



# El impacto del calentamiento global en la distribución de las precipitaciones: una perspectiva histórica

*Wallace Broecker*



## INTRODUCCIÓN

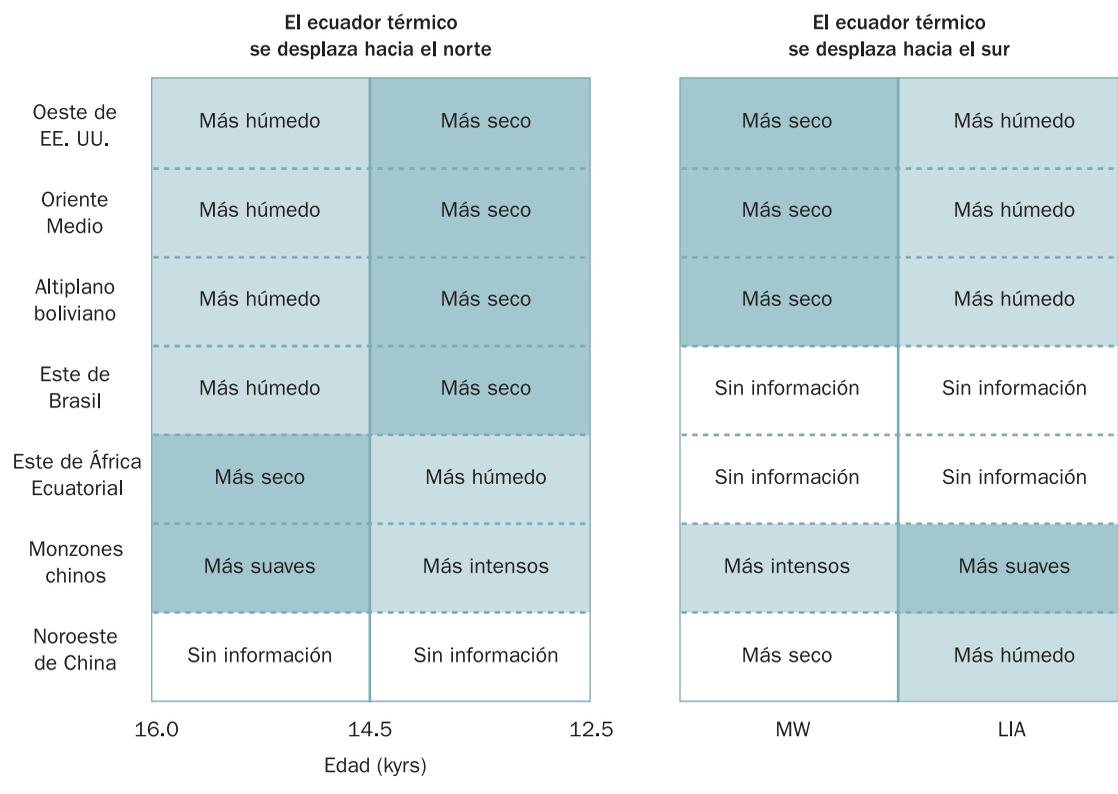
Es probable que los cambios en las precipitaciones que se generarán por el actual aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera entrañen las consecuencias más graves para los seres humanos. Serán especialmente rigurosas para las zonas áridas de la Tierra, donde el agua ya escasea. Isaac Held, ganador del Premio Fronteras del Conocimiento 2012 de la Fundación BBVA en la categoría de Cambio Climático, ha predicho, basándose en la teoría y las simulaciones con modelos, que los trópicos recibirán una porción aún mayor de las precipitaciones mundiales y que este aumento se producirá en detrimento de las regiones secas colindantes. Aunque las simulaciones realizadas en modelos acoplados océano-atmósfera confirman la predicción de Held, discrepan ampliamente en cuanto a los detalles. Debido a esto, un grupo con el que trabajo se ha propuesto complementar estas simulaciones con pruebas recopiladas a partir de cambios climáticos del pasado. Por “pasado” me refiero a los cambios que se han producido durante los últimos 30 000 años, un periodo de tiempo en que la datación por radiocarbono nos permite correlacionar los eventos ocurridos en diferentes lugares del planeta. Tal como se muestra en la figura 1, este periodo incluye el Último Máximo Glacial (de 28 a 18 000 años atrás), el periodo de desglaciación (de 18 a 10 000 años atrás) y el interglacial Holoceno



Durante la extinción de la última glaciación, se produjeron cambios importantes y abruptos en los regímenes de precipitaciones globales. Estos cambios parecen haber sido provocados por los cambios en la latitud del cinturón de lluvias tropicales inducidos por las expansiones y contracciones desfasadas de la extensión del hielo marino en los dos océanos polares. Estos cambios están registrados en tres archivos: 1) el tamaño de los lagos de cuenca endorreica, 2) la composición isotópica del oxígeno de las estalagmitas de algunas cuevas, y 3) la proporción entre los detritos del suelo y las conchas marinas en los sedimentos de la vertiente continental. Estos registros dejan claro que 14,5 kyrs atrás, el cinturón de lluvias tropicales sufrió un espectacular desplazamiento hacia el norte. Como resultado, los monzones chinos se intensificaron y la franja sur de la Amazonia experimentó una sequía profunda, al igual que el Oriente Medio y el oeste americano (véase figura 2).



