

LIBROS

Predicting Our Climate Future: What We Know, What We Don't Know, And What We Can't Know (Predecir nuestro futuro climático: lo que sabemos, lo que no sabemos y lo que no podemos saber)

DAVID STAINFORTH, 2023. EDITORIAL: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 369 PÁGINAS, PRECIO: 24.80 €, ISBN-13: 978-0198812937.

David Stainforth estudió Física en la Universidad de Oxford, donde adquirió una sólida base en dinámica de sistemas complejos y modelización matemática. Trabajó durante casi una década como consultor en proyectos de energías renovables. Más tarde regresó al ámbito académico para investigar sobre modelización atmosférica y climática, especializándose en el estudio de la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas. Su carrera ha estado vinculada a instituciones de referencia como la Universidad de Oxford, donde fue investigador del Natural Environment Research Council (NERC) y del Tyndall Centre for Climate Change Research, antes de incorporarse a la London School of Economics. La aportación más conocida de David Stainforth fue la creación, junto con el climatólogo Myles Allen, del proyecto *climateprediction.net*, del que fue cofundador y primer científico jefe. El proyecto nació a comienzos de la década de 2000 con una idea innovadora: aprovechar la capacidad de cálculo de miles de ordenadores personales repartidos por todo el mundo para ejecutar simulaciones climáticas de forma colaborativa, siguiendo un modelo similar al utilizado por otros proyectos de computación distribuida. Esta estrategia permitió construir uno de los primeros grandes *ensembles* de simulaciones climáticas, fundamentales para analizar no solo la evolución media del clima, sino también las incertidumbres inherentes a las predicciones. El proyecto se convirtió en el mayor experimento mundial de modelización climática distribuida y marcó un antes y un después en la investigación sobre la incertidumbre climática. Actualmente en la London School of Economics, Stainforth ha ampliado su campo de investigación más allá de la física del clima para estudiar cómo la información científica puede incorporarse eficazmente a la toma de decisiones públicas y privadas.

La idea central de este magnífico libro es que, aunque sabemos con certeza suficiente que el cambio climático causado por el ser humano es real y exige actuar, existen incertidumbres importantes sobre cómo evolucionará exactamente el sistema climático y cuáles serán sus consecuencias concretas para

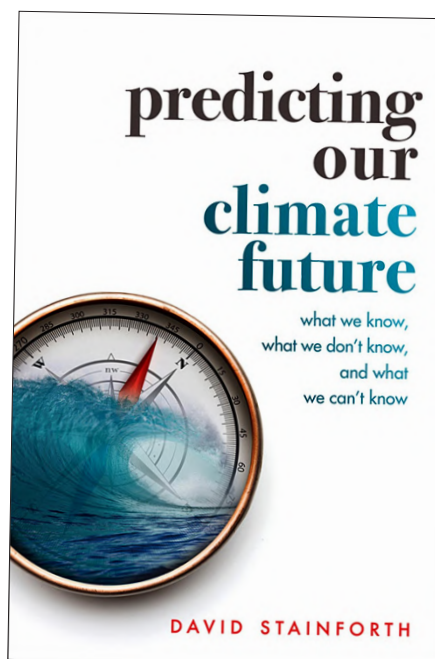
la sociedad. Reconocer la incertidumbre no debilita el mensaje climático, al contrario, hace la ciencia más creíble, conecta mejor con personas de diferentes ideologías, evita presentar falsas certezas, aumenta la confianza pública. La incertidumbre forma parte del conocimiento científico. No significa ignorancia, significa conocer los límites de lo que puede saberse. Lejos de ser una debilidad, comprender esas incertidumbres fortalece la ciencia y mejora la toma de decisiones. Stainforth comienza cuestionando una frase habitual: "la ciencia ya está resuelta; ahora solo queda actuar". Matiza en el libro que, si bien existe evidencia su-

futuro únicamente observando el pasado. El planeta está entrando en condiciones completamente nuevas. En segundo lugar, el sistema climático es extremadamente complejo en el que, atmósfera, océanos, hielo, vegetación, ecosistemas, química atmosférica, etc., interaccionan continuamente y, además, el sistema es no lineal.

