

Marci M. Robinson es micropaleontóloga del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. Comenzó a trabajar en el proyecto Investigación e Interpretación del Plioceno y sus Relaciones Sinópticas en 1994. Actualmente es asesora del Proyecto de Intercomparación de Modelos del Plioceno y editora de la revista especializada *Micropaleontology*.



CLIMATOLOGÍA

Lecciones climáticas del Plioceno

Hace tres millones de años las temperaturas globales eran ligeramente superiores a las de hoy. Las reconstrucciones climáticas de aquel período sirven para poner a prueba los modelos de cambio climático

Marci M. Robinson

EN EL TRANCURSO DE LA HISTORIA GEOLÓGICA, LA TEMPERATURA global ha aumentado y disminuido en respuesta a una amplia variedad de factores. Una de las causas principales de los cambios climáticos a escala planetaria ha sido la deriva continental, que en ocasiones ha modificado la circulación en las cuencas oceánicas y ha influido sobre la distribución global de calor. También revisten importancia las variaciones en la órbita terrestre, que gobiernan la alternancia de períodos glaciales e interglaciales. Y lo mismo ocurre con los cambios en la concentración de dióxido de carbono atmosférico, un gas de efecto invernadero que, como tal, retiene el calor. El calentamiento observado hoy en día transcurre con demasiada rapidez como para achacarlo a los dos primeros factores, por lo que la mayoría de los científicos lo atribuyen a una acumulación excesiva de gases de efecto invernadero en la atmósfera, debida, sobre todo, a la quema de combustibles fósiles.

¿Cómo repercutirá lo anterior en nuestro futuro? Responder a esta pregunta constituye gran parte de la labor del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la institución que cada cinco o seis años sintetiza un gran volu-

men de investigación climática en una sola memoria. El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, elaborado en 2007, predijo que el promedio anual de la temperatura en todo el mundo habrá aumentado entre 1,1 y 6,4 grados centígrados para finales de siglo. Para llegar a tales conclusiones se emplearon modelos de circulación general, simulaciones numéricas a escala planetaria que integran procesos oceánicos, atmosféricos, criosféricos y superficiales.

Por supuesto, un abanico tan amplio de posibilidades implica consecuencias de lo más dispares. Un clima en el que la temperatura promedio supere en un grado a la actual probablemente resulte muy distinto de uno seis grados más cálido. Podría tratarse de una diferencia entre 18 o 59 centímetros en la elevación del nivel del mar, por ejemplo. ¿Qué fiabilidad alcanzan los resultados de los diferentes modelos? ¿Cómo cuantificar su incertidumbre?

Una de las vías para formarse una imagen más certera del futuro consiste en estudiar con detalle el pasado; en particular, épocas en las que las temperaturas globales coincidiesen con las que quizá se alcancen a finales de este siglo. El registro de mediciones directas de temperaturas abarca solo hasta 1850,

EN SÍNTESIS

Durante el Plioceno, hace unos tres millones de años, las temperaturas eran unos tres grados más altas que hoy y los niveles de CO₂ atmosférico se asemejaban a los actuales.

Sin embargo, la posición de los continentes y los patrones de las corrientes oceánicas, las cuales distribuyen el calor, eran muy similares a los de hoy.

Varios indicadores climáticos permiten deducir las características climáticas del Plioceno; entre ellos, las conchas de microfósiles, las alquenos o el polen fósil.

La reconstrucción del clima del Plioceno resulta de extremada utilidad para afinar los modelos computacionales que se proponen estudiar el cambio climático actual.



por lo que no se remonta lo suficientemente lejos. Los testigos de hielo permiten estimar las concentraciones pasadas de dióxido de carbono atmosférico, pero no más allá de hace unos 800.000 años. Sin embargo, algunos estudios basados en otros indicadores climáticos, como las proporciones de elementos químicos en fósiles marinos diminutos, están arrojando luz sobre algunos interrogantes. De hecho, sus resultados comienzan a considerarse un punto de referencia para quienes intentan modelizar el clima futuro.

INDICADORES DEL PLIOCENO

El mejor indicador del que disponemos para identificar épocas pasadas más cálidas que la actual lo constituye el registro de los isótopos de oxígeno marino. Este se basa en la proporción de ^{16}O y ^{18}O presentes en las conchas de microfósiles. La evaporación preferencial del isótopo más ligero, el ^{16}O , provoca que el agua marina se enriquezca en ^{18}O , mientras que parte del agua evaporada se incorpora a la nieve que compone las capas de hielo. Por tanto, durante los períodos fríos, las capas de hielo se expanden e incorporan el isótopo ligero, al tiempo que

Tripulación del buque oceanográfico JOIDES Resolution en 2005. Sus miembros preparan una sonda de pistón durante una expedición del Programa Integrado de Perforación Oceánica (IODP) en el Atlántico Norte. Los sedimentos recuperados en este tipo de misiones resultan cruciales para deducir las condiciones climáticas durante el Plioceno medio, hace unos tres millones de años. Dicha época se caracterizó por unas temperaturas globales similares a las que se podrían alcanzar a finales de siglo y por unos niveles de dióxido de carbono atmosférico próximos a los actuales.

disminuye el nivel del mar y el océano se enriquece en el isótopo pesado.

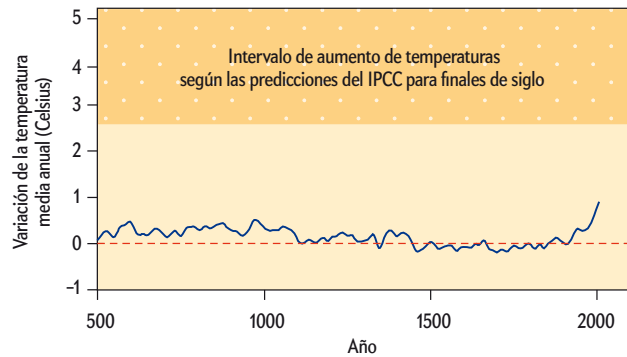
Los organismos marinos registran la composición isotópica del océano cuando sus conchas calcáreas precipitan. Las conchas formadas en períodos glaciales presentan una mayor proporción de oxígeno pesado que las secretadas en períodos interglaciales. Debido a que las variaciones en la composición isotópica son sincrónicas en todos los océanos, resulta posible

Reconstruir el pasado

Las características del clima pasado se deducen mediante el análisis de diversos indicadores climáticos (*proxies*).

