

El clima de tus hijos

Cómo prepararte para la emergencia climática

Francisco J. Tapiador

N E X T —
D O O R . . .
P U B L I S H E R S

© Del Autor:
Francisco J. Tapiador

© Next Door Publishers

Primera edición: abril de 2021

ISBN: 978-84-122556-4-5
ISBN eBook: 978-84-122556-5-2
DEPÓSITO LEGAL: DL NA 99-2021

Reservados todos los derechos. No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea mecánico, electrónico, por fotocopia, por registro u otros medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del *copyright*.

Edición cofinanciada por la Unión Europea a través de Fondo Europeo de Desarrollo Regional al Grupo de Investigación de Ciencias de la Tierra y del Espacio (CITE) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

Next Door Publishers S.L.
c/ Emilio Arrieta, 5, entlo. dcha., 31002 Pamplona
Tel: 948 206 200
E-mail: info@nextdooreditores.com
www.nextdoorpublishers.com

Impreso por Liberdúplex
Impreso en España

Diseño de colección: Ex. Estudi
Autora del sciku: Laura Morrón
Dirección de la colección: Laura Morrón
Editora: Laura Morrón
Corrección y composición: NEMO Edición y Comunicación

Colección
El Café Cajal



Índice

Pró- logo

13

Capítulo 1. El clima de la Tierra 17

Capítulo 2. ¿Qué le está pasando al planeta? 41

Capítulo 3. ¿Qué pruebas hay del cambio climático? 51

Capítulo 4. Ciencia y escepticismo
69

Capítulo 5. ¿Qué va a pasar con el clima? 95

Capítulo 6. Las nubes y la lluvia 129

**Capítulo 7. Catástrofes y extremos
climáticos** 155

**Capítulo 8. La emergencia
climática** 165

Capítulo 9. ¿Qué podemos hacer?
179

Capítulo 10. Los más vulnerables
215

Capítulo 11. El camino por recorrer
223

Capítulo 12. A título personal 235

Para
saber
más

*Para mi querida Paula,
esperando dejarte un planeta mejor.*

Prólogo

Este ensayo presenta los elementos básicos del clima de la Tierra y discute algunas cuestiones clave de su cambio reciente. El enfoque es integrador, ya que el tema se aborda tanto desde el lado de las ciencias naturales como desde el de los saberes sociales y las humanidades. Y es que las bases físicas del clima pertenecen casi en su totalidad al primer ámbito, en concreto a la física de la Tierra, mientras que las estrategias de mitigación y adaptación son el campo de trabajo natural de una ciencia, la geografía, cuyo objetivo es el análisis de las relaciones recíprocas en el espacio entre los seres humanos y el medio ambiente.

Espero que el libro sirva tanto para introducirse de una manera rápida en el tema del clima como para persuadir a las personas sensatas que crean que el cambio climático no es un problema de que estamos ante una verdadera emergencia planetaria que puede tener graves consecuencias para nuestra forma de vida y de que atajarlo no solo es necesario, sino que puede ser beneficioso para la economía y para la felicidad de las personas. Este último aspecto creo que es novedoso, puesto que se suele enfatizar más la amenaza del cambio climático que las oportunidades que abre para cambiar un presente imperfecto.

La tesis central del ensayo es que las acciones que hay que acometer ahora mismo para afrontar el cambio climático no solo no tienen por qué perjudicar nuestro bienestar, sino que cuentan con un claro potencial para cambiar el mundo a mejor y sin que tomarlas suponga hipotecar nuestro crecimiento económico ni olvidar otras medidas que pudieran parecer más eficaces o urgentes para el desarrollo humano. La lucha

«Seamos sensatos: ¿a quién le gusta respirar aire contaminado, sufrir un golpe de calor o beber agua sucia? A nadie. No seamos gruñones ni vagos, y pongámonos a trabajar para dejar un planeta decente a nuestros hijos. No tenemos que renunciar al bienestar y al desarrollo. Tan solo hemos de cambiar la forma de lograrlos».

contra el cambio climático y la mejora de las condiciones de vida de la humanidad son dos caras de la misma moneda. Atajar las consecuencias de los cambios en el clima producidos por la actividad humana y satisfacer los objetivos de desarrollo sostenible —que, como se verá, son aspiraciones con las que cualquier persona sensata estaría de acuerdo— no son solo acciones compatibles y necesarias, sino que están entrelazadas. Después de todo, como le comenté a mi editora en una de esas conversaciones que se intercalan en cada capítulo, ¿quién quiere respirar aire contaminado, no poder salir a la calle porque hace demasiado calor, no disponer de agua potable para beber o sufrir una tormenta que le destruya la casa? Nadie. Como tampoco nadie en su sano juicio puede disfrutar de un alto grado de bienestar y comodidad personal mientras a su alrededor otros pasan hambre y necesidades.

Francisco J. Tapiador
Junio de 2020

Capítulo 1

El clima de la Tierra

El clima de nuestro planeta está cambiando a un ritmo sin precedentes. La causa principal es la emisión de ciertos gases que generan las actividades humanas. Como consecuencia de esas emisiones, hemos llegado a un estado de emergencia climática que va a trastornar nuestra forma de vida. ¿Cómo sabemos esto? ¿Qué pruebas hay de ello? ¿Qué va a pasar exactamente? Este libro trata de las respuestas a estas preguntas y explica las soluciones que se han propuesto para afrontar un asunto que el ex secretario general de Naciones Unidas, Kofi Annan, describió hace unos años como «el problema emergente más importante de la humanidad».

El agua y la vida

¿Por qué son tan importantes el clima y su cambio? La razón más inmediata, la que le viene a la cabeza a alguien que se pare a reflexionar sobre ello, es que los humanos dependemos del estado de la atmósfera para muchas de nuestras actividades. No solo nos tiene que dar el sol para no enfermarnos, sino que lo que nos nutre —los alimentos, el agua y el aire— depende a su vez de cómo cambia el tiempo a lo largo del año.

