta profundidades de 2000 m, captados por 2000 dispositivos. Conforme a su estudio,  $0,69 \times 10^{23}$  J fueron secuestrados y almacenados por el mecanismo descrito entre 300 y 1500m de profundidad entre 1999 y 2012. De no ser así, ese calor habría continuado aumentando la temperatura atmosférica. Sin embargo, no se trata de una retención permanente y el mecanismo podría deteriorarse por efecto de la dilución generada por la fusión de los hielos del Ártico, Groenlandia y la costa atlántica norte de Norteamérica (p.ej., Murray, 2000).

## 7. Impactos del Cambio Climático sobre las Poblaciones Humanas

Un artículo de McGranahan et al (2007) señala que las tierras bajas (menos de 10 m sobre el nivel del mar) y contiguas al mar ocupan sólo un 2% de la superficie de la Tierra. Sin embargo albergan a un 10% de la población mundial y la cifra asciende a 13% nos referimos a la población urbana. La mayor parte de las naciones comprendidas en este grupo son isleñas, pero un porcentaje importante de la población afectada reside en deltas y llanuras de inundación de bordes continentales y pertenece a naciones mayores. De estas poblaciones un 14% se encuentran en naciones en desarrollo y 10% en países de la OCDE. En consecuencia es

razonable pensar que los efectos del cambio climático sobre el nivel de los mares pueden llegar a ser muy graves.

A estos riesgos debemos sumar el probable incremento de la frecuencia y magnitud de las tormentas tropicales y las consiguientes inundaciones, producto de la mayor energía térmica disponible. Las cifras hablan por si mismas en las llanuras aluviales cercanas a la costa, incluyendo los grandes deltas (p.ej., Ganges en Bangladesh-India), donde entre 1994 y 2004 ocurrieron: 1) un tercio de las 1562 inundaciones mayores, 2) la mitad de las 120 mil muertes resultantes; y 3) casi 2 millones de afectados (Mc Granahan et al, 2007). A esto se agrega el hecho de que varios de los países más amenazados tienen problemas económicos y políticos serios y carecen de terrenos más elevados para trasladar a la población afectada, como es el caso de Bangladesh, donde el 98% de sus 170 millones de habitantes viven en un delta fluvial que tiene 580 km de costa sobre la Bahía de Bengala. Ya en las condiciones actuales, sus costas son periódicamente afectadas por ciclones y “olas de tormenta” que han causado de decenas de miles de muertes en las últimas dos décadas (McGranahan et al, 2007).



*Inundaciones asociadas al Ciclón Bangladesh (designación IMD: BOB 01; designación JTWC: 02B). Arriba, inundaciones en el entorno del río Karnaphuli; Abajo izquierda, imagen satelital del Ciclón Bangladesh a las 06:23 UTC el 29 de Abril de 1991 (el ciclón era de categoría 4). Abajo derecha, trayectoria del ciclón en su movimiento hacia el NW, N, NE y finalmente ENE (Imágenes<sup>11</sup>). BA: Bangladesh; BB: Bahía de Bengala; IN: India.*

Conforme a un estudio de Karim y Mimura (2008) el efecto de un ascenso del nivel del mar de 0,3 m y de un aumento de 2 °C de la temperatura atmosférica media incrementaría el área de riesgo de inundaciones en Bangladesh en 15,3% y la profundidad de las inundaciones en 22,7% dentro de los 20km adyacentes a su extensa costa. Dentro del área de riesgo, se identificaron

5690 km<sup>2</sup> en los que la inundación superaría 1 m de altura. Estas cifras negativas hacen ver con pesimismo el hecho de que actualmente 20 millones de personas viven bajo los niveles normales de la marea alta y que 200 millones son vulnerables al efecto de tormentas ciclónicas, cifras que siguen creciendo de modo importante por la sostenida tendencia de las poblaciones a migrar hacia las costas en búsqueda de mejores condiciones de vida (Nichols, 2011).

