



Climate System Dynamics and Modelling (Dinámica y modelización del Sistema climático)

AUTOR: HUGUES GOOSSE

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS: CAMBRIDGE 2015; 273 PP: ISBN 9781107445833, 55 EUROS.

Climate system dynamics and modelling ofrece una brillante introducción a la dinámica y modelización del clima. Sigue un enfoque intuitivo a la vez que riguroso en su aproximación a la dinámica del sistema climático que, probablemente, servirá de referencia durante unos cuantos años. Se trata de un manual introductorio, redactado de forma excelente y cuya edición se ha cuidado al máximo. Complementa a los libros clásicos, más centrados en cubrir aspectos individuales del clima; constituyendo, en consecuencia, un compendio excelente tanto para alumnos como para profesionales en el campo de la ciencia climática.

La inclusión de figuras y gráficos de gran calidad, con un diseño de colores muy acertado; así como el uso de la negrita para subrayar los conceptos importantes, hace que este texto sea atractivo para aquellos estudiantes que no cuenten con suficiente base en clima, meteorología u oceanografía. Incluye ejercicios en forma de problemas con modelos de respuestas para ayudar a los estudiantes a aprender la materia. Además, parte del contenido del libro está disponible 'online', lo que hace que sea una herramienta educativa muy útil para los cursos universitarios.

El autor es Hugues Goosse, investigador senior asociado en el *Fond National de la Recherche Scientifique* (F.R.S.-FNRS-Belgium) y profesor en la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica).

Su campo de investigación está centrado principalmente en el desarrollo de los modelos climáticos, comparación de datos y salidas de modelos y la aplicación de los modelos al estudio del cambio climático pasado, presente y futuro; analizando tanto la variabilidad natural como la respuesta a las perturbaciones inducidas por los seres humanos. Actualmente es editor del *Journal Climate of the Past*, habiendo contribuido igualmente en varios programas internacionales e informes de evaluación, en particular, al cuarto y quinto informes de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

El libro consta de seis capítulos, precedidos de un prefacio, hoja de agradecimientos y una lista con los principales símbolos y acrónimos. Cada capítulo se estructura en un boceto breve, de no más de diez líneas, el

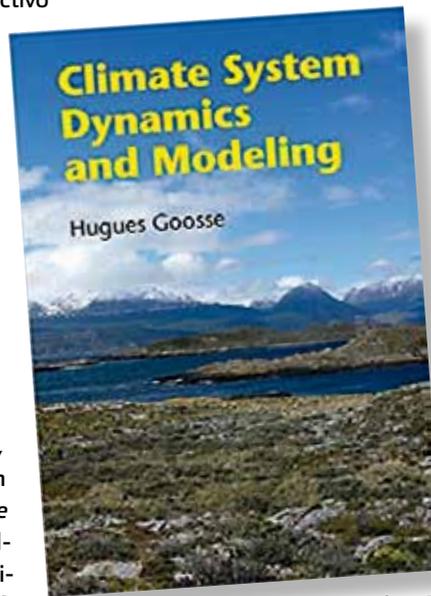
núcleo del capítulo y un bloque final de ejercicios de revisión en páginas de color hueso. El libro acaba con las conclusiones más significativas, un glosario, una lista de las referencias citadas y de lecturas propuestas, las soluciones de los ejercicios de revisión planteados al final de cada capítulo, y el índice.

El prefacio cuenta cómo el clima tiene un impacto significativo en la vida de la Tierra así como en las actividades humanas. Desde el principio de la humanidad, las personas han tenido que lidiar con el clima y, en la medida de lo posible, adaptarse a él. Paralelamente, el clima ha evolucionado como una ciencia, elaborando cada vez representaciones más sofisticadas de los fenómenos observados. Tal descripción del clima significa la implicación de diferentes dominios de las ciencias,

incluyendo la física, química, biología y geología. Se puntualiza que un análisis exhaustivo de todas las componentes del sistema climático (atmósfera, océano, mantos de hielo, superficies de tierra, etc.) y de las interacciones entre las mismas está fuera del alcance de este libro. Tras subrayar el autor que va a proporcionar tan solo una relativamente breve panorámica de los procesos que rigen el comportamiento de las componentes individuales; insiste en que el núcleo principal de este libro está en las interacciones entre los diferentes elementos del sistema climático y en las principales retroalimentaciones que gobiernan la variabilidad climática en todas las escalas temporales.

