



Reseña

Nuestro hogar, la Tierra, es caótico, mutable y está repleto de objetos mundanos que tocamos y modificamos todos los días sin apenas reparar en ello. Pero son precisamente esos escenarios cotidianos en los que debemos fijarnos si deseamos saber qué hace que el engranaje del universo funcione. En *¿Por qué a los patos no se les enfrían los pies?*, Helen Czerski nos da las respuestas a algunas preguntas complejas del estilo de: ¿cómo viaja el agua desde las raíces de una secuoya hasta la copa? ¿Cómo consiguen los patos mantener los pies calientes cuando caminan sobre hielo? ¿Por qué la leche, al echarla al té, se asemeja tanto a un remolino de nubes de tormenta? Czerski, de una forma cercana y audaz, comparte sus asombrosos conocimientos para levantar el velo de la familiaridad de lo ordinario. Es probable que después de leer este libro no volvamos a mirar nada con los mismos ojos.

Índice

[Introducción](#)

1. [Palomitas y cohetes](#)
2. [Todo lo que sube, baja](#)
3. [La belleza de lo pequeño](#)
4. [Un momento en el tiempo](#)
5. [Creando olas](#)
6. [¿Por qué a los patos no se les enfrían los pies?](#)
7. [Cucharas, espirales y Sputnik](#)
8. [Cuando los opuestos se atraen](#)
9. [Cuestión de perspectiva](#)

[Referencias bibliográficas](#)

[Agradecimientos](#)

[Sobre el autor](#)

Introducción

Para mis padres, Jan y Susan

Cuando estaba en la universidad, pasé un tiempo estudiando física en casa de mi abuela. La abuela, una nortea con los pies en la tierra, se quedó muy impresionada cuando le dije que estaba estudiando la estructura del átomo.

—Ah —me dijo—, ¿y qué harás cuando lo sepas?

Es una muy buena pregunta.

Vivimos en el borde, posados en la frontera entre el planeta Tierra y el resto del universo. En una noche clara, cualquiera puede admirar el gran manto brillante de estrellas, conocidas y perennes, esos puntos de referencia que son exclusivos de nuestro lugar en el cosmos. Todas y cada una de las civilizaciones humanas han visto las estrellas, pero ninguna las ha tocado. Nuestro hogar, aquí en la Tierra, es todo lo contrario: es caótico y cambiante, rebosante de novedades y de cosas que tocamos y retocamos cada día. Es aquí donde hay que fijarse si queremos saber cómo funciona el universo. El mundo físico está repleto de una diversidad apabullante, una diversidad creada por los mismos principios y los mismos átomos

que, combinados de distintas formas, producen una gran cantidad de resultados. Pero dicha diversidad no es aleatoria. Multitud de patrones rigen nuestro mundo.

Si añades leche al té y lo remueves rápidamente verás formarse un remolino, una espiral de dos fluidos que se rodean mutuamente pero que apenas se tocan. En tu taza, la espiral durará solo unos segundos antes de que los dos líquidos terminen de mezclarse. Pero habrá durado lo suficiente para que hayas podido verla, como si tratara de recordarnos que los líquidos se mezclan en forma de preciosos patrones espiralados y no de manera instantánea. Observamos el mismo patrón en otras situaciones por esta misma razón. Si miramos hacia la Tierra desde el espacio exterior, no será raro ver remolinos muy parecidos en las nubes, justo donde el aire frío y el caliente danzan entre sí en vez de mezclarse directamente. En Gran Bretaña, estos remolinos llegan muy a menudo desde el oeste rodando por el Atlántico, lo que causa ese archiconocido clima inestable. Se forman en el límite entre el frío aire polar del norte y el cálido aire tropical del sur; el aire frío y el caliente se persiguen en círculos y forman dicho patrón, que se puede apreciar perfectamente en las imágenes de satélite. Llamamos a estos remolinos «depresiones» o ciclones, y el tiempo cambia enseguida de ventoso a lluvioso o plenamente soleado cuando los brazos de la espiral pasan girando sobre nuestras cabezas.

Podría parecer que una tormenta giratoria tiene muy poco que ver con una taza removida, pero la similitud entre sus patrones es más que una mera coincidencia. Es una pista que apunta a algo más

fundamental: ambas esconden la base sistemática que comparten todas las formaciones de este tipo, la cual ha sido descubierta, explorada y probada por medio de rigurosos experimentos llevados a cabo por muchas generaciones de humanos. La ciencia se basa en este proceso de descubrimiento: en el constante refinamiento y puesta a prueba de nuestro conocimiento, así como en las investigaciones que revelan todavía más cosas por entender.

A veces es fácil encontrar un patrón en lugares nuevos. Pero en otras ocasiones la conexión se encuentra un poco más escondida, lo que hace que la satisfacción al hallarla sea todavía mayor. Por ejemplo, podríamos pensar que los escorpiones y los ciclistas no tienen mucho en común, pero ambos se sirven de la misma triquiñuela científica para sobrevivir, aunque lo hagan de formas contrarias.

Una noche sin luna en el desierto de Norteamérica es fría y tranquila. Parece casi imposible encontrar nada por allí, ya que el suelo solo está iluminado por la tenue luz de las estrellas. Pero para encontrar un tesoro muy concreto, solo tenemos que equiparnos con una linterna especial y adentrarnos en la oscuridad. La linterna tiene que proyectar una luz que sea invisible para nuestra especie: luz ultravioleta o «luz negra». Es imposible discernir hacia dónde apuntamos el haz de la linterna, ya que es invisible. Pero entonces vemos un destello, y un espeluznante punto brillante de color azul verdoso que se escabulle sorprendido punza la oscuridad del desierto. Es un escorpión.

Así es como los aficionados buscan escorpiones. Estos arácnidos negros tienen el exoesqueleto cubierto de unos pigmentos que absorben la luz ultravioleta que nosotros no vemos y reflejan una luz que sí que nos resulta visible. Es una técnica muy astuta, aunque si ya de por sí te dan miedo los escorpiones, quizás te cueste un poco apreciarla. A este juego de luces se lo denomina «fluorescencia». Se cree que el brillo aturquesado de los escorpiones es la forma que tienen de adaptarse para poder encontrar los mejores escondrijos en cuanto anochece. La luz ultravioleta siempre está presente, pero al anochecer, cuando el sol acaba de esconderse en el horizonte, la mayor parte de la luz ha desaparecido y la ultravioleta es la única que permanece. Así que si un escorpión está a la vista, brillará y será fácil de encontrar, puesto que no hay mucha más luz azul o verde alrededor. Si el escorpión está expuesto, aunque sea un poco, puede detectar su propio brillo y saber de este modo que tiene que esforzarse más en esconderse. Es un sistema de señalización elegante y efectivo; o al menos lo era antes de que los humanos empezaran a merodear con linternas de luz ultravioleta.

Afortunadamente para las víctimas de la aracnofobia, no hace falta irse en plena noche a un campo minado de escorpiones para ver la fluorescencia, ya que también es un fenómeno bastante común en las mañanas sombrías de cualquier ciudad. Fíjate en los ciclistas preocupados por la seguridad: sus chaquetas de alta visibilidad parecen tener un extraño brillo en comparación con lo que las rodea. Parece como si resplandecieran, y es que, efectivamente, así

es. En los días nublados, las nubes bloquean la luz visible, pero no impiden que un montón de luz ultravioleta las atraviese. Los pigmentos de las chaquetas de alta visibilidad absorben la luz ultravioleta y reflejan luz visible. Es exactamente el mismo truco que usan los escorpiones, pero por una razón radicalmente distinta. Y es que los ciclistas buscan brillar: al emitir esa luz adicional, se les ve mejor y, por lo tanto, están más seguros. Para los humanos, este tipo de fluorescencia es como un regalo: no somos conscientes de la existencia de la luz ultravioleta, así que no perdemos nada cuando se convierte en algo que podemos aprovechar.

Es fascinante que suceda algo así, pero a mí lo que más me atrae es que una perla de sabiduría física como esta no sea un simple hecho interesante, sino una herramienta que puedes llevar contigo. Te puede resultar útil estés donde estés. En este caso, la misma parcela de la física ayuda a sobrevivir a escorpiones y a ciclistas. También hace que la tónica brille bajo la luz ultravioleta, porque la quinina que la compone es fluorescente. Y de aquí proviene también la magia de los blanqueadores para la ropa y de los rotuladores fluorescentes. La próxima vez que veas un párrafo subrayado, recuerda que la tinta del rotulador está actuando como un detector de luz ultravioleta; aunque no la veas directamente, tú sabes que está ahí gracias a ese brillo.

Estudié física porque explicaba cosas que me interesaban. Me permitía mirar a mi alrededor y ver los mecanismos que hacen que nuestro mundo cotidiano funcione. Y lo mejor de todo es que me permitía descubrir algunos de ellos por mí misma. Aunque ahora

soy física profesional, muchas de las cosas que he resuelto por mí misma no han tenido nada que ver con laboratorios ni con complicados programas de ordenador ni con experimentos caros. Los descubrimientos que más satisfacción me han proporcionado surgieron de cosas con las que estaba jugando cuando se suponía que no estaba haciendo ciencia. Si tienes nociones básicas de física, el mundo se convierte en una caja de juguetes.

A veces se percibe algo de esnobismo cuando se habla de la ciencia que encontramos en las cocinas, los jardines y las calles de las ciudades. Se considera como algo con lo que mantener a los niños ocupados, una distracción trivial que es importante para los jóvenes, pero que no resulta demasiado útil para los adultos. Un adulto puede comprarse un libro sobre el funcionamiento del universo, y eso sí se verá como un auténtico tema de adultos. Pero esa actitud falla en un aspecto muy importante: todo lo rige la misma física. Una tostadora te puede enseñar algunas de las reglas más básicas de la física, y lo bueno que tienen las tostadoras es que seguramente tú tienes una y puedes ver cómo funciona por ti mismo. La física es alucinante precisamente porque todos los patrones son universales: se dan en la cocina y en los rincones más alejados del universo. La ventaja de fijarse en una tostadora primero es que, aunque jamás tengas que preocuparte por la temperatura del universo, sí sabrás por qué tu tostada está caliente. Pero una vez que conoces el patrón, lo reconocerás en muchos otros lugares, y algunos de esos otros sitios serán los logros más impresionantes de la sociedad humana. Aprender la ciencia de lo cotidiano es una

vía directa hacia el trasfondo del mundo que todo ciudadano tiene que conocer si quiere participar plenamente en la sociedad.

¿Alguna vez has tenido que distinguir un huevo crudo de uno duro sin romperlos? Hay una forma muy fácil de hacerlo. Pon el huevo en una superficie lisa y dura y hazlo girar. Al cabo de unos segundos, toca la cáscara del huevo con el dedo un momento, lo suficiente para detener su rotación. Puede que el huevo se quede ahí, inmóvil. Pero tras uno o dos segundos, puede que empiece a moverse para retomar la rotación. Los huevos crudos y los huevos duros son iguales por fuera, pero su interior es distinto, y esto es lo que nos revela su secreto. Al tocar el huevo cocido, has detenido un objeto sólido. Pero al parar el huevo crudo, solo has detenido la cáscara. El líquido de su interior no ha dejado de girar, así que, tras uno o dos segundos, la cáscara ha empezado a rotar de nuevo porque estaba siendo arrastrada por su contenido. Si no me crees, ve a buscar un huevo y compruébalo tú mismo. Según un principio de la física, todos los objetos tienden a mantener el mismo tipo de movimiento a menos que se los empuje o se tire de ellos. En este caso, la rotación de la clara del huevo se mantiene invariable porque no tenía ninguna razón para cambiar. Es lo que se conoce como «conservación del momento angular»; y no se limita solo a los huevos.

El telescopio espacial Hubble, un ojo en órbita que lleva dando vueltas alrededor de nuestro planeta desde 1990, ha tomado miles de imágenes espectaculares del cosmos. Nos ha enviado fotografías de Marte, de los anillos de Urano, de las estrellas más antiguas de

la Vía Láctea, de la galaxia bautizada con el precioso nombre de Galaxia del Sombrero y de la enorme Nebulosa del Cangrejo. Pero cuando estás flotando libremente en el espacio, ¿cómo mantienes tu posición mientras fijas la mirada en esos diminutos puntos de luz? ¿Cómo sabes en qué dirección estás mirando exactamente? El Hubble tiene seis giroscopios, cada uno de los cuales es una rueda que gira a 19.200 revoluciones por segundo. La conservación del momento angular hace que esas ruedas sigan girando a esa velocidad porque no hay nada que las ralentice. Y su eje giratorio se mantendrá orientado exactamente en la misma dirección, porque no tiene ninguna razón para moverse. Los giroscopios le dan al Hubble una dirección de referencia para que sus lentes se mantengan fijas en un objeto lejano durante el tiempo que sea necesario. El principio físico que se usa para orientar uno de los mayores avances tecnológicos de nuestra civilización se puede demostrar haciendo girar un huevo en la cocina.

Por eso me encanta la física. Todo lo que aprendes te resultará útil en otra situación, y esta es toda una aventura porque no sabes adónde te llevará mañana. Hasta donde sabemos, las reglas de la física que observamos en la Tierra también se observan en el resto del universo, y cualquiera puede comprender muchos de los intríngulis del cosmos. Puedes ponerlos a prueba tú mismo. Lo que aprendes de un huevo eclosiona y revela un principio que puedes aplicar a todo lo demás; sales a la calle armado con tu polluelo y ves el mundo con otros ojos.

En el pasado la información se valoraba más que ahora. Cada perla de sabiduría era algo difícil de conseguir y muy valioso. Hoy en día, vivimos a la orilla de un océano de conocimiento en el que constantes tsunamis amenazan nuestra cordura. Si puedes vivir tu vida tal como está, ¿para qué buscar más conocimiento y, por consiguiente, más complicaciones? El telescopio espacial Hubble es muy bonito, pero a menos que también mire hacia abajo de vez en cuando para ayudarte a buscar las llaves cuando llegas tarde a una reunión, ¿acaso te afecta en algo?

Los humanos tenemos curiosidad por el mundo y nos complace mucho satisfacer nuestra curiosidad. El proceso es todavía más gratificante si descubres las cosas por ti mismo o si compartes el viaje hacia el descubrimiento con alguien. Y los principios de la física que aprendes jugando también sirven para las nuevas tecnologías médicas, la meteorología, los teléfonos móviles, las prendas que se lavan solas y los reactores de fusión. La vida moderna está repleta de decisiones complejas: ¿merece la pena pagar más por una bombilla fluorescente compacta? ¿Es seguro dormir con el móvil al lado de la cama? ¿Debería fiarme de la predicción meteorológica? ¿Por qué tiene importancia que los cristales de mis gafas de sol sean polarizados? A menudo, los principios básicos no ofrecerán respuestas por sí mismos, pero nos proporcionarán el contexto que necesitamos para formular las preguntas adecuadas. Y si nos acostumbramos a deducir las cosas por nosotros mismos, no nos sentiremos desamparados si la respuesta no es obvia en el primer intento. Sabremos que, si

pensamos un poquito más, podremos aclarar las cosas. El pensamiento crítico es esencial para entender el mundo, especialmente cuando los anunciantes y los políticos no paran de decirnos que ellos saben más que nosotros. Tenemos que ser capaces de observar la evidencia y decidir si estamos o no de acuerdo con estas personas. Y en ello nos va algo más que nuestras vidas diarias, porque somos responsables de nuestra civilización: votamos, escogemos qué comprar y cómo vivir y todos participamos en el periplo de la humanidad. Nadie puede entender todos y cada uno de los detalles de este mundo tan complejo, pero sus principios básicos son unas herramientas valiosas y fantásticas que siempre podemos llevar encima mientras recorremos el camino.

