

# La evolución de la ciencia del clima

## La visión personal de Julia Slingo



*Julia Slingo, Dama comendadora de la Orden del Imperio Británico (DBE), Directora Científica del Servicio Meteorológico del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte de 2009 a 2016, recibió en 2015 el prestigioso Premio de la Organización Meteorológica Internacional (OMI) por su destacado trabajo en meteorología, climatología, hidrología y ciencias afines. Como Directora Científica, ha dirigido a más de 500 investigadores de un amplio abanico de especialización que forma la base del pronóstico del tiempo, las predicciones climáticas y las proyecciones de cambio climático. Posee una dilatada trayectoria en los ámbitos de la física de la atmósfera y la ciencia del clima, adquirida durante sus etapas en el Servicio Meteorológico, en el Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo, en el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (Estados Unidos de América) y en la Universidad de Reading.*

*A lo largo de su carrera, ha llevado a cabo avances innovadores en la descripción y modelización del tiempo y el clima, desarrollando y empleando complejos modelos meteorológicos y climáticos, proporcionando nuevas perspectivas del funcionamiento del sistema atmosférico y climático, con avances significativos en las técnicas de predicción y en los servicios climáticos. Objeto de su especial interés son la meteorología tropical y la variabilidad climática.*

*Julia es la sexagésima laureada con el OMI y la séptima británica. Fue seleccionada para este premio anual por el Consejo Ejecutivo de la OMM en junio de 2015 y pronunció la conferencia científica (que se resume en este artículo) en la ceremonia de entrega del premio, celebrada durante la reunión del Consejo Ejecutivo de la OMM de junio de 2016. Fue elegida miembro de la Real Sociedad de Londres para el Avance de la Ciencia Natural (Royal Society) en 2015.*

“Clima es lo que se espera; tiempo es lo que ocurre”. En ello reside una interesante pregunta: ¿qué diferencia existe entre tiempo y clima? Es una cuestión de escala temporal; el clima es, en efecto, la estadística del tiempo meteorológico promediado sobre un determinado período. Como muestra este artículo, la ciencia del tiempo es la base de la ciencia del clima.

La misión de la ciencia del clima es explicar el funcionamiento del clima terrestre en las escalas global y regional. El porqué de las variaciones y cambios climáticos debidos a interacciones internas, como El Niño y la circulación termohalina, y en respuesta a agentes externos, como las actividades solar y volcánica. Asimismo, estudia si las actuaciones humanas, sobre todo las relacionadas con la emisión de gases de efecto invernadero, influirán de forma fundamental en el comportamiento del clima terrestre. No es de extrañar que, en los últimos años, la ciencia del clima se haya convertido en sinónimo de ciencia del cambio climático.

Pero la ciencia del clima se ocupa de mucho más que del cambio climático. Como especialidad, se ha desarrollado precisamente durante mi carrera como científica, desde mis comienzos como investigadora en el Servicio Meteorológico, después de licenciarme en física. Pero sus raíces están mucho más atrás. Es afín a las especialidades de meteorología, oceanografía y climatología, y tiene su fundamento en la física clásica, las matemáticas, la química y, cada vez más, la biología. La moderna ciencia del clima es fundamentalmente una fusión de teoría, observaciones y modelización informática.

En este artículo expongo desde una perspectiva personal, valiéndome de mis cuarenta años de experiencia y resaltando varios hitos históricos, la evolución de la ciencia del clima y su transformación durante ese período, mediante los avances científicos y tecnológicos. Por último, abordo cuestiones relativas al cambio climático inducido por la acción del ser humano y la aportación con que la ciencia del clima contribuye para la planificación de un futuro seguro y sostenible.

## Contexto histórico

La ciencia del clima posee una historia larga y bien diferenciada. En 1686, Edmund Halley publicó su emblemática descripción de los vientos tropicales en la revista *Philosophical Transactions*, de la Royal Society: *An Historical Account of the Trade Winds, and Monsoons, Observable in the Seas between and near the Tropics, with an Attempt to Assign the Physical Cause of the Said Wind* [Explicación