**Figura 2**



Cambios hidrológicos documentados que se produjeron hace 14,5 kyrs aproximadamente y entre el Periodo Cálido Medieval (PCM) y la Pequeña Edad de Hielo (PEH). Como puede verse, los segundos son opuestos a los primeros. Durante la transición PCM-PEH, el ecuador térmico y sus cinturones de lluvia asociados se desplazaron hacia el sur, y hace 14,5 kyrs, el ecuador térmico se desplazó hacia el norte.

Podríamos preguntarnos qué relación guarda esto con los próximos cien años. Las simulaciones del aumento actual de CO<sub>2</sub> en la atmósfera indican que el hemisferio norte se calentará dos veces más rápido que el hemisferio sur. Por tanto, en el caso de que, tal como sugieren las simulaciones, el doble de CO<sub>2</sub> aumentara la temperatura de la Tierra 3,6 °C, el hemisferio norte se calentaría 4,8 °C y el sur unos 2,4 °C. El calentamiento adicional del hemisferio norte podría provocar que el ecuador térmico y sus cinturones de lluvias asociados se desplazaran hacia el norte. Por consiguiente, la pregunta es si se pueden utilizar los cambios que tuvieron lugar en las precipitaciones hace 14,5 kyrs como guía para los que se generarán debido al calentamiento global.

Una vez más recurro a las pruebas históricas para responder a esta pregunta. Me baso en los cambios que se produjeron en las precipitaciones durante la fluctuación Periodo Cálido Medieval-Pequeña Edad de Hielo. En este caso, el ecuador térmico parece haberse desplazado hacia el sur. Aunque las consecuencias fueron mucho menores, tal como se describe más adelante, eran opuestas a las asociadas al mayor desplazamiento hacia el norte que tuvo lugar en el punto medio de la desglaciación. Puesto que las fuerzas que impulsaron aquellos dos cambios eran muy diferentes, su consistencia refuerza el argumento de que el calentamiento global provocará una repetición de las consecuencias del desplazamiento del ecuador térmico hacia el norte. Y, por supuesto, todos sabemos que los desplazamientos anuales norte-sur de la posición del ecuador térmico crean una marcada estacionalidad de las precipitaciones.

## DATOS DE PRECIPITACIONES

El dato de precipitación más espectacular y fácil de entender es el registro de los cambios en el tamaño de los lagos que no tienen salida al mar. Entre ellos, los más conocidos son el Mar Muerto y el Gran Lago Salado. El agua que reciben por las precipitaciones directas y la afluencia de los ríos se pierde totalmente por la evaporación de la superficie del lago. Por lo tanto, en los periodos en que las precipitaciones fueron mayores (o la evaporación menor), los lagos aumentaron de tamaño y profundidad. Como las edades de estas líneas costeras elevadas pueden determinarse mediante datación por radioisótopos, es posible hacer cronologías del tamaño pasado de los lagos. Los cambios en el tamaño de los lagos registrados por estas líneas costeras son sorprendentemente grandes. Durante el Último Máximo Glacial, el Mar Muerto era unas cuatro veces mayor y el Gran Lago Salado cerca de ocho veces mayor que antes de la Revolución Industrial (es decir, antes de la interferencia humana). Esos lagos eran tan enormes que cuesta trabajo creerlo. El aumento de las precipitaciones y la disminución de la evaporación están muy lejos de explicar estas expansiones.

Resulta que un potente amplificador traduce los cambios de precipitaciones en las enormes respuestas observadas en el tamaño de los lagos. Esto tiene que ver con la dependencia entre

la parte de precipitaciones que afluye desde el paisaje a los ríos y la pluviosidad. Actualmente, en las cuencas hidrográficas del Gran Lago Salado y el Mar Muerto, solo llega un 10 % a los ríos; el resto, o se evapora del suelo o es transpirado por las plantas. Si las precipitaciones en estas áreas se duplicaran, la fracción de escorrentía se triplicaría (es decir, pasaría de un 10 a un 30 %). Por lo tanto, los lagos alimentados por esos ríos recibirían una cantidad de agua ¡seis veces mayor cada año!

Este potente amplificador se aplica no solo a los lagos endorreicos, sino también a los embalses y presas artificiales. A medida que aumenten los cambios en la entrada de agua de lluvia a la cuenca hidrográfica, también lo hará la cantidad de agua disponible para riego y generación de energía eléctrica. En la medida en que la agricultura de las regiones áridas del mundo depende del agua de río recogida en los embalses, esta ampliación incrementará el impacto de los cambios en las precipitaciones. En el caso del Nilo, estos cambios no solo afectarán al suministro de alimentos en Egipto, sino también a la cantidad de energía eléctrica generada en Asuán.

Justo antes del desplazamiento de los cinturones de lluvia hacia el norte 14,5 kyrs atrás, el Mar Muerto y el Gran Lago Salado se encontraban en su tamaño máximo. Pero, a medida que el Gran Lago Salado había abierto una brecha en su salida y se desbordaba hacia el mar, dejó de registrar cambios en las precipitaciones. Sin embargo, otros lagos endorreicos de la Gran Cuenca del oeste de Estados Unidos registraban las condiciones en ese momento (véase ejemplo en la figura 3). La figura 4 muestra la foto de uno de estos lagos. Todos eran significativamente más extensos que durante el Último Máximo Glacial. En aquel momento, la superficie total de los lagos de la Gran Cuenca era aproximadamente diez veces mayor que en el año 1850 d.C. (es decir, antes de la aparición de los desvíos agrícolas).