Por todo ello, creo que jugar con los juguetes de la física que encontramos en nuestro entorno es algo más que «un divertimento», aunque yo misma me declaro fanática de la diversión sin motivos. La ciencia no trata solamente de coleccionar hechos; es un proceso lógico que lleva a entender las cosas. Lo que tiene la ciencia es que cualquiera puede ver los datos y llegar a una conclusión razonada. Al principio, puede que las conclusiones halladas no coincidan, pero entonces sales y recoges más información que te ayude a decantarte por una descripción concreta del mundo y, al final, las conclusiones convergen. Esto es lo que diferencia la ciencia de otras disciplinas: una hipótesis científica debe hacer predicciones demostrables, lo que significa que si tienes una idea de cómo crees que algo funciona, el siguiente paso es deducir qué consecuencias entrañará dicha idea. En concreto, tienes que buscar con ahínco todas

aquellas consecuencias que puedas comprobar y, sobre todo, las que puedas demostrar que son erróneas. Si tu hipótesis se impone sobre cualquier prueba posible, aceptaremos prudentemente que es probable que este sea un buen modelo para describir cómo funciona el mundo. La ciencia siempre intenta demostrar que se halla en un error, ya que esta es la vía más fácil para descubrir qué es lo que está pasando en realidad.

No hace falta ser científico profesional para experimentar con el mundo. Si conoces algunos de los principios básicos de la física estarás en el buen camino y podrás entender muchas cosas por ti mismo. A veces ni siquiera es necesario seguir un proceso organizado, puesto que las piezas del puzle se colocan en su sitio prácticamente solas.

Uno de mis viajes de descubrimiento favoritos empezó con una decepción: hice mermelada de arándanos y me salió de color rosa. O, más bien, fucsia vivo. Me pasó hace unos años, cuando vivía en Rhode Island y estaba ultimando los detalles para regresar al Reino Unido. Ya lo tenía casi todo listo, pero de pronto se me metió entre ceja y ceja un último proyecto que debía concluir antes de irme. Siempre me han encantado los arándanos, ya que son algo exótico, delicioso y de un color azul tan bonito como extraño. En la mayoría de los sitios en los que he vivido, se vendían en unas cantidades decepcionantemente pequeñas, pero en Rhode Island crecen en abundancia. Quería convertir algo de esa copiosidad veraniega de arándanos en mermelada azul para llevármela al Reino Unido, así

que me pasé una de mis últimas mañanas allí recolectando y clasificando arándanos.

No cabe duda de que la característica más importante y atractiva de la mermelada de arándanos es su color azul. O bueno, eso creía yo. Pero la naturaleza tenía otros planes. La cazuela donde la mezcla burbujeaba era cualquier cosa menos azul. Llené los tarros de mermelada y la verdad es que estaba muy buena. Pero la decepción y la confusión no me abandonaron y, de hecho, nos siguieron, a mí y a mi mermelada rosa, en nuestro viaje de vuelta al Reino Unido.

Seis meses más tarde, un amigo me pidió ayuda para resolver una duda histórica. Estaba haciendo un programa de televisión sobre brujas y, según me contó, resulta que en algunos documentos se hablaba de unas «mujeres sabias» que hervían pétalos de verbena en agua y vertían el líquido resultante sobre la piel de las personas para saber si estaban embrujadas. Mi amigo se preguntaba si medían algo de forma sistemática, aunque no fuera esa su intención. Investigué un poco y descubrí que tal vez fuera así.

Las flores moradas de la verbena, así como la lombarda, las naranjas sanguinas y muchas otras plantas rojas y moradas contienen unos componentes químicos llamados «antocianinas». Estas antocianinas son los pigmentos que dan a las plantas sus colores vivos. Existen varias versiones, de ahí que el color cambie ligeramente, pero todas tienen una estructura molecular similar. Y hay algo más. El color depende asimismo de la acidez del líquido en el que se encuentra la molécula, lo que se conoce como su «valor de pH». Si alteras ese ambiente y lo haces ácido o lo alcalinizas un

poco, las moléculas cambian levemente de forma, y esto hace que cambien de color. Son indicadores, como una versión de la naturaleza del papel tornasol.

Con este material te lo puedes pasar estupendamente en la cocina. Para extraer el pigmento de la planta, solo tienes que hervirla, así que hierve unas hojas de lombarda y luego guarda el agua de la cocción, que se habrá vuelto morada. Si añades un poco de vinagre, verás que se pone roja. Una solución de detergente en polvo —que es fuertemente alcalina— hará que se vuelva amarilla o verde. Puedes generar todo un arcoíris de resultados usando únicamente lo que tienes en la cocina. Yo lo sé porque lo he comprobado. Me encanta este descubrimiento porque las antocianinas están en cualquier materia y todos tenemos acceso a ellas sin tener que recurrir a un kit de química.

Así que es muy posible que aquellas sabias usaran flores de verbena para analizar el pH y no para diagnosticar embrujos. El pH de la piel puede variar de forma natural, por lo que la aplicación del mejunje de verbena sobre la piel puede producir colores distintos en cada persona. Yo hice que el agua de la lombarda cambiara de morado a azul cuando estaba sudada después de salir a correr, pero no cambió de color cuando lo probé sin haber hecho ejercicio. Aquellas sabias podrían haberse dado cuenta de que las personas hacían que los pigmentos de la verbena cambiaran de formas distintas y haber interpretado este hecho a su manera. Nunca lo sabremos con certeza, pero a mí me parece una hipótesis razonable.

Ya está bien de historia. La cuestión es que este caso me hizo acordarme de mi mermelada de arándanos. Los arándanos son azules porque contienen antocianinas. La mermelada solo contiene cuatro ingredientes: fruta, azúcar, agua y zumo de limón. El zumo de limón ayuda a la pectina natural de la fruta a hacer que la mermelada cuaje, y lo consigue porque es ácido; mi mermelada de arándanos salió de color rosa porque los arándanos hervidos actuaron como una prueba del papel tornasol en versión cazuela. Así que mi mermelada tenía que ser rosa para que pudiera cuajar. La emoción de deducir todo esto casi compensó la decepción de que la mermelada no me saliera azul. Casi. Pero descubrir que una sola fruta puede ofrecer todo un arcoíris de colores es el tipo de tesoro que bien merece un sacrificio.

En este libro se relacionan las pequeñas cosas cotidianas con el vasto mundo en el que vivimos. Es un paseo por el mundo físico que nos muestra que jugar con cosas como las palomitas, las manchas de café o los imanes de nevera puede arrojar luz sobre las expediciones de Scott o sobre ciertas pruebas médicas, o ayudarnos a hallar soluciones a nuestras necesidades futuras de energía. La ciencia no tiene que ver con «ellos», sino con «nosotros», y todos podemos lanzarnos a la aventura a nuestra manera. Cada capítulo empieza con algo pequeño del mundo cotidiano, algo que todos hemos visto muchas veces pero en lo que nunca hemos reparado. Al final de cada capítulo veremos cómo los mismos patrones explican algunos de los avances científicos y tecnológicos más importantes de nuestros tiempos. Toda investigación pequeña resulta

gratificante, pero la gran recompensa viene cuando unimos las piezas del enigma.

Saber cómo funciona el mundo tiene otra ventaja, una de la que los científicos no suelen hablar. Ver qué es lo que hace que el mundo funcione cambia tu punto de vista. El mundo es un mosaico de patrones físicos, y, una vez que te has familiarizado con lo más fundamental, empiezas a percibir las conexiones que existen entre dichos patrones. Espero que, a medida que leas este libro, los polluelos científicos que van eclosionando en cada capítulo crezcan hasta convertirse en una forma distinta de ver el mundo. El capítulo final explora cómo los patrones encajan entre sí para formar nuestros tres sistemas de soporte vital: el cuerpo humano, el planeta y la civilización. Pero no tienes que estar de acuerdo con mi punto de vista. La esencia de la ciencia reside en que cada uno experimente con los principios teniendo en cuenta las evidencias existentes para finalmente sacar sus propias conclusiones.

La taza es solo el principio.

Capítulo 1

Palomitas y cohetes

Las leyes de los gases

Las explosiones en la cocina suelen ser una mala idea. Sin embargo, a veces, una pequeña explosión puede alumbrar algo delicioso. Un grano de maíz seco contiene muchos componentes alimenticios buenos —carbohidratos, proteínas, hierro y potasio—, pero están muy comprimidos, además de protegidos por una cáscara blindada. El potencial es prometedor, aunque para que ese grano sea comestible es preciso aplicarle una reorganización extrema. La explosión es el broche de oro y, muy oportunamente, ese grano contiene la semilla de su propia destrucción. Anoche me metí a hacer cocina balística, es decir, palomitas. Siempre es reconfortante descubrir que un exterior duro y hostil puede albergar un interior más dócil; pero ¿por qué en este caso el contenido se convierte en un copo blandito en lugar de explotar en mil pedazos?

Cuando el aceite de la sartén estuvo caliente, añadí una cucharada de granos, puse la tapa y los dejé ahí mientras hervía agua para prepararme un té. Afuera, la tormenta bramaba, y grandes gotas de agua golpeaban la ventana. El maíz silbaba suavemente en el aceite. Me miraba como si no estuviera pasando nada, pero, en la sartén, la función ya había empezado. Cada grano de maíz contiene un germen, que es el comienzo de una nueva planta, y el endosperma, que sirve de alimento para esa nueva planta. El endosperma está compuesto de almidón envasado en gránulos, y contiene un 14% de

agua. Mientras los granos estaban en el aceite caliente, esa agua empezó a evaporarse, convirtiéndose en vapor. Las moléculas calientes se mueven más rápido, así que cada vez que un grano se calentaba, aumentaba la cantidad de moléculas de agua que zumbaban por el interior en forma de vapor. El propósito evolutivo de la cáscara de un grano de maíz es resistir a los ataques del exterior, pero ahora había una rebelión en su interior que hacía las veces de olla exprés en miniatura. Las moléculas de agua que se habían convertido en vapor se encontraban atrapadas y no tenían forma de escapar, por lo que la presión aumentaba en el interior. Las moléculas de gas no cesaban de colisionar entre ellas y con las paredes del recipiente, y al aumentar la cantidad de moléculas de gas y la velocidad a la que se movían, hacían cada vez más ruido en el interior de la cáscara.

Las ollas exprés van muy bien porque el vapor caliente es de lo más efectivo a la hora de cocinar, y lo mismo ocurre en el interior de las palomitas. Mientras buscaba una bolsita de té, los gránulos de almidón se estaban convirtiendo en una sustancia gelatinosa presurizada y la presión seguía aumentando. La cáscara externa de un grano de maíz puede soportar este estrés, pero solo hasta cierto punto. Cuando la temperatura se acerca a los 180 °C en el interior y la presión es casi diez veces superior a la presión normal del aire, esa sustancia viscosa ya roza la victoria.

Sacudí un poco la sartén y oí la primera explosión sorda proveniente del interior. Tras unos segundos, sonó como si estuvieran disparando una ametralladora en miniatura, y vi como la

tapa se levantaba con cada golpe que recibía desde el interior. Cada explosión traía consigo además una bocanada impresionante de vapor que salía por debajo de la tapa de la sartén. Dejé todo un momento para servirme el té y, en ese preciso instante, el tumulto del interior movió la tapa y los copos empezaron a volar por los aires.

En momentos de catástrofe, las reglas cambian. Hasta ese instante, una cantidad fija de vapor de agua se encuentra confinada, y la presión que ejerce en el interior de la cáscara aumenta a medida que sube la temperatura. Pero cuando la cáscara dura finalmente sucumbe, el interior queda expuesto a la presión atmosférica de la sartén y ya no se topa con limitaciones de volumen de ningún tipo. La masa de almidón viscoso sigue llena de moléculas calientes en movimiento, pero ya nada ofrece resistencia desde el otro lado. Así que se expande de forma explosiva hasta que la presión interior coincide con la exterior. La masa blanca compacta se convierte entonces en un copo expansivo, espumoso y blanco, dando la vuelta por completo al grano; y al enfriarse, se solidifica. La transformación se ha consumado.

Al retirar las palomitas descubrí algunas víctimas que no habían sobrevivido. Granos oscuros, quemados y sin abrir tamborileaban tristes en el fondo de la sartén. Si la cáscara exterior está dañada, el vapor de agua escapa al calentarse, así que la presión no llega a aumentar. La razón por la que el maíz explota y otros cereales no lo hacen es que las cáscaras de los demás son porosas. Si un grano está demasiado seco —quizás porque no fue cosechado en el

momento idóneo—, no contiene el agua suficiente para provocar la presión que se necesita para romper la cáscara. Sin la violencia de la explosión, el maíz incomedible sigue siendo incomedible.

Me llevé el té y el bol de palomitas perfectamente cocinadas a la ventana y observé la tormenta. La destrucción no tiene por qué ser siempre mala.

* * * *

Lo sencillo es bello. Y esta belleza es todavía más satisfactoria cuando se ha condensado a partir de algo complejo. Para mí, las leyes que nos explican el comportamiento de los gases son como una de esas ilusiones ópticas que te hacen creer que estás viendo algo concreto, pero que, cuando parpadeas y vuelves a mirar, ves que es algo completamente distinto.

Vivimos en un mundo hecho de átomos. Cada una de estas motitas de materia está recubierta de un patrón distintivo de electrones con carga negativa que actúan como guardianes del denso núcleo cargado positivamente. La química es la historia de cómo esos vigilantes comparten sus tareas entre muchos átomos, cambiando de formación pero siempre obedeciendo las estrictas reglas del mundo cuántico y manteniendo a los núcleos cautivos en unos patrones más amplios llamados moléculas. En el aire que respiro mientras escribo esto hay parejas de átomos de oxígeno —cada pareja forma una molécula de oxígeno— moviéndose a 1440 km/h y chocando con parejas de átomos de nitrógeno que viajan a 320

km/h, y que luego quizás rebotan contra una molécula de agua que va a más de 1600 km/h. Es terriblemente caótico y complicado — distintos átomos, distintas moléculas, distintas velocidades— y, además, en cada centímetro cúbico de aire hay unas 30 000 000 000 000 000 000 000 (3×10^{19}) moléculas individuales, cada una de las cuales choca aproximadamente mil millones de veces por segundo. Uno podría pensar que lo más sensato sería dejar el asunto mientras todavía está a tiempo y ponerse a estudiar cirugía cerebral o teoría de la economía o cómo *hackear* superordenadores. O, en cualquier caso, algo más sencillo. Por suerte, quienes descubrieron el comportamiento de los gases no tenían ni la más remota idea de todo esto. Y es que la ignorancia puede ser muy útil. La idea de los átomos no llegó a formar parte de la ciencia hasta principios del siglo XIX, y la prueba irrefutable de su existencia no apareció hasta el año 1905, aproximadamente. En 1662, lo único que tenían Robert Boyle y su ayudante Robert Hooke eran unos objetos de cristal, algo de mercurio, un poco de aire atrapado y la cantidad justa de ignorancia. Descubrieron que, a medida que aumentaba la presión a la que se encontraba una bolsa de aire, su volumen menguaba. Esta es la ley de Boyle, y dice que la presión del gas es inversamente proporcional al volumen. Un siglo después, Jacques Charles descubrió que el volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura. Es decir, que si duplicas la temperatura, duplicas también su volumen. Resulta casi imposible de creer. ¿Cómo puede tanta complicación atómica acabar convirtiéndose en algo tan sencillo y tan coherente?