Stainforth explica con detalle todo aquello que sabemos con seguridad y robustez sobre las bases físicas del cambio climático, incluyendo el efecto invernadero, el papel del CO₂ – que representa aproximadamente una quinta parte del efecto invernadero –, la gran inercia del sistema climático –que hace que el calentamiento no sea instantáneo y que la temperatura también aumente con fluctuaciones naturales–, las consecuencias que se producirán tales como aumento de temperaturas, cambios regionales, modificación del régimen de precipitaciones, mayor frecuencia de inundaciones e incendios, cambios en la disponibilidad de agua, cambios agrícolas, etc. Hasta aquí existe bastante consenso científico.

Sin embargo, el verdadero problema es el impacto sobre la sociedad. Y esta parte es quizás la idea más original del libro. El problema no son únicamente las inundaciones o las olas de calor sino los aspectos económicos y sociales. Cada desastre obliga a gastar recursos continuamente en reconstrucción, mantenimiento, protección, adaptación. Y este dinero deja de invertirse en educación, sanidad, cultura, igualdad, investigación, bienestar social. Según el autor, el cambio climático actúa y actuará como un drenaje permanente de recursos.

Stainforth discute con detalle las bases de los modelos climáticos y las limitaciones de las proyecciones generadas con ellos. Los modelos no intentan adivinar un futuro único. Lo que hacen es calcular muchas posibles trayectorias que se corresponden con diferentes futuros posibles, en definitiva, una distribución de probabilidades. Insiste Stainforth en que no existe un único futuro sino muchos futuros compatibles con las leyes físicas. Como en todos los sistemas caóticos, incluso un modelo casi perfecto puede acabar alejándose de la realidad con el paso del tiempo: pequeñísi-



ficiente para justificar actuar inmediatamente, la investigación científica está lejos de haber terminado. Además, el cambio climático plantea preguntas completamente nuevas sobre cómo hacer ciencia y obliga a integrar: Física, Matemáticas, Economía, Ciencias sociales, Políticas públicas, etc.

El autor plantea el cambio climático como un reto científico único por dos razones principales. En primer lugar, estamos entrando en un clima nunca visto, con unas concentraciones de CO₂ que han superado cualquier nivel conocido en millones de años y en consecuencia no podemos estudiar el

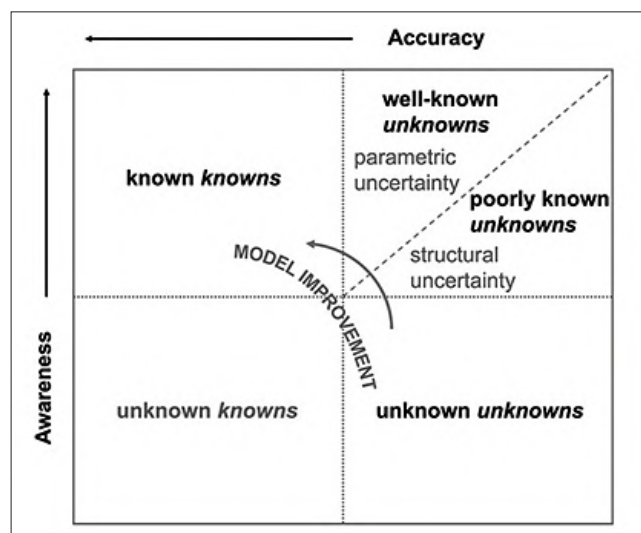
mas diferencias iniciales (efecto mariposa) o diferencias en la formulación de los modelos (efecto polilla) generan grandes diferencias posteriores. Esto desde luego no invalida los modelos sino que simplemente limita aquello que pueden predecir.