La respuesta de estos lagos de la Gran Cuenca al desplazamiento del ecuador térmico hacia el norte fue drástica, reduciéndose precipitadamente de su tamaño máximo al mínimo. El Mar Muerto experimentó una contracción similar. A su vez, el tamaño del lago Titicaca, un gran lago endorreico situado en la parte norte del Altiplano de Bolivia, tuvo un historial evolutivo similar. Hace 15 000 años se desbordó hacia el sur creando un lago tres veces mayor en lo que ahora es el “solar” seco del sur del Altiplano. Más tarde, hace unos 14,5 kyrs, este megalago se secó. Esta transición de muy húmedo a muy seco es el resultado de un desplazamiento de la posición de la Amazonia hacia el norte (véase figura 5).

El registro del lago Victoria al este de África también merece consideración. Actualmente se desborda en un brazo del río Nilo, pero antes del acontecimiento de hace 14,5 kyrs no solo dejó de desbordarse sino que, sorprendentemente, se secó. Las pruebas de su desecación proceden de cuatro núcleos de sedimentos. Cada uno se asienta en un suelo. El sedimento del lago que se encuentra en la parte superior de este suelo tiene una edad de 14 kyrs aproximadamente. Las ráfagas de sonido enviadas desde la superficie del lago rebotan en este suelo denso. De esta forma se demostró que el suelo se extendía hasta la parte más profunda del lago. Así que, al





Menos fácil de entender es el registro de los depósitos de algunas cuevas sobre la proporción del oxígeno pesado ( $^{18}\text{O}$ ) respecto al oxígeno ligero ( $^{16}\text{O}$ ) en la calcita depositada en las estalagmitas. La composición isotópica del oxígeno del agua que gotea desde el techo de la cueva originando las estalagmitas coincide con el promedio anual de lluvia local. Así, los cambios temporales en la composición isotópica de la calcita de la cueva proporcionan un registro de los cambios en las precipitaciones por encima de la cueva. Como la lluvia monzónica tiene una composición isotópica muy diferente a la lluvia no monzónica, las estalagmitas registran la medida en que se ha modificado la fuerza de los monzones. Una analogía relacionada con el contraste entre la llovizna y la tormenta nos ayudará a entender cómo se produce. La llovizna implica la eliminación de una fracción minúscula de la humedad contenida en la nube madre, mientras la tormenta elimina una fracción muy grande. La consecuencia es que la composición isotópica del oxígeno en el agua de la tormenta será muy cercana a la del vapor de agua en la nube. Por el contrario, como la presión de vapor del agua pesada ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ) es ligeramente inferior a la del agua ligera ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ), el agua de la llovizna será más rica en el isótopo pesado en comparación con la nube. Las lluvias monzónicas son similares a las tormentas y las lluvias no monzónicas a la llovizna, por lo tanto, las variaciones temporales en la composición isotópica de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) de la cueva están relacionadas con la parte del agua de la cueva suministrada por la lluvia monzónica.

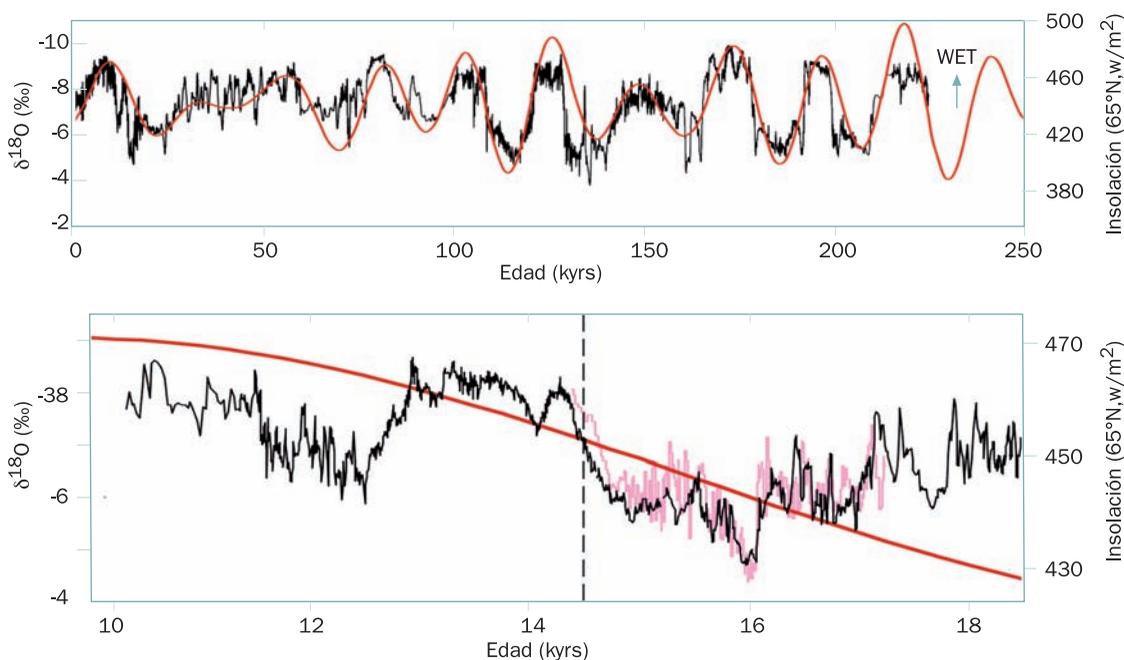
**En el caso de que, tal como sugieren las simulaciones, el doble de  $\text{CO}_2$  aumentara la temperatura de la Tierra 3,6 °C, el hemisferio norte se calentaría 4,8 °C y el sur unos 2,4 °C. El calentamiento adicional del hemisferio norte podría provocar que el ecuador térmico y sus cinturones de lluvias asociados se desplazaran hacia el norte**