* * * *

Una última bocanada de aire, un coletazo tranquilo con su gruesa cola, y el gigante deja atrás la superficie del mar. Lo único que este cachalote necesita para vivir durante los próximos cuarenta y cinco minutos se encuentra almacenado en su cuerpo, así que su cacería puede empezar. El premio es un calamar gigante, un monstruo gomoso armado de tentáculos, de feroces ventosas y de un pico aterrador. Para encontrar a su presa, el cachalote debe aventurarse en las profundidades de lo más oscuro del océano, en lugares a los que la luz del sol no ha llegado jamás. Sus inmersiones normales alcanzan de 500 a 1000 metros de profundidad, y el récord registrado es de unos dos kilómetros. El cachalote sondea la oscuridad con un sonar altamente direccional, esperando oír el débil eco que le indique que la cena podría andar cerca. Y mientras tanto el calamar gigante sigue flotando, totalmente desprevenido y ajeno a lo que está ocurriendo, porque es sordo.

El tesoro máspreciado que el cachalote se lleva en su viaje hacia la oscuridad es el oxígeno, ya que lo necesita para mantener las reacciones químicas que proporcionan energía a los músculos que usa para nadar, así como para su propia vida. Pero el oxígeno gaseoso que le proporciona la atmósfera es un lastre en las profundidades; de hecho, en el momento en que el cachalote deja la superficie, el aire que albergan sus pulmones se convierte en un problema. Cada metro que nada hacia abajo es un metro más de

agua presionando sus pulmones para adentro. Las moléculas de nitrógeno y oxígeno rebotan entre ellas y con las paredes de los pulmones, y cada colisión provoca una opresión minúscula. En la superficie, la presión interior y la presión exterior mantienen al cachalote en equilibrio. Pero cuando el gigante se sumerge, se ve aplastado por el peso adicional del agua que lo cubre, y la opresión del exterior supera a la del interior. Esto provoca que las paredes de los pulmones se contraigan hasta encontrar el equilibrio, es decir, hasta que lleguen al punto en que las opresiones vuelvan a estar equilibradas. Y este equilibrio se alcanza porque, cuando el pulmón del cachalote se comprime, cada molécula tiene menos espacio y las colisiones entre ellas resultan más frecuentes; por lo tanto, hay más moléculas golpeando hacia fuera por todo el pulmón, lo que aumenta la presión en el interior, hasta que llega un momento en que las moléculas, que no paran de chocar entre sí, pueden competir en igualdad de condiciones con las del exterior. Diez metros de profundidad en el agua son suficientes para ejercer una presión añadida equivalente a toda una atmósfera adicional. De manera que incluso a esa profundidad, cuando el cachalote todavía podría ver la superficie con facilidad si lo intentara, sus pulmones quedan reducidos a la mitad de su volumen inicial. Esto significa que hay el doble de colisiones moleculares contra las paredes, lo que iguala la presión duplicada que proviene del exterior. Pero puede que el calamar esté a un kilómetro de la superficie del océano, y, a esa profundidad, la enorme presión del agua podría

provocar que el volumen de los pulmones del cachalote se desplomara hasta el 1% del volumen que tienen en la superficie.

Al final, el cachalote oye el reflejo de uno de sus ruidosos chasquidos. Con los pulmones encogidos y contando con el sonar como única guía, ahora debe prepararse para luchar en la inmensa oscuridad. El calamar gigante está armado y, aun cuando terminara sucumbiendo, es probable que el cachalote salga con horribles cicatrices. Sin oxígeno en los pulmones, ¿cómo puede siquiera tener energía para luchar?

El problema de tener los pulmones encogidos es que, si su volumen está reducido a una centésima parte del que tenía en la superficie, la presión del gas en el interior será cien veces mayor que la presión atmosférica. En los alveolos, la parte delicada de los pulmones donde se realiza el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre, esta presión podría impulsar demasiado nitrógeno y demasiado oxígeno, los cuales se disolverían en el flujo sanguíneo del cachalote. El resultado sería un caso extremo de lo que los submarinistas llaman «síndrome de descompresión», y cuando el cachalote regresara a la superficie, el nitrógeno sobrante se convertiría en burbujas dentro de la sangre, lo que causaría todo tipo de daños. La solución evolutiva es cerrar los alveolos por completo desde el instante en que el cachalote abandona la superficie. No hay otra alternativa. Pero puede acceder a sus reservas de energía porque su sangre y sus músculos son capaces de almacenar una enorme cantidad de oxígeno. Los cachalotes tienen el doble de hemoglobina que los humanos, y unas diez veces

más de mioglobina, que es la proteína que se usa para almacenar energía en los músculos. Mientras estaba en la superficie, el cachalote iba rellenando estas grandes reservas. Los cachalotes nunca respiran con los pulmones cuando se sumergen en las profundidades. Es demasiado peligroso. Y tampoco apuran su última bocanada de aire mientras están sumergidos. Viven —y luchan— gracias al excedente acumulado en sus músculos, a las provisiones que han almacenado durante el tiempo que han pasado en la superficie.

Nadie ha presenciado nunca una batalla entre un cachalote y un calamar gigante. Pero los estómagos de los cachalotes muertos contienen montones de picos de calamar —la única parte de este cefalópodo que no pueden digerir—, así que cada cachalote lleva en su interior la cuenta de las batallas ganadas. Mientras el cachalote victorioso nada hacia la luz del sol, sus pulmones se van inflando de nuevo y recuperan la conexión con la reserva de sangre. A medida que la presión disminuye, el volumen vuelve a aumentar hasta que recupera su nivel inicial.

Curiosamente, la combinación de los comportamientos moleculares complejos con la estadística —la cual no suele considerarse simple— da lugar a unos resultados relativamente sencillos en la práctica. Desde luego, hay muchas moléculas y muchas colisiones y muchas velocidades distintas, pero los dos únicos factores que importan son el rango de velocidades a las que se mueven las diversas moléculas y la cantidad media de colisiones contra las paredes de su contenedor. La cantidad de colisiones y la fuerza de

cada una de ellas —provocada por la velocidad y la masa de la molécula— determinan la presión. La opresión ejercida por todo ello, comparada con la opresión del exterior, es lo que determina el volumen. Y, entonces, la temperatura tiene un efecto ligeramente distinto.

* * * *

— ¿Quién estaría preocupado ahora mismo? —El profesor, Adam, lleva una túnica blanca que se estira sobre una panza satisfecha y redonda, justo la clase de apariencia que un director de *casting* buscaría para un panadero bonachón. Su marcado acento del este de Londres es un buen añadido. Hince el dedo en la mísera placa de masa que tiene frente a él, y se le queda pegada como si estuviera viva (porque, de hecho, lo está) —. Lo que un buen pan necesita — anuncia— es aire.

Estoy en una clase de cocina aprendiendo a hacer *focaccia*, un pan tradicional italiano. Diría que la última vez que me puse un delantal tenía diez años. Y aunque he hecho pan muchas veces, nunca había visto una masa que pareciera el respaldo de una silla, así que ya siento que estoy aprendiendo.

Siguiendo las instrucciones de Adam, empezamos a preparar la masa desde el principio. Cada uno de nosotros mezcla la levadura fresca con agua y luego vamos añadiendo harina y sal, y amasamos con vigor terapéutico para desarrollar el gluten, la proteína que da elasticidad al pan. Mientras estiramos y rompemos la estructura

física, la levadura viva que dicha estructura contiene está fermentando azúcares y creando dióxido de carbono. Esta masa, como todas las que he hecho, no contiene nada de aire; lo único que alberga en su interior es un montón de burbujas de dióxido de carbono. Es como un biorreactor de color dorado, pegajoso y elástico, y los productos de vida que contiene están ahí atrapados, lo que hace que aumente de tamaño. Una vez concluida esta primera fase, damos a la masa un generoso baño de aceite de oliva y vemos como esta sigue subiendo mientras nos quitamos los restos de las manos y recogemos los que quedan en la mesa y en un perímetro sorprendentemente amplio a nuestro alrededor. Cada reacción de fermentación produce dos moléculas de dióxido de carbono, las cuales son repelidas por la levadura. El dióxido de carbono, o CO_2 —dos átomos de oxígeno pegados a un átomo de carbono—, es una pequeña molécula arreactiva, que a temperatura ambiente tiene energía suficiente para flotar libremente como un gas. Y cuando se encuentra en una burbuja con muchas más moléculas de CO_2 , se pasa horas actuando como si estuviera en los coches de choque. Cada vez que choca con otra molécula, es muy probable que ambas intercambien algo de energía, como en el billar, cuando la bola blanca choca con alguna de las otras bolas. A veces, una de ellas se detendrá casi por completo y la otra se quedará con toda esa energía y saldrá disparada a toda velocidad. Otras veces, compartirán esa energía. Cada vez que una molécula choca contra la pared de la burbuja, rica en gluten, ejerce presión al rebotar contra ella. Esta reacción es la que, llegados a este punto, hace que

las burbujas crezcan, ya que al albergar más moléculas en su interior, la presión ejercida hacia fuera es cada vez más persistente. De esta forma, las burbujas se expanden hasta que la presión contraria ejercida por la atmósfera equilibra la presión hacia el exterior que ejercen las moléculas de dióxido de carbono. A veces, las moléculas de CO_2 se mueven muy rápido cuando chocan con la pared, y en otras ocasiones lo hacen muy lentamente. A los panaderos, como a los físicos, no les interesa saber cuáles son las moléculas que chocan contra ciertas paredes a unas velocidades concretas, porque todo eso es cuestión de estadística: a temperatura ambiente y en condiciones normales de presión atmosférica, el 29% de ellas viajan a una velocidad de entre 350 y 500 metros por segundo, y saber cuál es cuál no es relevante.

Adam da una palmada para llamar nuestra atención y destapa la masa creciente con la gracia de un mago. Y entonces hace algo que es nuevo para mí. Estira la masa cubierta de aceite y la dobla sobre sí misma desde ambos extremos. El objetivo es atrapar aire entre los pliegues. Mi primera reacción silenciosa es pensar que está haciendo trampa, porque yo siempre había asumido que el único «aire» que había dentro del pan era el CO_2 de la levadura. Una vez, en Japón, vi a un maestro de origami enseñar a sus alumnos con mucho entusiasmo cómo aplicar celo en un caballo angular, y entonces sentí la misma rabia irracional que en esos instantes en la cocina. Pero, si lo que quieres es aire, ¿por qué no usar el mismo aire? Cuando esté preparado nuestro pan, nadie lo sabrá. Me rindo a la sabiduría del experto y, mansamente, doblo mi propia masa.

Unas horas más tarde, cuando ya ha subido la masa un poco más y hemos hecho algunos dobleces más, y tras incorporar más aceite del que creía posible, mi naciente *focaccia* y sus burbujas estaban listas para entrar en el horno. Ese «aire» de dos clases distintas estaba a punto de tener su gran momento.

En el horno, la energía térmica fluía por el interior del pan. La presión allí dentro seguía siendo la misma que en el exterior, pero la temperatura del pan había aumentado súbitamente de 20 a 250¹. En un gas, eso significa que las moléculas se aceleran. Lo que resulta contradictorio es que ninguna molécula tiene temperatura propia. Un gas —que es un conjunto de moléculas— puede tener temperatura, pero las moléculas que lo constituyen, no. La temperatura del gas no es más que una forma de expresar la energía cinética media de las moléculas, pero cada una de las moléculas está acelerándose y lentificándose constantemente, intercambiando su energía con las demás en cada colisión. Las moléculas individuales se limitan a montar en sus coches de choque particulares sirviéndose de la energía de la que disponen. Cuanto más rápido se mueven, más fuerte es el choque contra los lados de las burbujas y, por lo tanto, mayor es la presión que generan. Cuando metí el pan en el horno, las moléculas del gas ganaron inesperadamente muchísima energía térmica, y eso aumentó su velocidad. La velocidad media pasó entonces de 480 a 660 metros por segundo. De esta forma, la presión hacia el exterior ejercida en las paredes de las burbujas aumentó significativamente, y no había presión exterior que las detuviera. Cada burbuja creció en

proporción a la temperatura, abriéndose paso por la masa hacia el exterior y forzándola a expandirse. Y aquí viene lo bueno: las burbujas de aire —constituidas, en su mayor parte, por nitrógeno y oxígeno— se expandieron de la misma forma que las burbujas de CO_2 . Esta es la última pieza del puzle. Resulta que no importa de qué tipo sean las moléculas. Si duplicas la temperatura, el volumen se duplica (siempre que la presión se mantenga constante). Y de la misma forma, si mantienes el volumen constante y duplicas la temperatura, la presión se duplicará. El hecho de que haya átomos de distintos tipos en la mezcla es irrelevante, porque la estadística es la misma para cualquier mezcla. Nadie que vea el resultado final del pan podría diferenciar qué burbujas eran de CO_2 y cuáles de aire. Llegados a este punto, la base de proteína y carbohidrato que rodeaba las burbujas se coció y se solidificó. El tamaño de las burbujas se mantuvo fijo. Y así, nuestra blanca y esponjosa *focaccia* quedaba asegurada.

Existe una ley que describe el comportamiento de los gases, es la que conocemos como «ley de los gases ideales», y el idealismo de su nombre está plenamente justificado porque la ley funciona. De hecho, funciona extraordinariamente bien. Esta ley dice que, en una masa gaseosa fija, la presión es inversamente proporcional al volumen —al duplicar la presión, el volumen se reduce a la mitad—, la temperatura es directamente proporcional a la presión —al duplicar la temperatura, la presión se duplica—, y el volumen es directamente proporcional a la temperatura si la presión se mantiene fija. No importa qué gas sea, lo único que importa es

cuántas moléculas de ese gas hay. La ley de los gases ideales es lo que hace que funcionen los motores de combustión interna y los globos aerostáticos..., y que se hagan las palomitas. Y es relevante tanto para las cosas que se calientan como para las que se enfrían.