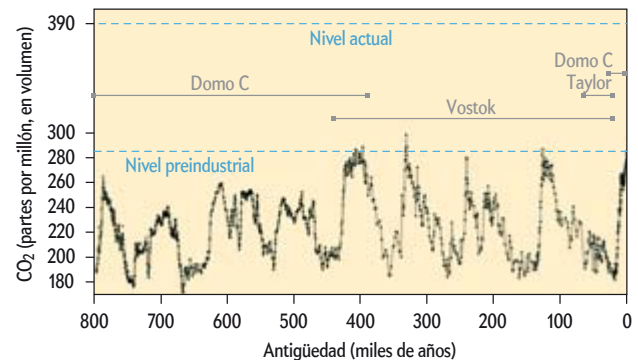
Crecimiento de los árboles

Las temperaturas de los últimos 1500 años se han reconstruido, sobre todo, a partir del estudio de los anillos de crecimiento de los árboles (dendrocronología). Desde la segunda mitad del siglo XIX, los datos se corresponden con mediciones directas de termómetros. El área sombreada muestra el intervalo de calentamiento estimado para finales del siglo XXI según el IPCC.



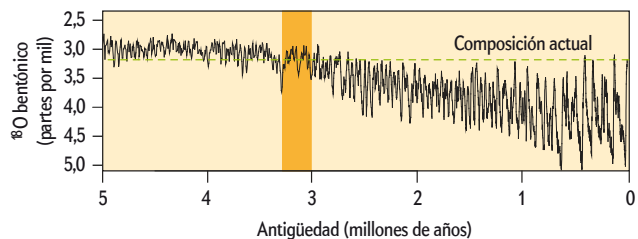
CO₂ atmosférico

Las concentraciones de CO₂ atmosférico representadas aquí se han calculado a partir de testigos de hielo extraídos en tres puntos de la Antártida (*nombres en la gráfica*). Las líneas discontinuas indican los niveles de CO₂ actuales y los de la época preindustrial.



¹⁸O oceánico

Otro indicador climático lo aporta la composición isotópica del oxígeno del agua de mar: durante las épocas frías, los océanos se enriquecen en ¹⁸O. La línea discontinua indica la composición actual.



correlacionar los registros isotópicos de distintos puntos del planeta. La enorme cantidad de conchas analizadas hasta hoy comprende un período de millones de años de antigüedad. Su estudio ha proporcionado un registro de isótopos de oxígeno que permite calcular de manera aproximada la variación global de las temperaturas y del nivel del mar.

Según este registro, el Plioceno medio (hace unos tres millones de años) fue la época más reciente que presentó temperaturas globales similares a las que se prevén para finales de siglo. Tres millones de años puede parecer un pasado muy remoto, pero no lo es en términos geológicos. En aquella época, la posición de los continentes era casi idéntica a la actual, por lo que las corrientes oceánicas (el principal vehículo de transferencia de calor) no diferían demasiado de las actuales. Además, la mayoría de las plantas y animales del planeta ya habían evolucionado, lo que facilita la comparación entre los organismos vivos de hoy y sus correspondientes ejemplares fósiles. Esta simetría convierte al Plioceno en un modelo excelente de lo que podría ser nuestro futuro.

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico durante el Plioceno apenas superaban a las actuales. Aun así, las temperaturas eran de dos a tres grados más altas que en la actualidad, y el nivel del mar, unos 25 metros más alto. Esta aparente paradoja —un planeta más caliente con una concentración similar de CO₂— inquieta a quienes se preguntan si incluso un

pequeño aumento en los niveles de CO₂ bastaría para alterar el clima de manera significativa.

Hacia la década de 1970, el climatólogo Mijaíl Budyko comenzó a estudiar el Plioceno medio con el cambio climático en mente, si bien a él le impulsaba más el optimismo que la alarma: concluyó que un mundo calentado por gases de efecto invernadero beneficiaría a algunas regiones de la Unión Soviética. Budyko fue el primero en considerar las reconstrucciones de períodos anteriores más cálidos como herramienta para predecir las condiciones climáticas del siglo XXI. Tras un intercambio científico entre EE.UU. y la Unión Soviética en el que Budyko presentó una reconstrucción climática, Dick Poor, del Servicio de Inspección Geológica estadounidense (USGS), y David Rinde, de la NASA, sugirieron que el USGS obtuviera un conjunto de datos más cuantitativos sobre el Plioceno. Desde su creación en 1989, el proyecto Investigación e Interpretación del Plioceno y sus Relaciones Sinópticas (PRISM) del USGS ha llevado a cabo una evaluación sin precedentes sobre cómo podría ser un planeta más cálido que el actual.

MÉTODOS PARA RECONSTRUIR EL CLIMA

El *actualismo* constituye un principio fundamental en geología. Según este, los procesos físicos y las leyes naturales que actúan en el presente son los mismos que operaron en el pasado. A partir de ciertas premisas sobre la estabilidad de la química oceá-

Los técnicos del proyecto Investigación e Interpretación del Plioceno y sus Relaciones Sinópticas (PRISM) extraen microfósiles de un testigo de sedimentos. La determinación de las especies de dichos microfósiles permite acotar la edad de los materiales depositados a lo largo de la llanura costera de Virginia.

nica y las tolerancias ecológicas de las especies, la paleontología permite deducir las condiciones ambientales pasadas en algunas regiones del planeta. La combinación de varias reconstrucciones de un mismo período en zonas geográficas diferentes proporciona una visión conjunta de las condiciones terrestres en el pasado.