Larry Edwards, geoquímico de isótopos de la Universidad de Minnesota, fue el primero en utilizar este archivo. Su aportación principal fue el desarrollo de un medio muy preciso para determinar la edad de la calcita de las cuevas. Se basa en el  $^{230}\text{Th}$ , un producto de la desintegración radiactiva del uranio con una vida media de 75 000 años. Supo que había encontrado una mina de oro cuando obtuvo los registros de los isótopos del oxígeno procedentes de estalagmitas de varias cuevas chinas datadas con precisión. Estos registros se remontan a varios cientos de miles de años atrás. Edwards averiguó que la proporción de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  y  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  sigue ciegamente el ciclo de 20 000 años de precesión del eje de rotación de la Tierra. El impacto de este ciclo es el cambio de la insolación estival. Lo que descubrió Edwards fue que en los momentos en que la insolación estival en China era más fuerte que la media, la contribución de las lluvias monzónicas era mayor (véase figura 6).



Sonja Braas, *Forces 04*, 2002

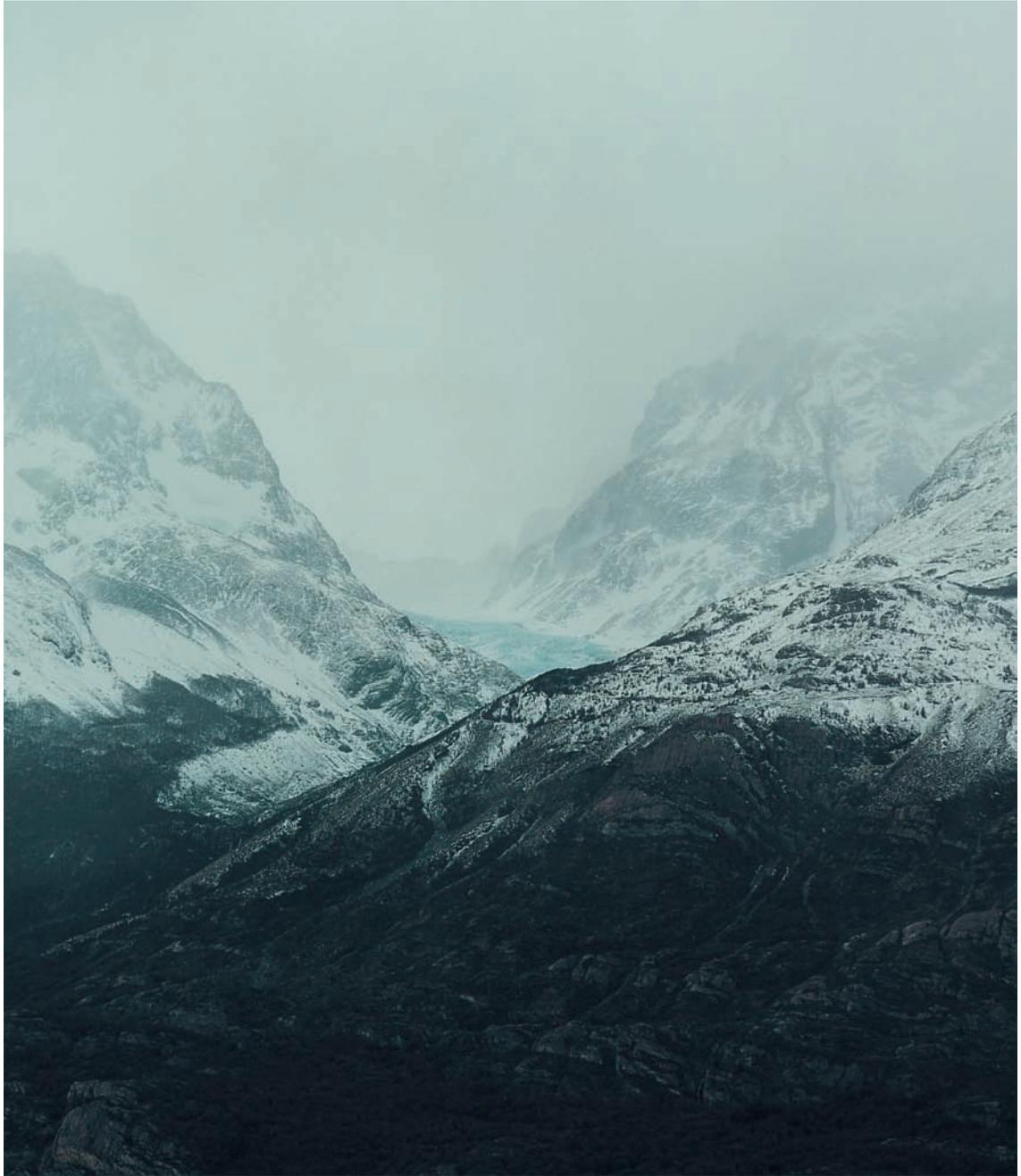
Figura 6



Registro de los isótopos de oxígeno de las estalagmitas de la cueva Hulu en China. La línea superpuesta (en rojo) es el registro de la insolación de julio a 65° N. Tal como hemos explicado anteriormente, cuanto más negativo es el valor de  $\delta^{18}O$ , más fuertes son los monzones. Por tanto, su fuerza está orquestada por las modificaciones de la insolación estival provocadas por los cambios cíclicos de la órbita de la Tierra. Como puede verse, los picos de insolación estival están espaciados a intervalos de aproximadamente 20 kyrs. En el gráfico inferior se muestra un pico del registro para el intervalo del periodo de desglaciación. El ciclo más suave de 20 kyrs está interrumpido por marcados desvíos. Estos corresponden a cambios en el ecuador térmico. De suma importancia entre ellos es el cambio hacia un recrudescimiento de los monzones hace 14,5 kyrs.

Nuestro interés se centra en las desviaciones milenarias de este comportamiento cíclico. Tal como puede verse en el pico del registro de la estalagmita china durante los últimos 25 000 años (figura 6), el intervalo de tiempo de desglaciación está marcado por desviaciones de este ciclo suave de 20 000 años. De particular interés es la fuerte intensificación de los monzones centrada en 14,5 kyrs atrás. Así, al tiempo que el suministro de agua a los lagos del oeste de Estados Unidos, de Oriente Medio y del Altiplano descendía bruscamente, las lluvias monzónicas en China se intensificaban.

Las cuevas son ubicuas. Por tanto, durante las dos próximas décadas, el registro monzónico se extenderá a todo el mundo. De hecho, una cueva del sur de Brasil ya ha demostrado que el ciclo de precesión es, como era de esperar, opuesto al del hemisferio norte. Digo “opuesto” porque en las épocas en que la insolación estival es más fuerte que la media en el hemisferio norte, en el hemisferio sur es más débil. Como veremos más adelante, durante la Pequeña Edad de



Sonja Braas, *Forces 31*, 2003

Hielo (1300 a 1850 d.C.) los monzones del hemisferio norte eran un poco más fuertes y los del hemisferio sur un poco más débiles que la media.