* * * *

Llegar al Polo Sur fue una de las hazañas más importantes de la historia de la humanidad. Los grandes exploradores polares — Amundsen, Scott y Shackleton, entre otros— son figuras legendarias, y los libros sobre sus hazañas y fracasos cuentan algunas de las mejores historias de aventuras de todos los tiempos. Ellos se las tuvieron que ver con un frío inimaginable, con la falta de comida, con océanos indomables y con prendas de vestir que no estaban a la altura de su misión, pero además tenían a la poderosa ley de los gases ideales literalmente en su contra.

El centro de la Antártida es un altiplano elevado y seco. Está cubierto de una gruesa capa de hielo, pero casi nunca nieva. Su superficie blanca y brillante refleja prácticamente toda la débil luz que llega hacia el espacio, y las temperaturas pueden bajar de los ochenta grados bajo cero. Allí reina el silencio. A nivel atómico, la atmósfera es muy débil, ya que las moléculas del aire tienen poca energía —a causa del frío— y se mueven relativamente despacio. El aire de arriba desciende hacia el altiplano, y el hielo le roba todo el calor, así que el aire, ya frío, se enfría todavía más. La presión es fija, así que el aire encoge su volumen y se vuelve más denso. Las

moléculas están más juntas y se mueven más lentamente, porque no son capaces de ejercer la presión suficiente hacia el exterior para competir con el aire que las rodea y que ejerce presión hacia el interior. A medida que la tierra se extiende desde el centro del continente hacia el océano, este aire frío y denso se aleja también del centro deslizándose por la superficie, imparable, como una lenta cascada de agua. Los enormes valles lo canalizan como si fueran embudos, y va ganando velocidad a medida que estos embudos descienden hacia fuera, siempre hacia fuera, en dirección al océano. Son los vientos catabáticos del Ártico, y si uno pretende ir andando al Polo Sur, ha de prepararse para sentirlos en la cara durante todo el camino. Cuesta trabajo imaginar de qué otra forma podría la naturaleza haber jugado más sucio con los exploradores polares.

La palabra «catabático» no es más que el término que se usa para denominar a este tipo de viento, que podemos encontrar en muchos sitios, no todos fríos. Mientras descienden, esas débiles moléculas se calientan, aunque no sea más que un poco. Y las consecuencias de este calentamiento pueden ser impresionantes.

En 2007 vivía en San Diego y trabajaba en el Instituto Oceanográfico Scripps. Como norteña, desconfiaba un poco de la eterna luz solar, pero como me permitía nadar todas las mañanas en una piscina descubierta de cincuenta metros, no me podía quejar. Y las puestas de sol eran increíbles. San Diego está en la costa y, si miras hacia el oeste, puedes disfrutar de una vista impresionante del océano Pacífico, sin contar que la increíble belleza del horizonte al anochecer nunca defraudaba.

Echaba mucho de menos las estaciones, eso es cierto. Parecía que el tiempo no pasara jamás, era casi como vivir en un sueño. Pero entonces llegaban los vientos de Santa Ana y pasábamos de un tiempo soleado, cálido y alegre a un calor plomizo y seco. Los vientos de Santa Ana llegan en otoño, cuando el aire cruza los altos desiertos y fluye sobre la costa de California hacia el océano. Estos son también vientos catabáticos, exactamente como los del Ártico. Pero para cuando llegan al océano, el aire está mucho más caliente en la costa de lo que lo estaba en el altiplano. Recuerdo muy bien un día en que iba por la Interestatal 5 en dirección norte, hacia uno de los grandes valles que canalizaban el aire caliente hasta el mar. Un riachuelo de nubes bajas cubría el valle. Mi novio de entonces era quien conducía.

— ¿Hueles a humo? —pregunté.

—No seas tonta —dijo él.

Pero a la mañana siguiente me desperté en un mundo extraño. Había incendios enormes al norte de San Diego extendiéndose a través de los valles, y el aire traía ceniza. Una hoguera se le había ido a alguien de las manos en esas condiciones tan cálidas y secas, y ahora los vientos alimentaban el fuego y este avanzaba imparable hacia la costa. El riachuelo de nubes que había visto antes era humo. La gente iba al trabajo, y al llegar, o bien los mandaban a casa, o bien se apiñaban para escuchar la radio, preguntándose si sus hogares estarían a salvo. Nosotros esperamos. El horizonte estaba nublado a causa de esas enormes nubes de ceniza que podían verse desde el espacio, pero los atardeceres de aquellas

jornadas eran espectaculares. Tres días más tarde, el humo empezó a disiparse. Las llamas habían arrasado los hogares de algunos de mis conocidos. Todo estaba cubierto por una capa de ceniza y las autoridades sanitarias aconsejaban evitar hacer ejercicio en el exterior durante al menos una semana.

Arriba, en el altiplano, el aire caliente del desierto se había enfriado y densificado, deslizándose seguidamente por las laderas, igual que los vientos que había tenido que afrontar Scott en el Ártico. Pero si aquellos incendios se desataron con tanta virulencia no fue solo porque el aire fuera seco, sino también porque estaba caliente. ¿Por qué se calentaba aún más al bajar de las alturas? ¿De dónde proviene esa energía? La ley de los gases ideales sigue actuando en este caso: se trataba de una masa fija de aire, y se movía a tal velocidad que no había tiempo para que se produjera ningún intercambio de energía con algo de lo que la rodeaba. Mientras esa corriente de aire denso bajaba, la atmósfera del fondo de la montaña ejercía presión sobre ella, porque la presión era mayor ahí abajo. Ejercer presión sobre algo es una forma de darle energía. Imagina, por ejemplo, cómo chocan las moléculas de aire contra la pared de un globo que se dirige hacia ellas. Rebotarán con más energía de la que tenían antes, porque chocan contra una superficie en movimiento. Así pues, el volumen del aire de los vientos de Santa Ana disminuyó porque la atmósfera que lo rodeaba estaba apretándolo hacia dentro. Esa compresión proporcionó más energía a las moléculas de aire que estaban en movimiento y, por lo tanto, la temperatura del viento aumentó. A esto se lo llama

«calentamiento adiabático». Todos los años, en cuanto llegan los vientos de Santa Ana al estado de California, se extrema la precaución con las hogueras. Como ese aire tan caliente y seco lleva días robando la humedad del paisaje, es muy fácil que una chispa provoque un incendio. Y el calor no proviene únicamente del sol californiano; también procede de la energía extra que obtienen las moléculas del gas al ser comprimidas por el aire más denso que encuentran más cerca del océano. Cualquier cosa que varíe la velocidad de las moléculas del aire afectará a su temperatura.

Sucede lo mismo, pero en sentido contrario, cuando echas un chorro de nata montada de un bote. El aire que sale con la nata se ha expandido súbitamente y ha ejercido presión en todo cuanto tiene a su alrededor, lo cual hace que libere energía y se enfríe. Si la boquilla del bote de nata montada resulta fría al tacto es porque el gas que sale por ahí libera parte de su energía al entrar en contacto con la atmósfera libre, de manera que, en el lugar por donde sale, queda menos energía y, por lo tanto, el bote está frío.

La presión atmosférica es una medida para conocer la fuerza con que esas diminutas moléculas golpean una superficie. Normalmente no nos damos cuenta porque esos golpes son los mismos en todas las direcciones (si sostengo una hoja de papel, esta no se mueve porque se ve empujada con la misma fuerza desde los dos lados). A todos nos empuja el aire todo el rato, y, sin embargo, apenas lo notamos. Llevó mucho tiempo entender el verdadero alcance de ese empuje, y cuando por fin se comprendió, la respuesta dejó a todos algo sorprendidos. La magnitud del descubrimiento era fácil de

apreciar porque su demostración fue inusualmente memorable. No es muy frecuente que un importante experimento científico dé además pie a un espectáculo teatral, pero en este caso se daban todos los ingredientes necesarios: caballos, suspense, un resultado impresionante y el emperador del Sacro Imperio Romano como espectador.

La dificultad residía en que, para calcular la fuerza con que el aire empuja algo, es preciso extraer todo el aire que hay al otro lado del objeto, creando un vacío. En el siglo IV a. C., Aristóteles había afirmado que «la naturaleza aborrece el vacío», y esta seguía siendo la idea predominante casi mil años después. Crear vacío parecía, pues, algo descartado. Pero tiempo después, aproximadamente hacia 1650, Otto von Guericke inventó la primera bomba de vacío. En lugar de escribir un artículo técnico sobre el asunto y dejarlo caer en el olvido, decidió crear un espectáculo para demostrar su teoría². Seguramente, el hecho de ser un político y diplomático reconocido le fue de gran ayuda, así como las buenas relaciones que mantenía con los dirigentes de su época.

El 8 de mayo de 1654, Fernando III, emperador del Sacro Imperio Romano y señor de una gran parte de Europa, se juntó con sus cortesanos fuera del Reichstag, en Bavaria. Otto presentó una esfera hueca de cincuenta centímetros de diámetro y hecha de cobre grueso. Estaba separada en dos mitades cuyos bordes se tocaban. Cada mitad tenía una argolla en la parte exterior, para que se pudieran atar sendas cuerdas y usarlas para tirar de cada una de las mitades. Otto engrasó la superficie de los bordes, unió las dos

partes y utilizó su flamante bomba de vacío para extraer el aire del interior de la esfera. No había nada que las mantuviera unidas, pero cuando se hubo extraído todo el aire, parecía que las dos mitades estuvieran pegadas con cola. Otto se había dado cuenta de que la bomba de vacío le permitía comprobar cuánta presión podía llegar a ejercer la atmósfera. Había miles de millones de minúsculas moléculas de aire golpeando sin cesar el exterior de la esfera, y esto era lo que mantenía las dos mitades unidas. Pero dentro no había nada que contrarrestara esa presión³. Solo se podían separar los dos hemisferios si se tiraba de ellos con más fuerza de la que ejercía la presión del aire.

Entonces trajeron los caballos. Se ató unos cuantos en cada lado de la esfera para que tiraran en direcciones opuestas, como en una gran demostración del juego de la soga. Bajo la mirada del emperador y su séquito, los caballos tiraban contra el aire invisible. Lo único que mantenía la esfera unida era la fuerza de las moléculas de aire que chocaban contra algo del tamaño de un balón de playa. Pero la fuerza de treinta caballos no fue suficiente para separar la esfera. Cuando se detuvo el tira y afloja, Otto abrió la válvula para dejar que el aire penetrara en el interior de la esfera, y entonces las dos mitades se separaron por sí solas. No había duda alguna sobre el vencedor. La presión del aire era mucho más fuerte de lo que nadie habría imaginado. Si se extrae todo el aire de una esfera de ese tamaño y se la cuelga en vertical, la presión hacia arriba del aire podría, en teoría, soportar hasta dos mil kilos, lo que equivale al peso de un rinoceronte adulto. Esto significa que si

dibujas un círculo de cincuenta centímetros de diámetro en el suelo, la fuerza del empuje del aire en ese trozo de suelo también equivale al peso de un rinoceronte de dos mil kilos. Esas diminutas moléculas invisibles nos golpean con muchísima fuerza. Otto llevó a cabo su demostración en muchas ocasiones frente a públicos de carácter distinto, y su experimento llegó a conocerse con el nombre de «los hemisferios de Magdeburgo», por la población natal de su descubridor.

Los experimentos de Otto se hicieron famosos en parte porque otras personas escribieron sobre ellos. La primera vez que sus ideas se introdujeron en la corriente prevaleciente de la ciencia fue gracias a un libro escrito por Gaspar Schott y publicado en 1657. Precisamente leyendo sobre la bomba de vacío de Otto fue como se inspiraron Robert Boyle y Robert Hooke para llevar a cabo sus experimentos sobre la presión del gas.

Tú mismo puedes llevar a cabo una versión casera de este experimento, sin necesidad de caballos o emperadores. Coge un cuadrado de cartón plano y grueso que tenga el tamaño adecuado para cubrir un vaso. Conviene hacer esta prueba sobre el fregadero, para evitar percances. A continuación llena el vaso de agua hasta el borde y coloca encima el cartón. Empújalo contra el borde del vaso, de manera que no quede nada de aire entre la superficie del agua y el cartón. Entonces, gira el vaso y retira la mano. El cartón, que estará soportando todo el peso del agua, se quedará donde está. Si lo hace es porque hay moléculas de aire que lo golpean desde abajo,

empujándolo hacia arriba. Ese empuje es suficiente para mantener arriba el agua.

El martilleo de las moléculas de aire no solo sirve para mantener las cosas en un sitio. También puede usarse para mover objetos, y los humanos no fueron los primeros en aprovecharse de ello. Vamos a conocer ahora a un elefante, uno de los mayores expertos del planeta en manipular su entorno sirviéndose del aire.

El elefante africano es un gigante majestuoso al que normalmente encontramos paseando tranquilamente por la seca y polvorienta sabana. La vida familiar del elefante se construye alrededor de las hembras. Una elefanta de edad avanzada —la matriarca— lidera el grupo mientras deambulan para encontrar comida y agua, confiando en sus recuerdos del paisaje para tomar decisiones. Pero la supervivencia de estos animales no depende únicamente de su peso. Puede que los elefantes tengan un cuerpo torpe y pesado, pero para compensar, disponen de una de las herramientas más delicadas y sensibles del reino animal: la trompa. Cuando una familia se desplaza, no dejan nunca de explorar el mundo con esta extremidad tan peculiar, con la cual señalizan, olfatean, comen y resoplan.

La trompa de los elefantes es fascinante en muchos sentidos. Es una red de músculos entrelazados, capaces de doblarse y alzarse y de recoger objetos con una destreza asombrosa. Y si eso fuera todo, ya sería lo suficientemente útil, pero las dos fosas nasales que recorren toda la longitud de la trompa la hacen todavía mejor. Estas fosas son como tuberías flexibles que unen la punta husmeadora de

la trompa con los pulmones del elefante. Y es aquí donde empieza la diversión.

Cuando nuestra elefanta y su familia se acercan a una laguna, el aire «quieto» que las rodea sigue chocando y empujando como en cualquier otra parte, golpeando su arrugada piel gris, el suelo y la superficie del agua. La matriarca camina algo avanzada con respecto al grupo, balanceando la trompa mientras se mete sin prisa en el lago, haciendo que su reflejo se ondule en el agua. Introduce la trompa en el lago, cierra la boca y los enormes músculos de su pecho se levantan y expanden su caja torácica. Al expandirse sus pulmones, las moléculas de aire que contienen se dispersan para ocupar un nuevo espacio. Pero eso significa que, justo al final de la punta de la trompa, donde el agua fría entra en contacto con el aire de sus fosas nasales, hay menos moléculas de aire golpeando el agua. Y las que quedan se mueven igual de rápido, pero no se producen tantas colisiones. La consecuencia es que la presión en el interior de sus pulmones se ha reducido. Ahora la atmósfera está ganando la competición de empujones entre las moléculas de aire que golpean el agua del lago y las moléculas de aire del interior de la matriarca. La presión del interior ya no puede igualar a la del exterior, y el agua es solo algo con lo que hay que lidiar en dicha competición. Así pues, la atmósfera empuja el agua hacia arriba por el interior de la trompa del elefante, porque lo que hay dentro no puede contrarrestar la presión. Una vez que el agua ha ocupado una parte del espacio adicional, las moléculas del aire

del interior vuelven a estar tan juntas como antes, y el agua ya no va a ningún sitio.