Este tipo de reconstrucciones climáticas parte del muestreo de sedimentos a escala planetaria. En el caso de los sedimentos de las profundidades oceánicas, la mayoría de las muestras proceden de los sondeos efectuados por el Programa Integrado de Perforación Oceánica (IODP) y sus predecesores. El proyecto, coordinado por autoridades estadounidenses y japonesas, recibe también financiación de un consorcio europeo, China, Corea, Australia, Nueva Zelanda e India. Cualquier investigador puede solicitar muestras del IODP. Durante sus expediciones, se taladran cientos o miles de metros en el fondo oceánico a fin de recuperar sedimentos que abarcan períodos de tiempo de millones de años [véase «Viaje al manto terrestre», por Damon Teagle y Benoît Ildefonse; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2011]. La profundidad a la que se encuentran los fósiles del Plioceno se determina mediante diversas técnicas de datación.

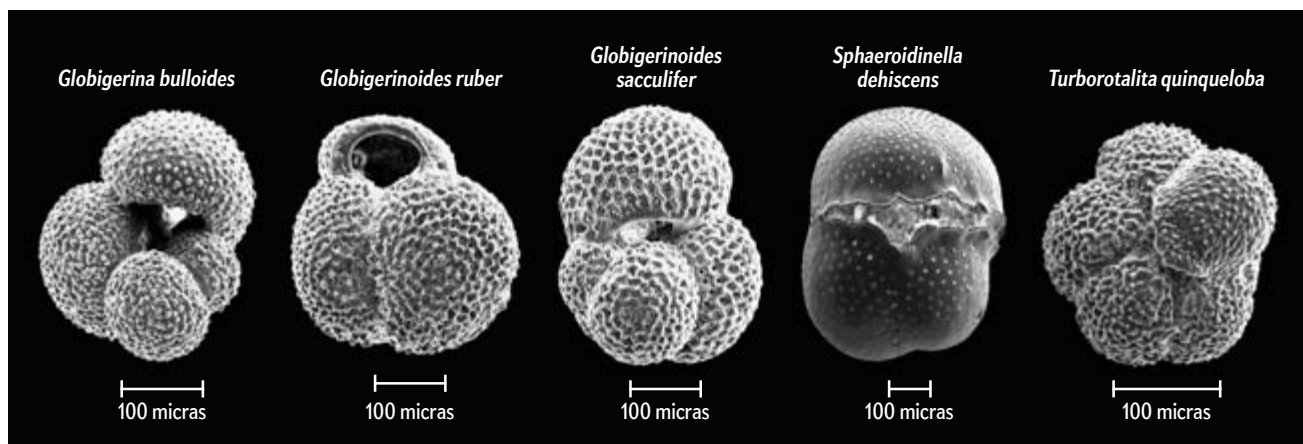
Los sondeos marinos suelen presentar un alto contenido en foraminíferos planctónicos, organismos unicelulares que flotan en la superficie o cerca de ella. Cada una de las casi cuarenta especies que existen presenta una concha calcárea de forma y ornamentación únicas, lo que facilita su identificación. Todas son del tamaño de un grano de arena. Puesto que cada especie vive bajo unas condiciones ambientales muy específicas, los fósiles hallados en los sondeos revelan la temperatura y otras características, como la salinidad o la productividad, del entorno en que habitaron los foraminíferos.

Supongamos que el 60 por ciento de los organismos presentes en una asociación fósil pertenecen a una especie y el 40 por ciento, a otra. Si hoy esa misma asociación habita en una zona donde el agua se encuentra a 14 grados centígrados, se asigna



a la muestra esa temperatura. Sin embargo, lo más probable es que la muestra contenga unas cuarenta especies y que hoy dicha asociación habite en un amplio intervalo de temperaturas oceánicas. El valor más aproximado para la asociación se calcula entonces mediante una combinación de temperaturas. Una técnica denominada «análisis de factores» resulta también de utilidad: a partir de los datos de las asociaciones actuales y sus respectivos ambientes, se realiza una regresión multivariante que se aplica después a los datos paleontológicos. Este método permite determinar la temperatura aproximada del ambiente en el que habitó la asociación.

La mayor parte de las temperaturas oceánicas de nuestras reconstrucciones se han calculado a partir de datos de foraminíferos, aunque también se emplean a tal efecto otros microfósiles, como diatomeas, radiolarios, ostrácodos y polen. Otro método utilizado para estimar paleotemperaturas consiste en el estudio de otras propiedades químicas de las conchas de foraminíferos y ostrácodos. Aunque estos caparazones se compo-



Los foraminíferos planctónicos, organismos marinos unicelulares, poseen conchas calcáreas que se conservan entre los sedimentos del Plioceno medio. Cada especie habita bajo condiciones muy específicas y presenta una concha de apariencia única, por lo que sus fósiles sirven como indicadores climáticos.

nen sobre todo de calcio, carbono y oxígeno, también incluyen una pequeña proporción de magnesio, ya que los iones de este elemento pueden sustituir a los de calcio en la red cristalina del carbonato cálcico. La velocidad de sustitución se halla en estrecha correlación con la temperatura del agua en el momento en que se secreta la concha. Así, la aplicación de este método tanto en fósiles del fondo oceánico como en otros de aguas más superficiales permite reconstruir gradientes térmicos oceánicos. Las alquenonas revisten un interés similar. Estos compuestos orgánicos de cadena larga son sintetizados por ciertas algas que habitan en las proximidades de la superficie oceánica. El número de enlaces dobles de carbono en dichas cadenas (grado de insaturación) varía linealmente con la temperatura del agua en la que crecen. Este método proporciona una estimación de la temperatura oceánica independiente de los métodos basados en microfósiles.

En la reconstrucción del Plioceno medio elaborada por el proyecto PRISM se consideran también datos relativos a la vegetación, el hielo continental, el nivel del mar, la temperatura de las aguas oceánicas profundas y la topografía. En tierra firme, la distribución de la vegetación y el hielo continental se deduce a partir de los análisis de polen fósil. Aunque la extensión de hielo sobre Groenlandia y la Antártida no guarda una estrecha relación con la distribución de la vegetación, el volumen de hielo sí supone un indicador del nivel del mar durante el Plioceno. Los restos geológicos de las líneas de costa pliocena también aportan datos. Por ejemplo, el escarpe de Orangeburg, en EE.UU., que se extiende desde Florida hasta Virginia, delimita lo que fue la costa atlántica durante el Plioceno. Hoy, la carretera 95 bordea el este del escarpe.