Los ríos vierten los productos de la erosión continental al mar. Cuanto mayor sea su descarga, más detritos transportan. Este material se deposita en grandes cantidades a lo largo de las vertientes continentales donde se mezcla con las conchas producidas por el plancton marino del agua superficial. Como el índice de agua de lluvia de las conchas permanece más constante con el tiempo que el suministro sumamente variable de detritos de los ríos, la proporción de los detritos de la erosión con respecto a la calcita marina en el sedimento proporciona una medida cualitativa de la descarga del río.

Una comparación del registro sedimentario de la vertiente atlántica de Brasil con el de la vertiente caribeña frente a Venezuela aporta pruebas convincentes del desplazamiento de la selva amazónica hacia el norte 14,5 kyrs atrás. En ese momento, en las aguas frente a la costa de Brasil, la proporción del silicato continental disminuyó diez veces con respecto al carbonato marino. Por el contrario, en las aguas profundas de Venezuela, el vertido de detritos continentales experimentó un aumento sustancial.



**14,5 kyrs atrás, el cinturón de lluvias tropicales sufrió un espectacular desplazamiento hacia el norte. Como resultado, los monzones chinos se intensificaron y la franja sur de la Amazonia experimentó una sequía profunda, al igual que el Oriente Medio y el oeste americano**

De interés en este sentido es el registro en una cueva de las regiones áridas del este de Brasil (véase figura 5). Durante la época de la gran expansión del lago Titicaca hubo una explosión de crecimiento de estalagmitas, que terminó cuando este lago se secó. La desecación que acabó con el crecimiento de estalagmitas es consistente con la gran disminución de la descarga del río en el Atlántico adyacente. Ambos procesos fueron causados por el desplazamiento del cinturón tropical amazónico hacia el norte.

### **¿QUÉ IMPULSÓ EL DESPLAZAMIENTO HACIA EL NORTE?**

Tal como se menciona al principio de este capítulo, los desplazamientos de la posición del ecuador térmico fueron impulsados por las expansiones y contracciones alternas de la superficie de la capa de hielo marino en los dos océanos polares. Cuando la superficie del hielo marino disminuyó en la región polar del norte, en la región polar del sur aumentó. Esto provocó un calentamiento



Sonja Braas, *Forces 11*, 2002

neto en el hemisferio norte y un enfriamiento neto en el hemisferio sur y, como consecuencia, el ecuador térmico y sus cinturones de lluvia asociados se desplazaron hacia el norte.

Por consiguiente, la pregunta es: ¿qué originó los cambios drásticos de la capa de hielo marino? La respuesta resumida es que el impulsor fue lo que yo denomino el “balancín oceánico bipolar”. La respuesta amplia requiere un poco de historia acerca de cómo se “ventila” el fondo del mar. Digo “ventila” porque es equivalente a soplar aire fresco en un ambiente viciado. Las aguas que descienden desde la superficie hacia el fondo del mar contienen oxígeno ( $O_2$ ), y reemplazan el agua in situ que está viciada como consecuencia de la utilización del  $O_2$  por las criaturas –grandes y pequeñas– que habitan allí.