Los elefantes no pueden beber con la trompa; si lo intentaran, toserían igual que lo harías tú si intentaras beber por la nariz. Así que cuando la matriarca tiene en la trompa unos ocho litros de agua, deja de expandir su caja torácica. Riza la trompa hacia abajo y la apunta a la boca. Entonces usa los músculos del pecho para comprimir el pecho, reduciendo así el tamaño de los pulmones. Al hacer que las moléculas de aire del interior se aprieten unas contra otras, la superficie del agua que queda hacia la mitad de la trompa resulta golpeada con mucha más frecuencia. En su lucha, el aire del interior y el aire del exterior intercambian los papeles, y el agua se ve propulsada por la trompa hacia la boca de la elefanta. Nuestra matriarca está controlando el volumen de sus pulmones para tener bajo control la fuerza con que sale el aire desde su interior. Si cierra la boca, el único lugar en el que puede haber movimiento es en la trompa, y cualquier cosa que se encuentre en la punta de esta será empujada hacia dentro o hacia fuera. La trompa y los pulmones de los elefantes forman una herramienta combinada que permite manipular el aire de forma que sea el propio aire, y no el elefante, el que se encargue de empujar.

Nosotros hacemos lo mismo cuando sorbemos algo a través de una pajita⁴. Al expandir nuestros pulmones, el aire del interior se distribuye con menos densidad. En el interior de la pajita hay menos moléculas de aire que puedan ejercer presión sobre la superficie del agua, y la presión que la atmósfera ejerce sobre el

resto del líquido hace que este suba por la pajita. A esto lo llamamos sorber, pero en realidad no somos nosotros quienes estamos «tirando» de la bebida. Es la propia atmósfera la que empuja el líquido hacia arriba por la pajita, encargándose de todo el trabajo por nosotros. Incluso algo tan pesado como el agua puede ser redirigido si el martilleo de las moléculas de aire es más fuerte en un lado que en el otro.

Sin embargo, sorber aire a través de una trompa o de una pajita tiene sus limitaciones. Cuanto mayor sea la diferencia de presión entre los dos extremos, más fuerte será ese empuje. Ahora bien, la mayor diferencia que se puede dar cuando sorbemos algo es la diferencia que existe entre la presión atmosférica y cero. Aunque tuviéramos una bomba de vacío perfecta en lugar de pulmones, no podríamos beber en vertical por una pajita de más de 10,2 metros de longitud, porque esa es la altura máxima a la que nuestra atmósfera puede empujar el agua. Así que para explotar todo el potencial de las moléculas de gas para empujar cosas, tenemos que conseguir que actúen en presiones más altas. El empuje de la atmósfera puede ser fuerte, pero si haces que otro gas esté más caliente y lo sometes a una fuerte presión, el empuje será mayor. Si reúnes las suficientes moléculas de gas y haces que choquen contra algo con la frecuencia y la velocidad suficientes, podrás mover una civilización entera.

Una locomotora de vapor es un dragón hecho de hierro, una bestia poderosa que silba y respira. Hace menos de un siglo, estos dragones estaban por todas partes, llevando los productos de la

industria y las necesidades de la sociedad por medio de continentes enteros y abriendo los horizontes de sus pasajeros. Eran algo común y corriente, ruidoso y contaminante, pero también eran hermosas obras de ingeniería. Cuando se volvieron obsoletos, no se dejó morir a aquellos dragones, ya que la sociedad no quería desprenderse de ellos. Se han mantenido vivos gracias a los voluntarios, a los aficionados y a una gran dosis de cariño. Yo crecí en el norte de Inglaterra, así que mi niñez estuvo impregnada de la historia de la revolución industrial, de sus molinos, canales, fábricas y, sobre todo, de vapor. Pero ahora vivo en Londres, de modo que todo aquello parece fácil de olvidar. Un viaje en el tren de vapor de Bluebell en compañía de mi hermana me lo trajo de nuevo a la memoria.

Era un frío día de invierno, perfecto para un viaje propulsado por vapor, con la promesa de té y bollos al llegar a nuestro destino. No estuvimos mucho rato en la estación de la que partimos, pero cuando llegamos a Sheffield Park y nos apeamos del tren, nos envolvió un tráfago constante, lento pero sin pausa. Un enjambre siempre distinto de humanos que parecían diminutos al lado de las bestias de hierro se ocupaba continuamente de las máquinas. Era fácil identificar a los humanos que trabajaban con la maquinaria: petos azules, gorras con visera, actitud alegre, barba —opcional— y normalmente apoyados en alguna parte en los ratos que les quedaban libres entre una máquina y otra. Como mi hermana observó, muchos de ellos parecían llamarse Dave. La belleza de una máquina de vapor reside en que el principio que la mueve es

maravillosamente sencillo, pero la fuerza bruta que produce debe ser estimulada, amansada y cuidada. Por eso, una máquina de vapor y los operarios que la manejan forman un equipo.

Ahí de pie, con la mirada puesta en una enorme máquina de color negro, era difícil comprender que, en el fondo, aquello no era más que un horno con ruedas que se calentaba por medio de un hervidor gigante. Uno de los Daves nos invitó a subir a la cabina. Subimos por la escalera que queda justo detrás del motor y, de pronto, nos hallamos en una gruta llena de palancas de metal, esferas y tubos. Había también dos tazas esmaltadas de color blanco y un bocado guardado detrás de uno de los tubos. Pero lo mejor de la cabina era que nos permitía ver las entrañas de la bestia. El horno gigante del interior de una máquina de vapor está lleno de carbón que, cuando arde, se pone de color amarillo intenso. El fogonero me dio una pala y me dijo que la alimentara yo misma y, obedeciendo, cargué enseguida la pala con carbón del tender que tenía a mis espaldas y lo eché a la brillante boca. La máquina estaba hambrienta. En un trayecto de 18 kilómetros, consume 500 kilos de carbón. Esa media tonelada de oro negro sólido se convierte en gas, es decir, en dióxido de carbono y agua. Y como la combustión libera enormes cantidades de energía, esos gases están extremadamente calientes. Este es el principio de la conversión energética que hace que el tren se mueva.

Si te fijas en una máquina de vapor, verás que su característica principal es el largo cilindro de la propia «máquina», que va desde la cabina hasta la chimenea. Nunca me había parado a pensar qué

había en su interior, pero resulta que está llena de tubos. Estos tubos transportan el gas caliente desde la caja de combustión a través de la máquina, y esto es la caldera. La mayor parte del espacio entre los tubos está ocupado por agua, lo que hace que sea como una bañera gigante llena de líquido hirviendo y burbujeante. Al calentarse con los tubos se produce el vapor, es decir, moléculas calientes de aire que zumban a gran velocidad en el espacio superior del motor. Esta es la esencia de la máquina de vapor: un horno y una caldera que producen grandes nubes de vapor de agua caliente. Este dragón no suelta bocanadas de fuego, sino que se alimenta de miles de millones de moléculas energéticas que se mueven a grandes velocidades pero que están atrapadas en la máquina. La temperatura de ese gas está en torno a los 180 °C y la presión en la parte superior de la caldera es diez veces mayor que la presión atmosférica. Las moléculas golpean con mucha fuerza las paredes de la máquina, pero solo pueden escapar una vez que han cumplido con su cometido.

Bajamos de la cabina y nos dirigimos hacia la parte delantera. El imponente motor, la media tonelada de carbón, la caldera gigante y el equipo humano, todos ellos estaban al servicio de lo que acabamos de ver: dos cilindros con pistones en su interior, cada uno de los cuales tenía unos cincuenta centímetros de diámetro y setenta de largo. Es aquí abajo, en la parte delantera, en un espacio empequeñecido por el dragón de arriba, donde se lleva a cabo el trabajo de verdad. El vapor caliente y sometido a una elevada presión entra por cada uno de los tubos. La presión atmosférica en

el otro extremo del pistón no puede igualar las diez atmósferas que el dragón acaba de exhalar. Las inquietas moléculas empujan el pistón a lo largo del cilindro y son finalmente liberadas a la atmósfera con un chu-chu de satisfacción. Esto es lo que oímos cuando el conocido resoplido de la locomotora de vapor se nos acerca haciendo chu, chu. Es el vapor de agua que está siendo liberado a la atmósfera después de haber cumplido su misión. El pistón mueve las ruedas, y estas se agarran a los raíles y desplazan los vagones. Sabemos que las máquinas de vapor necesitan grandes cantidades de carbón para funcionar, pero casi nadie habla de cuánta agua se consume en cada viaje. Los 500 kilos de carbón con los que se alimenta la máquina en cada recorrido se usan para convertir 4500 litros de agua en gas; este gas empuja un pistón y luego se pierde en la atmósfera con cada chu-chu⁵.

Ya era hora de dejar la máquina y regresar a uno de los vagones del tren para volver a casa. El trayecto de vuelta nos pareció diferente. Las nubes de vapor que silbaban al otro lado de la ventana habían aportado algo nuevo a nuestra excursión. En lugar de parecer ruidosa e intrusiva, ahora la máquina que nos transportaba parecía relativamente silenciosa y tranquila, teniendo en cuenta lo que estaba ocurriendo en su interior. Sería maravilloso que alguien construyera una locomotora de vapor solo con cristal, así podríamos ver a la bestia trabajar.

La revolución del vapor de principios del siglo XIX trató de utilizar la presión de las moléculas de gas para algo útil. Para eso basta con disponer de una superficie llena de moléculas de gas que golpeen

con más fuerza un extremo que el otro. Esa presión puede levantar la tapa de una sartén mientras cocinas, o se puede emplear para transportar alimentos, combustible y personas; pero en cualquiera de los casos, parte de los mismos principios básicos. Hoy en día, ya no usamos motores de vapor, pero seguimos utilizando esa presión. Técnicamente, un motor de vapor es un «motor de combustión externa», porque el horno está separado de la caldera. En el motor de un coche, la combustión tiene lugar en el cilindro: la gasolina se quema justo al lado del pistón, y la propia combustión produce el gas caliente que mueve el pistón. A eso se lo llama «motor de combustión interna». Cada vez que subes a un coche o a un autobús, estás siendo transportado por el empuje de las moléculas de gas.

Es fácil jugar con los efectos de la presión y el volumen, especialmente si tienes una botella de cuello ancho y un huevo duro pelado. La boca de la botella debe ser algo más estrecha que el huevo para que puedas colocarlo sobre ella sin que se caiga dentro. Prende una hoja de papel, métela en la botella, deja que arda unos segundos y luego vuelve a poner el huevo encima de la boca. Espera un rato y verás cómo el huevo se escurre hacia el interior de la botella. Es un poco raro, y de hecho, tener un huevo dentro de una botella de la que no puedes sacarlo es algo inútil. Existen varias soluciones, pero una de ellas es poner la botella boca abajo, de manera que el huevo quede sobre la boca, y ponerla luego bajo el grifo de agua caliente. Al cabo de un rato, el huevo saldrá disparado.

La cuestión es que tenemos una masa fija de gas —en el interior de la botella— y una forma de saber si la presión del interior es mayor o menor que la presión de la atmósfera. Si el huevo bloquea la boca de la botella, el volumen del gas del interior es fijo. Si aumentamos la temperatura del interior quemando algo, la presión del interior aumentará también y el aire se escapará entre los laterales del huevo (si es que lo tenemos encima de la botella). Cuando se vuelva a enfriar, la presión del interior disminuirá —ya que el volumen es fijo— y el huevo será empujado hacia el interior, porque la presión del exterior ahora es mayor que la que empuja hacia fuera desde el interior de la botella. Puedes hacer que el huevo se mueva con solo calentar o enfriar el aire de un contenedor cuyo volumen sea fijo.

Las altas presiones presentes en un motor de vapor son controladas y estables, perfectas para empujar pistones y hacer girar las ruedas. Pero eso no es todo. ¿Por qué malgastar energía en las fases intermedias entre el gas y las ruedas? ¿Por qué no dejar que los gases calientes de presión alta muevan directamente el vehículo hacia delante? Así es como han funcionado siempre las pistolas, los cañones y los fuegos artificiales, aunque, como todos sabemos, las primeras eran muy poco fiables. Pero a principios del siglo XX, la tecnología y la ambición habían avanzado. Y entonces apareció el cohete, la forma más extrema de propulsión directa jamás inventada.

No fue hasta después de la primera guerra mundial cuando la tecnología necesaria alcanzó cierto grado de fiabilidad, pero en la década de 1930 se podía lanzar un cohete que probablemente iría

en la dirección correcta, y que posiblemente no acabaría con la vida de nadie. En la mayoría de los casos. Como ocurre con tantas otras tecnologías nuevas, los inventores consiguieron que funcionaran antes de que nadie supiera qué hacer con ellas. Y del pozo sin fondo de la emocionante creatividad humana surgió algo completamente nuevo y con apariencia moderna que, en realidad, estaba irremediablemente condenado al fracaso: el correo por cohete.

En Europa, el correo por cohete apareció gracias a un solo hombre: Gerhard Zucker. Algunos inventores de la época andaban trasteando con los cohetes, pero Zucker lideró ese campo gracias a su enorme perseverancia y a un optimismo a prueba de cualquier impedimento. Este joven alemán estaba obsesionado con los cohetes, y como el ejército no estaba interesado en su trabajo, buscó en el ámbito civil una excusa para continuar con sus investigaciones. Creía que mandar correo por cohete era algo que el mundo estaba pidiendo a gritos, ya que sería un medio rápido, capaz de cruzar el océano y, además, totalmente novedoso. Los alemanes toleraron sus primeros —e infructuosos— experimentos, hasta que decidieron dejar de hacerlo, y fue entonces cuando Zucker se marchó al Reino Unido. Allí encontró amigos y apoyo entre los miembros de la comunidad filatélica, que estaban encantados con la idea de que apareciera un nuevo tipo de sello para aquella nueva distribución del correo postal. Todo iba bien. Tras una prueba a pequeña escala en Hampshire, Zucker fue enviado a Escocia en julio de 1934 para intentar mandar correo por cohete entre las islas de Scarp y Harris.

El cohete de Zucker no era especialmente sofisticado. La parte principal era un cilindro metálico de un metro de longitud. En su interior llevaba un estrecho tubo de cobre con una boquilla cubierta de explosivo pulverizado en el extremo posterior. El espacio entre el tubo y el cilindro del exterior estaba lleno de cartas, y en la parte delantera había una especie de pico puntiagudo con un muelle, se supone que para suavizar el aterrizaje. Un detalle adorable es que Zucker, en su esquema para el montaje, había anotado junto a la fina capa que separaba el explosivo y las cartas, altamente inflamables, la frase siguiente: «Asbestos embalados alrededor del cartucho para evitar que se dañe el correo». Se colocó el cohete de costado en un caballete inclinado que apuntaba hacia arriba y hacia un lado. En el momento del lanzamiento, una descarga debía prender el explosivo, y la combustión resultante produciría grandes cantidades de gas caliente de alta presión. Las moléculas de gas, que se moverían a gran velocidad, rebotarían en el interior, chocando contra la parte delantera del cohete, lo cual lo movería hacia delante; y como no había un empuje equivalente en la parte trasera, el gas se escaparía por la boquilla hacia la atmósfera. Este desequilibrio en los empujes podría hacer que el cohete se moviera hacia delante a mucha velocidad. La combustión del explosivo duraría todavía unos segundos más, los suficientes para empujar el cohete hacia lo alto y sobrevolar el canal entre las dos islas. A nadie parecía importarle demasiado saber cómo y dónde aterrizaría, pero precisamente por eso se decidió probarlo en una parte muy remota de Escocia rodeada por el mar.