En el caso de la lluvia esto es evidente. Tenemos que beber agua y la vida a nuestro alrededor necesita recibir de forma regular su cuota habitual de precipitación. Si deja de llover en primavera, los cultivos que requieren agua para germinar morirán y no ten-

dremos cosechas. Si además aumenta la temperatura en las montañas, los prados estarán menos húmedos, dejarán de ser rentables y eso hará que se resienta la ganadería. Si no llueve en primavera y en otoño, los embalses no dispondrán de agua durante el largo y seco verano que define el tipo de clima mediterráneo. Si la sequía dura más de lo normal, es decir, si hay una sucesión de años en los que llueve poco, algunas especies de árboles no podrán resistirlo y se secarán, haciendo que el suelo sea cada vez más pobre y facilitando la destrucción del paisaje por los incendios y la aridez. Y si hay más episodios de lluvias extremas después de un período seco, aumentarán las inundaciones, se arrasarán casas, carreteras, ferrocarriles y equipamientos. La lista de catástrofes potenciales es muy larga ya solo considerando una variable, la precipitación.

Es un hecho también que tanto las sociedades humanas desde sus comienzos como nuestra forma de vida en este momento de la historia están adaptadas a un clima más o menos estable. En la parte del mundo en la que vivimos, en las llamadas latitudes medias, tenemos estaciones y el tiempo cambia a lo largo del año. No obstante, a pesar de las variaciones, se observa un patrón estable alrededor del cual giran nuestras vidas. En el centro y en el norte del país, en verano hace calor y llueve menos que en otoño, y en invierno hace frío. En el mundo mediterráneo el tiempo varía bastante de un año a otro, con precipitaciones irregulares y notables cambios estacionales, pero aun así la pauta es predecible y a lo largo de las generaciones las plantas y los animales se han adaptado a ella. O dicho con más precisión: los genes que se han transmitido han sido aquellos que proporcionan una mejor adecuación a ese ambiente y a las relaciones que se establecen en él. Incluso en las zonas tropicales, de clima más monótono a lo largo del año, o en el ecuador, donde los días son casi indistinguibles, las especies que han sobrevivido han sido aquellas que mejor se han adaptado a un ciclo diario de calor, evaporación intensa y lluvia regular.

Hay numerosos ejemplos cercanos de las adaptaciones de las especies actuales al clima. Tenemos por ejemplo la sabina, un árbol extraordinario al que le basta con un poco de agua de vez en cuando para resistir a pleno sol sequías prolongadas. De hecho, si no viviera en condiciones hostiles, habría otras especies más vivaces que le quitarían su espacio. El haya es otra especie interesante para los climatólogos. Prospera al otro lado del espectro. Es un árbol adaptado a ambientes sombríos de mucha humedad, pero le sucede algo parecido a lo que le pasa a la sabina: si las condiciones cambiaran, otras especies mejor adaptadas le arrebatarían su nicho, esa combinación de elementos ambientales que una especie explota mejor que otras. Con los cultivos también sucede. El trigo, el olivo y la vid se plantan en ciertos lugares en función de cuándo llueve, de cuánto y de cuáles son allí las temperaturas máximas y mínimas a lo largo del año. Cualquier cambio atmosférico afecta a esta «trilogía mediterránea» de los geógrafos: demasiada lluvia arruinará el trigo, una helada tardía acabará con la cosecha de aceituna (y quizá con el árbol) y afectará a la vid y demasiados días cubiertos o demasiada agua no contribuirán a lograr un buen vino.

Efectos paradójicos e inesperados

¿Heladas tardías? ¿No se está calentando el planeta? Sí, se está calentando, pero uno de los efectos paradójicos de ese hecho es que el clima de la Tierra puede acabar haciendo cosas muy extrañas, como veremos con más detalle en los siguientes capítulos. El clima es un sistema de relaciones mutuas y sus partes interaccionan de forma a veces paradójica. La fuente de energía primaria, lo que hace moverse a la atmósfera y al océano, es el Sol. La Luna también influye en las mareas; pero aquí estamos hablando de las grandes corrientes marinas, no de esos movimientos periódicos. Sin la energía solar, nuestra vida

sobre el planeta no sería posible. Pero el Sol es solo el motor, el principio de un ciclo de varias etapas que moviliza enormes cantidades de masa y materia. El cómo se reparte la energía que nos llega de nuestra estrella depende de muchas otras cosas: de cómo de inclinado está el eje de rotación del planeta (esto es lo que origina las estaciones), de cuánta agua hay circulando por la atmósfera o de si está en forma de gas, líquida o sólida. También depende de cómo se almacena el calor en los mares, dónde y a qué profundidades. Y de la cantidad de hielo acumulado sobre la tierra y de las corrientes submarinas profundas. Y, además, de las actividades humanas. La proporción del suelo que ocupamos, lo que ponemos en cada sitio (cultivos, fábricas, edificios) y, sobre todo, la materia que emitimos a la atmósfera alteran el clima a veces de maneras muy sutiles, pero muy profundas.

El elemento humano está cambiando las redes de relaciones que han mantenido el clima relativamente estable en los últimos cientos de años. Enseguida explicaré en detalle el proceso, pero uno de los elementos del clima que más se ha visto afectado por nuestra civilización ha sido la temperatura de las capas bajas de la atmósfera.

La atmósfera se divide en capas en función de cómo varía la temperatura según ascendemos. La capa más cercana al suelo, en la que la temperatura normalmente disminuye con la altura, es la troposfera. En nuestras latitudes llega hasta aproximadamente los 12 km de altura. Luego está la estratosfera, en la que, a causa del ozono, la temperatura aumenta según seguimos subiendo. A unos 50 km, la troposfera da paso a la mesosfera, en la que la temperatura vuelve a descender y donde se alcanza el mínimo en el tope. Viene luego, a partir de los 85 km, la termosfera, que acaba a unos 600 km, comienzo de la exosfera, que es la capa que se extiende hasta una distancia convencional de 10 000 km. Los satélites de observación de la Tierra se mueven en la termosfera.