Barnett (2001) analiza esta situación en términos del concepto amplio de seguridad frente a los riesgos que plantea el cambio climático para las naciones, regiones y comunidades. Ello incluye por ejemplo la situación que afecta a países establecidos en atolones como Tuvalu, el riesgo en que se encuentran los habitantes del delta de Bangladesh y la situación de las comunidades Inuits amenazadas por el adelgazamiento del hielo ártico. En tal sentido, la velocidad de los cambios y su posible aceleración por los efectos de retroalimentación plantea un desafío importante. Sin embargo, la mayor dificultad radicará seguramente en los limitados recursos económicos y los problemas de gobernanza que afectan a gran parte de las poblaciones expuestas. Ello contrasta con el caso de países desarrollados como Dinamarca, donde los riesgos de elevación del nivel del mar y de los efectos de olas de tormenta han sido evaluados (Hallegate et al, 2011) y donde se están tomando medidas integrales (incluyendo la planificación urbana a largo plazo) que son difícilmente imaginables en países en desarrollo. Lo señalado implica enormes riesgos en materia de pérdida de vidas humanas y recursos. Al respecto las cifras relativas a Bangladesh son ilustrativas, cómo también lo son las enormes pérdidas generadas por el huracán Katrina en el área de Nueva Orleans y las dificultades que ha tenido un país desarrollado para recuperarse de estas.

En otros casos, como en las poblaciones que habitan atolones como el de Tuvalu en el Pacífico ecuatorial (Church et al, 2006; Hoegh-Guldberg et al, 2007), la situación puede tornarse grave en el Siglo XXI. La razones son múltiples, ya que aparte del ascenso del nivel del mar, estas poblaciones se enfrentan otros problemas como la estabilidad de los arrecifes coralinos en condiciones de un descenso progresivo del pH debido a un exceso de CO<sub>2</sub> en las aguas oceánicas (Doney, 2006). Conforme a un estudio de Webb y Kench (2010), un 14% de estas islas muestran una reducción neta de su superficie en las últimas décadas.

Vafeidis et al (2008) en el contexto del proyecto DINAS-COAST elaboraron una base de datos para evaluar los probables impactos del ascenso del nivel del mar y la vulnerabilidad de las costas a ese respecto, fue elaborado por Vafeidis et al (2008) en el contexto del proyecto DINAS-COAST. El estudio entrega información relativa a los aspectos físicos, ecológicos y socioeconómicos de las fajas costeras del mundo, con exclusión de la Antártica. Su objetivo fue servir de base para los análisis de impacto y vulnerabilidad relativos al ascenso del nivel del mar en un amplio rango de escalas. Naturalmente, la utilización y aplicación práctica de esta información dependerá de los niveles de desarrollo de los países afectados o del apoyo que puedan encontrar al respecto en los organismos de asistencia internacional. De todas maneras, como advierte Stern (2006) "...hay límites a la capacidad de adaptarse a cambios climáticos fundamentales y rápidos, en el sentido de que los costos humanos y económicos pueden ser muy grandes". En cuanto a la adaptación y manejo para la conservación de la biodiversidad el cambio climático puede presentar dificultades "sin precedentes" (Mawdsley et al, 2009), como lo

indica claramente el registro paleontológico de las extinciones en masa de especies biológicas derivadas de pasados cambios climáticos globales.

Otro riesgo a considerar es el relativo a posibles conflictos internacionales producto de la migración masiva de las poblaciones desplazadas, con su cortejo de riesgos, incluidos aquellos de naturaleza epidémica. A ese respecto, Bangladesh presenta la situación más compleja debido a que sólo un 10% del país se encuentra a más de 1 m sobre el nivel del mar y un tercio del territorio está bajo la influencia de los cambios de mareas (Karim y Mimura, 2008). Por otra parte su población alcanza unos 170 millones de personas, con densidades poblacionales de 500 a 1000 habitante por km<sup>2</sup>. El país limita con India pero su población es mayoritariamente islámica (80% islámica, 20% hinduista, la proporción opuesta a la de India) y afín a la de Paquistán. Puesto que un largo conflicto separa India de Paquistán desde la independencia de ambos países, ello implicaría un factor adicional de riesgo, si su población se viera obligada a migrar masivamente.

## 8. El gran factor de riesgo: los efectos de retroalimentación

El mayor riesgo que implica la evolución futura del cambio climático radica en los potenciales efectos de los mecanismos de retroalimentación, que pueden seguir cursos desconocidos y alcanzar magnitudes imposibles de evaluar.

Uno de los efectos de retroalimentación más simples está relacionado con la fusión del hielo, material cuyo albedo permite reflejar al espacio un porcentaje importante de la radiación recibida por la Tierra. Cuando el hielo se funde por el aumento de temperatura, la superficie queda constituida por agua o por rocas, que tienden a absorber más que a reflejar, la radiación recibida. Sin embargo, un factor de riesgo mucho mayor está dado por la enorme cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto en las aguas profundas de los océanos: unas 36.400 Gt, contra 900 Gt disueltas en las aguas superficiales y 750 Gt presentes en la atmósfera (Holmén, 2000).