Zucker reunió 1200 cartas para enviarlas como parte de la prueba, cada una de ellas adornada con un sello especial en el que podía leerse «Western Isles Rocket Post». Introdujo tantas como cupieron en el cohete y montó el caballete bajo la atenta mirada de una multitud perpleja y una primitiva cámara de televisión de la cadena BBC. Había llegado el momento.

Cuando presionó el botón del lanzamiento, la descarga encendió el explosivo. La rápida combustión generó la esperada mezcla de gases calientes en el interior del tubo de cobre, y las energéticas moléculas golpearon la parte delantera del cohete, propulsándolo desde el caballete a gran velocidad. Pero al cabo de unos segundos, se oyó un fuerte ruido sordo y el cohete desapareció tras una columna de humo. A medida que el humo desaparecía, vieron como cientos de cartas caían desde el cielo. Los asbestos habían cumplido su parte, pero el cohete no. El gas caliente y a alta presión es difícil de controlar, y las moléculas energéticas habían roto el revestimiento. Zucker atribuyó el error al cartucho de explosivo y rápidamente se puso a recoger las cartas y a preparar una segunda prueba.

Unos días más tarde, se introdujeron en otro cohete las 793 cartas que habían sobrevivido al primer lanzamiento junto con 142 misivas nuevas. En esta ocasión fue lanzado desde la isla de Harris, en dirección a la de Scarp. Pero la suerte no acompañó a Zucker. El segundo cohete también explotó en la plataforma de lanzamiento, y esta vez la explosión fue todavía más sonora. Las cartas que sobrevivieron fueron recogidas de nuevo y enviadas a sus destinatarios mediante el sistema de correo convencional, con los

bordes chamuscados como recuerdo. Ya no se hicieron más pruebas. Durante los años posteriores, el tenaz Zucker siguió trabajando en sus lanzamientos, siempre convencido de que la próxima vez sería la buena. Y, sin embargo, nunca lo fue⁶, al menos no para distribuir el correo. Zucker trabajó duramente contra lo desconocido, pero solo la ventaja de la perspectiva nos permite comprender que no era el momento adecuado ni el lugar adecuado ni la idea adecuada. Si todo lo anterior hubiera estado de su lado, ahora alabaríamos su genialidad. Lo que sucede es que su trabajo de ingeniería espacial a pequeña escala era, sencillamente, demasiado poco fiable y demasiado complejo para enviar mensajes de forma más efectiva y rápida que el transporte motorizado y el telégrafo. Ahora bien, había algo en lo que sí llevaba razón: que usar gases calientes de alta presión como propulsores es una estrategia que tiene un gran potencial para el transporte de cosas. Pero no fue él quien sacó partido de este principio, sino otros los que encontraron una aplicación apropiada y resolvieron los problemas prácticos hasta que lograron que funcionara con éxito. El desarrollo de cohetes se convirtió en el dominio de los ejércitos, con los cohetes alemanes V1 y V2 usados en la segunda guerra mundial como precursores y con los programas espaciales civiles liderando el campo más tarde.

Hoy en día, todos estamos familiarizados con las imágenes de enormes cohetes que transportan cargamentos de personas y equipamiento a la Estación Espacial Internacional, o que ponen satélites en órbita. La potencia de los cohetes puede resultar

intimidante, y los modernos sistemas de control que hacen que ahora sean seguros y fiables son una hazaña humana impresionante. Pero el mecanismo básico que ha permitido volar a cada cohete Saturno V, a cada Soyuz y Ariane y Falcon 9, es el mismo que impulsó al primitivo cohete de Gerhard Zucker. Si creas suficiente gas caliente de alta presión a la velocidad necesaria, podrás usar la enorme energía acumulada proveniente de miles de millones de moléculas que chocan contra cosas. La presión de vuelo en la primera fase de un cohete Soyuz es unas sesenta veces mayor que la presión atmosférica, lo que hace que el empuje sea sesenta veces mayor que la presión normal del aire. Pero es exactamente el mismo tipo de empuje: se trata solamente de moléculas chocando contra cosas. Si hay una enorme cantidad de ellas colisionando a la frecuencia y la velocidad adecuadas pueden mandar un hombre a la Luna. Por eso, no debemos subestimar las cosas que son demasiado pequeñas para poder percibir las a simple vista.

Estamos continuamente rodeados de moléculas gaseosas. La atmósfera de la Tierra nos rodea, choca contra nosotros, nos empuja y también nos mantiene vivos. Lo maravilloso de nuestra atmósfera es que no es estática, sino que se mantiene en movimiento constante y nunca para de cambiar. El aire es invisible a nuestros ojos, pero si pudiéramos percibirlo, veríamos enormes masas de aire que se calientan y enfrían, se expanden y contraen, siempre en movimiento. Lo que hace nuestra atmósfera se rige por las leyes de los gases que hemos visto en acción en este capítulo, igual que ocurre con cualquier otro grupo de moléculas de gas.

Aunque no esté atrapada en el interior de los pulmones de un cachalote o en un motor de vapor, la atmósfera siempre está empujando. Pero como se encuentra rodeada de aire, lo que hace es empujarse constantemente a sí misma por el mundo, adaptándose a las condiciones imperantes. No podemos ver los detalles, pero hemos puesto nombre a sus consecuencias: el tiempo atmosférico.

El mejor lugar para observar una tormenta es una amplia llanura. El día anterior, puede que el viento sea apacible y que el azul que se extiende sobre nuestras cabezas parezca no tener fin. Moléculas invisibles de aire se agrupan cerca del suelo y se separan a medida que suben, sin dejar nunca de empujar, agitarse, reajustarse y fluir. El aire se mueve desde las regiones de altas presiones hasta regiones de presiones bajas, respondiendo a calentamientos y enfriamientos, siempre de camino a otro sitio. Pero esos reajustes son lentos y pacíficos, y no hay ningún indicio que revele las grandes cantidades de energía que transportan las moléculas.

El día de la tormenta amanece como el día anterior, pero el cielo está más claro, por lo que el suelo se calienta con más rapidez. Las moléculas de aire absorben algo de esa energía y se aceleran. Hacia media tarde, una gran muralla nubosa se acerca y se expande mientras se mueve hasta estirarse por todo el horizonte. La energía se está moviendo. Una diferencia de presión es lo que empuja esta losa de arquitectura gaseosa por la amplia llanura. Esta enorme estructura es muy inestable, y de ahí el drama que va a producirse. Las moléculas de aire se empujan con fuerza las unas contra las otras, pero no han tenido tiempo de reorganizarse en unas

condiciones más equilibradas. Y, además, hay grandes cantidades de energía moviéndose de aquí para allá, por lo que la situación no deja de cambiar. El aire cálido, calentado por el suelo, está empujando hacia arriba, hacia el interior de la nube, abriéndose paso a impulsos y levantando torres muy altas que atraviesan y sobrepasan la muralla.

Al posarse las nubes de tormenta sobre nuestras cabezas, el azul infinito se ve sustituido por una capa baja y oscura que encapota el paisaje. En el suelo, estamos encajados por el choque que está teniendo lugar en las alturas. No vemos las moléculas de aire, pero sí observamos cómo las nubes se arremolinan y crecen. Y esta es solo una pequeña muestra de la violencia de su interior, donde las bolsas de aire son golpeadas e impulsadas porque los desequilibrios de la presión son tan exacerbados que el reajuste se efectúa en un proceso rápido y cargado de energía. Cuando las moléculas de aire intercambian energía, las gotitas de agua se enfrían y crecen, y empiezan a caer las primeras gotas de lluvia de mayor tamaño. Fuertes vientos soplan a nuestro alrededor mientras las moléculas corren alborotadas incluso al nivel del suelo.

Los nubarrones de tormenta nos recuerdan que ahí arriba, en el cielo, existe una gran cantidad de energía. Vemos algunos empujones y choques, y nos parecen briosos, pero todo eso no es más que una pequeña muestra de los fuertes movimientos y choques que ocurren a nivel molecular por encima de nuestras cabezas. Las moléculas de aire pueden absorber energía del sol, perderla a manos del océano, ganarla gracias a la condensación a

medida que se forman las nubes o perderla porque irradian esa energía hacia el espacio, y además están constantemente reajustándose según la ley de los gases ideales. Nuestro planeta rotatorio, con su superficie irregular y colorida, complica esos reajustes, igual que lo hacen las nubes, las diminutas agrupaciones de partículas y los gases específicos que están presentes. La predicción del tiempo no es sino una forma de seguir las batallas que se libran sobre nuestras cabezas y de prestar atención a las que más consecuencias acarrearán para los que estamos aquí abajo. Pero la acción que impulsa el corazón de todo esto es la misma que vemos en los elefantes, los cohetes o los motores de vapor. No son más que las leyes de los gases en acción. Y de ahí que la misma parcela de la física que hace que las palomitas exploten rija también el tiempo que va a hacer.

Capítulo 2

Todo lo que sube, baja

La gravedad

La curiosidad es un rasgo común en mi familia. A todos mis parientes les gusta investigar cualquier cosa nueva que se cruce en su camino, siempre están dispuestos a hacer pruebas, y todo esto lo hacen sin convertirlo en un espectáculo. Así que no se sorprendieron en absoluto cuando un día desaparecí en la cocina mientras estábamos en una comida familiar para llevar a cabo algo muy urgente que se me acababa de ocurrir y que requería una botella de limonada y un puñado de pasas. Era un bonito día de verano y estábamos todos reunidos en el jardín de mi madre: mi hermana, mi tía, la abuela y mis padres. Encontré una botella de dos litros de limonada barata con gas, le quité la etiqueta y coloqué el recipiente en el centro de la mesa. Esta nueva locura era observada por mi familia con un interés tranquilo, pero había conseguido captar su atención, así que quité el tapón y metí en la botella un puñado de pasas. El líquido se espumó un poco y, cuando las burbujas desaparecieron, vimos las pasas danzar en el interior. Había previsto que aquello resultaría entretenido durante uno o dos minutos, pero mi abuela y mi padre no podían dejar de mirarlo. La botella se había convertido en una lámpara de lava de pasas. Las uvas pasas se movían desde el fondo de la botella hasta arriba y luego volvían a empezar, haciendo piruetas como locas y chocándose por el camino.

Un gorrión se posó en la mesa para limpiarla de migas y miró la botella con recelo. Mi padre también la miraba con recelo desde su sitio.

— ¿Funciona solo con pasas? —preguntó.

La respuesta es que sí, y hay una muy buena razón para ello. Antes de quitar el tapón de una bebida gaseosa, la presión en el interior es significativamente mayor que la presión del aire que nos rodea. Al desenroscar el tapón, la presión del interior cae. El agua contiene mucho gas disuelto, que se mantiene gracias a la alta presión, pero, de pronto, todo ese gas puede escapar. El problema es que necesita una ruta de salida. Crear una nueva burbuja de gas desde cero es muy difícil, así que lo único que las moléculas de gas pueden hacer es unirse a una burbuja que ya exista. Lo que necesitan es una pasa. Muy convenientemente, las pasas están cubiertas de arrugas en forma de V a cuyo interior la limonada no siempre ha podido llegar. En el fondo de cada arruga hay una protoburbuja, una pequeña bolsa de gas. Por eso necesitan de las pasas, o de cualquier otra cosa que sea pequeña, arrugada y solo un poco más densa que el agua. El gas sale de la limonada y se une a esas protoburbujas, y de esta manera se crea un salvavidas de burbujas alrededor de la pasa que se le queda pegado. Las pasas en sí son más densas que el agua, por lo que la gravedad las arrastra hacia el fondo. Pero cuando quedan recubiertas por varias burbujas, su densidad total disminuye, y así empieza su viaje hacia la superficie. Cuando llegan arriba, las burbujas que traspasan la superficie explotan, y entonces vemos cómo las pasas se dan la vuelta, ya que las

burbujas de debajo suben hacia lo alto y, a su vez, también explotan. Cuando desaparece su salvavidas, la pasa es más densa que la limonada, así que vuelve a hundirse hacia el fondo. Y esto se repetirá una y otra vez hasta que el exceso de dióxido de carbono haya salido de la limonada.

Después de haber acaparado nuestra atención durante una media hora, la frenética danza de las pasas quedó reducida a una excursión ocasional y pausada hacia la superficie, y la limonada adoptó un color amarillento muy poco apetecible. La hermosa exuberancia flotante del principio se había transformado en algo que parecía una enorme botella llena de muestras de orina con moscas muertas en el fondo.

Haz este experimento. Es una buena forma de animar una fiesta algo amuermada, siempre que puedas rescatar algunas pasas de entre los aperitivos. La clave está en que las burbujas y la pasa se convierten en un solo objeto y se mueven al unísono. Si hinchas la pasa con burbujas de aire, apenas aumentas su peso, pero juntos ocupan mucho más espacio. La proporción entre «cosa» y espacio ocupado es lo que conocemos como densidad, y resulta que la combinación de pasa más burbuja es menos densa que la pasa por sí sola. La gravedad solo puede empujar «cosas», así que todo lo que sea menos denso no experimenta tanta atracción hacia la Tierra. Por eso algunos objetos flotan: la flotación no es más que la jerarquía gravitacional poniéndose en orden. La gravedad atrae los líquidos densos hacia abajo, y cualquier objeto que esté en el líquido y sea menos denso será relegado a la superficie, donde permanecerá

flotando. De ahí que digamos que todo lo que sea menos denso que un líquido es flotante.

Los espacios llenos de aire son muy útiles para controlar la densidad relativa y, por consiguiente, la flotabilidad. Es bien sabido que una de las características de diseño que se suponía que debía garantizar que el *Titanic* fuera «inhundible» eran los grandes compartimentos herméticos que ocupaban la parte inferior del barco. Actuaban como las burbujas con la pasa: eran bolsas de aire que aumentaban la flotabilidad del barco y lo mantenían a flote. Cuando las cosas en el *Titanic* se complicaron, resultó que esos compartimentos no eran herméticos, y a medida que se iban inundando, se produjo el mismo efecto que el que vemos en las últimas burbujas explotando en la superficie. Como una pasa sin su salvavidas, el *Titanic* se hundió en las profundidades⁷.