En este marco, el principal objetivo de este libro es analizar las causas dominantes de los cambios climáticos del pasado y discutir de forma crítica las proyecciones de cambio climático en los próximos siglos o milenios y en segundo lugar, proporcionar a los lectores una base sobre la que desarrollar una comprensión de cómo se construyen los modelos climáticos y sus intereses específicos y limitaciones, a la vez que proporcionar ejemplos claves de sus aplicaciones.

Por último, se menciona que la presente obra es una versión ampliada de la versión disponible 'online' en www.climate.be/textbook. En principio, se diseñó para servir de apoyo a los estudiantes en el primer año del programa de master en la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica). No obstante, el libro también ha sido pensado para estudiantes no universitarios. Se ha inclui-



do un amplio glosario, que puede ser de gran ayuda para los lectores que necesiten explicaciones más específicas. Los términos correspondientes se subrayan en negrita en el texto. Algunas secciones incluyen, aunque en número limitado, desarrollos matemáticos, ya que no se necesita una comprensión completa para seguir el hilo argumental, porque se ha procurado desarrollarlos mediante diagramas o párrafos explicativos.

En general, esta obra incluye un índice extensivo y muchas referencias cruzadas entre las distintas secciones donde se discuten temas que están relacionados. El número de referencias varía entre las distintas secciones, siendo mayor en aquellos temas que se están desarrollando y más reducidas en el caso de aquellos temas de los que se ofrecen breves pinceladas. Por último, al final de cada capítulo se incluyen ejercicios de repaso. Incluyen preguntas que proporcionan una revisión de los elementos más importantes cubiertos en las secciones correspondientes, de forma que los lectores puedan autoevaluarse directamente, respecto a su comprensión del texto.

Los dos primeros capítulos proporcionan la base del sistema Tierra incluyendo discusiones del ciclo del carbón y de temas como la órbita de la Tierra alrededor del Sol y su influencia en el balance de energía de la Tierra. De manera más específica, el capítulo 1 describe las principales componentes del sistema climático así como algunos de los procesos que son necesarios para entender los mecanismos analizados en los capítulos siguientes. Se ha agregado una información complementaria en el glosario, destinada para aquellos lectores que no se encuentran demasiado familiarizados con algunas de las nociones introducidas aquí. Empieza con la definición del clima de la OMM, puntualizando el hecho de que cada vez con más frecuencia, se interpreta en el sentido amplio como una descripción del sistema climático. El capítulo 2 está referido al balance de energía, y a los ciclos (hidrológico y de carbono). En el esbozo previo que encabeza el capítulo se expone que el clima está caracterizado por grandes intercambios de energía y de varias especies químicas entre sus componentes y que las modificaciones de estos intercambios son una fuente principal de cambio climático. Para la energía, el agua y el carbono, este capítulo describe, en primer lugar, el balance de varios reservorios a escala global antes de abordar o centrarse en la distribución espacial de algunas variables clave. Los procesos responsables para el reparto del carbono emitido entre la atmósfera, el océano y la biosfera se discutirán fundamentalmente en las secciones 4.3.1 y 6.2.9. Sin embargo, debe insistirse en este punto en que la fracción almacenada en cada reservorio es una función de la historia del forzamiento y el estado del sistema y por tanto, no es constante en el tiempo. Se concluye con los reservorios geológicos y el ciclo del metano, y la hoja de revisiones.

El capítulo 3, de lectura obligada, se refiere a aspectos de la modelización, planteando preguntas del tipo: '¿qué es un modelo?', '¿cuáles son las ecuaciones?', '¿cómo podemos resolver las ecuaciones mediante los esquemas

numéricos?', '¿cómo o de qué forma podemos evaluar los modelos?' La belleza de este enfoque radica en la forma intuitiva pero precisa en la que el autor describe las metodologías. Como se insiste en el sumario inicial del capítulo, los modelos son esenciales para comprender los procesos responsables de los cambios observados y para hacer predicciones. Se presenta la jerarquía de modelos, las componentes de los distintos modelos, la evaluación del comportamiento de los modelos, las métricas para medir ese comportamiento, los proyectos de intercomparación de modelos concluyendo con una discusión sobre la forma de interpretar los resultados en conjunción con las observaciones. Se resalta que la evaluación del comportamiento de los modelos se efectúe tan cuidadosamente como sea posible; al igual que la comparación datos-modelos debe tener en cuenta las incertidumbres. Se ilustran los sesgos más importantes que muestran los modelos climáticos actuales y cómo una de las actividades continuas en los grandes centros de modelización está en la proposición de nuevos desarrollos para mejorar los modelos y reducir estos sesgos. Sin embargo no se deben de rechazar totalmente los modelos, porque los modelos son en sí representaciones imperfectas de la realidad (página 121). En consecuencia, hay que tener en cuenta las discrepancias entre los resultados de los modelos y las observaciones cuando se interpretan ciertas variaciones observadas basándose en los resultados de los modelos.