Con todo esto, hay que decir que la atmósfera es increíblemente delgada comparada con el resto de la Tierra. El 99 % de su masa

está en los primeros treinta kilómetros. Si todo el planeta fuera del tamaño de una pera, el grosor de la atmósfera equivaldría solo al de su piel.

Hay varios gases emitidos por los humanos, como el dióxido de carbono o el metano, que atrapan la radiación reemitida por la Tierra, lo cual calienta el aire y después el océano. El problema es que ese proceso, que ha ocurrido siempre, está sucediendo ahora mismo a un ritmo cada vez mayor. Luego comentaré algo sobre las causas, pero que el cambio climático está ocurriendo y está causado por las actividades humanas más allá de la duda razonable es una de las conclusiones principales del quinto informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) y lo será del sexto. Aunque el consenso científico no sea un valor absoluto de calidad, en ausencia de propuestas alternativas contrastables continúa siendo mucho más razonable aceptarlo que no hacerlo.

Los efectos del calentamiento global son cada vez más evidentes y aparecen ahora en lugares en los que no habríamos reparado hace unos años. Veremos también más adelante algunos impactos concretos sobre la flora y la fauna, pero hay ejemplos curiosos en ámbitos insospechados. Por ejemplo, en el sector aeronáutico.

El cambio climático está afectando a la navegación aérea. Los viajes en avión son cada vez más incómodos debido al aumento de la turbulencia que genera el calentamiento. ¿Qué consecuencias tiene esto? No son solo pequeñas molestias para el sueño de los pasajeros, un poco de traqueteo durante el viaje o algún zumo de tomate que se vierte. (¿Por qué zumo de tomate? Porque está estudiado que el zumo de tomate sabe mejor cuando lo tomamos allá arriba y que por eso solemos pedirlo¹. En las condiciones ambientales de ruido de un viaje en avión somos menos sensibles

1. SPENCE, C., MICHEL, C., SMITH, B., «Airplane noise and the taste of umami», *Flavour*, 2014, vol. 3, núm. 2, <http://dx.doi.org/10.1186/2044-7248-3-2>

a los sabores dulce, amargo, salado y ácido, y más al sabor jugoso, el denominado *umami*. De ahí la percepción de los asistentes de vuelo de que hay gente que no acostumbra a pedirlo en tierra a la que, no obstante, se le antoja un zumo de tomate o un *bloody mary* durante el vuelo). La turbulencia incrementa el riesgo de las operaciones aeronáuticas y, de hecho, se piensa que los fenómenos meteorológicos severos están detrás de varios accidentes en los últimos años, como por ejemplo el del Air France 447 que salió de Río de Janeiro el 1 de junio de 2009 y que nunca llegó a París. El problema es, de hecho, global y afecta a la mayoría de los aspectos esenciales de la navegación aérea. Las rutas tradicionales están teniendo que rediseñarse para adaptarse a las nuevas condiciones de la atmósfera, de manera que se ahorre en tiempo y combustible y se gane en seguridad. El asunto del cambio climático incide también sobre el propio diseño de los aparatos y de la instrumentación, que incluye nuevas necesidades de datos en tiempo real y de visualización meteorológica en las cabinas del futuro. Este es solo un ejemplo, y no de los más conocidos, de la multitud de transformaciones que está provocando ese cambio climático tan rápido que experimentamos desde hace unos años.

¿Qué es el clima?

Para explicar adecuadamente lo que le está pasando al clima, primero tenemos que definirlo. Vamos a llamar *clima* a los valores medios del tiempo atmosférico a lo largo de varias décadas². Es

2. El uso de la media es una simplificación. En general, el clima se puede caracterizar con la ayuda de toda una serie de estadísticos que incluyen varios *momentos* de las distribuciones de probabilidad (varianza, sesgo, curtosis, etc.), además del uso de otras maneras de caracterizar las secuencias, como armónicos o *wavelets*. Pero la media es más que suficiente para explicar los conceptos básicos.

decir, al tiempo que se espera en una época determinada en un lugar. Si estamos en León en octubre, puede que mañana llueva o que no lo haga, pero basándonos en lo que ha pasado en los últimos treinta años, esperamos sin duda que llueva en algún momento del mes, porque octubre en León es un mes generalmente lluvioso. Es posible que un octubre determinado, por ejemplo, el de 2019, sea más seco de lo normal. Pero a largo plazo, si el clima no estuviera cambiando, esperaríamos octubres lluviosos (y agostos secos) en León.

Si esto varía de alguna manera, si los octubres en León dejan de ser lluviosos, es cuando diremos que el clima ha cambiado. En cambio, el tiempo atmosférico, el estado de la atmósfera en un momento determinado, es mucho más variable que el clima. El tiempo cambia de un día para otro y es muy difícil de predecir. Sin embargo, los valores medios de la temperatura, la lluvia o el viento han permanecido más o menos iguales durante décadas y definen tanto el carácter ambiental y agrario de una región como el conjunto de las actividades humanas que se dan en ella. Cuando sacamos del armario la ropa de verano o de invierno, estamos respondiendo a lo que sabemos del clima, no del tiempo. Quizá no sepamos qué tiempo va a hacer el próximo 22 de diciembre, pero si vivimos en León, ya intuimos que en nuestro armario de diciembre tiene que haber guantes, gorro, un abrigo y un paraguas.