Aceptamos que los objetos se hundan y floten, pero casi nunca reparamos en la verdadera causa de que esto ocurra: la gravedad. El teatro de nuestras vidas se representa en un escenario dominado por esta fuerza omnipresente que siempre nos deja muy claro cuál es el camino «hacia abajo». Es algo sumamente útil, ya que, para empezar, lo mantiene todo organizado a base de dejarlo en el suelo. Pero también es la fuerza más obvia con la que podemos jugar. Las fuerzas son elementos extraños, pues no podemos verlas y, a veces, puede resultar difícil saber qué están haciendo verdaderamente. Pero la gravedad siempre está ahí, con la misma fuerza constante — al menos en la superficie terrestre— y apuntando en la misma dirección. Si quieres jugar con las fuerzas, la gravedad es un punto

de partida fantástico. ¿Y qué mejor forma hay de empezar a jugar que saltando y cayendo?

Los saltos de trampolín o plataforma se encuentran a medio camino entre la libertad absoluta y la locura total. En cuanto saltas del trampolín, te sientes completamente liberado de la sensación de gravedad. No es que haya desaparecido, es que te estás entregando a ella por completo, así que ya no hay nada contra lo que empujar. Puedes rotar como si en teoría fueras un cuerpo libre, como si flotaras en el espacio, y eso es extremadamente liberador. Pero, en esta vida, todo tiene un precio, y en este caso se paga un segundo más tarde, cuando aterrizas en la superficie del agua. Hay dos formas de gestionar este aterrizaje: o bien abres un pequeño túnel en el agua con ayuda de las manos o los pies y te organizas para que el resto de tu cuerpo se deslice con gracia por el túnel, minimizando las salpicaduras; o bien dejas que brazos y piernas, el estómago y la espalda impacten cada uno por su lado, lo cual generará una enorme salpicadura. La segunda opción duele.

A los veintitantos fui saltadora de trampolín y entrenadora durante unos años, pero detestaba saltar desde la plataforma. Los trampolines son flexibles y están a 1 o 3 metros por encima de la piscina. Es algo así como saltar en una cama elástica, pero con la caída más suave. Las plataformas son sólidas y están más arriba, a 5, 7,5 y 10 metros de altura. La piscina donde yo entrenaba solo tenía una plataforma, de 5 metros de altura, pero yo siempre hacía lo que podía para evitarla.

Ahí arriba, en la plataforma de 5 metros de altura, el agua parece estar muy lejos. Siempre había un pequeño riachuelo de burbujas que provenía del fondo, así que podías ver dónde estaba la superficie del agua, incluso cuando la piscina estaba totalmente inmóvil. El salto más básico de calentamiento es el que se conoce como «salto frontal». El nombre lo dice todo. Te colocas en el extremo del trampolín y te inclinas hacia delante formando una L con los brazos fijos encima de la cabeza y manteniendo el cuerpo totalmente recto, aparte de la curva de la cadera. A partir de aquí, la cosa parece un poquito menos aterradora, porque tienes la cabeza más cerca del agua, aunque no mucho. Entonces te pones de puntillas y te dejas caer. De pronto, eres libre. Estáis solos tú y un planeta con una masa de 6000 trillones de toneladas al que te une únicamente una cosa que se llama gravedad, y las leyes del universo establecen que ambos tiráis el uno del otro.

La gravedad, como cualquier otra fuerza, cambia tu velocidad —te acelera—, lo que es una consecuencia de la famosa segunda ley de Newton⁸, la cual dice que toda fuerza neta que actúe sobre ti modificará tu velocidad. Cuando saltas desde un trampolín, al principio estás inmóvil, así que empiezas a moverte lentamente. Lo que hace que la aceleración sea interesante es que se mide con unidades de cambio de velocidad por segundo. Al principio, estás poniéndote en movimiento, así que tardas un tiempo relativamente largo —0,45 segundos— en recorrer el primer metro. Pero el segundo metro ya lo recorres mucho más rápido, de modo que hay menos tiempo para acelerar por el camino. Después del primer

metro, tu velocidad es de 4,2 metros por segundo, pero después del segundo, es solo de 6,2 metros por segundo.

Por lo tanto, te pasas la mayor parte del tiempo que dura un salto en el peor sitio: muy por encima del agua. Cuando saltas desde 5 metros de altura, en la primera mitad del tiempo que pasas en el aire, solo caes 1,22 metros. Después, todo pasa muy rápido. Tardas 1 segundo en recorrer los 5 metros, y para cuando la caída termina, estás cayendo a 9,9 metros por segundo. Pones el cuerpo recto, te abalanzas sobre el agua y deseas con todas tus fuerzas que la salpicadura sea mínima.

Cuando competíamos, mis compañeros siempre estaban ansiosos por saltar desde los trampolines más altos de las piscinas que visitábamos. No era mi caso. Tal como yo lo veía, pasar más tiempo en el aire significaba que había más tiempo para que la cosa se torciera. Pero esto no era especialmente lógico, porque te mueves tan rápido que, en realidad, recorrer esa distancia adicional no te acelera tanto. Tardas 1 segundo en caer 5 metros, pero solo 1,4 segundos en caer 10 metros. Y solo te mueves un 40% más rápido, aunque hayas recorrido el doble de distancia. Era consciente de ello. Pero fui saltadora durante unos cuatro años y jamás he saltado de un trampolín de más de 5 metros de altura. No me dan miedo las alturas; lo que me da miedo son los impactos. Cuanto más tiempo tenga la gravedad para acelerarme, más posibilidades habrá de que la fase de desaceleración sea bien poco agradable. Incluso cuando se te cae el teléfono eres consciente de que dejar que la gravedad tome el control no es siempre una buena idea. Que haya distancia

adicional para la caída propicia la oportunidad de una velocidad adicional..., menos cuando no es así.

En la Tierra, los efectos que la gravedad puede ejercer sobre ti tienen sus límites. Esto sucede porque solo te acelera la fuerza total ejercida sobre tu cuerpo, a lo cual llamamos fuerza resultante. A medida que aceleras, tienes que apartar más aire de tu camino en un período de tiempo concreto, y ese aire también te empuja a ti, lo que reduce de forma eficaz la fuerza de la gravedad, porque está empujando en la dirección opuesta. En algún momento, ambas cosas se equilibran, y entonces estarás viajando a tu velocidad terminal y ya no podrás acelerar más. Para las hojas, los globos y los paracaídas, la resistencia del aire es bastante grande en comparación con la débil fuerza gravitacional, y por eso dicho equilibrio de fuerzas se consigue a una velocidad relativamente baja. Pero para un humano, la velocidad terminal cerca del suelo es de unos 198 kilómetros por hora. Desafortunadamente para cualquier humano en caída, la resistencia del aire resulta bastante insignificante hasta que se alcanzan velocidades muy altas. Y, desde luego, no ejerce la suficiente resistencia como para tranquilizarme ante un salto de un trampolín de 10 metros de altura, ni siquiera a estas alturas de mi vida.

* * * *

Mi investigación científica se centra en la física de la superficie oceánica. Soy experimentalista, lo que significa que parte de mi

trabajo me lleva al océano a medir qué está pasando en esta frontera errática y bella que separa el aire del mar. Y esto implica pasarse semanas trabajando en un barco de investigación, una especie de ciudad científica móvil, flotante y funcional. El problema de vivir en un barco es que tienes que convivir con una gravedad caprichosa. «Abajo» se convierte en un concepto incierto. Los objetos pueden caer a la misma velocidad y en la misma dirección que lo habrían hecho en tierra firme, pero también puede que no lo hagan. Si ves un objeto que reposa tranquilamente en una mesa, te acabas descubriendo a ti mismo vigilándolo con recelo porque no hay ninguna garantía de que vaya a quedarse en su sitio. La vida en el mar está repleta de cuerdas elásticas, cordeles, sogas, alfombras adherentes antideslizantes, cajones con cerradura..., cualquier cosa que pueda ayudar a preservar la organización cuando una fuerza antojadiza atrae los objetos en direcciones imprevisibles, como una especie de diablillo científico. Mi campo específico de investigación son las burbujas producidas por las olas rompientes durante las tormentas, por lo que he vivido en el mar durante meses en condiciones bastante desagradables. Me gusta este ambiente porque, entre otras cosas, resulta fácil adaptarse; pero también he aprendido hasta qué punto asumimos la gravedad como algo dado por hecho. En un viaje de investigación por el Antártico, el comisario del barco dirigía un circuito de entrenamiento tres veces a la semana para los miembros del equipo que mostrábamos un entusiasmo irracional. Nos reuníamos en la bodega, un espacio de hierro en el que resonaba el eco dentro de las entrañas del barco, y,

obedientes, dábamos brincos, levantábamos pesas y saltábamos a la comba durante una hora. Debía de ser el entrenamiento de circuito más efectivo que he realizado en mi vida, porque nunca sabías qué fuerza ibas a tener que resistir. Los tres primeros abdominales podían parecer facilísimos, porque el barco viraba hacia abajo, con lo cual conseguía reducir la gravedad. Entonces empezabas a sentirte muy bien contigo mismo, pero el castigo comenzaba cuando el barco llegaba al fondo del punto más bajo de la ola. En ese momento, la gravedad era, de hecho, un 50% mayor, y de pronto sentías como si los músculos de la tripa estuvieran luchando contra bandas elásticas que te mantenían pegado al suelo. Cuatro abdominales más y la gravedad volvía a desaparecer. Saltar era aún peor, porque nunca estabas del todo seguro de dónde estaba el suelo. Y luego, además, cuando te duchabas tenías que ir persiguiendo el chorro de agua por el cubículo de la ducha, porque el continuo balanceo del barco hacía imposible predecir por dónde iba a salir propulsado.

Desde luego, a la gravedad no le pasaba nada. Todos los objetos del barco estaban siendo atraídos hacia el centro de la Tierra con la misma fuerza. Pero cuando sientes la fuerza de la gravedad, estás oponiendo resistencia a una aceleración. Si lo que te rodea gana velocidad mientras la enorme lata en la que vives está siendo sacudida por la naturaleza, tu cuerpo no entiende la diferencia entre la aceleración gravitacional y cualquier otro tipo de aceleración que exista en ese momento. Así que sientes la «gravedad efectiva», que es lo que estás experimentando en términos generales,

sin preocuparte de dónde viene esta fuerza. De ahí que esa sensación tan rara que nos sobreviene en los ascensores aparezca únicamente al principio y al final del viaje, cuando el ascensor está acelerando hasta alcanzar su velocidad máxima, o desacelerando — lo que no deja de ser una aceleración negativa— para detenerse del todo. Para nuestro cuerpo no existe diferencia alguna entre la aceleración del ascensor y la aceleración causada por la gravedad⁹, así que lo que notamos es una «gravedad efectiva» reducida o aumentada. Durante una fracción de segundo, podemos experimentar cómo sería vivir en un planeta con un campo gravitacional distinto.

Por suerte para nosotros, la mayor parte del tiempo no tenemos que preocuparnos por todas estas complicaciones. La gravedad es constante y atrae siempre hacia el centro de la Tierra. «Abajo» es la dirección en la que caen los objetos. Hasta las plantas lo saben.

Mi madre es una entusiasta de la jardinería, así que de niña fueron muchas las veces que planté semillas, corté hierbajos, arrugué asqueada la nariz al ver a las repugnantes babosas y apilé montones de abono. Recuerdo la fascinación que sentía por las plantas de semillero, porque estaba claro que ellas sabían diferenciar arriba de abajo. Allí abajo, en la oscuridad del suelo, se abría una vaina y nuevas raíces se deslizaban hacia el interior del subsuelo mientras un brote naciente salía explorando hacia arriba. Podías arrancar una planta de semillero joven y comprobar que no había duda sobre sus ansias de exploración. La raíz iba directamente hacia abajo y el brote directamente hacia arriba.

¿Cómo sabía qué es lo que debía hacer? Cuando crecí descubrí la respuesta, y es maravillosamente sencilla. Resulta que en el interior de la semilla hay unas células especializadas llamadas estatocistos y que son como diminutas bolas de cristal de nieve hechas de plantas. En el interior de cada una de ellas hay granos de almidón especializados cuya densidad es mayor que la del resto de la célula, y que se depositan en el fondo de las células. Las redes de proteínas sienten su ubicación, y es así como la semilla, y más tarde la planta, sabe qué dirección debe seguir para subir. La próxima vez que plantes una semilla, dale la vuelta, ten en cuenta la minúscula bola de cristal de nieve que hay en su interior, y luego plántala en la dirección que quieras. La planta sabrá resolver la situación por sí sola.

La gravedad es una herramienta maravillosamente útil. Las plomadas y los niveles son instrumentos baratos y precisos. El «abajo» es universalmente accesible. Pero si todo ejerce fuerza sobre lo demás, ¿qué pasa con la montaña que veo a lo lejos? ¿Acaso no ejerce ella fuerza sobre mí? ¿Qué tiene el centro del planeta que lo hace tan especial?

Me gustan las costas por un sinfín de razones —olas, burbujas, atardeceres y brisa marina—, pero lo que más me gusta es esa sensación liberadora y confortable que me proporciona observar la vasta extensión del mar. Cuando vivía en California, compartía una casita que estaba muy cerca de la playa, tanto que por la noche oíamos las olas. Tenía un naranjo en el jardín de atrás y un porche desde el que ver el mundo pasar. El mayor placer al final de un

largo día de trabajo era caminar hasta el final de la calle, sentarse en las rocas lisas y desgastadas por el tiempo y mirar el océano Pacífico. Cuando de pequeña hacía este tipo de cosas en Inglaterra, quería ver peces o pájaros o enormes olas. Pero al observar el océano en San Diego, me imaginaba el planeta entero. El océano Pacífico es enorme: ocupa una tercera parte de la circunferencia de la Tierra a la altura del ecuador. Al contemplar el atardecer, imaginaba la enorme pelota de roca en la que vivía, con Alaska y el Ártico muy lejos a mi derecha, en el norte; y toda la cordillera de los Andes extendiéndose hasta llegar a la Antártida a mi izquierda, en dirección sur desde el lugar donde me encontraba. Casi me provocaba vértigo a mí misma cuando visualizaba todo eso en mi cabeza. Y una vez se me ocurrió pensar que estaba sintiendo todos esos lugares en mi propia carne. Cada uno de ellos tiraba de mí, y yo tiraba de ellos. Cada pedacito de masa atrae a todos los demás pedacitos de masa. La gravedad es una fuerza increíblemente débil (incluso un niño pequeño es capaz de generar la fuerza necesaria para oponer resistencia a la atracción gravitacional de un planeta entero); pero aun así, todos esos minúsculos tirones siguen estando ahí. En conjunto, la suma de una cantidad infinita de tironcitos se convierte en una fuerza única: la gravedad que sentimos.

Este es el paso que dio el gran científico Isaac Newton cuando en 1687 publicó su ley de gravitación universal en el libro *Philosophiae naturalis principia mathematica* (sus famosos *Principia*). Aplicando la regla que dice que la fuerza gravitacional entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los

separa, demostró que, si se sumaba la atracción ejercida desde cada rincón del planeta, la mayoría de esas atracciones se contrarrestaban las unas a las otras, y el resultado era una única fuerza que tiraba hacia abajo, en dirección al centro del planeta, y que es proporcional a la masa de la Tierra y a la masa del objeto que estaba siendo atraído. Una montaña que está dos veces más lejos solo tirará de ti con una cuarta parte de esa fuerza. Por lo tanto, los objetos lejanos importan menos. Pero aun así, cuentan. Cuando estaba allí sentada, observando el universo, Alaska me atraía hacia un lado en dirección norte y un poco hacia abajo, y los Andes lo hacían de lado hacia el sur y un poco hacia abajo. Pero la atracción hacia el norte y la atracción hacia el sur se contrarrestaban mutuamente, y lo único que permanecía era la atracción hacia abajo.