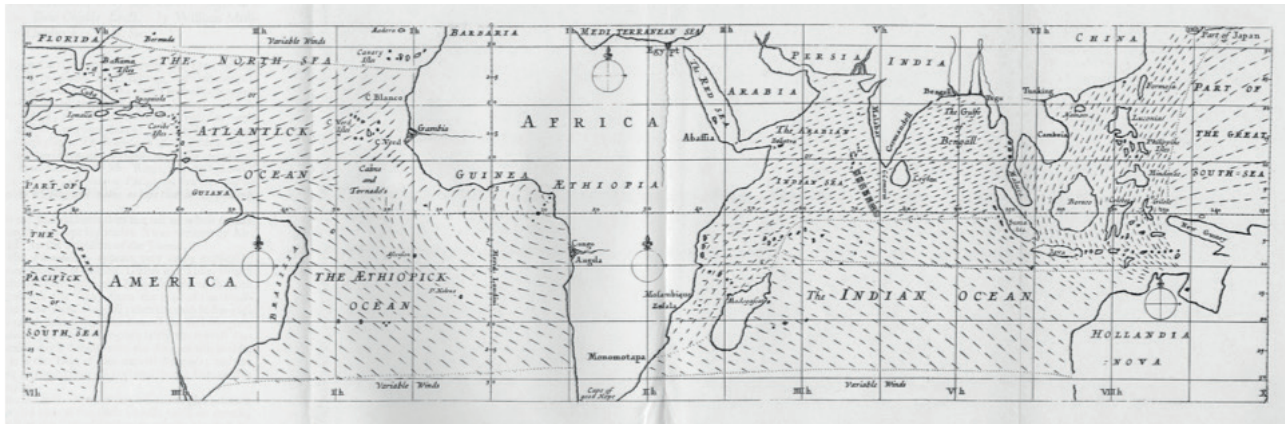
*histórica de los vientos alisios y monzones observables en los mares entre los trópicos y sus proximidades, con un intento de determinar la causa física de dichos vientos*]. Halley se preguntaba por qué los vientos soplaban invariablemente del este y sostenía que debían ser causados por el paso diario del Sol, debido al cual el Sol calienta la atmósfera, causando el ascenso del aire y, por tanto, atrayendo aire desde el este tras el paso solar.

En 1735, George Hadley postuló que, en realidad, es la rotación terrestre quien induce los vientos alisios de componente este. En un artículo ampliamente ignorado en su tiempo, escribió: “[...] que el aire al moverse desde los trópicos hacia el ecuador, teniendo menor velocidad que la zona de la Tierra a la que llega, mostrará un movimiento relativo contrario al movimiento diurno de la Tierra en esa zona, lo que, en combinación con el movimiento hacia el ecuador, producirá un viento del NE a ese lado del ecuador, y del SE al otro”. Hadley también apuntó que el mayor calentamiento solar en el ecuador debería causar la elevación del aire y, por continuidad, debía haber una región equivalente de descenso y de producción de vientos de componente oeste desde los trópicos. De estas ideas nació la “circulación de Hadley”, parte fundamental del sistema climático.

Pero esta afirmación de la importancia de la rotación terrestre no fructificó hasta mucho más tarde. En 1835, Gaspard-Gustave de Coriolis introdujo su teoría sobre el movimiento de objetos dentro de sistemas de referencia en rotación y las fuerzas que actúan sobre ellos. Coriolis no consideró sistemas esféricos, pero su teoría fue de inmediato aceptada por los meteorólogos para explicar los patrones de viento de la Tierra. Hadley estuvo en lo cierto al identificar como fundamental la rotación de la Tierra, pero se equivocó al suponer que se conservaba la velocidad absoluta, en lugar del momento angular absoluto.

En 1856, William Ferrel ofreció la primera descripción de la circulación global y de los vientos del oeste –o “vientos de paso”, como se les conocía entonces– que caracterizan a los climas de latitudes medias. De esta forma, al final del siglo XIX, gracias a la combinación de observaciones y teoría, se consiguió demostrar la importancia fundamental de la rotación terrestre en la definición de las características medias de la circulación atmosférica y, por tanto, del sistema climático, desde los alisios del este hasta los oeste de latitudes medias.

El papel de la rotación terrestre alcanzó su reconocimiento definitivo en el trabajo de Carl Gustaf Rossby, quien, desde la década de 1930, introdujo el concepto de vorticidad absoluta y su conservación en condiciones



Mapa de Edmund Halley (1686, *Philosophical Transactions, Royal Society*), donde las rayas más cortas muestran la gran inversión de los vientos alisios entre los monzones de invierno y verano de Asia y Australia.

adiabáticas. Desarrolló la teoría de ondas planetarias –ondas de Rossby– en la atmósfera y los océanos, y sentó las bases esenciales de la oceanografía y meteorología dinámicas.