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Hasta el momento, el proyecto PRISM ha reconstruido el clima del Plioceno medio a partir de datos procedentes de 86 puntos marinos y 202 continentales. El resultado se muestra muy distinto del clima actual en algunas regiones y muy similar en otras. Mientras que las temperaturas ecuatoriales del Plioceno se asemejaban a las de hoy, las de los polos eran más elevadas. En general, la diferencia entre temperaturas pasadas y presentes resulta tanto más acentuada cuanto mayor es la latitud. En Islandia y Groenlandia crecían bosques boreales en lugar de tundra

polar, lo que indica que la temperatura media anual en el océano Ártico y en el Atlántico Norte debió superar en al menos 10 grados a la actual. En el hemisferio sur, la vegetación arbustiva poblaba la península antártica occidental y las costas de la Tierra de Wilkes, donde en la actualidad no hay sino hielo.

Por otro lado, la mayor parte de los trópicos se encontraba a temperaturas similares a las que vemos hoy. En la región tropical del Pacífico Occidental, cerca de Papúa Nueva Guinea, las aguas superficiales eran tan cálidas como en la actualidad (unos 29 grados Celsius). En el presente, las temperaturas superficiales en la región occidental del Pacífico suelen ser algo más elevadas que las de la zona oriental. Este gradiente solo se suaviza con la llegada de El Niño, un fenómeno cuasiperiódico que genera un patrón de temperaturas más cálido de lo normal y que trae consigo alteraciones meteorológicas a escala planetaria. Durante las épocas más cálidas del Plioceno, el estado habitual se asemejaba al de El Niño de nuestros días. La región ecuatorial del Pacífico Oriental, cerca de Panamá, Colombia y Ecuador, era tan cálida como las zonas occidentales.

Hoy, las costas de Perú y California se caracterizan por la presencia de corrientes frías ascendentes y muy ricas en nutrientes, lo que las convierte en excelentes regiones pesqueras. Según los indicadores de productividad, las aguas ascendentes del Plioceno eran también ricas en nutrientes; sin embargo, a diferencia de las actuales, eran unos 7 grados más cálidas. Para comprender mejor las corrientes cálidas ascendentes del Plioceno, la reconstrucción del proyecto PRISM está incorporando datos procedentes de 27 puntos nuevos, la mayoría ubicados a lo largo de estos márgenes continentales. Aunque el océano Índico se halla mucho peor representado en la reconstrucción del PRISM, se espera que esta situación mejore tras la inclusión de seis nuevos puntos de obtención de datos. Otra línea de investigación reciente intenta contextualizar desde un punto de vista histórico el dipolo de temperaturas que se observa hoy en el océano Índico. Se trata de otro fenómeno episódico responsable de un acentuado gradiente de temperaturas y que influye sobre los fenómenos meteorológicos locales y sobre el clima de la región.

Cada vez más, un método para comprobar la precisión de los modelos climáticos consiste en aplicarlos al Plioceno y contrastar sus resultados. En 2004, se observó una discrepancia entre las temperaturas ecuatoriales del Pacífico Oriental estimadas por el PRISM y las calculadas por el Modelo Acoplado del Centro Hadley (HadCM3). La precisión de este modelo reviste sumo interés, puesto que se ha empleado en un gran número de predicciones climáticas y estudios de sensibilidad. En su simulación, HadCM3 había obtenido que, durante el Plioceno, las aguas situadas al oeste de Panamá, Colombia y Ecuador eran más cálidas que hoy. Sin embargo, la reconstrucción del PRISM no contemplaba este resultado.

Esta discrepancia motivó a Harry Dowsett, micropaleontólogo del PRISM, y a la autora a investigar las causas. En los res-

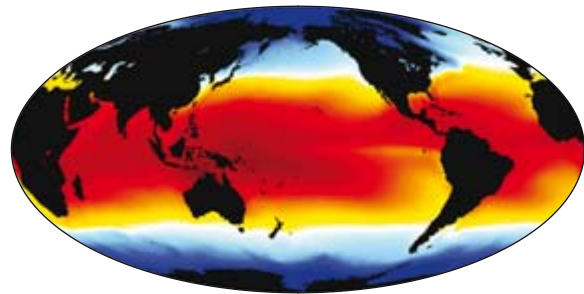


Durante el Plioceno, la línea de costa (*amarillo*) de lo que hoy es el sudeste de EE.UU. se hallaba desplazada con respecto a la presente. Los datos geoquímicos y geológicos indican que hace tres millones de años el nivel del mar se elevaba 25 metros por encima del actual. La antigua línea de costa se corresponde con el escarpe de Orangeburg, un elemento topográfico esculpido por la erosión marina del Plioceno medio que se extiende desde Florida hasta Virginia.

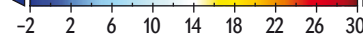
El Pacífico, ayer y hoy

La distribución actual de temperaturas superficiales del océano Pacífico (*arriba, derecha*) se caracteriza por la existencia de un gradiente térmico este-oeste en las latitudes ecuatoriales. En un primer momento, la reconstrucción pliocena del PRISM2 (*debajo, izquierda*) reprodujo en esta región unas condiciones de temperatura similares a las modernas. Después, un modelo climático indicó que el gradiente térmico debió ser menos acusado, circunstancia que fue corroborada por indicios geoquímicos posteriores. La reconstrucción posterior del PRISM3 (*debajo, derecha*) se ajustó según los nuevos datos.