El océano es como un pastel de capas de agua de diferente densidad. Como estas diferencias de densidad están relacionadas principalmente con la temperatura, el océano se enfría cada vez más con la profundidad. Las aguas superficiales más frías del océano se encuentran en las regiones polares, por tanto, el fondo del mar se “ventila” desde estas aguas polares.

Una complicación de esta historia por lo demás sencilla es que la sal es un densificador secundario del agua del mar. Debido a esto, las aguas destinadas a sumergirse en las profundidades deben ser a la vez frías y saladas. Como veremos más adelante, es la sal la que impulsa el balancín bipolar.

En el océano actual, alrededor de la mitad de la ventilación del fondo del mar se produce en el Atlántico norte y la otra mitad en el océano Austral. El agua que se sumerge en el norte fluye por el fondo del Atlántico hasta la punta de África, donde gira abruptamente a la izquierda y se une a la Corriente Circumpolar Antártica que fluye con gran velocidad. Esta corriente actúa como una “batidora” muy eficiente mezclando la contribución del Atlántico con una cantidad aproximadamente igual de agua del fondo del mar que desciende por las vertientes del continente antártico. Es la mezcla de estas dos aguas la que ventila el fondo del Índico y del Pacífico.

Aunque interrumpido por unos cuantos eructos, este modo de ventilación del fondo del mar parece haber permanecido estable durante los últimos 10 000 años (es decir, el Holoceno). Sin embargo, este buen comportamiento estuvo ausente durante gran parte del Último Periodo Glacial. El mal comportamiento fue más pronunciado durante el periodo de desglaciación, cuando la guerra entre las dos fuentes de aguas profundas era la regla y no la excepción.

Imaginemos lo que sucedería si se arrojara una buena cantidad de agua dulce en el extremo septentrional del Atlántico. Diluiría el contenido de sal de las aguas superficiales hasta el punto de que el agua ya no descendería en invierno. El Atlántico norte pasaría a ser como el Ártico y el Pacífico norte de la actualidad, donde la acumulación de agua dulce en la superficie impide la formación de aguas profundas.

Ahora bien, si la región del Polo Norte fuera más fría de lo que es actualmente, tras la inundación se formaría hielo marino durante el siguiente invierno. La razón de que esta región no esté cubierta actualmente por el hielo es que el calor que emerge a la superficie a causa de la columna



Sonja Braas, *Forces 12*, 2002

de agua subyacente impide la formación de hielo. Si la región estuviera cubierta de hielo, este reflejaría la radiación solar hacia el espacio, y el calor transportado por las aguas cálidas que llegaran a esta zona quedaría atrapado bajo el hielo. ¡En lugar de recibir calor del sol y de la Corriente del Golfo, los inviernos del Atlántico norte serían más parecidos a los de Siberia!

Para poder entender lo que ocurrió en el extremo sur del océano, hemos de tener en cuenta lo que impulsa la ventilación del fondo del mar. Al igual que el nivel de ventilación del aire viciado de una habitación depende de la fuerza de un ventilador, la ventilación del fondo del mar depende del ritmo con el que se “difunde” en las profundidades el calor procedente de la superficie caliente del océano. Este calor reduce la densidad de las aguas profundas residentes y de esta manera crea un “vacío de densidad” que permite que las aguas superficiales polares se sumerjan en el fondo del mar.

Ahora imaginemos lo que ocurriría si las fuentes de agua del Atlántico norte fueran eliminadas por una inundación de agua dulce. A menos que algo impulsara la velocidad de formación de aguas profundas en el océano Austral, el vacío de densidad creado por la penetración descendiente del calor no se llenaría. Aunque no se conocen los detalles, hay pruebas de que el reajuste de las condiciones del océano Austral redujo la superficie de su capa de hielo marino. Esto calentó el hemisferio sur reforzando el desplazamiento del ecuador térmico hacia el sur.

Podríamos preguntarnos cuál fue el origen del agua dulce necesaria para inhibir la formación de aguas profundas en el Atlántico norte. La respuesta es, por supuesto, las enormes capas de hielo de Canadá y Escandinavia. Durante el periodo glacial, la desestabilización de la capa de hielo de varios kilómetros de espesor sobre la bahía del Hudson provocó el derrumbamiento de dicha capa, convertida en una flota de icebergs rumbo al Atlántico norte a través del estrecho de Hudson. El deshielo de estos icebergs proporcionó la cubierta de agua dulce. Otra fuente fueron los lagos formados por el derretimiento del frente helado meridional. Si el agua de estos lagos rompiera el dique de hielo que los mantiene en su lugar, enormes cantidades de agua fluirían al mar.

Sabemos por nuestros archivos paleolíticos que, unos 700 años después de extinguirse, la formación de aguas profundas en el Atlántico norte entró de nuevo en acción provocando la desaparición del hielo marino y el calentamiento del hemisferio norte. Es posible que lo que llevara a esta reanudación fuera una acumulación gradual de sal como resultado del envío neto de vapor de agua a través de la atmósfera desde el Atlántico hasta el Pacífico, o quizá fue un proceso interno del océano. No lo sabemos a ciencia cierta. Pero sabemos por nuestros registros que estas activaciones fueron bruscas y tuvieron lugar en unos cuantos años.