Paralelamente al desarrollo del conocimiento de la circulación atmosférica, los físicos trataban de explicar el valor que la temperatura adopta en la superficie terrestre (en otras palabras, su balance de energía). Poco antes de 1860, John Tyndall puso de relieve que la atmósfera terrestre debía sufrir una especie de efecto invernadero que explicara la temperatura cálida de su superficie. También demostró que estos gases eran tanto emisores como absorbentes de radiación infrarroja, lo cual es vital para comprender la tasa neta de energía en la superficie.

Svante Arrhenius llevó esto un paso más allá, en 1896, al efectuar los primeros cálculos sobre la influencia del dióxido de carbono en la temperatura de la superficie terrestre. En su libro *Worlds in the making: the evolution of the Universe [Mundos en la creación: la evolución del Universo]*, publicado en 1908, afirmó que "...el doble de dióxido de carbono en el aire haría aumentar la temperatura de la superficie terrestre en 4 °C...". Esta temprana proyección del clima es coherente incluso con las actuales estimaciones.

Es interesante observar también cómo Arrhenius percibió el cambio climático inducido por el ser humano, sus causas y su impacto:

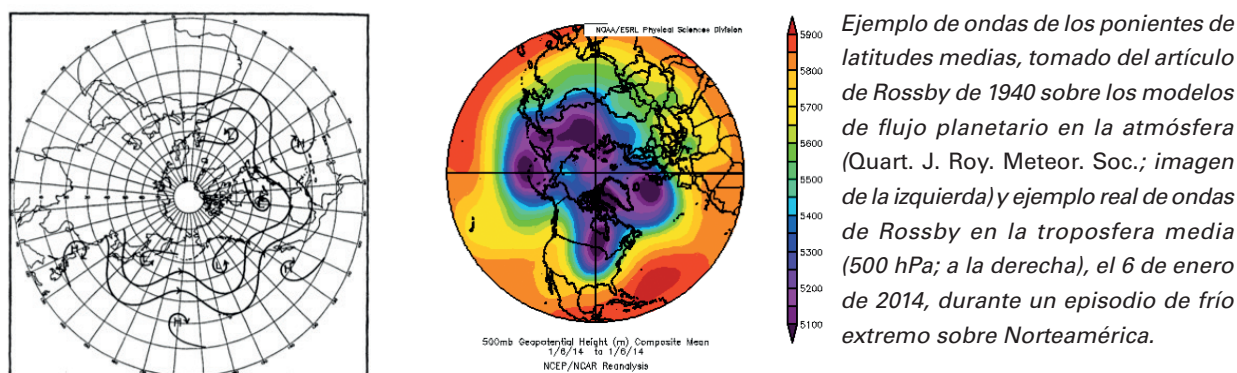
La ingente combustión de carbón de nuestra industria basta para incrementar el porcentaje de dióxido de carbono en el aire de forma perceptible... Por la influencia del creciente porcentaje de ácido carbónico de la atmósfera, podemos esperar años con mejores

y más estables climas, especialmente en las regiones más frías de la Tierra, años en los que se producirán cultivos mucho más abundantes que en la actualidad, para beneficio de una humanidad en rápida proliferación.

A lo largo de la primera mitad del siglo XX, el interés por el cambio climático estuvo muy enfocado en la posibilidad de alcanzar una nueva Edad de Hielo como la que indicaban los registros paleoclimáticos proporcionados por restos geológicos. En línea con el pensamiento de Arrhenius, el calentamiento global no era todavía una preocupación grave.

En términos de dinámica del sistema climático, hay otro aspecto de la ciencia del clima de profunda importancia: el funcionamiento y las causas de las variaciones interanuales e interdecenales del clima de una región debido a las variaciones internas del sistema climático asociadas con los flujos oceánicos y atmosféricos y sus interacciones mutuas. Su conocimiento posibilitaría la predicción de variaciones en modelos climáticos y meteorológicos a escala regional y con una anticipación de al menos una estación.

Mientras que Tyndall y Ferrel sopesaban los aspectos globales del sistema climático, la India estaba en un momento de creciente importancia para la economía del Imperio Británico. Las cosechas de algodón y cereales suponían casi la quinta parte de la economía británica, y dependían drásticamente de las precipitaciones monzónicas. Henry Blanford llegó a la India en 1875 como primer Director británico (Informador meteorológico imperial) del Departamento de Meteorología de la India. Allí se encontró con un clima donde "El orden y la regularidad son características tan sobresalientes de nuestros fenómenos atmosféricos, como lo son el capricho y la



*Ejemplo de ondas de los ponientes de latitudes medias, tomado del artículo de Rossby de 1940 sobre los modelos de flujo planetario en la atmósfera (Quart. J. Roy. Meteor. Soc.; imagen de la izquierda) y ejemplo real de ondas de Rossby en la troposfera media (500 hPa; a la derecha), el 6 de enero de 2014, durante un episodio de frío extremo sobre Norteamérica.*

incertidumbre de sus análogos europeos". Blanford estaba convencido de haber encontrado en la India un laboratorio perfecto para observar el funcionamiento del tiempo.