Tipos de clima y climatologías

Para poder definir el clima en un lugar, y sus cambios, hay que empezar por darle un nombre. Esto se denomina *caracterizarlo* y se hace casi siempre a partir de dos variables básicas: la precipitación y la temperatura. Conociendo las máximas y las mínimas de ambas a lo largo de treinta años, la precipitación en el mes más frío, en el más cálido y

las diferencias entre unas y otras, podemos hacer una clasificación de ese clima y nombrarlo. Así, tras hacer las cuentas correspondientes, podemos concluir que Siberia se caracteriza por un clima subártico, de inviernos fríos y largos y veranos cortos y frescos, que llamamos «Dfc», mientras que el tipo de clima de Sicilia es un «mediterráneo de veranos calientes» (clima «Csa»). Esto es lo que tradicionalmente han hecho los geógrafos desde que Vladimir Köppen propuso su sistema en 1844.

Pero también podemos definir el clima de una manera puramente cuantitativa, como un conjunto de números, como si fuera un código de barras, y hablar —aplicando un cierto abuso del lenguaje— de «climatologías» de la precipitación, de la temperatura o del viento. El conjunto es lo que llamamos «el clima», mientras que cada una de ellas se conoce como «la climatología (de la variable X)» y sirve para una cosa: los científicos que se dedican a estudiar los cultivos prefieren unas climatologías más centradas en la evaporación, mientras que a otros que trabajan con bosques les resuelve mejor su trabajo las que utilizan los rangos de temperatura y la altitud. Los que diseñan parques eólicos en el océano necesitan sin embargo la climatología de vientos medios y la de rachas de viento, y los que se encargan del suministro de agua potable emplean climatologías de precipitación, ya sea de lluvia o de nieve.

Las climatologías cualitativas tipo Köppen tienen la ventaja de que son una especie de resumen, de etiqueta del clima, pero resultan poco precisas y son muy sensibles a errores en los datos. Las climatologías cuantitativas son mucho más precisas a la hora de evaluar el cambio climático, lo cual no quita para que de vez en cuando hagamos el ejercicio de estilo de ver qué pasaría con las climatologías cualitativas en el futuro³.

3. Como hicimos en: TAPIADOR, F. J., MORENO, R., NAVARRO, A., «Consensus in climate classifications for present climate and global warming scenarios», *Atmospheric Research*, 2019, vol. 216, pp. 26-36, <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.017>; y en TAPIADOR, F. J., MORENO, R., NAVARRO, A.,

He dicho antes que una climatología son los valores medios del tiempo atmosférico a lo largo de un período de treinta años. Específicamente, para calcular la climatología de la temperatura de los eneros en Barcelona, lo que hago es sumar los treinta valores de la temperatura media de enero en 1961, 1962, etc., hasta el año 1990, y dividir entre treinta. ¿Por qué utilizo tantos años? ¿No valdría con cinco o seis? Lo cierto es que no, porque el clima de la Tierra varía de forma natural en períodos tan cortos. Los famosos períodos de siete años de sequía o los ciclos de heladas tienen una frecuencia menor de una década. Si utilizáramos un lustro, cinco años, para calcular la climatología de la temperatura en Barcelona, descubriríamos que esta iba a depender de si escogemos 1961-1965 o 1971-1975 como período de referencia. En el primero de los casos quizá subestimáramos la tendencia a largo plazo, mientras que en el segundo quizá la sobreestimáramos.

Para hacerlo bien necesitamos períodos más largos, que comprendan varias ocurrencias de un fenómeno periódico. ¿Cómo de largos? Al menos lo suficiente para tener en cuenta los ciclos más largos, como el famoso fenómeno de El Niño. El estándar son treinta años. Podríamos utilizar más, cincuenta u ochenta, pero el período de treinta es un mínimo razonable que nos asegura que tendremos datos fiables y que evitaremos las distorsiones que podría producir incluir pocos ciclos cortos.

Simular el clima no es igual que predecir el tiempo

Una pregunta habitual que nos hacen a los que nos dedicamos a esto es que cómo es posible que podamos hablar con tanta se-

SÁNCHEZ, J. L., GARCÍA-ORTEGA, E., «Climate classifications from regional and global climate models: Performances for present climate estimates and expected changes in the future at high spatial resolution», *Atmospheric Research*, 2019, vol. 228, pp. 107-121, <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.022>

«El clima de la Tierra no ha sido nunca igual, pero los impactos que ha producido la actividad humana son tan enormes que lo que antes cambiaba en siglos ahora está cambiando en años. Y esto es una complicación muy seria para nuestra forma de vida. Pero, sobre todo, va a ser un problema brutal para nuestros hijos».

guridad del clima del futuro si no somos capaces de predecir si mañana va a llover.

La respuesta es que, bueno, en primer lugar, sí somos capaces de saber con bastante precisión si mañana va a llover. El mejor modelo de predicción del tiempo que tenemos hoy, el del Centro Europeo de Predicción a Corto y Medio Plazo, acierta casi siempre el pronóstico a tres días vista y la mayor parte de las veces acierta incluso hasta el quinto día. Esto hace treinta años no sucedía, pero en este tiempo tanto nuestro conocimiento de la atmósfera como la capacidad de hacer cálculos con los datos de los satélites han ido ampliándose y hoy disfrutamos de pronósticos muy buenos para los próximos días⁴.

Más allá, sin embargo, a horizontes de tres o cuatro semanas, sí es cierto que no siempre es posible realizar predicciones tan fiables de los detalles del tiempo. Esto se debe a algo que veremos en su momento y que tiene que ver con la física del caos⁵. No obstante, sabemos que, si se dan determinadas condiciones, sí podemos

4. Hay dos tipos básicos de satélites en función de su órbita: los de órbita baja y los de órbita alta. Los primeros giran a alturas variables, pero en torno a unos pocos cientos de kilómetros. El GPM-*core*, por ejemplo, lo hace a unos 400 km. Los segundos, de los cuales los satélites Meteosat son un ejemplo clásico, están mucho más arriba, a 36 000 km, en lo que se llama la *órbita geoestacionaria*. Giran al mismo tiempo que rota la Tierra, de manera que siempre están en la misma posición relativa respecto al suelo. Los de órbita baja no; estos pasan rápidamente sobre el mismo punto de la superficie: el GPM-*core* da una vuelta completa al planeta en tan solo hora y media.