Temperaturas actuales de la superficie oceánica

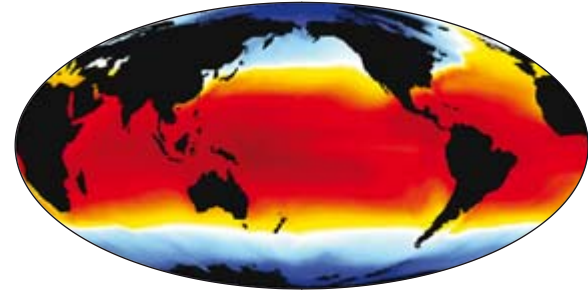
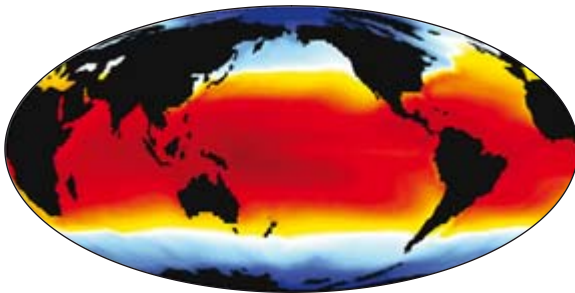


Temperatura (Celsius)



Temperaturas de la superficie oceánica del PRISM3

Temperaturas de la superficie oceánica del PRISM2



gistros del IODP hallamos tres testigos que contenían sedimentos pliocenos de la región ecuatorial, entre 0 y 6 grados de latitud norte o sur. Uno de ellos se había extraído muy cerca de la costa occidental de América del Sur, a 84 grados de longitud oeste. Los otros dos se habían perforado a 95 y 110 grados de longitud oeste. Realizamos un estudio de las asociaciones de foraminíferos planctónicos de los tres testigos, así como de las alquenonas procedentes del punto más oriental, que hoy se encuentra en una zona de corrientes ascendentes. Nuestro análisis mostró que se habían subestimado las temperaturas del Plioceno en dicha región. El punto situado más al oeste indicaba temperaturas 2,5 grados superiores a la media actual; el punto intermedio, 2,8 grados por encima (un dato que concordaba de manera asombrosa con otras observaciones), y el más oriental indicaba temperaturas pliocenas entre 1,5 y 1,9 grados más cálidas que las actuales. El modelo climático había acertado en sus proyecciones.

En otra ocasión, la reconstrucción del PRISM revelaba un clima muy cálido en las proximidades de Islandia y las islas Svalbard, mientras que las simulaciones de 2004 del HadCM3 no reflejaban esta circunstancia. Para esclarecer esta divergencia, estudiamos los patrones de circulación oceánica y la evolución del fondo oceánico en esta región desde el Plioceno.

Las aguas profundas del Atlántico Norte se originan cuando el agua superficial fría, salada y más densa se hunde al norte de Islandia. La dorsal escocesa, un elemento topográfico asociado al punto caliente situado en Islandia y que conecta Groenlandia, Islandia y Escocia, retiene el agua profunda recién formada en su camino hacia el sur. En la década de los setenta, Peter Vogt llevó a cabo un estudio geofísico pionero que demostró que, durante el Plioceno, la dorsal escocesa era más baja que hoy. La actividad geotérmica bajo Islandia ha provocado que la dorsal se eleve unos 300 metros durante los últimos tres millo-

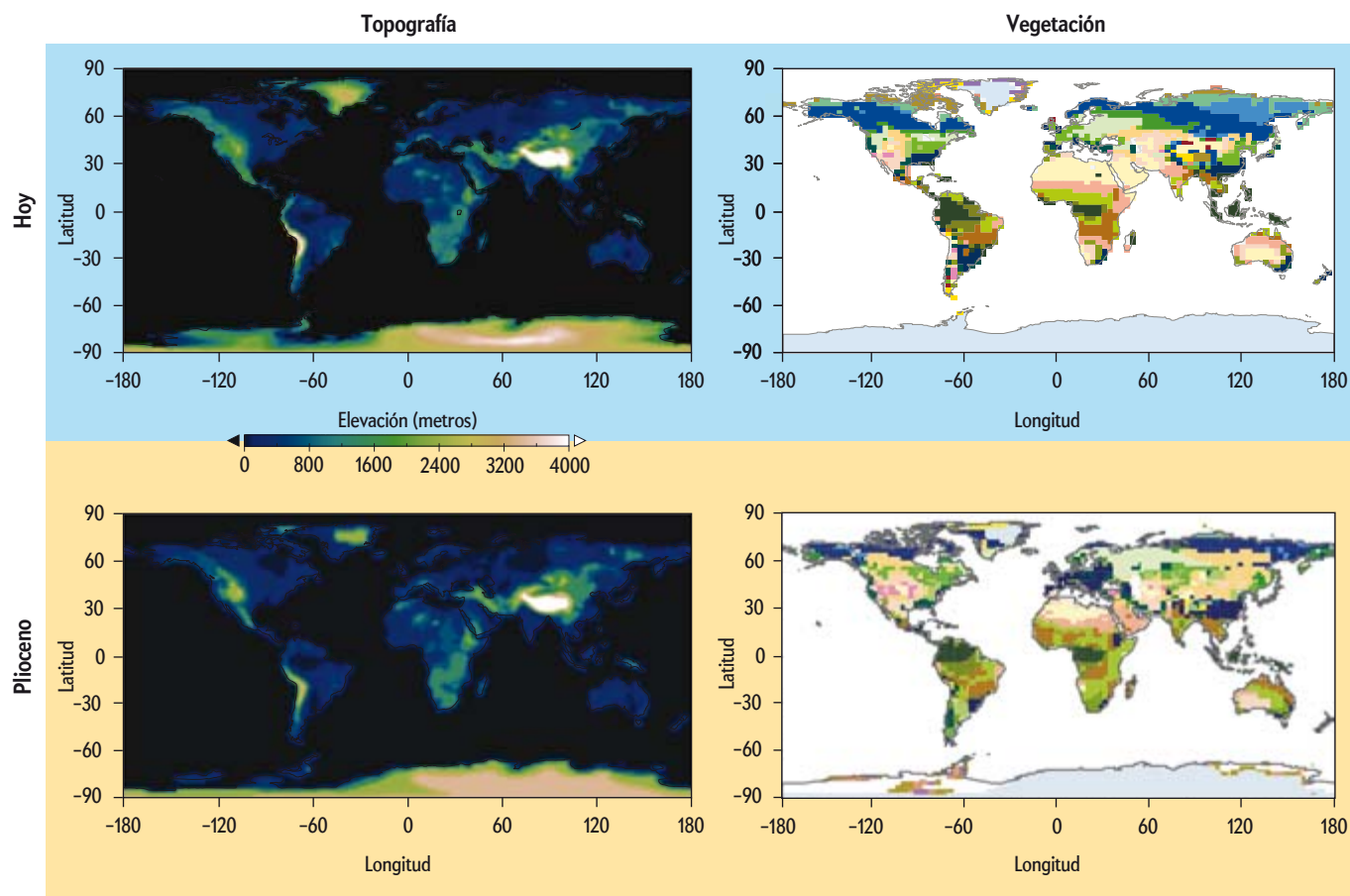
nes de años. Estudios posteriores realizados por Jim Wright y Ken Miller, de la Universidad Rutgers, han demostrado que estos cambios han afectado a la circulación de las aguas profundas. Estas variaciones han sido incorporadas en un estudio piloto publicado este año por la autora junto a otros colaboradores. Al final, el reajuste de las condiciones de contorno del modelo climático permitió reconciliar los datos reconstruidos con el resultado de la simulación.