Pero pronto se encontró con la gran hambruna de 1876-1878, cuando las precipitaciones monzónicas disminuyeron radicalmente, afectando seriamente a la economía británica. Concluyó que, precisamente por la supuesta simplicidad del clima indio, debía ser posible encontrar las causas de esta anomalía monzónica; que, por medio de la predicción climática, las hambrunas podrían ser anticipadas y controladas, y la India podría ser gobernada con mayor eficacia.

Así comenzó el cada vez mayor grupo de investigación que buscaba encontrar relaciones entre las variaciones del clima en las distintas regiones del mundo, denominadas "teleconexiones" por el meteorólogo británico Sir Gilbert Walker.

Sir Gilbert Walker llegó a la India en 1904 como tercer Director británico (Director general de observatorios) del Departamento de Meteorología de la India, y comenzó a recabar observaciones de todo el mundo, inaugurando la predicción climática estadística mediante la construcción de una "computadora humana" con personal indio, desarrollando una masa de correlaciones estadísticas usando estos datos. Como Walker decía, "las relaciones que gobiernan las condiciones meteorológicas mundiales son tan complejas que la única oportunidad que tenemos de explicarlas consiste en acumular hechos empíricos". De este empeño vino la identificación de la Oscilación del Sur (y sus asociaciones con las sequías monzónicas), la Oscilación del Atlántico Norte y la Oscilación del Pacífico Norte.

Durante los siguientes cincuenta años, la climatología estadística se convirtió en una rama muy importante de la ciencia del clima con la que se desarrollaron sistemas empíricos de predicción de las variaciones estacionales

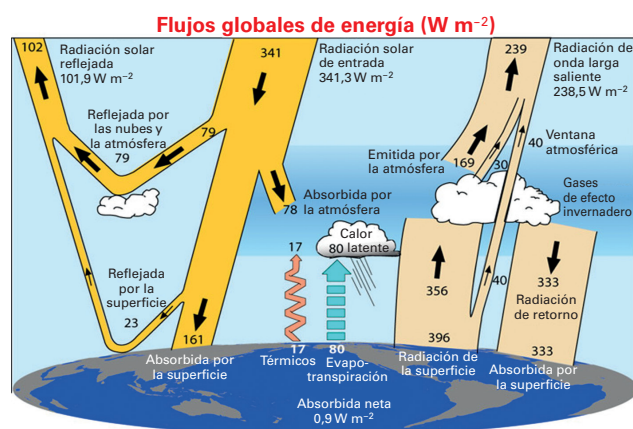
del clima, como el monzón indio. Pero las causas de estas variaciones climáticas eran difíciles de explicar; en ese momento entró en escena la oceanografía.

Los calentamientos y enfriamientos intermitentes de la zona ecuatorial del océano Pacífico oriental (El Niño y La Niña) eran conocidos desde antiguo, particularmente por los pescadores peruanos, que veían disminuir drásticamente sus capturas en los años de El Niño. En 1961, Vilhelm Bjerknes estableció la conexión entre este fenómeno oceánico y la Oscilación del Sur de la atmósfera, aceptándose la relación simbiótica entre los dos (El Niño/Oscilación del Sur (ENOS)). Aunque Henry Blanford no lo supo entonces, la gran hambruna india de 1876-1878 fue causada por un episodio muy intenso de El Niño.

Por aquella época comencé mi carrera en el Servicio Meteorológico, en 1972, estando ya bien establecidas la meteorología dinámica, la predicción del tiempo, la climatología estadística, la paleoclimatología y la oceanografía, a punto de comenzar la transformación de la ciencia del clima.

## La primera transformación: la observación de la Tierra

Ahora nuestro conocimiento sobre el clima y sus variaciones y cambios es enorme gracias a una vasta cantidad de observaciones, especialmente las proporcionadas por los sistemas de teledetección espacial. En la década de 1970, el conocimiento se basaba principalmente en la red de observaciones meteorológicas usadas para la predicción del tiempo que nos dieron una visión limitada de la circulación general de la atmósfera y del papel del ciclo hidrológico. Empezaron a aparecer por entonces las primeras imágenes de satélites meteorológicos mostrando la organización de las nubes, y a principios de los ochenta se realizaron las primeras mediciones directas del balance radiativo terrestre.