5. El artículo seminal del caos es este: LORENZ, E. N., «Deterministic Nonperiodic Flow», *J. Atmos. Sci.*, 1963, vol. 20, pp. 130-141, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2), pero el que se refiere a la famosa mariposa es seis años posterior: LORENZ, E. N., «The predictability of a flow which possesses many scales of motion», *Tellus*, 1969, vol. 21, pp. 289-307, <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00444.x>

aventurarnos con cierta fiabilidad en lo que pasará en las próximas estaciones. Hay patrones atmosféricos que llamamos de alta predictibilidad bajo los cuales estamos bastante seguros de que los pronósticos estacionales van a funcionar. Lamentablemente, esas situaciones no siempre se dan y, en esos casos, los pronósticos estacionales fallan. ¿Por qué entonces estamos los científicos tan seguros de cuál va a ser el clima de los próximos treinta años, algo que está mucho más lejos de esas tres o cuatro semanas o de la próxima primavera? La razón es que se trata de un tipo diferente de predicción.

Para explicar los detalles, primero hay que aclarar que en climatología no intentamos averiguar si va a llover en Valladolid a las cuatro de la tarde del 4 de abril del año 2073, sino lo que decíamos arriba: si la media de los treinta abrils que van del año 2071 al 2100 va a ser más o menos lluviosa en esa ciudad que la media de los treinta abrils que vivimos de 1961 a 1990. Cuando hablamos de cambios en el clima, nos referimos a los cambios de los valores medios de unas décadas (o de unos siglos) con respecto a otros.

Vayamos ahora con los detalles. La mejor manera que he encontrado de explicar la diferencia entre predecir el tiempo y el clima es con ejemplos. Hay una analogía tradicional con dados. Dice que, si arrojo un dado, no sé qué cara de las seis va a salir (eso sería el tiempo); pero si lo lanzo seis mil veces —y el dado no está trucado—, sé que cada número habrá salido aproximadamente en mil ocasiones (eso sería el clima). Nótese que para calcular la probabilidad de cada cara no tengo siquiera que lanzarlo. Esto, por cierto, expresa muy bien la diferencia entre la probabilidad y la estadística. A mis profesores de primero de Matemáticas les gustaba decirnos que la primera disciplina sí que formaba parte de la carrera, mientras que la segunda era otra cosa aparte de las ciencias exactas. Hay incluso un chiste al respecto en *Los Simp-*

son, en el episodio 15 de la tercera temporada (*Deep Space Homer*, minuto 3:33).

Mi ejemplo de la piscina es un poco más complicado, pero creo que añade matices importantes. Luego daré una explicación más técnica, pero de momento imaginemos una piscina pública en verano. Supongamos que la tenemos casi llena, pero que no renovamos el agua en todo agosto. Supongamos también que todos los días tenemos la misma secuencia de temperatura. Lo que queremos saber es cómo va a cambiar el nivel de agua a lo largo del mes.

Para medir el nivel cada día, lo más sencillo es hacer una marca en una de las paredes de la piscina. Ahora es cuando vienen las complicaciones. Si no hay viento ni nadie dentro del agua, esto será relativamente fácil, pero si hay gente que entra y sale de la piscina, se creará un cierto oleaje. Debido a esa agitación, será difícil decidir exactamente dónde llega el agua. Me costará un poco saber dónde hacer la marca. Digamos que, con tanto trajín, dudaré si hacer la marca uno o dos milímetros arriba o abajo.

Ese movimiento rápido, ese oleaje arriba y abajo de una «superficie media del agua» es el equivalente al tiempo atmosférico: unos días la temperatura o la precipitación son más altas que otros y es difícil saber cuál es la tendencia general mirando solo un día. Los días del tiempo atmosférico, comprimidos a segundos, son el equivalente al oleaje de la piscina.

Día a día, poco a poco, la energía del sol hará que el agua de la piscina se vaya evaporando. Si vuelvo a intentar hacer la marca al cabo de tres días, me encontraré con el mismo problema que el primero: saber exactamente dónde marcar con tanto movimiento arriba y abajo. Ese margen de uno o dos milímetros sigue estando ahí. Pero lo que está claro es que la marca va a estar bastante por debajo de la del primer día. Digamos que 5 cm más abajo que hace tres días. ¿Puedo saber, en un momento cualquiera, cuándo va a llegar la siguiente ola y hasta dónde va a subir en ese momen-

to el agua para hacer la marca con más precisión? Quizá, pero no resultaría fácil. ¿Puedo *predecir* dónde pondré la marca dentro de treinta días? Sí, eso es más fácil. Teniendo en cuenta todo lo que sé sobre la piscina y la evaporación producida por el sol, si en tres días el agua ha bajado 5 cm, en treinta días habrá bajado 50 cm.

Hay algo más que es importante en este ejemplo: si aplicara toda la física que sabemos hoy —y tuviera los instrumentos de medida adecuados—, sí podría saber con cierta fiabilidad cuándo va a llegar la siguiente ola y hacer así la marca correspondiente. Podría también descontar la evaporación en los próximos segundos, pero esta sería tan pequeña que afectaría poco al resultado. Sin embargo, la evaporación total va a ser la suma a lo largo de todo el mes de esas pequeñas pérdidas que son insignificantes en el día a día. Un efecto que es despreciable en los próximos veinte segundos (lo puedo entender como una especie de «ruido») resulta fundamental para conocer la evolución a largo plazo del nivel de agua (que es lo que podría llamar la «señal» que yo quiero medir). Es la suma de esas pequeñas evaporaciones de cada día la que me dará el nivel de la piscina al final de agosto.