Respecto a la pregunta de si podemos confiar en los modelos, la respuesta es sí pero con matices. Los modelos coinciden claramente en aspectos tales como el aumento de la temperatura global, el calentamiento global debido al aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, cuando queremos conocer exactamente qué ocurrirá en una región concreta aparecen mayores diferencias y aumenta la incertidumbre. Hay mucha confianza en las tendencias globales, pero menos en detalles locales.

Cuánto costará realmente el cambio climático representa uno de los mayores problemas actuales en este ámbito. Mientras que algunos economistas estiman pérdidas relativamente moderadas, otros calculan pérdidas enormes. La diferencia entre unos modelos económicos y otros es enorme. La economía aún no ha conseguido representar adecuadamente las consecuencias sociales del cambio climático.

Uno de los aspectos más originales del libro es el uso de la famosa matriz de Donald Rumsfeld —popularizada en una rueda de prensa en 2002 y aplicada a los límites del conocimiento estratégico cuando era Secretario de Defensa de Estados Unidos— para explicar cómo debemos pensar el conocimiento científico sobre el cambio climático. Stainforth le da a la matriz un uso completamente distinto al original: no como herramienta política, sino como un marco epistemológico para clasificar el conocimiento científico. La clasificación se articula en cuatro grandes categorías, que tienen que ver con el subtítulo del libro: *What We Know, What We Don't Know, and What We Can't Know*.

Los *known knowns* (lo que sabemos que sabemos) de Rumsfeld son los hechos bien establecidos por la evidencia científica y sobre los que existe una elevada confianza. Stainforth insiste en que aquí no debe confundirse "conocimiento" con "certeza absoluta". En ciencia nunca existe una certeza matemática, pero sí un conocimiento suficientemente sólido para fundamentar decisiones. Como hemos mencionado más arriba, entre estos conocimientos se incluyen entre otros: el efecto invernadero, el dióxido de carbono como gas



La Matriz de Rumsfeld es un modelo de gestión de riesgos y toma de decisiones que clasifica la información disponible en cuatro cuadrantes basándose en el nivel de consciencia y entendimiento sobre un problema (según Saravanan, 2022)

de efecto invernadero que absorbe la radiación infrarroja, el hecho de que las actividades humanas han incrementado la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, el hecho de que el planeta se está calentando y que el calentamiento continuará mientras sigan aumentando las emisiones, el cambio climático incrementa numerosos riesgos físicos y sociales, etc. Según Stainforth, estas cuestiones están establecidas "más allá de toda duda razonable" y justifican plenamente la necesidad de actuar.

Los *known unknowns* (lo que sabemos que no sabemos) de Rumsfeld son los vacíos de información identificados que debemos investigar o medir. Aquí aparecen las incertidumbres propias de la ciencia climática. Por ejemplo: ¿Cuánto aumentará exactamente la temperatura en una región concreta? ¿Cómo cambiarán determinados patrones de precipitación? ¿Qué impactos económicos tendrá un determinado nivel de calentamiento? ¿Qué medidas de adaptación serán más eficaces? ¿Qué aspectos de los modelos climáticos son suficientemente fiables para responder a determinadas preguntas? Stainforth afirma que gran parte de la investigación actual intenta responder a estas preguntas y delimitar las incertidumbres existentes.

Los *unknown knowns* (lo que no sabemos conscientemente que sabemos) de Rumsfeld se refieren principalmente a cosas que no sabemos o que no entendemos, pero que otros sí pueden. Puede que ni siquiera sepamos que exista conocimiento sobre el tema y desde luego no sabemos cómo podría afectar a nuestro análisis y conclusiones. La información existe y es conocida pero las personas cuyas conclusiones y acciones se verían modificadas por

ella no la conocen. Esto afecta tanto a los investigadores y académicos como a los responsables políticos y al público en general. Aquí es donde la limitada capacidad para llevar a cabo investigaciones multidisciplinares y complejas, como es la referida al cambio climático, frena nuestra comprensión. El libro de Stainforth se centra principalmente en esta categoría.