Durante el transcurso del último periodo glacial y su extinción, la presencia y ausencia de formación de aguas profundas en el Atlántico norte desplazó el ecuador térmico y su cinturón de lluvias asociado. Me estoy centrando en el desplazamiento de hace 14,5 kyrs porque sus consecuencias fueron las más dramáticas y también las mejor documentadas.



Sonja Braas, *Forces 22*, 2003

## ¿ES EL DESPLAZAMIENTO DE HACER 14,5 KYRS UN ANÁLOGO FIABLE DE LO QUE ESTÁ POR VENIR?

Se podría argumentar que el futuro desplazamiento inducido por el CO<sub>2</sub> será “harina de otro costal”. En primer lugar, será gradual en lugar de brusco. En segundo lugar, aunque es probable que la capa de hielo marino del Ártico desaparezca, no habrá un crecimiento correspondiente del hielo marino en el océano Austral. En tercer lugar, es poco probable que sea una reorganización a gran escala de la circulación del océano.

Sin embargo, existen pruebas que apoyan la idea de que nos espera una repetición de los cambios que se produjeron en las precipitaciones 14,5 kyrs atrás derivados de lo que se conoce como la Pequeña Edad de Hielo, una ola de frío que duró 500 años entre 1350 y 1850 d.C. aproximadamente. Durante este medio milenio, la capa de hielo marino alrededor de Islandia aumentó, los glaciares de montaña de Europa y América del Norte alcanzaron su tamaño máximo en los últimos 8 000 años, y la línea de los árboles en Siberia retrocedió hacia el sur. Sobre la base de las mediciones realizadas en muestras de hielo de Groenlandia, el casquete polar del norte de nuestro planeta se enfrió 1 °C aproximadamente. A este periodo se le conoce como Pequeña Edad de Hielo porque el enfriamiento fue solo una décima parte de la Gran Edad de Hielo (es decir, el Último Máximo Glacial). La Pequeña Edad de Hielo fue precedida por un periodo de 400 años conocido como el Periodo Cálido Medieval. Fue durante este intervalo de tiempo cuando Eric el Rojo y su banda de vikingos ocuparon el sur de Groenlandia.

**El calentamiento de la Tierra debido al CO<sub>2</sub> causado por la actividad humana originará grandes cambios en la disponibilidad de agua en las regiones áridas de la Tierra. Sí, habrá ganadores y perdedores. Y si Isaac Held tiene razón, los ganadores serán una minoría**

Aunque más pequeños en tamaño, la fluctuación Periodo Cálido Medieval-Pequeña Edad de Hielo produjo cambios en las precipitaciones semejantes (aunque en sentido opuesto) a los que se produjeron hace 14,5 kyrs. Estudios de núcleos de sedimentos procedentes de pequeños lagos de las islas ecuatoriales del Pacífico sugieren que el cinturón de lluvia se desplazó 800 kilómetros hacia el sur. Esta conclusión se basa en la observación de que, mientras que los lagos de las islas dentro del cinturón de lluvia desbordan en el mar, los de las islas que se encuentran fuera del cinturón están cerrados. Los sedimentos de estos dos tipos de lagos son muy diferentes. Por lo tanto, las muestras extraídas en estos lagos registran cambios en la latitud del cinturón de lluvias.



documentados directamente es que el desvío artificial de los riachuelos que alimentan estos lagos originó un descenso de su nivel, dejando al descubierto líneas costeras inaccesibles. Scott Stine, de la Universidad de California, halló el modo de documentar directamente la cronología de estos niveles mínimos. Stine encontró tocones de pino de Jeffrey que sobresalían de la superficie del río West Walker (véase figura 8). Los tocones tenían más de 100 anillos de crecimiento. Como los pinos de Jeffrey no pueden sobrevivir a la inmersión de la raíz ni siquiera unas semanas, estos tocones documentan periodos centenarios en los que el río estuvo seco. Las mediciones de radiocarbono revelan que hubo dos de estas sequías seculares separadas por algunas décadas. Más tarde, Stine demostró descensos correspondientes en el nivel del lago Walker recogiendo restos de plantas leñosas de la orilla expuestas como consecuencia del desvío del río Walker. Así demostró que durante las dos sequías el lago se redujo a menos de la mitad de su tamaño preagrícola.

Aunque existe poca información sobre la historia de los lagos de cuenca endorreica de China, uno de mis colegas, Aaron Putnam, documentó que el lago Lop Nor, en gran parte seco hoy en día, tuvo su mayor línea costera durante la Pequeña Edad de Hielo. Durante ese periodo era unas ocho veces mayor. Además, realizó una datación por radiocarbono de la madera de los fósiles de álamos encontrados entre las dunas del vasto desierto de Taklamakán en China, demostrando que durante la Pequeña Edad de Hielo experimentaron crecimiento.

Todo esto sugiere que en las regiones áridas del hemisferio norte situadas hacia el polo de la zona monzónica se produjo un cambio de sequía durante el Periodo Cálido Medieval a humedad durante la Pequeña Edad de Hielo. Sin embargo, la evidencia sigue siendo incompleta, es necesario llevar a cabo más investigaciones para confirmar esta observación.