Un lector astuto pensará que se puede argumentar que no hace falta calcular cuándo llegará cada ola. Al fin y al cabo, el nivel al final solo depende de la tasa de evaporación. ¡Correcto! Pero un lector aún más astuto diría que las condiciones del experimento se han simplificado en exceso. Dirá que es un caso idealizado. En realidad, la gente sale mojada de la piscina y se lleva consigo cierta cantidad de agua. O chapotea y echa agua fuera (e incrementa la energía del agua y, con ello, la tasa de evaporación). Y a veces cae arena o se acumulan piedras en el fondo de la piscina, lo cual aumenta un poco el volumen. Ese lector dirá que hay muchos factores que no he considerado y que, de hecho, todo el experimento es una gran simplificación, porque el agua de las piscinas se rellena y la tasa de evaporación diaria no es constante.

Es cierto, pero todos esos factores se podrían incluir en el modelo para hacerlo más realista. Si sé cuánta gente viene cada día a la piscina y cuántas veces entran y salen de media, puedo estimar cuánta agua pierdo cada día. Lo mismo con los chapoteos o con los objetos que caigan al fondo. O puedo incluir más realismo a mi cuadro y tener en cuenta que la piscina sí se rellena y que la temperatura varía en cada momento. Puedo ir complicando mi modelo y haciéndolo más preciso siempre que tenga datos sobre los factores que influyen en la cantidad de agua de la piscina. Esto hará que los cálculos sean mucho más complicados, desde luego, y por eso precisamente los modelos de clima utilizan los ordenadores más potentes del mundo. Lo veremos en el capítulo 5.

Lo crucial ahora para entender la diferencia entre predecir el tiempo (el nivel del agua en un momento dado considerando el

oleaje) y el clima (el nivel del agua al cabo de mucho tiempo) es que, aunque yo no pueda saber si mi sobrina Paula se va a meter en la piscina mañana exactamente a las tres, o si la ola que genere su chapoteo va a afectar en uno o dos milímetros a mi medida del día, sí sé que, si Paula y los demás se comportan como acostumbra, al cabo de un mes el nivel del agua estará 50 cm por debajo del inicial.

El ejemplo muestra que sí puedo hacer una predicción a largo plazo, aunque no sepa exactamente en qué momento ocurrirá algo en el corto plazo, siempre, claro está, que los factores que influyen en la situación sigan operando de la misma manera. Con el tiempo y el clima ocurre lo mismo. Así, a partir de la combinación de las leyes más relevantes del funcionamiento del proceso físico

«No siempre es posible realizar predicciones tan fiables de los detalles del tiempo».

«bañarse en la piscina», puedo estimar cuál va a ser el nivel de la piscina a final de mes, de la misma forma que puedo calcular —de una manera mucho más complicada, pero siguiendo una lógica similar— cuál va a ser el clima de Europa dentro de cuarenta años aunque no sepa si lloverá el 4 de abril de 2042 a las doce de la noche.

El Niño y la variabilidad del clima

¿Qué es El Niño que he mencionado antes? Técnicamente, se conoce como «El Niño-Oscilación del Sur» (ENSO, por sus siglas en inglés⁶). Se trata de un calentamiento del océano Pacífico en su zona ecuatorial americana, que es generalmente fría. Es un fenómeno que ocurre de manera periódica. Aparece por Navidad, y de ahí su nombre. En general, se manifiesta en ciclos de siete años, aunque este patrón no siempre se cumple estrictamente. Su origen es la dinámica atmosférica, el cómo se mueve el aire: a veces sucede que se da un movimiento del aire que hace que se refuerce la corriente oceánica y esto da lugar a un cambio de pre-

6. A lo largo del libro utilizo los nombres de eventos y organizaciones en español, pero las siglas las dejo en inglés. La razón es que, por ejemplo, ningún climatólogo hispanoamericano habla del PICN, sino del IPCC, para referirse al panel intergubernamental del cambio climático; y lo mismo para la ENSO (*The El Niño-Southern Oscillation* - Fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur): casi nadie emplea el acrónimo FEN, ni el de OAN para la Oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO). Así, diré «el IPCC» y «la ENSO», lo cual además no chocará a aquellos que ya sepan lo que significan ambas siglas. Creo que es un buen compromiso entre escribir en nuestro idioma común y utilizar unos términos que, dado que la lengua de la ciencia es actualmente el inglés, están ya consolidados para cualquiera que haya penetrado mínimamente en el tema.

sión contrario al que cabría esperar en esa época del año y que, además, permanece durante más tiempo. Eso hace que el agua cálida de El Niño caliente el aire sobre el océano, incrementando la evaporación y por tanto la nubosidad y la precipitación, que a veces llega a ser muy fuerte.

Se dice que El Niño lleva inundaciones a amplias zonas de América, pero su efecto es global: el clima de la Tierra es un sistema interconectado de campos de presión y, al igual que en una cama elástica, si en un lugar hay menos presión, en otro aparecen altas presiones. De hecho, las sequías que experimentamos en España de manera periódica podrían estar ligadas con las altas presiones compensatorias que induce El Niño, aunque la dinámica atmosférica es muy compleja y hace falta afinar mucho para poder atribuir una causa específica a un fenómeno concreto.