*Flujos de energía en el sistema climático global ( $W m^{-2}$ ) (Trenberth, 2009), que muestran que, aunque el balance en la atmósfera superior ocurre entre la radiación solar neta de onda corta y la radiación térmica infrarroja del planeta, en la superficie terrestre el balance es mucho más complejo, pues intervienen otros flujos de energía, además de la radiación, sobre todo por el transporte turbulento de humedad. Dentro de la atmósfera, el balance es más complejo aún, tomando parte las nubes, la emisión y absorción de radiación térmica por gases de efecto invernadero y la liberación de calor latente.*

En los siguientes decenios, el desarrollo de satélites de órbitas geostacionaria y polar ha proporcionado un poderoso medio de descripción y vigilancia del sistema climático, que se complementa con una miríada de sistemas de observación de superficie, que abarca estaciones meteorológicas de superficie, globos meteorológicos, aeronaves, boyas oceánicas, flotadores y barcos.

Hemos sido capaces de definir el flujo global de energía a través del sistema climático con la exactitud suficiente como para saber que el planeta está acumulando energía debido a las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera; y sabemos que cerca del 90% de esta energía adicional es absorbida por los océanos. Sabemos asimismo que el exceso de calor acumulado en los trópicos es transportado hacia los polos, principalmente por los sistemas meteorológicos de la atmósfera, y que las transiciones de fase del agua (desde su evaporación en la superficie terrestre hasta la condensación en la atmósfera, formando nubes y precipitación) suponen una parte fundamental del ciclo de energía de la Tierra.

De hecho, la capacidad del clima terrestre de contener agua en sus tres fases (sólida, líquida y gaseosa), es una de las características que hacen singular al planeta. Esto significa que el calor puede ser extraído en un punto y liberado lejos de su fuente original, entre los límites de la troposfera.

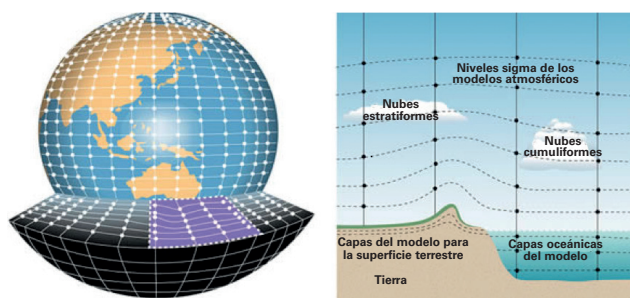
Hoy en día, la observación de la Tierra nos habla extensamente de nuestro sistema climático, pero no nos da las causas de su forma de funcionar, ni explica cómo los diferentes componentes interactúan y determinan la variabilidad que observamos, ni por qué el clima podría estar cambiando. Para ello, debemos hacer uso de modelos numéricos climáticos.

## La segunda transformación: los modelos climáticos

En principio, la física fundamental explica los movimientos atmosféricos y oceánicos, la termodinámica del ciclo hidrológico, la transferencia de radiación a través de la atmósfera y las interacciones de esta con la superficie subyacente. Sin embargo, en la práctica hemos de resolver estas ecuaciones físicas mediante ordenadores, dividiendo la atmósfera y los océanos terrestres en millones de volúmenes individuales, y usando sofisticadas técnicas numéricas.

Los primeros modelos climáticos, conocidos como modelos de circulación general, se desarrollaron en la década de 1950 en paralelo a la predicción numérica del tiempo, que estaba también en sus comienzos. En aquella época, los modelos eran de construcción muy simple y las primeras simulaciones consideraban tan solo el flujo adiabático, sin representaciones del ciclo hidrológico. Pronto se puso de manifiesto que para conseguir resultados mínimamente realistas se requería incluir los procesos de humedad, lo que acarrió grandes desafíos con los que todavía hoy estamos luchando.

El problema consiste en que muchos de estos procesos que favorecen, por ejemplo, el desarrollo convectivo, la condensación y la formación de nubes y precipitación, ocurren a escalas mucho más pequeñas que las que son resueltas por la rejilla del modelo. Por tanto, gran parte del desarrollo inicial de los modelos de circulación general se centró en la búsqueda de maneras de representar estos procesos de subrejilla a través de la parametrización, de forma que el efecto de estos procesos pudiera ser deducido a partir de características atmosféricas de mayor escala resueltas. Durante los siguientes decenios, estas parametrizaciones se han desarrollado sustancialmente,



Esquemas que muestran la forma en que un modelo climático divide la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre en cuadrados horizontales, normalmente de 100 km o menos de lado. Las columnas verticales correspondientes están seccionadas en al menos 70 capas. Las ecuaciones fundamentales del movimiento se resuelven numéricamente en esta rejilla para simular la evolución en el tiempo de los vientos atmosféricos y las corrientes oceánicas.

fundamentándose en una mayor comprensión de los fundamentos teóricos, en unas mejores observaciones y en el resultado de experimentos específicos, tanto de laboratorio como sobre el terreno.