Muchos modelos se han desarrollado para estudiar la respuesta del sistema climático a las perturbaciones, en particular, para llevar a cabo "proyecciones" del sistema climático; esto es, simular y entender los cambios climáticos futuros en respuesta a la emisión antropogénica de los gases de efecto invernadero y aerosoles (capítulo 6).

Por otra parte, los modelos constituyen unas formidables herramientas para mejorar nuestro conocimiento de las características más importantes del sistema climático y las causas de las variaciones climáticas. Cuando se emplean correctamente, todos los tipos de modelos producen información útil en el comportamiento del sistema climático. Sin embargo, hay que subrayar que no existe ningún modelo perfecto que sea conveniente para todas las prestaciones.

La respuesta del sistema climático a las perturbaciones se explora en el capítulo 4. En este capítulo se revisan brevemente los principales tipos de perturbaciones que influyen en el sistema climático. El núcleo principal del capítulo está en las nociones de forzamiento y retroalimentación que proporcionan un marco de referencia usado ampliamente para interpretar la respuesta del sistema climático a los cambios en las condiciones externas. En primer lugar, las retroalimentaciones físicas estándares se presentan antes de describir las interacciones que implican de manera conjunta los ciclos de balance de energía, hidrológico y biogeoquímicos. Los cambios climáticos en respuesta a las perturbaciones alcanzan, en última instancia, un nuevo equilibrio. Para tener una visión más clara de la dinámica del sistema, es importante separar tan objetivamente





como sea posible el forzamiento de esta respuesta. También se analizan los principales agentes de forzamiento radiativo, los aerosoles, los forzamientos antropogénicos y los forzamientos solares y volcánicos. Se verá cómo en respuesta al forzamiento radiativo, las variables que caracterizan el estado del sistema climático cambiarán. Ello modificará, a su vez, los flujos radiativos, induciendo una retroalimentación que puede amplificar (feedback positivo) o amortiguar (feedback negativo) la influencia directa de la perturbación. Esas modificaciones implican mecanismos complejos. Sin embargo, se pueden comprender mejor suponiendo que los cambios en los flujos radiativos en la tropopausa o en la cima de la atmósfera debido a la respuesta climática pueden estimarse como una función de los cambios en la temperatura de la superficie media global.

Me resultó sumamente interesante la página 145, antes de abordar la sección 4.1.4., cuando el autor menciona que algunos cambios pueden clasificarse como forzamiento o respuesta dependiendo del foco particular del investigador. Es, en consecuencia, importante en climatología, como en muchas disciplinas, definir precisamente lo que consideramos el sistema que estamos estudiando y cuáles son las condiciones de contorno y los forzamientos. En la página 162, se dice que además de las retroalimentaciones físicas

Para 'predecir' el clima del siglo XXI y siglos futuros, es necesario, por tanto, estimar los cambios futuros en los forzamientos. Esto se consigue mediante el desarrollo de escenarios para las emisiones de gases de efecto invernadero, aerosoles, varios contaminantes en la atmósfera, uso de la tierra, y así sucesivamente

discutidas en la Sección 4.2, muchas retroalimentaciones están relacionadas con los procesos químicos y biológicos que ocurren en el interior del sistema climático, implicando, por ejemplo, los cambios en la captación de carbono por el océano, la vegetación terrestre, aerosoles y polvo. Sin olvidar que el objetivo de esta sección es ser no tanto exhaustivo como ilustrar alguna de las interacciones dominantes.

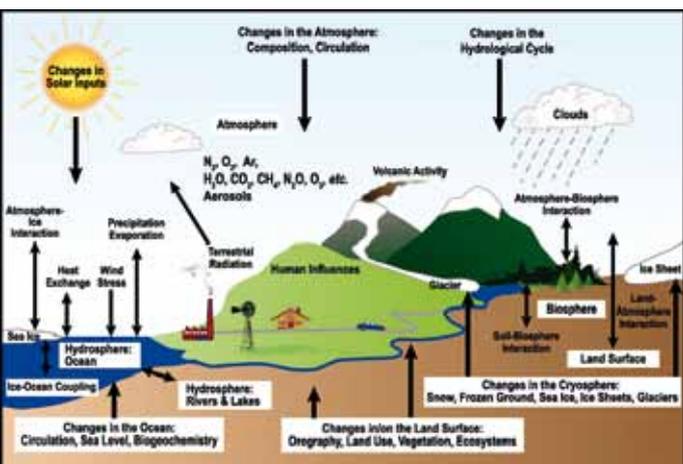
Las secciones 4.2 y 4.3 incluyen descripciones de algunas de las más importantes retroalimentaciones que actúan en diferentes escalas de tiempo y que implican a todos los componentes del sistema climático; retroalimentaciones que quedan recogidas en la tabla 4.1. Aunque muchas otras retroalimentaciones están actuando, retroalimentaciones que potencialmente tienen un gran impacto localmente o para variables específicas y periodos, no se pueden enumerar aquí. Discriminar cuáles de ellas son dominantes y cómo pueden interrelacionar en el problema que se trate es un asunto clave en la ciencia del clima, como se ilustra en los dos siguientes capítulos para las condiciones pasadas y futuras.