El cotejo entre las observaciones y los resultados de los modelos climáticos constituye un paso indispensable para aumentar la fiabilidad de las simulaciones del clima futuro. No obstante, estas comparaciones se hallan aún en desarrollo. Por un lado, algunos aspectos del procedimiento resultan muy delicados y requieren mayor consideración; por otro, aún han de resolverse algunas diferencias básicas entre los modelos y las reconstrucciones. Entre otras cuestiones, resultan problemáticas la definición de «momento presente» y la implementación de los ciclos térmicos estacionales. Otro inconveniente radica en que las reconstrucciones se basan en datos tomados solo en ciertos puntos geográficos. Tanto los sondeos marinos como los terrestres se distribuyen de manera irregular por el planeta, con agrupaciones más densas en el Atlántico Norte y en Europa occidental. Por lo tanto, para estimar las temperaturas deben realizarse varias extrapolaciones. La región central del Pacífico Sur representa el área más extensa en la que no existen registros.

Por otra parte, tanto los indicadores climáticos como los modelos requieren partir de una serie de suposiciones. Por ejemplo, se postula que las tolerancias ecológicas de cada especie de foraminíferos y de los organismos productores de alquenonas no han variado demasiado desde el Plioceno; asimismo, se supone que entonces habitaban en los mismos medios que hoy. Además, al elaborar un modelo se da por sentado que los pará-

Diferencias entre el Plioceno y la actualidad

Las últimas reconstrucciones del PRISM sobre el clima del Plioceno medio manifiestan una serie de diferencias entre dicha época y la actualidad. En América del Norte, el extremo septentrional de las montañas Rocosas era topográficamente más bajo y los Grandes Lagos no existían. En la región central y oriental de Europa abundaban los bosques templados (con taxones subtropicales), mientras que en África y Australia se extendían sabanas y bosques tropicales. Las zonas actuales de tundra exhibían entonces vegetación de taiga perenne, un bioma caracterizado por bosques de coníferas.



metros que gobiernan los fenómenos climáticos, como la formación de nubes, pueden definirse matemáticamente. Ello no obstante, sin estas premisas no podríamos llevar a cabo nuestra labor científica.

CUANTIFICAR LA INCERTIDUMBRE

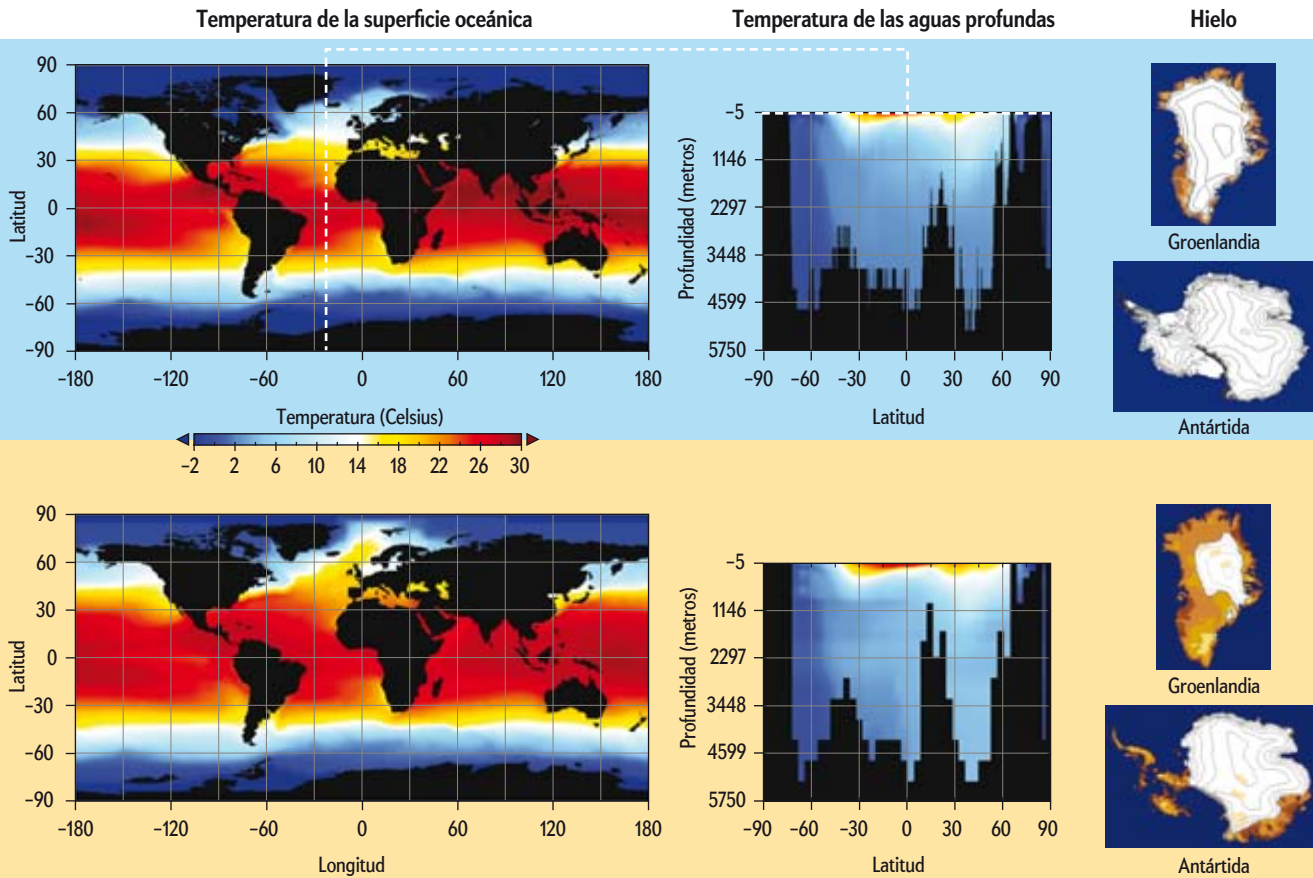
Existen dos fuentes de incertidumbre asociadas a las predicciones climáticas: la precisión de las condiciones de contorno y la capacidad del modelo para simular un sistema climático global de enorme complejidad. En nuestro caso, las condiciones de contorno corresponden a los datos de la reconstrucción del PRISM, los cuales se emplean para poner a punto las simulaciones. A fin de minimizar la incertidumbre de los datos del PRISM relativos a la temperatura de la superficie oceánica, se utilizan varios indicadores: las asociaciones fósiles, las alqueononas y las proporciones de magnesio y calcio. Este método reduce el error frente a las estimaciones basadas en un solo indicador; además, emplear múltiples indicadores permite calcular la temperatura en mayor número de zonas. Por ejemplo, los es-