La ENSO es sin embargo un fenómeno natural. Forma parte de la «variabilidad interna» de la atmósfera, que es como llamamos a los cambios que se producen en nuestra envoltura líquida y gaseosa por la propia dinámica de los fluidos. ¿Qué queremos decir con ese término? Volvamos al ejemplo de la piscina. En una piscina en un día despejado, el agua entra por las boquillas y sale por los rebosadores hacia la depuradora, formando un circuito cerrado. Este flujo produce una serie de corrientes. Si dejamos caer un corcho cerca de las boquillas, veremos que se empieza a mover de manera más o menos errática. De hecho, si dejamos caer dos corchos uno al lado del otro, veremos que enseguida se empiezan a separar, que recorren partes diferentes de la piscina y acaban a veces en diferentes rebosadores. Eso es lo que llamaríamos la dinámica, el movimiento de las moléculas de agua, y que podemos identificar gracias a los corchos. Si se observa con atención, se verá que esa dinámica a veces genera remolinos o zonas en las que el agua está más quieta, o más alta, o más baja. Pero la causa es el propio movimiento natural del agua y no factores externos,

como el sol o el chapoteo. Eso es lo que llamamos «variabilidad interna».

Supongamos ahora que el día no está despejado, sino nublado. Las nubes crearán sombras en el agua y harán que unos puntos de la piscina estén más fríos que otros. El movimiento del agua será ahora diferente y se crearán otros fenómenos: otros remolinos u otras zonas más o menos altas. Diremos que la dinámica se ha modificado. Esta nueva variabilidad, sumada a la anterior, es la que llamamos «variabilidad natural». En el caso de la Tierra, la causa de la variabilidad natural es geofísica: es la producida por los volcanes o por cambios a muy largo plazo en la radiación solar. Solo desde hace unos años consideramos aquí también los efectos de otros seres vivos.

La variabilidad natural, como su nombre indica, no tiene nada que ver con los humanos. Sucedería igual si no estuviéramos sobre el planeta. La «variabilidad del clima», entendida como un todo, es la suma de esa variabilidad natural más la humana, también llamada antrópica o antropogénica. Siguiendo con el ejemplo de la piscina, si Paula entra ahora a hacerse unos largos, modificará la dinámica de la piscina. El movimiento del agua será diferente. De hecho, lo que sucederá es que la variabilidad *paulina* (humana) se mezclará de una manera muy complicada con la variabilidad natural, reforzándola en algunos casos y amortiguándola en otros. Lo que se dice que sucede entonces es que la influencia humana queda enmascarada por la natural. Si Paula se queda un rato en la zona en sombra de la piscina, la energía que emite su cuerpo calentará un poco el agua a su alrededor. Si midiéramos la temperatura en esa zona, podríamos pensar que las nubes no están enfriando el agua tanto como pensábamos. Este enmascaramiento de la señal aparece a menudo en el estudio del cambio climático y puede ocurrir en ambas direcciones: si Paula estuviera en la zona soleada, podríamos pensar que el sol calienta el agua más de lo

que lo hace. Si estuviera a la sombra, la medida quizá nos llevara a pensar que las nubes dejan pasar más radiación de la que dejan. En ambos casos, estamos ante unos efectos que se superponen y que hay que desenredar para poder distinguir entre lo que es natural y lo que no. En el clima de la Tierra, en ciertas ocasiones los ciclos naturales refuerzan los efectos antropogénicos, pero en otras los mitigan o los enmascaran. Así, por ejemplo, el efecto que tiene el hollín de las calefacciones de carbón y de los motores de combustión interna sobre las nubes no se definió antes con la suficiente precisión porque había otros efectos naturales, como las emisiones volcánicas, que lo tapaban.

La sensibilidad a las condiciones iniciales

¿Cuál es esa explicación más técnica que prometí antes sobre la diferencia entre predecir el clima y el tiempo? Tiene que ver con la física del caos y, en concreto, con un problema muy serio para realizar pronósticos precisos: la sensibilidad a las condiciones iniciales de los llamados sistemas dinámicos, entre los que el océano y la atmósfera son dos ejemplos clásicos. Decía antes que, si ponía dos corchos en la piscina, estos me podían ir mostrando la dinámica del flujo de agua. También sostenía que, si dejamos caer dos corchos uno a lado del otro, quizá viéramos que enseguida se empiezan a separar y a recorrer partes diferentes de la piscina. El problema con el que nos encontramos es que es posible que, por muy juntos que pusiera los corchos, estos acabaran separándose. Incluso si los colocara a una distancia de un átomo el uno del otro. Esto es algo también bastante antiintuitivo, porque podría pensarse que, si el flujo del agua es suave, dos puntos próximos indistinguibles seguirán estando juntos al cabo de un tiempo. Pero no siempre sucede así. De hecho, esto es tan sorprendente que no nos dimos cuenta del asunto hasta 1963, y gracias a los ordenadores.

¿Dónde está el problema? Pues en que eso hace muy difícil predecir. Si empiezo a seguir por dónde va el flujo desde dos puntos muy juntos y da igual lo juntos que estén porque, tarde o temprano, puede que se vayan a separar, la predicción es muy difícil. Sí, podría intentar saber por qué parte de la piscina viajará cada corcho si conozco las ecuaciones del movimiento y en qué punto exacto están al principio. Pero si resulta que en un punto a un átomo de distancia la trayectoria puede ser completamente diferente, entonces no tengo nada que hacer salvo que pudiera saber con una exactitud imposible en qué punto exacto coloco el corcho. Pero no puedo. Siempre hay un error instrumental o mil problemas para determinar en qué punto exacto está mi valor inicial. Y lo peor es que no por estar más cerca voy a ser más preciso, porque reducir el error de la medida inicial no reduce automáticamente el error al cabo de mucho tiempo. Es todo más complicado. No en vano, la rama de la física que estudia esto se llama «física de sistemas complejos».

Si el movimiento del agua en la piscina del ejemplo depende de ese valor inicial (lo que se llama técnicamente «sensibilidad a las condiciones iniciales», o «efecto mariposa»), entonces por mucho que me afane no podré saber dónde van a acabar los corchos. Lo que va a suceder al principio es que los dos se van a mover igual, juntos, pero al cabo de un tiempo empezarán a separarse. Primero un poco, como yendo en paralelo, pero llegará un momento en que uno se separará del otro y empezará a hacer cosas muy diferentes. Puede que incluso acaben en diferentes rebosadores de la piscina o que uno de ellos entre y el otro no.