Para los científicos del clima, los modelos climáticos son nuestro laboratorio. Para probar hipótesis formuladas a partir de la teoría y las observaciones, no podemos llevar a cabo experimentos en el sistema real, como se podría hacer en física o química experimentales. En su lugar, con el objeto de explicar los mecanismos del sistema climático y las causas de sus variaciones y cambios, necesitamos usar un modelo donde seleccionar interacciones y retroalimentaciones dentro del sistema. Esto nos obliga a confrontar constantemente la validez de nuestros modelos con la teoría y las observaciones, buscando siempre perfeccionar su eficacia.

Durante los últimos decenios, los modelos nos han permitido comprender numerosos aspectos del sistema climático: desde la influencia de las interacciones de la humedad del suelo en el monzón de África occidental, a las causas de la dependencia del clima norteamericano de los fenómenos del Pacífico occidental tropical, pasando por el impacto del ciclo solar de once años en el invierno meteorológico que estamos experimentando en el Reino Unido. Hemos aprendido cómo los sistemas montañosos determinan la trayectoria de los temporales, si la cobertura de nieve del Himalaya puede realmente influir en la formación del monzón indio y muchos otros descubrimientos importantes. Todo este conocimiento ha sido

adquirido gracias al cuidadoso diseño de experimentos del tipo “¿qué ocurriría si...?”, basados en hipótesis extraídas de observaciones de los climas pasado y presente.

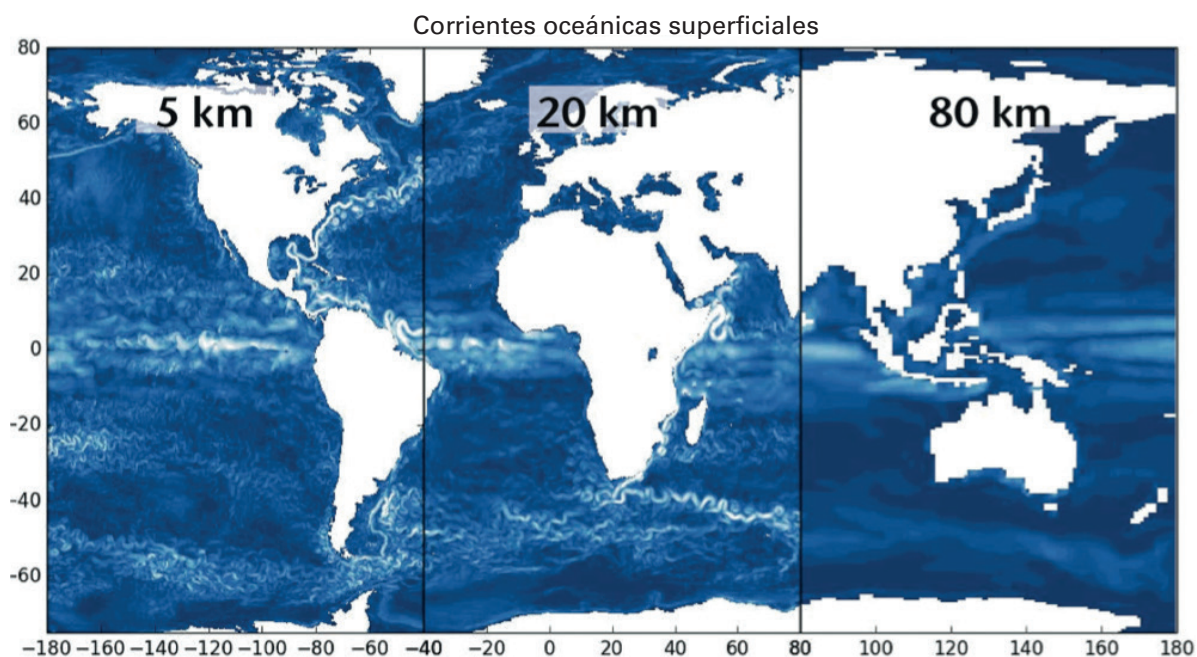
## La tercera transformación: la supercomputación

Desde sus inicios, los modelos climáticos se han ido desarrollando sobre técnicas computacionales; por tanto, la disponibilidad de potencia de cálculo ha dictado el nivel de sofisticación y el tipo de experimentos que se llevan a cabo. Hay pocas ciencias donde el progreso esté tan íntimamente ligado al incremento de la capacidad de supercomputación.