Puesto que la capacidad de los océanos para disolver gases disminuye al aumentar su temperatura, se podría desencadenar una transferencia masiva de CO<sub>2</sub> a las aguas superficiales y de éstas a la atmósfera, al aumentar progresivamente la temperatura de las aguas.

Otro tanto puede ocurrir respecto a los grandes volúmenes de CH<sub>4</sub> almacenados en los fondos oceánicos bajo la forma de clatratos, vale decir cristales de hielo-metano, así como con los retenidos en regiones periglaciales de Norteamérica y Rusia (Siberia) bajo las cubiertas de suelos permanentemente helados (permafrost). Bajo las actuales condiciones de temperatura se ha iniciado un proceso de fusión masiva del permafrost, a la cual se atribuye la formación de los cráteres profundos recientemente detectados en Siberia, interpretados como efecto del escape explosivo de metano.



*Cráter en Siberia, probablemente ocasionado por el deshielo y actividad explosiva de CH<sub>4</sub> (Imagen<sup>12</sup>).*

Es posible que la situación de extremo calentamiento desarrollada en el curso del período Cretácico (145-65 Ma) haya tenido su origen en el desencadenamiento de procesos de retroalimentación. El calentamiento global registrado durante el Cretácico produjo la fusión total de las masas de hielos polares, y los mares y costas del mundo alcanzaron condiciones similares a las de las actuales regiones tropicales, alcanzando una altura 300 a 500 m superior a los actuales niveles (Lambeck y Chappel, 2001). El propio nombre del período (Cretácico: del latín *creta* = "tiza") alude a la masiva precipitación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) que presentan sus secuencias sedimentarias.



*Los blancos acantilados de Dover (Inglaterra) del período Cretácico, constituidos por acumulación de restos de microorganismos con exoesqueleto de carbonato de calcio (Imagen<sup>13</sup>). Una buena ilustración sobre como los procesos geológicos y biológicos secuestran el CO<sub>2</sub> atmosférico.*

Respecto a este último punto puede haber contribuido tanto la proliferación de organismos marinos que facilitan la precipitación de rocas carbonatadas (en particular en los arrecifes coralinos) como la sobresaturación del  $\text{CaCO}_3$ , como consecuencia del paso de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, puesto que el  $\text{CO}_2$  facilita la disolución de esa sal bajo forma de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ).

Una situación opuesta, en la que el calentamiento del mar desencadena en el curso de unos años o décadas un episodio glacial ha sido documentado mediante registros climáticos (complementados con evidencias sedimentarias marinas) en Groenlandia (Murray, 2000). Se trata de trastornos en la regulación de las temperaturas por el sistema Corriente del Golfo (*Gulf Stream*) – Corriente Cálida Superficial del Atlántico Norte (*North Atlantic Drift*), que transporta calor desde las latitudes del mar Caribe hacia el Atlántico norte, proceso documentado para los últimos 60 mil años. Dichas corrientes retornan al sur a mayor profundidad, con características de corriente fría y densa (por efecto de su menor temperatura). Al respecto, se han registrado varios episodios (denominados “eventos Heinrich”), que han seguido a etapas de incremento en el desprendimiento de icebergs, y que han sido interpretados como el resultado de procesos de descongelamiento en Canadá y Groenlandia. El resultado de estos episodios es una perturbación del mecanismo de circulación de las corrientes marinas, al perder densidad la corriente fría profunda de retorno como resultado de su dilución por agua dulce (producto de la fusión del hielo). Durante cada episodio el clima de Norteamérica y el norte de Europa ha experimentado un fuerte descenso de las temperaturas (Ciclos Dansgaard-Oeschger, en Murray, 2000). Este mecanismo sirvió de base argumental para una película en la cual el tiempo de desarrollo de un episodio es llevado a unos pocos días (*El Día Después*). Otros autores (Lund et al. 2006; Sicre et al. 2008) han relacionado perturbaciones en el régimen de circulación y de temperatura de la Corriente del Golfo con cambios climáticos relevantes como la “Pequeña Edad del Hielo” o el “período cálido de la Edad Media” (que precedió a la anterior).