El capítulo 5 -"Breve historia del clima: causas y mecanismos"- sitúa la dinámica del clima en un contexto más amplio, tratando tanto los cambios recientes como la va-

riabilidad paleoclimática. Más que hacer una descripción exhaustiva del clima a lo largo de la historia de la Tierra, se han seleccionado periodos y mecanismos claves con el objetivo, como se menciona en el sumario inicial del capítulo, de ilustrar los procesos estudiados en los capítulos precedentes e investigar cómo su interacción dio lugar a los cambios pasados. Este enfoque integrado unifica todas las características clave del sistema climático, incluyendo desde la variabilidad interanual a la decenal (ENSO, NAO, SAM, PDO, AMO), la datación de archivos, así como los isótopos para explicar la estructura y comportamiento del clima a lo largo del tiempo. El capítulo proporciona una amplia panorámica empezando por el Precámbrico (los primeros billones de años), siguiendo por el clima del Cenozoico para concentrarse en el clima del último millón de años, incluyendo la teoría astronómica. El periodo interglacial actual se menciona en dos secciones: mecanismos como los monzones o factores de forzamiento como los volcanes. Como era de esperar, dando el campo de especialización de Gosse, también se discuten cómo se pueden inferir los climas del pasado a partir de los proxies.

El capítulo 6, último capítulo, está dedicado a los cambios climáticos futuros. En el breve resumen inicial se nos informa de cómo se deducen las estimaciones de los cambios climáticos futuros y de cómo se han obtenido hasta ahora los principales resultados. En particular, se presta atención especial a la interpretación y a las limitaciones de las predicciones a diferentes escalas de tiempo y a los mecanismos más robustos que explican los cambios. Ello permitirá subrayar los enlaces con los capítulos previos.

El primer punto está dedicado a los escenarios, exponiendo el propósito y el desarrollo de los mismos. Como se discutió en el capítulo 5, los cambios en los forzamientos externos han pilotado las principales variaciones climáticas del pasado. Para 'predecir' el clima del siglo XXI y siglos futuros, es necesario, por tanto, estimar los cambios futuros en los forzamientos. Esto se consigue mediante el desarrollo de escenarios para las emisiones de gases de efecto invernadero, aerosoles, varios contaminantes en la atmósfera, uso de la tierra, y así sucesivamente. Esos escenarios dependen de muchos elementos inciertos, y algunas de las incertidumbres en las estimaciones de los cambios climáticos futuros están relacionadas con estos factores. Esta es la razón por la que, en la literatura científica, el término 'proyección climática' se prefiera generalmente para las estimaciones de los cambios durante el siglo XXI y más allá, al término 'predicción climática' (ver también la sección 6.2.2)-. El término 'proyección climática' enfatiza el hecho de que los resultados dependen de los escenarios elegidos y de las hipótesis empleadas en esos escenarios. Se presenta una revisión cuidadosa de los nuevos escenarios utilizados en el quinto informe de evaluación del IPCC, AR5, de sus siglas en inglés. Estos nuevos escenarios denominados sendas representativas de concentración (RCP, de sus siglas en inglés), cubren un rango amplio de cambios futuros en el forzamiento radiativo, habiendo sido elaborados con un enfoque ligeramente diferente; considerándose todos los escenarios como razonablemente posibles



"Esquema de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones. (fuente: FAQ1.2, Figura 1 IPCC -2007)"

o igualmente probables. La sección 6.2 está dedicada a los cambios climáticos en el siglo XXI. El punto 6.2.1 está dedicado a los ensembles de los modelos y el punto 6.3 a los cambios a largo plazo.