La supercomputación ha transformado la ciencia del clima. Ha hecho posible aumentar la resolución de los modelos para que estos capturen más fielmente los sistemas meteorológicos que constituyen el clima; ha permitido la introducción de más componentes del sistema climático, como el ciclo del carbono y la propia composición de la atmósfera, y su transformación en modelos del sistema Tierra completo; y ha proporcionado la capacidad de realizar gran número de simulaciones para verificar la robustez de los modelos y para determinar un abanico verosímil de futuros estados del tiempo y el clima que podrían alcanzarse razonablemente teniendo en cuenta la naturaleza caótica de la atmósfera y los océanos.

Pero la complejidad tiene un coste computacional y, por otra parte, la resolución de los modelos climáticos debe permitir que se representen diferentes interacciones y retroalimentaciones dentro del sistema climático. Hoy en día se reconoce cada vez más que muchas de estas interacciones y retroalimentaciones operan en escalas temporales y espaciales propias de los fenómenos meteorológicos y las perturbaciones oceánicas, y los recientes avances en supercomputación están permitiendo esto.

El incremento de la resolución espacial horizontal de los modelos es particularmente exigente; dividir por dos la longitud de rejilla requiere multiplicar por diez la potencia de cálculo. Incluso los últimos modelos usados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para su Quinto Informe de Evaluación (2013) tienen resoluciones horizontales más anchas que 100 km. Pero esto está cambiando rápidamente en la actualidad gracias a la mayor disponibilidad de capacidad computacional. Existe además una mayor percepción de la necesidad científica de resolver los movimientos atmosféricos (el tiempo) y la forma en que transportan calor,



*Ejemplo de los avances en la descripción de las corrientes en las capas superficiales del océano gracias al aumento de la resolución del modelo climático del Servicio Meteorológico del Reino Unido. La figura muestra las corrientes superficiales (las más intensas en blanco), destacándose la importancia de la resolución en la captura de los torbellinos oceánicos y las corrientes en los límites occidentales del océano, como la del Golfo.*

cantidad de movimiento, humedad y otras variables atmosféricas.

El océano es, en teoría, aún más exigente porque la escala de las perturbaciones es menor que la de la atmósfera. Las resoluciones del orden de 80 km usadas comúnmente en los modelos climáticos requieren parametrizar el efecto de los remolinos oceánicos e implica a importantes componentes de la circulación oceánica, como la corriente del Golfo. Los últimos modelos climáticos, con una resolución significativamente mayor (20 km), están comenzando a capturar los remolinos oceánicos y conduciendo a incrementos sustanciales de eficacia, pero en general para representar estos remolinos son necesarias resoluciones del orden de 5 km. Además de su importancia como medio de transporte de calor en el seno del océano, en las regiones de mayor densidad de torbellinos la producción biológica es más intensa, por lo que son regiones cruciales para la absorción de carbono por el océano.

Así, el científico del clima se encuentra ante un dilema permanente acerca del uso de los recursos de supercomputación disponibles, teniendo que optar por resolución, por complejidad o por tamaño del conjunto. La respuesta nunca es la misma; depende de la aplicación científica y de nuestro conocimiento de lo que significan las distintas

posibilidades para la validez de la simulación o predicción. No hay duda de que la disponibilidad de potencia de supercomputación continúa siendo un freno para la ciencia del clima, y ello justifica adecuadamente la realización de mayores inversiones.

### La cuarta transformación: el calentamiento global

En 1958, Charles David Keeling comenzó a realizar mediciones de la concentración atmosférica de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en Mauna Loa (Hawái, Estados Unidos de América) y pronto percibió que las concentraciones estaban aumentando sistemáticamente año tras año. Así comenzó la enorme influencia que el cambio climático antrópico tendría en la ciencia del clima.