*El río Támesis, congelado a su paso por Londres en 1677 durante la Pequeña Edad del Hielo (Imagen<sup>14</sup>).*

## 9. Conclusiones

Las bases físicas del cambio climático global son bien conocidas y el registro geológico muestra los resultados de los numerosos cambios climáticos ocurridos a lo largo de la historia de la Tierra. Por otra parte, la modelación físico-matemática de los procesos en curso, contrastada con la distribución geográfica de las poblaciones humanas, entrega resultados que deberían llevar a modificar los patrones mundiales de conducta en lo relativo a la emisión de gases invernadero. Sin embargo existe una gran barrera para que ello ocurra, que es la dependencia de la mayoría de los países respecto a la “economía del carbono”. Esa dependencia se ha acentuado, en vez de disminuir, durante las últimas décadas, debido al creciente rechazo de la energía nuclear causado por accidentes como el de Chernobyl y Fukushima. Por otra parte las energías “limpias y renovables” siguen representando un pequeño porcentaje del total requerido, mientras la población mundial continúa creciendo al igual que la búsqueda del desarrollo por parte de todos. A esto debemos agregar: 1) que las expectativas de la población “son para hoy” y los riesgos que se enfrentarán a mediados o finales del siglo se ven lejanos y seguramente afectarán a otra generación; y 2) las necesidades de la defensa nacional, tan ligadas al uso del petróleo y tan urgentes en un mundo donde los conflictos pueden surgir en cualquier parte.

Deberíamos añadir a lo anterior que a pesar de lo bien contruidos que están los modelos físico-matemáticos, y lo sólidas que puedan ser las evidencias sobre las cuales se elaboran, siempre pueden ser objeto de críticas capaces de confundir a quienes deben tomar las decisiones. Sumemos a este hecho que las medidas que habría que adoptar serían poco rentables en términos políticos ya que por el sacrificio que implicarían serían difícilmente del gusto popular. Mientras mayor es el desarrollo económico de un país, más grande es su consumo de energía, y por lo tanto, más CO<sub>2</sub> es emitido a la atmósfera. El problema radica en que las llamadas energías limpias aun no constituyen una respuesta global, económicamente asumible, al tema que nos ocupa.

Por las razones anteriores, es muy probable que no se tomen medidas de fondo mientras no surjan trastornos de tal magnitud que obliguen a hacerlo, pese al costo económico y político que impliquen. Aun así ello resultará muy difícil y lento porque la Tierra y sus condiciones climáticas globales son un “bien común” y la tendencia humana ha sido siempre la de usufructuar de ese tipo de bienes, participando lo menos posible en su cuidado y conservación, y con mayor razón entre las distintas naciones, cuyos intereses y proyectos pueden ser muy diferentes y contrapuestos.

## Bibliografía

Alley, R., Berntsen, T, Bindhoff, N.L. et al, (2007) Climate change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra. 18p.

Appenzeller, T. El gran deshielo (2007) National Geographic, Junio: 2-41.

- Barnett, J. (2001) Security and climate change. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working paper N°7, 17p.
- Bendschadler, R.A y Bentley, C.R. (2002) On thin ice? Scientific American, Dic: 66-71.
- Chen, X. y Tung, K-K. (2014) Varying planetary heat sink led to global warming slowdown and acceleration. Science, 435, 897, 7p.
- Church, J.A., White, N.J y Hunter, J.R. (2006) Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands. Global and Planetary Change, 53:155-168.
- Cohen, J.E. (2005) Human population grows up. Scientific American, Sept: 26-33.
- Doney, S. C. (2006) The dangers of ocean acidification. Scientific American, Marzo:38-45.
- Glick, D. (2004) El gran deshielo. National Geographic, Sept: 12-33.
- Grunwald, M. (2014) Obama's carbon rules. Time, Junio 30, p16.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O. et al (2011) Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. Climatic Change.104: 113-137.
- Hansen, J. (2004) Defusing the Global Warming time bomb. Scientific American, Marzo: 40-49.
- Heller, N.E. y Zavaleta, E.S. (2009) Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. Biological Conservation, 142: 14-32.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J. et al (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. Science, 318, 14 Dic: 1737-1742.
- Holmén, K. (2000) The global carbon cycle, en: Earth System Science: 282-321, M.C. Jacobson et al, eds, Academic Press, San Diego.
- Jacobson, M.C., Charlson, R.J., Rhode, H. y Orians, G.H. Eds. (2000) Earth System Science, Academic Press, San Diego, 527p.
- Karim, M.F. y Nimura, N. (2008) Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh. Global Environment Change, 18: 490-500.
- Lambeck, K. y Chappel, J. (2001) Sea level change through the last glacial cycle. Paleoclimate, Science, 27/04: 679-686.
- Lillo, J. y Oyarzun, R. (2009) How short can short-term human-induced climate oscillations be? Science of the Total Environment, 407: 3605-3608.
- Lund D.C., Lynch-Stieglitz J. y Curry W.B. (2006) Gulf Stream density structure and transport during the past millennium. Nature, 444: 601-604.