Los *unknown unknowns* (lo que no sabemos que no sabemos) se refiere a los fenómenos o procesos que todavía ni siquiera sabemos que existen o cuya importancia

aún no hemos identificado, tales como nuevos mecanismos climáticos, interacciones inesperadas entre sistemas naturales, respuestas sociales imprevisibles, innovaciones tecnológicas disruptivas, etc. No es posible investigarlos directamente porque aún no sabemos formular las preguntas adecuadas. No representan fallos de la ciencia, sino oportunidades que es posible que surjan para mejorar el conocimiento.

Las denominadas por otros autores sorpresas climáticas (*climate surprises*) constituye un buen ejemplo para entender los límites de la matriz de Rumsfeld aplicada por Stainforth. La mayor parte de las sorpresas de las que habla actualmente la comunidad científica no son completamente desconocidas. Sabemos que pueden ocurrir, aunque no sepamos cuándo ocurrirán, con qué probabilidad, qué magnitud alcanzarán, qué consecuencias exactas tendrán. Por ejemplo, un colapso de la circulación meridional del Atlántico (AMOC), una pérdida acelerada de la capa de hielo de la Antártida Occidental, una liberación importante de carbono del permafrost, cambios abruptos en el Amazonas. Estos fenómenos suelen denominarse *tipping points* o puntos de inflexión. Precisamente porque los conocemos, aunque exista una gran incertidumbre sobre ellos, podrían clasificarse como *known unknowns*. Existen, sin embargo, otro tipo de sorpresas mucho más profundas. Serían, por ejemplo, procesos que no aparecen en los modelos actuales, no forman parte de nuestras hipótesis o ni siquiera sabemos que podrían existir. Por ejemplo, imaginemos que dentro de veinte años se descubre un desconocido mecanismo de interacción entre las nubes tropicales y determinados tipos de aerosoles que modifica significativamente la sensibilidad climática. Antes de descubrirlo, ni siquiera sabíamos que había que buscar ese mecanismo. En este caso sería un auténtico *unknown unknown*, como lo fue en su



→ momento el papel de ciertas sustancias, los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), en la destrucción de la capa de ozono.

Stainforth, siendo él mismo un experto en modelos climáticos, dedica una parte sustancial del libro a hablar de las limitaciones de los modelos climáticos. Su objetivo en estas discusiones no es ni mucho menos desacreditar los modelos, sino utilizarlos de forma más rigurosa y honesta. En primer lugar afirma que los modelos climáticos no son el sistema climático. Al contrario de lo que se lee con frecuencia recientemente, un modelo climático no es una copia digital de la Tierra sino una representación matemática construida a partir de leyes físicas, aproximaciones numéricas, parametrizaciones e hipótesis sobre numerosos procesos. En consecuencia, nunca podemos decir que un modelo puede ser completamente verdadero, siempre será una simplificación de la realidad. Podemos decir que Stainforth es un firme defensor de la frase atribuida al estadístico George Box "todos los modelos son erróneos, pero algunos son útiles". En definitiva, los modelos climáticos no son ni pueden ser reproducciones fieles del planeta, sino herramientas científicas para explorar escenarios. El autor insiste repetidamente en la utilidad de los modelos para producir distribuciones de probabilidades, no futuros únicos. En realidad, cada simulación representa únicamente una posible evolución compatible con las leyes físicas, las condiciones iniciales, las aproximaciones introducidas y los parámetros elegidos. Lo verdaderamente importante es el conjunto de simulaciones que permiten estimar probabilidades, rangos de incertidum-

bre, riesgos, etc. No todos los modelos están equivocados de la misma manera. Muchos comparten ecuaciones, parametrizaciones, hipótesis, etc. Por ello, el acuerdo entre modelos no siempre implica una confirmación independiente. Del mismo modo que el desacuerdo tampoco significa necesariamente que todos sean incorrectos. Lo importante es comprender por qué difieren.