tudios sobre foraminíferos planctónicos no sirven para estimar las temperaturas en las latitudes altas, ya que allí escasean y, en las asociaciones, suele predominar una sola especie, a menudo extinguida. Por otro lado, las técnicas basadas en las alqueononas no son aplicables en zonas cálidas tropicales, puesto que no registran las temperaturas por encima de los 28 grados.

Las incertidumbres de las simulaciones pueden tratarse utilizando un conjunto de modelos. En el método de «predicción por conjuntos», o de comparación entre modelos, varios modelos climáticos ejecutan simulaciones idénticas con las mismas condiciones de contorno y en los mismos escenarios de emisión. Así fue como se realizaron las proyecciones del IPCC mencionadas al principio de este artículo.

En diciembre de 2011, el Grupo de Trabajo I presentará el primer borrador de su contribución al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. En estos momentos, 17 grupos de modelización climática utilizan la reconstrucción del PRISM para fijar las mismas condiciones de contorno y ejecutar simulaciones idénticas. Sus modelos integran el Proyecto de Intercompara-

En las latitudes altas, las temperaturas eran más elevadas que en la actualidad. Este calentamiento se intensificó debido a la interacción entre el hielo y el agua oceánica. En el océano Ártico se adentraban periódicamente masas de agua templada —unos 18 grados Celsius más caliente que a mediados del siglo XX en la misma región—, lo que implicaba que las masas de hielo desaparecían durante algunas épocas del año. Las aguas profundas del Atlántico Norte, que se forman cuando el agua fría y densa se hunde al norte de Islandia y se desplaza hacia el sur, eran más cálidas durante el Plioceno. El volumen de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida occidental era considerablemente menor, al igual que la capa de hielo de la Antártida oriental. El deshielo de los casquetes glaciares en aquella época se ha asociado con un nivel del mar unos 22 metros por encima del actual.



ción de Modelos del Plioceno (PlioMIP), fundado por Dowsett; Mark Chandler, de la Universidad de Columbia y del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, y Alan Haywood, de la Universidad de Leeds. El abanico de resultados que arrojan unos modelos y otros permitirá identificar la variabilidad intrínseca a dichos modelos y eliminarla de la medida de incertidumbre. El resto de las variaciones constituirán las barras de error que cuantifiquen la incertidumbre de las simulaciones climáticas, tanto las del pasado como las del futuro.

Otro método de acotar la incertidumbre consiste en ejecutar, con un solo modelo, un conjunto de simulaciones en las que se va modificando ligeramente una magnitud física cuyo valor no conocemos por completo. Al final, se compara el conjunto de resultados con la reconstrucción del PRISM. La simulación que mejor concuerda es la que se emplea para fijar el valor de la variable.

James Pope, estudiante de doctorado de la Universidad de Leeds, emplea el método anterior para calcular la incertidumbre de las proyecciones sobre el Plioceno realizadas con el mo-

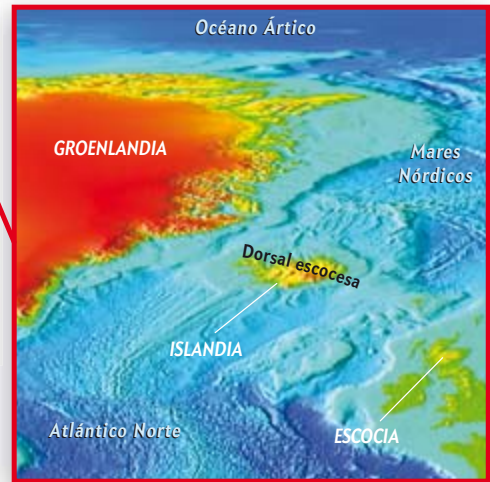
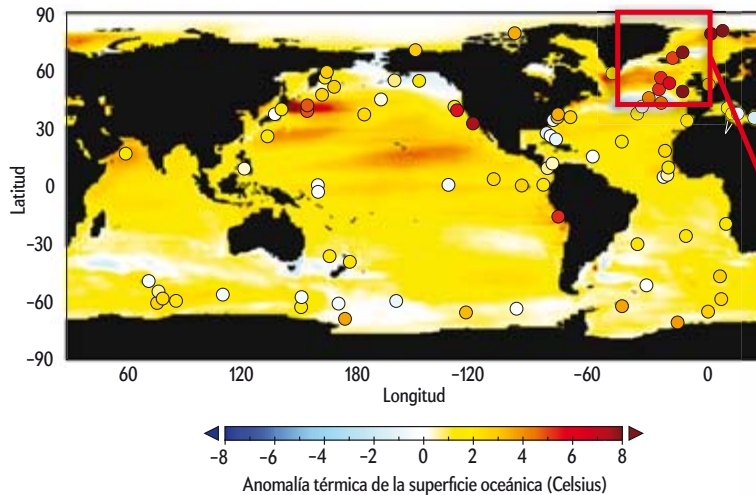
delo HadCM3 y con las condiciones de contorno del PRISM. Se trata de la primera ocasión en la que el método se aplica al caso de un planeta más caliente y con niveles altos de dióxido de carbono. La variable escogida para las primeras simulaciones ha sido la sensibilidad climática. Esta cantidad se define como la respuesta de la media anual de la temperatura global ante una duplicación de la concentración del CO₂ atmosférico. La indeterminación en el valor de esta magnitud constituye una de las principales fuentes de incertidumbre en las simulaciones climáticas.