- McGranahan, G., Balk, D. y Anderson, B. (2007) The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19, 1:17-37.
- Murray, J.W. (2000) The oceans, en: *Earth System Science*: 230-278, M.C. Jacobson et al, eds, Academic Press, San Diego.
- Musser, G. (2005) The climax of Humanity. *Scientific American*, Sept: 22-25.
- Nichols, R.J. (2011) Planning for the impacts of sea level rise. *Oceanography*.24, 2:144-157.
- Nichols, R.J. y Cazenave, A. (2010) Sea-level rise and its impacts on coastal zones. *Science*, v328, 18/06: 1517-1520.
- Oyarzun, R., Lillo, J. y Oyarzún, J. (2008) No water, no cyanobacteria – no calc alkaline magmas. Progressive oxidation of the early oceans may have contributed to modernize island-arc magmatism. *International Geology Reviews* v50: 885-894.
- Rahmstorf, S.(2011) A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 18/04:368-370.
- Ruddiman, W.F. (2003) The Anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change* 61:261-293.
- Ruddiman, W.F. (2005) How did humans first alter global climate? *Scientific American*, Marzo: 34-41.
- Sallenger,A.H., Doran,K.S. y Howd, P.A. (2012) Hotspot of accelerated sea-level rise on the Atlantic coast of North America.Letter, *Nature Climate Change*:884-888.
- Sicre, M.A., Jacob, J., Ezat, U., Rouse, S., Kissel, C., Yiou, P., et al. (2008) Decadal variability of sea surface temperatures off North Iceland over the last 2000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 268: 137–142.
- Solomon, S., Qui,Dae, Manning, M., et al, Eds. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 996p.
- Stern,N. (2006) What is the economic of Climate Change. *World Economics*, 7, 2:1-10
- Vafeidis,A.T., Nicholls, R.J., McFadden, R. et al (2008) A new global Coastal database for impact and vulnerability analysis of sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 24, 4:917-924.
- Webb, A.P. y Kench, P.S. (2010) The dynamic response of reef islands to sea-level rise: Evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change*.72: 234-246.
- Weitzman, M.L. (2009) On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change. *The Review of Economics and Statistic*, v XCI 1:1-19.

## Fuentes de las imágenes (Septiembre de 2014)

1. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/australiaandthepacific/kiribati/9127576/Entire-nation-of-Kiribati-to-be-relocated-over-rising-sea-level-threat.html>
2. <http://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/climateChange/general/pastClimatesExamples.html>
3. <http://www.nhm.ac.uk/nature-online/life/human-origins/humans-in-britain/what-was-britain-like/changing-landscape/index.html>
4. <http://enviroethics.org/2014/05/21/conference-welcome-to-the-anthropocene/>
5. <http://ecopolitology.org/2010/01/17/stunning-coal-fired-power-plant-timelapse-video/>
6. <http://www.theguardian.com/environment/gallery/2012/nov/29/polar-ice-sheets-losing-mass-in-pictures>
7. [http://www.nature.com/nclimate/journal/v2/n3/fig\\_tab/nclimate1393\\_F1.html](http://www.nature.com/nclimate/journal/v2/n3/fig_tab/nclimate1393_F1.html)
8. [http://www.geo.it/geo/fileadmin/Fallai/Baltica2009/Baltica\\_25\\_2\\_BALTICA\\_113-120.pdf](http://www.geo.it/geo/fileadmin/Fallai/Baltica2009/Baltica_25_2_BALTICA_113-120.pdf)
9. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7933589.stm>
10. [http://sites.duke.edu/biology217\\_01\\_s2011\\_pv24/how-does-rising-temperature-affect-coral-communities/global-threats/ocean-acidification-2/](http://sites.duke.edu/biology217_01_s2011_pv24/how-does-rising-temperature-affect-coral-communities/global-threats/ocean-acidification-2/)
11. [http://en.wikipedia.org/wiki/1991\\_Bangladesh\\_cyclone](http://en.wikipedia.org/wiki/1991_Bangladesh_cyclone)
12. <http://siberiantimes.com/science/casestudy/news/foreign-scientists-welcome-to-join-research-into-siberias-mysterious-giant-holes/>
13. <http://livelikedirt.blogspot.com.es/2012/04/becoming-fossil.html>
14. [http://en.wikipedia.org/wiki/Little\\_Ice\\_Age#mediaviewer/File:The\\_Frozen\\_Thames\\_1677.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Little_Ice_Age#mediaviewer/File:The_Frozen_Thames_1677.jpg)