Quizás la gran pregunta filosófica que plantea el libro es ¿cómo de parecido debe ser un modelo a la realidad? ¿Hasta qué punto debe parecerse un modelo al mundo real para poder confiar en sus predicciones? Sorprendentemente, la ciencia todavía no posee una respuesta general. El autor, utilizando ejemplos muy simples de sistemas caóticos, muestra que dos modelos casi indistinguibles pueden producir distribuciones de probabilidad completamente diferentes tras cierto tiempo de simulación. Por lo tanto, parece que la similitud entre modelo y realidad no garantiza la fiabilidad de las predicciones.

No existe un único concepto de "modelo bueno". Debemos evaluar qué preguntas puede responder cada modelo. Un modelo puede ser excelente para responder unas preguntas y poco útil para otras. La evaluación de un modelo debe hacerse siempre respecto a la pregunta científica planteada. Por ejemplo, un cierto modelo podría estimar correctamente la tendencia global del calentamiento, pero quizá no pueda responder con suficiente precisión a cómo cambiará la lluvia en una cuenca concreta. El objetivo de los modelos no es eliminar las incertidumbres, que proceden de diversas fuentes (sistema caótico, conocimiento incom-

pleto, procesos no observables, imposibilidad de validar estados climáticos futuros, etc.), sino comprenderlas mejor. A pesar de lo dicho, la utilidad de los modelos es enorme ya que muestran una notable robustez respecto a cuestiones fundamentales tales como la elevada confianza en que el incremento de CO₂ provoque un desequilibrio energético, o que la temperatura media global aumente o que muchas regiones experimenten cambios importantes. Las mayores incertidumbres aparecen cuando descendemos a escalas regionales o intentamos cuantificar impactos específicos.

En definitiva, Stainforth insiste en que los modelos climáticos no son "oráculos" capaces de predecir el futuro con exactitud, sino instrumentos científicos para explorar futuros plausibles y gestionar el riesgo bajo incertidumbre. Esta visión atraviesa todo el libro y constituye una de sus principales aportaciones tanto a la ciencia del clima como a la filosofía de la modelización científica. El libro contiene muchas y muy apasionantes discusiones sobre la investigación del cambio climático, sobre los modelos como representación del sistema climático, sobre la forma de entender la investigación en un mundo fuertemente dominado por las simulaciones. Aunque el libro está dirigido a un público muy amplio, posiblemente sean los investigadores en el desarrollo y aplicación de los modelos climáticos quienes –saltándose las partes introductorias dedicadas a explicar nuestra actual comprensión de las bases físicas del cambio climático– más disfruten de las disquisiciones y reflexiones que el autor plantea en el libro.

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO

El libro de las nubes: manual práctico y teórico para leer la atmósfera

VINCENZO LEVIZZANI. GUADALMAZÁN, 2025 283 PÁGINAS PRECIO: 19,95 €

Vincenzo Levizzani es conocido en Italia como *il signore delle nuvole* («el señor de las nubes»), sobrenombre que refleja tanto su pasión como su profundo conocimiento de estas formaciones atmosféricas.

El libro resulta especialmente recomendable para quienes deseen comprender qué ocurre en el interior de las nubes sin aspirar a convertirse en expertos en física de nubes, pero sin conformarse tampoco con ser meros observadores. Su lectura es amena y accesible, y proporciona las claves necesarias para entender los procesos que tienen lugar en ellas.

La traducción al español es rigurosa en el tratamiento de los conceptos propios de la física de nubes. Esta tarea no siempre resul-

ta sencilla, debido a la riqueza y complejidad del vocabulario empleado para describir los fenómenos atmosféricos. Algunos términos ni siquiera cuentan con una traducción plenamente aceptada en español. Es el caso de *groupel*, utilizado para designar partículas de hielo cuyo diámetro no alcanza los cinco milímetros necesarios para que puedan considerarse propiamente granizo. Resulta llamativo que exista un término específico en catalán, pero no en castellano, circunstancia que ha llevado a traducir este hidrometeoro como «granizo blando» o «nieve granulada».