El libro finaliza con las conclusiones más relevantes. De una manera muy bella y poética, el autor dice que nuestro corto viaje a la ciencia del clima llega a su fin. Se ha mostrado la diversidad del dominio y se ha proporcionado una muestra del gran número de procesos potencialmente responsables de las variaciones climáticas en un rango amplio de escalas espaciales y temporales. Esta diversidad es excitante porque permite crear y establecer los enlaces con el conocimiento previo, aprendido en muchos libros de textos y de lecturas, a la par que estimula nuestra curiosidad con muchas aplicaciones adicionales y tópicos no cubiertos aquí. También resulta frustrante porque el contenido de un libro de texto introductorio debería ser autosuficiente en la medida de lo posible. Idealmente, hay que demostrar nuevos puntos o justificarlos, apoyándose en habilidades estándares en matemáticas y físicas, por ejemplo, con unas pocas referencias para lecturas adicionales. Los principales mecanismos incluidos en los capítulos precedentes se explican todos cualitativamente, con frecuencia acudiendo al uso de esquemas, y muchos de ellos, también en forma cuantitativa. Sin embargo, determinar el criterio de estabilidad de un esquema numérico o estimar precisamente la magnitud de una retroalimentación requiere el uso de técnicas que no pueden describirse en detalle aquí.

Muchas de las referencias citadas en esta obra son recientes, muestra del desarrollo tan rápido del conocimiento. Esta situación también subraya el hecho de que las incertidumbres se encuentran todavía presentes en el tema que nos ocupa, justificando la corriente y activa investigación científica. Estas incertidumbres se han mencionado en diversas ocasiones en el desarrollo del texto, pero el autor nos insiste en que hay que recordar que hay muchos resultados que están muy bien establecidos. No se ha insistido en el desarrollo histórico del campo, pero la climatología está basada en leyes aplicadas con éxito en mecánica, astronomía, termodinámica, electromagnetismo, química,

geología y análisis numérico desde hace varias décadas. Se han expuesto estudios centrados en temas tan importantes como el impacto de cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero o la teoría astronómica de los paleoclimas hunde sus raíces al comienzo del siglo XX, e incluso un poco antes. Las principales conclusiones presentadas en los varios capítulos de este libro son robustas porque están basadas en mecanismos bien entendidos, han sido reproducidas utilizando varias técnicas y se han identificado en numerosos periodos del pasado.

El rango amplio de procesos que tienen que ser explicados en la ciencia del clima, queda reflejado en la diversidad de modelos climáticos. Los modelos complejos deberían usarse para proporcionar la representación más detallada del sistema, sin olvidar que los modelos más sencillos son capaces de describir algunas de las principales características de los modelos complejos; permitiendo proporcionar explicaciones que pueden convencer a audiencias más amplias; quiénes probablemente se sentirían perdidos si se requiriera tratar con toda la complejidad del sistema.

Esta comprensión es un elemento clave porque las decisiones tienen que tomarse basándose en argumentos científicos, en particular, para limitar el impacto de las actividades humanas en el cambio climático futuro y mitigar las consecuencias de los efectos inevitables. Las incertidumbres deberían tenerse en cuenta en cualquier decisión. La meta de los científicos está en reducirlas en la medida de lo posible llevando a cabo nuevas y más precisas observaciones, proponiendo desarrollos teóricos nuevos y mejorando los modelos. Sin embargo, las incertidumbres actuales no deberían constituir un pretexto para evitar la adopción de acciones porque se disponen de argumentos claros y contundentes basados en una ciencia sólida.

En la sección de agradecimientos, Goosse puntualiza que un libro como este se basa en el trabajo de muchos científicos y quiere agradecerles por sus contribuciones y disculparse por no ser capaz de proporcionar muchos detalles de aspectos importantes en el marco de referencia de este estudio introductorio. De forma específica quiere agradecer a las organizaciones, a los editores y a los científicos que le han permitido reproducir su trabajo. El material 'online' ha contado con el apoyo de los Fondos de Desarrollo Pedagógico de la Universidad católica de Lovaina en el marco del proyecto "Réalisation de simulations interactives comme support à l'apprentissage dans le cadre du cours d'introduction à la physique du système climatique et à sa modélisation".

Para acabar, nada mejor que citar las palabras de Anne de Vernal, Université de Québec à Montréal, que suscribo totalmente, recogidas en la contraportada, donde afirma: 'Este es exactamente el libro que me hubiera gustado tener cuando empecé a estudiar el cambio climático, ... bien ilustrado y con un lenguaje suficientemente claro para que los no-especialistas puedan entender la dinámica del sistema climático., proporcionando a la vez pistas sobre aproximaciones o enfoques numéricos y referencias útiles para los especialistas'.

María Asunción Pastor Saavedra