En una serie de simulaciones sobre el Plioceno, un estudio piloto de Pope consideró un intervalo de valores para la sensibilidad climática entre 2,1 grados Celsius (baja) y 7,1 grados (alta). La simulación con una sensibilidad climática elevada reprodujo mejor las temperaturas de la superficie oceánica del PRISM. Sin embargo, la simulación de control, sin incluir perturbaciones, reflejó mejor la distribución de la vegetación. Los resultados son prometedores e indican que con un amplio conjunto de simulaciones podría obtenerse un mejor ajuste de los datos.

Reconstrucciones frente a modelos

Aquí se representan las anomalías térmicas de la superficie oceánica del Plioceno medio según los datos del proyecto PRISM (*puntos sobre el planisferio*) frente a los valores obtenidos por el Modelo Acoplado del Centro Hadley (HadCM3, *fondo de color*). Las temperaturas estimadas por el PRISM en las proximidades de la dorsal escocesa, en

el Atlántico Norte, superaban a las temperaturas proyectadas por el modelo. La discrepancia dio pie a un estudio detallado sobre la producción de agua profunda en la zona. Al final, se esclareció la manera en que los cambios de altura de la dorsal escocesa influiría sobre las temperaturas del agua de la región.



MÁXIMO PROVECHO

El clima del Plioceno aparece, pues, como el análogo natural más parecido al clima que se espera para finales de siglo, por lo que su estudio resulta de gran valor para aumentar la fiabilidad de nuestros modelos computacionales sobre el clima. Sin embargo, cabe recordar que existen diferencias en algunos aspectos fundamentales. Por un lado, la Tierra pliocena todavía no había sufrido los ciclos glaciales e interglaciales que han caracterizado los últimos millones de años. En consecuencia, el Plioceno no se encontraba en una época tendente hacia un clima más cálido, como la que vivimos hoy, sino que fue el período precedente a un prolongado enfriamiento que culminó con las glaciaciones.

Otra diferencia, más significativa, reside en que el Plioceno se caracterizó por una estabilidad climática nada similar al estado de desequilibrio actual. Entonces, las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico se mantuvieron relativamente estables y el clima pudo adaptarse a ellas. Las emisiones ocurrieron de manera gradual y se debieron a procesos naturales, como la actividad volcánica o la descomposición de materia orgánica. Hoy, la situación es bien distinta: la quema de combustibles fósiles y la deforestación conllevan emisiones mucho más rápidas. El clima actual se encuentra todavía en proceso de reajuste y tardará un tiempo alcanzar el equilibrio.

Por otra parte, hemos detectado un elemento geológico que, aunque condicionó el clima cálido del Plioceno, actúa en escalas de tiempo muy dilatadas: la variación de la altura topográfica de la dorsal escocesa. El fenómeno, que obedece a los movimientos de magma bajo Islandia, afectó probablemente al transporte de agua caliente superficial hacia el océano Ártico. Las cálidas temperaturas que experimentaron estas latitudes fueron producto de una serie de cambios que se sucedieron en escalas de tiempo del orden de cientos de miles o incluso de mi-

llones de años. El clima actual no responderá a este condicionante climático en un futuro próximo.

A pesar de que el Plioceno no supuso un análogo exacto de nuestro futuro cercano, su estudio nos ayudará a elaborar previsiones más precisas. Durante el Plioceno se produjo una elevación del nivel del mar y un desplazamiento hacia los polos de las temperaturas y de las especies vegetales tropicales. Es posible que se observen los mismos fenómenos conforme el clima actual se vaya volviendo más cálido. Probablemente, las latitudes más altas se calentarán en mayor medida que las bajas y las capas de hielo se fundirán. Cuánto, no lo sabemos. Y puede que las pequeñas variaciones en la circulación oceánica ejerzan un gran efecto sobre fenómenos regionales, como los cambios estacionales de la profundidad de la termoclina (la capa de agua donde la temperatura disminuye bruscamente) o el ascenso de aguas profundas hacia la superficie. A menudo oímos que el actualismo nos enseña que el presente es la clave para entender el pasado. Pero no deberíamos pasar por alto otra consecuencia igual de cierta: que el pasado también resulta clave para entender el futuro.

© American Scientist Magazine

PARA SABER MÁS

Modelling Pliocene warmth: Contributions of atmosphere, oceans and cryosphere. A. M. Haywood y P. J. Valdes en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 218, pág. 363, 2004.

Mid-Pliocene equatorial Pacific sea surface temperature reconstruction: A multi-proxy perspective. H. J. Dowsett y M. M. Robinson en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 367, pág. 109, 2009.

Pliocene model intercomparison project (PlioMIP): Experimental design and boundary conditions (Experiment 1). A. M. Haywood et al. en *Geoscientific Model Development*, vol. 3, pág. 116, 2010.

Bathymetric controls on Pliocene Arctic sea-surface temperature and deepwater production. M. M. Robinson et al. en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 309, n.º 1-2, pág. 92, 2011.