Desde el primer momento, al consultar el índice, se aprecia el orden con el que se presentan prácticamente todas las cuestiones

que pueden interesar a quien desee conocer qué sucede en el interior de las nubes, con independencia de su tipo. La obra se estructura en ocho capítulos, un epílogo y un glosario especialmente útil para los lectores menos familiarizados con la física de nubes. A lo largo de sus páginas, el autor los guía en la comprensión de los conceptos fundamentales mediante una acertada combinación de ciencia y observación, utilizando siempre un lenguaje claro y accesible.

El libro comienza con un capítulo titulado «*Nubole y nubi*», una distinción que posee pleno sentido en italiano, aunque no tanto en castellano. El autor emplea ambos términos para diferenciar entre *nubole*, palabra propia de los

poetas y de un lenguaje más evocador o cotidiano, y *nubi*, más habitual en la literatura científica y utilizada históricamente por navegantes, aviadores, militares y hombres de ciencia.

Levizzani aprovecha esta distinción para analizar la influencia de las nubes en el estado de ánimo y en la cultura humana. Su recorrido comienza en la Biblia, con la referencia al arcoíris del Génesis, y continúa por la pintura, la poesía y la literatura en general. Este enfoque constituye uno de los aspectos más originales del libro, pues rara vez se encuentra en otras obras concebidas como manuales sobre las nubes.

A partir del segundo capítulo comienza un análisis más formal que, sin embargo, no pierde su carácter descriptivo y didáctico. El autor parte de un principio aparentemente obvio: no existen dos nubes iguales. A continuación, expone la clasificación de Luke Howard y describe los diferentes tipos de nubes. No pretende reproducir un atlas, aunque la obra incluye numerosas fotografías, tanto en blanco y negro como en color. También presenta un fenómeno poco frecuente y difícil de observar: las nubes con *cavum*, conocidas en inglés como *fallstreak holes*. Se trata de altocúmulos en los que se ha producido precipitación en una zona concreta, lo que da lugar a una abertura con apariencia de agujero.

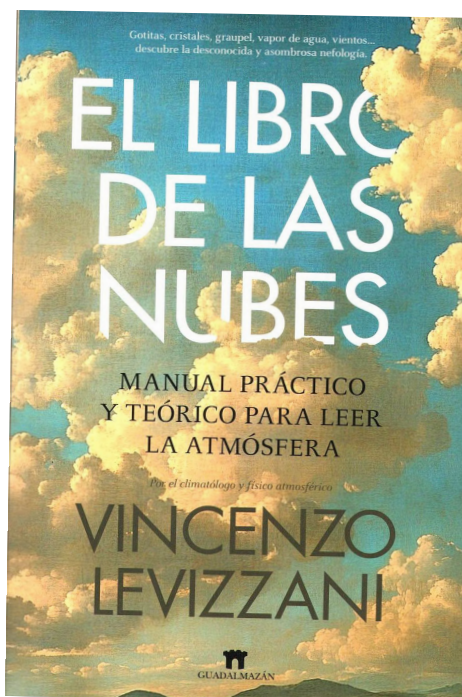
En el capítulo siguiente, el autor se centra en la formación de las nubes. Aborda los distintos tipos de niebla e incorpora algunas anécdotas personales. Su descripción abarca desde las nubes más modestas, como los cúmulos *humilis*, hasta las formaciones más intensas asociadas a las tormentas y los ciclones. El capítulo concluye con el análisis de unas nubes relativamente poco conocidas: los estratocúmulos oceánicos. Aunque se trata de formaciones muy frecuentes y extensas que desempeñan un papel importante en la regulación de la radiación, todavía no se conocen por completo los procesos que intervienen en su formación y evolución.

El capítulo 4 propone un recorrido por los hidrometeoros y sus procesos de formación. El análisis comienza con el papel que desempeñan los aerosoles y continúa con lo que el autor denomina «el zoológico del hielo atmosférico», en el que incluye el *graupel*, la lluvia engelante —junto con los peligros asociados a este fenómeno— y, finalmente, el granizo.