Las primeras simulaciones de las posibles implicaciones del incremento del mencionado gas fueron llevadas a cabo en la década de 1970 y, en los comienzos de la de 1980, estas simulaciones eran ya una parte esencial de la investigación climática del Servicio Meteorológico del Reino Unido. Un estudio emblemático de 1974, *The Effects of Doubling the  $\text{CO}_2$  Concentration on the Climate of a General Circulation Model* [Efectos de duplicar la concentración de  $\text{CO}_2$  en el clima de un modelo de circulación

*general*], de Suki Manabe y Dick Wetherald, predijo un calentamiento global de 2,93 kélvines (K), cercano al promedio del margen actualmente aceptado. Los autores también pronosticaron algunos otros aspectos que ya se han observado en la realidad como indicios de cambio climático producido por gases de efecto invernadero: enfriamiento estratosférico, mayor extensión del calentamiento de los polos y mayor calentamiento de la alta troposfera tropical.

La necesidad de conocer la sensibilidad del sistema climático hacia los gases de efecto invernadero sin duda ha tenido una gran influencia en la evolución de los modelos. Se han llevado a cabo considerables esfuerzos que han implicado colaboraciones científicas nacionales e internacionales, desde la introducción de modelos oceánicos de amplia interactividad enfocados a la absorción oceánica de calor, hasta el desarrollo de modelos de vegetación terrestre y biogeoquímica oceánica para explicar el papel del ciclo del carbono en el incesante calentamiento global, pasando por la compleja microfísica de nubes y los acoplamientos de estas con el sistema climático, y los modelos interactivos océano-hielo enfocados en los efectos amplificadas en los polos.

En el momento de la publicación del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2013), la evidencia de un calentamiento mundial era innegable. El IPCC dictaminó que es "*Sumamente probable* que el incremento observado en la temperatura global de la superficie desde 1951 esté causado principalmente por la influencia humana". Esta afirmación se basó en el uso de modelos climáticos para determinar cómo habría sido el clima mundial sin emisiones de efecto invernadero antrópicas ni cambios en los usos del suelo. Sin el desarrollo de modelos climáticos tan sofisticados en estos últimos cincuenta años, no se podría haber atribuido el calentamiento global a factores humanos.

Actualmente, la atribución del cambio climático va más allá al considerar no solo la temperatura media global de la superficie terrestre, sino también otros componentes, aspectos más regionales del sistema climático e incluso fenómenos extremos tales como inundaciones, sequías y olas de calor. Año tras año, se multiplican las señales de que el cambio climático antrópico ha contribuido a la intensidad de este tipo de fenómenos.

A pesar de los debates sobre la incertidumbre de los modelos climáticos y las proyecciones de cambio

climático, se puede afirmar que una de las más importantes conclusiones del Quinto Informe del IPCC es el muy simple y fundamental hecho de que si continuamos acumulando carbono en la atmósfera, el planeta continuará calentándose, como conjeturó Arrhenius en su hipótesis de 1896. Sin duda, el cambio climático se ha convertido en un problema determinante del siglo XXI.

## Cómo contribuir a planificar un futuro seguro y sostenible

En 1990, en la época de la publicación del Primer Informe del IPCC, la primera ministra Margaret Thatcher inauguró el Centro Hadley de Predicción e Investigación Climática, en el Servicio Meteorológico. Sus palabras son tan relevantes hoy como lo fueron hace 25 años:

"Ahora podemos afirmar que disponemos del Informe y en él se pone de relieve que existen fallos y que los trabajos de reparación han de comenzar sin dilación. [...] Pondríamos en grave peligro a las futuras generaciones si, habiendo recibido esta advertencia, no hiciéramos nada al respecto o simplemente adoptáramos la actitud de quien no sufrirá las consecuencias. [...] Los problemas no están en el futuro, están aquí y ahora, y los afectados serán nuestros hijos y nietos".

La evolución de la ciencia climática pone de manifiesto que hoy día está preparada para jugar un papel central en la planificación de un futuro seguro y sostenible. La capacidad de predicción de los modelos climáticos nos permite "ver en el futuro", de manera que podemos prepararnos mejor para afrontar los riesgos provocados por la intromisión de la humanidad en el sistema climático.

Vale la pena volver al principio de este artículo: "Clima es lo que se espera; tiempo es lo que ocurre". A lo largo de la evolución de la ciencia del clima, resumida en estas líneas, hemos empezado a percibir cada vez más que no hay diferencia entre el tiempo y el clima; la misma ciencia sostiene a ambos. Al mirar hacia el futuro, hacia un mundo en progresivo calentamiento, los mayores impactos del cambio climático en la sociedad se notarán a través de cambios en el tiempo, con fenómenos excepcionalmente peligrosos, como crecidas, temporales y olas de calor. La transformación de la ciencia del clima en una ciencia arraigada en la meteorología local es la siguiente gran etapa.