Aunque durante esta fluctuación no se produjo ninguna reorganización relevante de la ventilación oceánica, parece ser que durante la Pequeña Edad de Hielo la cuña del océano Austral que pasa por debajo de las aguas profundas formadas en el Atlántico norte se vio forzada a retroceder. En la actualidad esta cuña se extiende hasta las Bermudas, al igual que durante el Periodo Cálido Medieval. Sin embargo durante la Pequeña Edad de Hielo estuvo ausente. No obstante, al igual que los demás impactos, este cambio en el océano fue una nimiedad comparado con los asociados a la última glaciación.

No hay consenso en cuanto a qué propició el cambio climático desde el Periodo Cálido Medieval a la Pequeña Edad de Hielo. Basándonos en el análisis del aire atrapado en las burbujas del hielo polar, sabemos que ni el CO<sub>2</sub> ni ninguno de los otros gases de efecto invernadero experimentó un cambio significativo. Los modeladores han intentado achacar el enfriamiento de la Pequeña Edad de Hielo a una combinación de exceso de actividad volcánica y un sol más débil pero, en mi opinión, esto está lejos de ser convincente. Por el contrario, sospecho que esta fluctuación refleja cambios en el balance de calor del océano. El contenido de calor del océano es tan enorme que un ligero desequilibrio entre su absorción y emisión de calor pudo producir fácilmente el pequeño



## CONCLUSIÓN

Basándome en la similitud entre las consecuencias del gran desplazamiento del ecuador térmico hacia el norte que tuvo lugar hace 14,5 kyrs y las asociadas al desplazamiento mucho menor hacia el sur que se produjo durante la Pequeña Edad de Hielo, sospecho que el desplazamiento hacia el norte originado por el calentamiento global provocará cambios de precipitaciones similares en las regiones áridas de la Tierra. Si es así, el oeste de Estados Unidos y Oriente Medio se volverán más áridos, el Nilo recibirá más agua, la selva amazónica se desplazará hacia el norte secando el este de Brasil y el Altiplano boliviano y en China se intensificarán los monzones. Pero debo ser humilde. Los factores que influyen sobre los lugares donde llueve y la frecuencia de la lluvia son muy complejos. Por esta razón, los modelos globales diseñados para predecir estos cambios ofrecen una gama tan amplia de resultados. Pero una cosa es cierta: el calentamiento de la Tierra debido al CO<sub>2</sub> causado por la actividad humana originará grandes cambios en la disponibilidad de agua en las regiones áridas de la Tierra. Sí, habrá ganadores y perdedores. Y si Isaac Held tiene razón, los ganadores serán una minoría.

## BIBLIOGRAFÍA

Alley, Richard. 2002. *The Two-Mile Time Machine: Ice Cores, Abrupt Climate Change, and Our Future*. Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press.

Broecker, Wallace. 2010. *The Great Ocean Conveyor*. Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press.

LAS SIMULACIONES CON MODELOS DE LA RESPUESTA DE LA TIERRA AL ACTUAL CALENTAMIENTO GLOBAL HACEN PREVER QUE EL HEMISFERIO NORTE SE CALENTARÁ DOS VECES MÁS RÁPIDO QUE EL HEMISFERIO SUR. SI ES ASÍ, EL ECUADOR TÉRMICO EXPERIMENTARÁ UN DESPLAZAMIENTO HACIA EL NORTE. POR ANALOGÍA A UN DESPLAZAMIENTO QUE TUVO LUGAR HACE APROXIMADAMENTE 14 500 AÑOS, ESTO INTENSIFICARÁ LAS LLUVIAS MONZÓNICAS EN CHINA, AUMENTARÁ LA DESCARGA DEL NILO, VOLVERÁ MÁS ÁRIDAS LAS REGIONES SECAS SITUADAS ENTRE LOS 35 Y LOS 45 ° DE LATITUD NORTE Y DESPLAZARÁ LA AMAZONIA HACIA EL NORTE. LAS PRUEBAS QUE RESPALDAN ESTA PREDICCIÓN PROCEDEN DEL PEQUEÑO DESPLAZAMIENTO DEL ECUADOR TÉRMICO HACIA EL SUR QUE SE PRODUJO DURANTE LA TRANSICIÓN DEL PERIODO CÁLIDO MEDIEVAL A LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO.

# CURRÍCULO

## Wallace Broecker

*Universidad de Columbia*

Wallace Broecker es titular de la cátedra Newberry del Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Columbia y científico del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de Columbia. Es autor de más de 450 artículos y diez libros, entre ellos el trascendental libro de texto *Tracers in the Sea*, que escribió junto a Tsung-Hung Peng, y *The Great Ocean Conveyor, Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change*, publicado en 2010. Broecker ha recibido numerosos pre-

mios durante su carrera, incluyendo el Premio Crafoord, el Premio Vetlesen y el Premio Fronteras del Conocimiento 2009 de la Fundación BBVA. En 2008 fue galardonado con el Premio Balzan por sus extraordinarios logros en el campo de la ciencia. Es miembro de la Academia Americana de las Artes y las Ciencias y de la Academia Nacional de Ciencias. También es miembro extranjero de la Real Sociedad de Londres y miembro de la Unión Geofísica Americana y la Unión Geofísica Europea.