El capítulo 5 lleva por título «Llueve, pero los gobiernos no tienen nada que ver». En él, el autor se centra en los diferentes tipos de precipitación que pueden generar tanto las nubes cálidas como las frías. Asimismo, advierte del peligro que representan los procesos de

formación de hielo en los bordes de ataque de las alas de los aviones e incluye algunos ejemplos de accidentes aéreos provocados por este fenómeno. El capítulo finaliza con una breve descripción de la formación del granizo y de los rayos, así como de las diferencias entre las nubes que producen precipitación y aquellas que no llegan a generarla.

El capítulo 6 examina los ambientes y mecanismos estudiados por la física de nubes. Para ello, el autor presenta los resultados de diversos experimentos de laboratorio, además de observaciones realizadas mediante satélites y durante campañas desarrolladas con plataformas aéreas de investigación, conocidas por las siglas PAI. En este apartado se echa en falta, no obstante, una mayor presencia de los resultados obtenidos mediante plataformas europeas.



El capítulo 7, titulado «Meteorología y nubes», se ocupa de la interpretación de las nubes como herramienta para la predicción del tiempo. El autor explica cómo los observadores del cielo pueden extraer de ellas información útil, aunque advierte de los riesgos de formular pronósticos sin tener en cuenta las limitaciones inherentes a una predicción basada únicamente en su apariencia. Esta reflexión le permite presentar varios ejemplos de posibles confusiones.

Levizzani tampoco elude las limitaciones de la propia meteorología, que no siempre puede ofrecer respuestas satisfactorias y suficientemente detalladas. A partir de esta cuestión, describe los modelos numéricos de predicción y el considerable avance que han supuesto para la mejora de las previsiones

meteorológicas. Este capítulo puede resultar especialmente interesante para quienes deseen comprender cómo se elaboran los pronósticos y cómo varía su fiabilidad en función de la escala temporal considerada.

El último capítulo, el octavo, está dedicado al cambio climático y a la influencia que ejercen las nubes sobre él. El autor diferencia entre los efectos de las nubes altas y los de las nubes bajas, y explica de qué manera unas y otras pueden favorecer el calentamiento o el enfriamiento del sistema climático. Como no podía ser de otro modo, se detiene en las dificultades que encuentran los modelos climáticos para incorporar adecuadamente todos los procesos relacionados con las nubes. El capítulo ofrece una excelente exposición tanto de los aspectos que se conocen con cierto detalle como de las incógnitas aún pendientes y de los retos a los que se enfrenta actualmente la ciencia.

Sin adentrarse excesivamente en la cuestión, Levizzani aborda también la denominada siembra de nubes, una técnica que pretende modificar o intensificar determinados procesos microfísicos con el propósito de favorecer la formación de precipitación. Esta referencia permite relacionar los intentos contemporáneos de intervenir sobre las nubes con las antiguas creencias acerca del control humano de los fenómenos atmosféricos.

En este contexto, el autor cita la célebre obra *Contra insulsam vulgi opinionem de grandine et tonitruis* (*Contra la necia opinión del vulgo sobre el granizo y los truenos*), tratado escrito por Agobardo de Lyon a comienzos del siglo IX. En él se combaten las creencias populares que atribuían a determinadas personas, conocidas como «tempestarios», la capacidad de provocar tormentas y granizadas mediante encantamientos. El texto constituye uno de los primeros y más firmes alegatos medievales contra la superstición y la interpretación mágica de los fenómenos meteorológicos.

La obra finaliza con un vocabulario que el autor presenta como destinado «a los cazadores de nubes», un índice de siglas que el lector agradecerá y una selección de páginas web que pueden resultar de interés.

En suma, se trata de un libro especialmente adecuado para quienes sientan curiosidad por saber qué sucede en el interior de las nubes y quieran aprender a observarlas y comprenderlas un poco mejor. Levizzani consigue acercar al lector a la física de nubes con rigor científico y, al mismo tiempo, de una manera amena, accesible y entretenida.

JOSÉ LUIS SÁNCHEZ GÓMEZ