Esto es lo que sucede con la predicción del tiempo. Para calcularla, tenemos que dar unas condiciones iniciales a los modelos. Pero estas no pueden ser perfectas porque no podemos medir con precisión infinita el estado de la atmósfera en un momento dado. Si nos acercamos mucho al valor exacto y las ecuaciones son muy bue-

nas (y lo son), durante un tiempo la trayectoria del modelo y la que sigue la atmósfera en realidad serán muy parecidas, pero al cabo de un tiempo empezarán a diferir hasta que no se parezcan en nada. ¿A partir de cuándo empiezan a no parecerse? Depende del tipo de situación atmosférica que tengamos, pero en general a partir de tres o cuatro días es complicado que dos trayectorias que hayan partido del mismo punto exacto se sigan pareciendo. Por eso tenemos predicciones muy buenas hasta esos tres o cuatro días y después de ese horizonte el detalle del pronóstico puede empezar a estropearse.

Lo fundamental para entender la diferencia técnica entre predecir el tiempo y simular el clima es que en el primer caso el efecto mariposa me afecta enormemente. ¿Por qué no tengo ese problema al hacer simulaciones de clima? Porque en clima no me interesa por dónde va el corcho en la piscina en un momento concreto, sino más bien por dónde ha ido al cabo de mucho tiempo y eso depende más de procesos que operan a largo plazo que de las condiciones iniciales. No me interesa saber la temperatura de Valladolid el 4 de abril de 2073, sino qué ha estado pasando en los últimos treinta abrils en Valladolid y eso depende más de las estaciones (es decir, del Sol) y de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera que de lo que pasó el 4 de abril de 2042 a las doce de la noche. En la predicción meteorológica no; en la predicción meteorológica me importa mucho cómo empezó todo porque dónde esté la atmósfera en tan poco tiempo, en tres o cuatro días, sí depende mucho del minuto cero (y muy poco de la radiación solar y del dióxido de carbono, que van a ser casi los mismos en un intervalo tan pequeño). A las escalas temporales en las que varía el clima de la Tierra, este está más constreñido por la órbita del planeta y por la variabilidad natural y antrópica que por cuál fue la condición inicial de la que partimos. Esa es la clave.

El efecto mariposa se expresa a menudo como que el aleteo de una mariposa en una punta del mundo puede formar un huracán

en el otro extremo. Hay hasta películas sobre ello. La imagen es poética y ha calado hondo en la mentalidad popular, pero es incorrecta. Lo que en realidad significa el efecto mariposa es que nunca podremos predecir matemáticamente las consecuencias del aleteo de una mariposa, porque cualquier cambio en las condiciones iniciales del sistema —por minúsculo que sea— puede hacer que la dinámica posterior sea muy diferente. Es decir: la incertidumbre inicial se va propagando y multiplicando desde las escalas pequeñas a las grandes. Las otras interpretaciones del efecto mariposa pueden hacernos soñar y despertar valiosas intuiciones sobre el clima, pero no es lo que significa la sensibilidad a las condiciones iniciales.

¿Por qué nos fijamos en la temperatura media del planeta?

Para acabar este primer capítulo, quizá al lector le haya llamado la atención que uno de los resultados más divulgados de los modelos de clima sea el valor del cambio en la temperatura media en la superficie (ya sea en el suelo o a dos metros de altura). ¿Por qué utilizamos tanto la media global? Podría argüirse que una media sobre toda la Tierra no dice mucho sobre el estado real del planeta. Alguien que tuviera la cabeza en un horno a 50 °C y los pies en el frigorífico a -25 tendría una temperatura media corporal de 37,5, pero probablemente estaría cadáver⁷. ¿Por qué usar la media, que compensa las diferencias?

7. Para hablar de temperaturas utilizo todo el rato la escala Celsius (°C), salvo que indique otra cosa. Aunque la única unidad realmente física es el kelvin (K), la otra escala es la que usamos en la vida corriente. Para pasar de grados Celsius a kelvin solo hay que sumar 273,15. Por cierto, que no se dice «grados kelvin» sino «kelvin». En EE. UU. usan la escala Fahrenheit (°F), que no es centígrada: la temperatura de fusión del hielo en esta escala es 32 °F; y la de ebullición del agua, 212 °F. Su excusa para emplearla aún hoy es que 100 °F es la temperatura a la que tenemos fiebre.

Hay dos buenas razones para hacerlo así. La primera es que ese aumento de la media es el efecto principal que cabría esperar del incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero. Pero la segunda razón, más técnica, es que esa medida maximiza lo que se conoce como «cociente entre la señal y el ruido», que quiere decir el resultado de dividir el efecto de los gases entre la variabilidad natural de la atmósfera, que no tiene que ver con los gases y que a escala global es mínima. Maximizar, en este contexto, quiere decir buscar una manera de calcular algo que haga destacar lo más posible el cambio sobre las variaciones accidentales (estas se denominan «ruido»), lo que dicho de otra manera significa que podemos estar muy seguros de que, si el valor es alto, no puede ser por casualidad, sino porque la media ha cambiado más allá de lo que podríamos esperar que variara por causas naturales. Esto quizá hay que leerlo dos veces para entenderlo bien, pero el mensaje es sencillo: utilizar la media de todo el planeta es una manera sólida de ver qué está pasando con el clima.

La media global es por lo tanto una medida robusta, pero no nos informa sobre lo que está pasando en cada sitio, que es lo que nos puede resultar realmente útil. Para saber qué puede pasar en cada sitio tenemos que recurrir a los modelos globales del sistema Tierra, de los que hablaré en el capítulo 5. Pero antes vamos a ver qué le está pasando exactamente al clima de la Tierra para tenernos tan preocupados.