Así pues, aunque todos estamos siendo atraídos —ahora mismo— por el Himalaya, la Ópera de Sídney, el núcleo interno de la Tierra y un montón de caracoles de mar, no nos hace falta conocer todos los detalles. Las complejidades se solucionan por sí solas, y nos dejan una herramienta sencilla. Para predecir la atracción de la Tierra sobre mí, solo necesito saber a qué distancia está su centro y cuál es la masa del planeta entero. La belleza de la teoría de Newton reside en su sencillez, elegancia y eficacia.

Pero eso no quita que las fuerzas sean extrañas. A pesar de su brillantez, la explicación de la gravedad de Isaac Newton tenía un defecto muy importante: no había en ella ningún mecanismo. No es difícil afirmar que la Tierra atrae una manzana¹⁰, pero ¿qué ejerce

esa atracción? ¿Existen unos hilos invisibles? ¿O acaso son duendecillos? A esta cuestión no se le dio una respuesta satisfactoria hasta que Einstein aportó su teoría de la relatividad general, pero durante esos doscientos treinta años se aceptó el modelo de gravedad propuesto por Newton —que todavía hoy se utiliza ampliamente— porque funcionaba increíblemente bien.

Las fuerzas son invisibles, pero en casi todas las cocinas encontramos un aparato que sirve para medirlas. Y esto es así porque, para cocinar —y en especial para hornear pasteles—, necesitamos algo muy importante que los bonitos libros de recetas ilustrados nunca mencionan. Lo necesitamos porque las cantidades importan: hay que medir las «cosas», y tenemos que hacerlo con precisión. El ingrediente clave que no se menciona y que nos permite medir es muy sencillo: tiene que ser algo —lo que sea— del tamaño de un planeta. Afortunadamente para los amantes de los pastelitos, los bizcochos y las tartas de chocolate, nos encontramos justo encima de uno.

Tengo un libro lleno de recetas escritas a mano que he ido anotando desde que tenía ocho o nueve años, y me encanta poder ir directamente a las recetas de mi infancia. El pastel de zanahoria es una de ellas, y su receta, garabateada en una página que se ha ido manchando con el paso del tiempo, empieza diciendo que se necesitan 200 gramos de harina. El cocinero hace algo muy inteligente a lo que no damos la importancia debida. Pone harina en un bol y mide directamente cuánta atracción está ejerciendo la Tierra sobre él. Así es como funcionan las balanzas. Las colocas en

el espacio que hay entre nuestro enorme planeta y tu diminuto bol, y mides el empuje. La atracción entre un objeto y nuestro planeta es directamente proporcional a la masa del objeto y de la Tierra. Como la masa de la Tierra no cambia, esa atracción depende únicamente de la masa de la harina que hemos puesto en el bol. Las balanzas miden el peso, que es la fuerza existente entre la harina y el planeta. Pero el peso no es más que la masa de la harina multiplicada por la fuerza de la gravedad, la cual es una constante en nuestra cocina. Así que si mides el peso y conoces la fuerza de la gravedad, puedes calcular la masa de harina que hay en el bol. Luego se necesitan 100 gramos de mantequilla, así que pones harina en el bol hasta que la fuerza del empujón es la mitad de lo que era antes. Esta es una técnica increíblemente útil y sencilla para saber cuánto tienes de cada ingrediente, y sirve para cualquier cosa en todo el planeta. Los objetos pesados lo son únicamente porque constan de varias «cosas», así que la Tierra ejerce más atracción sobre ellos. Nada pesa en el espacio por que la gravedad local sea demasiado débil para ejercer una atracción perceptible sobre los cuerpos, a menos que te encuentres a muy poca distancia de un planeta o de una estrella. Pero lo que en realidad nos dicen las balanzas de cocina es que la gravedad, esa gran fuerza que mantiene unido nuestro planeta y nuestro sistema solar y que domina nuestra civilización, es increíblemente débil y enclenque. La Tierra tiene una masa de 6×10^{24} kg —o 6000 trillones de toneladas, si lo prefieres dicho así—, y solo puede atraer el bol de harina con la fuerza de una gomita elástica. Y ya nos viene bien que sea así, porque de otra forma no

podría existir vida, pero sí que nos lleva a replantearnos un poco las cosas. Cada vez que coges un objeto, estás resistiendo la atracción gravitacional de un planeta entero. El sistema solar es enorme porque la gravedad es muy débil. Aunque la gravedad tiene una gran ventaja en comparación con todas las demás fuerzas fundamentales: el alcance. Puede que sea débil, y que lo sea cada vez más a medida que nos alejamos de la Tierra, pero se extiende por todas las enormes distancias del espacio, tirando de otros planetas y de otros soles y galaxias. Cada tirón es diminuto, pero es este frágil campo de fuerza lo que da a nuestro universo su estructura.

Aun así, incluso levantar el pastel de zanahoria ya horneado requiere cierto esfuerzo. Cuando se encuentra sobre la mesa, esta superficie actúa sobre el pastel empujándolo hacia arriba en un grado suficiente para equilibrar perfectamente la atracción entre el pastel y el planeta. Para cogerlo, tienes que aplicar toda esa fuerza y un poquito más, la suficiente para que la fuerza mayoritaria sobre el pastel vaya hacia arriba. Nuestras vidas no las controla la acción de las fuerzas individuales, sino lo que queda una vez alcanzado el equilibrio. Y ello simplifica mucho las cosas. Fuerzas increíblemente potentes pueden convertirse en irrelevantes si se disponen de manera que otras fuerzas igualmente potentes opongan resistencia. El punto de partida más fácil para empezar a plantearse estas cuestiones lo constituyen los objetos sólidos, porque mantienen su forma mientras están siendo atraídos. Y el Puente de la Torre de Londres es, sin lugar a dudas, muy sólido.

La gravedad puede ser un fastidio, pues a veces nos interesa mantener algo en el aire. Para hacerlo, tenemos que oponer resistencia a la atracción hacia abajo; si no pudiéramos resistir esta fuerza, todo se deslizaría por el suelo. Los fluidos fluyen hacia abajo, y punto; así es como funcionan. Pero con los sólidos, la cosa cambia. Existe un único concepto, el eje, que nos permite neutralizar la gravedad de forma efectiva convirtiendo objetos extremadamente pesados en la mitad de un balancín. La otra misteriosa mitad suele estar astutamente escondida, y no hay mejor ejemplo que las dos majestuosas torres del conocido puente de Londres. Construido sobre dos islas artificiales, cada una en un tercio de la amplitud del Támesis, estas dos torres guardan la entrada a Londres desde el mar, y marcan el camino que une el norte de la ciudad con el sur.

La acera es un ruidoso circo de turistas que ejecutan su coreografía fotográfica mientras los taxis de Londres, los vendedores de souvenirs, los puestecitos de café, los paseadores de perros y los autobuses van a lo suyo en un segundo plano. Nuestro guía turístico sorteando el caos a grandes zancadas y los demás le seguimos paso a paso, como si de una fila de obedientes patitos se tratara. Abre una puerta de hierro en la base de una de las torres, nos escolta mientras giramos por la esquina y entramos en una especie de cobertizo lujoso hecho de piedra y, de pronto, todo está en calma. Casi se puede oír el suspiro de alivio del grupo al darse cuenta de que han sobrevivido a la tormenta de turistas y que han llegado a su recompensa: las esferas de latón, las enormes palancas y la

tranquilizadora y robusta apariencia de las válvulas de la maciza ingeniería victoriana. El bello y delicado ambiente de cuento de hadas del Puente de la Torre es bien conocido en el mundo entero, pero hoy estamos aquí para ver qué se esconde en su interior: las gigantescas entrañas de acero de esta bestia elegante y poderosa.

Londres ha sido puerto desde hace dos mil años, y lo bueno de vivir en una ciudad con río es que tienes dos orillas para jugar en lugar de un pequeño tramo de costa. Pero el Támesis es, a la vez, una autopista crucial para todo lo que flota y un enorme obstáculo para todo lo que camina o rueda. Durante siglos, se construían puentes que al cabo del tiempo desaparecían, y en la década de 1870 la ciudad pedía a gritos uno nuevo. El problema era el siguiente: ¿cómo se puede satisfacer al dueño del carro y a sus caballos sin que los barcos más altos tengan que prescindir del río? El Puente de la Torre de Londres es la ingeniosa solución a esta encrucijada.

El pequeño cobertizo de piedra se encuentra al final de una escalera de caracol que baja hacia una serie de grutas de ladrillos inesperadamente grandes que se esconden en los cimientos de la torre. Es como el armario que lleva a Narnia, solo que esta es la versión de Narnia para ingenieros. La primera gruta contiene las bombas hidráulicas originales, y la siguiente, mucho más grande, está ocupada en su mayor parte por un monstruo de madera: un barril de dos pisos de alto que solía usarse para almacenar energía temporalmente, como si fuera una pila no eléctrica. Pero es la tercera, la más grande de todas, la que he venido a ver. Esta es la cámara que cobija el contrapeso.

El camino entre las torres está dividido en dos mitades. Alrededor de mil veces al año, un barco o carguero llega al puente y entonces se detiene el tráfico. Cada una de las mitades se eleva, y en el otro lado del eje, en esta cámara oscura situada debajo de la torre, la mitad escondida del puente se mueve hacia abajo. Alzo la mirada para ver la parte inferior de este balancín y pregunto a nuestro guía qué es exactamente lo que cuelga sobre nuestras cabezas. Glen parece contento con la pregunta.

—Ahí arriba hay unas cuatrocientas sesenta toneladas de lingotes de plomo y piezas de arrabio —dice—. Repiquetea porque está suelto, se puede oír cuando el puente se abre. Cuando hacen algún cambio en el puente, normalmente añaden o quitan un poco para que se mantenga perfectamente equilibrado.

Por lo visto, estamos justamente debajo del puf de bolitas más grande del mundo. La clave está en el equilibrio, ya que no hay nada que levante el puente. Lo que hacen esos motores es inclinarlo un poco, puesto que lo que hay a un lado del eje está totalmente equilibrado con lo que está al otro lado. Esto significa que no se necesita más que una ínfima cantidad de energía para moverlo, la justa para superar la fricción de los soportes. Entonces, la gravedad deja de ser un problema, porque la atracción hacia abajo de un lado está perfectamente equilibrada con la atracción hacia abajo del otro. No se puede vencer a la gravedad, pero sí podemos usarla contra sí misma. Y se puede construir un balancín tan grande como se quiera, tal como comprendieron los victorianos.

Después de la visita, caminé un poco a lo largo del río y me volví para observar el puente. Mi visión del puente había cambiado por completo, y no podía estar más contenta de verlo desde otra perspectiva. Los victorianos no tenían abastecimiento de electricidad a placer, ni ordenadores para controlar lo que hiciera falta, ni materiales modernos como el plástico y el hormigón armado. Pero eran unos auténticos maestros en los sencillos principios de la física, y la simplicidad del puente me resulta conmovedora. Que esté basado en algo tan simple es precisamente lo que hace que siga funcionando ciento veinte años después sin que prácticamente se haya modificado nada. La arquitectura neogótica —que por lo visto es el nombre técnico de «estilo de castillo de cuento de hadas»— no es más que el papel pintado que cubre un balancín gigante. Si alguna vez vuelve a construirse uno similar, espero que hagan partes transparentes para que todo el mundo pueda admirar su ingenio.

Esta astucia para paliar los problemas de la gravedad se puede observar en cualquier parte. Imagina, por ejemplo, un eje central situado a cuatro metros de altura con las dos mitades de un balancín de seis metros de longitud equilibrándose mutuamente en ambos extremos. No es un puente, es un *Tyrannosaurus rex*, el icónico carnívoro del mundo del Cretácico. Dos fuertes patas lo mantienen en pie, y el eje lo encontramos en la cadera. La razón por la que no se pasaba la vida cayéndose de bruces es porque su enorme y pesada cabeza, con sus aterradores dientes, estaba equilibrada por una larga y musculosa cola. Pero vivir como un

balancín con patas también tiene sus problemas. Incluso el *T. rex* más tozudo tuvo que cambiar de dirección alguna vez, y la verdad es que se les daba bastante mal. Se estima que podrían haber tardado uno o dos segundos en girar 45 grados, de modo que eran algo más torpes que el listo y ágil *T. rex* que vemos en *Parque Jurásico*. ¿Qué podría limitar a un gigantesco y hercúleo dinosaurio de esta forma? Aquí viene la física al rescate...

Quienes practican el patinaje artístico sobre hielo aportan muchas cosas al mundo: estética, gracia y asombro ante lo que el cuerpo humano es capaz de hacer. Pero si te rodeas de físicos que te expliquen cosas durante el tiempo suficiente, se te podría perdonar que llegaras a pensar que la única contribución de un patinador sobre hielo es mostrar al mundo que estirar los brazos nos hace girar más lentamente que mantenerlos pegados al cuerpo. Este es un ejemplo útil porque el hielo está más o menos libre de fricción, así que cuando alguien gira sobre él, tiene una «cantidad» fija de giro. No hay nada que lo detenga. Así que es muy interesante ver que cuando alguien quiere cambiar de pirueta, también cambia de velocidad. Resulta que cuanto más alejadas se encuentran las cosas del eje de la rotación, más distancia tienen que recorrer en cada giro y, por lo tanto, más acaparan en el «giro»¹¹realizable. Al estirar los brazos, están más alejados del eje, y, para compensarlo, disminuye la velocidad de rotación. Este es, básicamente, el problema que tenía el *T. rex*. Solo era capaz de generar una cantidad limitada de fuerza rotativa («torsión») con las patas, y dado que su enorme cabeza y cola estaban estiradas como si fueran versiones gruesas,

pesadas y escamosas de los brazos del patinador, solo podía girar con lentitud. Cualquier mamífero pequeño y ágil —por ejemplo, uno de nuestros ancestros lejanos— estaría mucho mejor protegido después de haber comprendido este hecho.

El mismo pensamiento explica por qué estiramos los brazos hacia un lado cuando creemos que nos vamos a caer. Si estoy de pie, completamente erguida, y empiezo a caer hacia mi derecha, roto alrededor de los tobillos. Si estiro los brazos o los subo antes de empezar a caer, la misma fuerza inclinada no me moverá tanto, así que ganaré tiempo para ajustar lo que haga falta y seguir de pie. Por eso, cuando están en la barra de equilibrio, los gimnastas casi siempre tienen los brazos estirados en horizontal, ya que esta posición alarga su momento de inercia, lo cual les da más tiempo para corregir su postura antes de que la caída sea irremediable. Estirar los brazos también te permite rotar, subiéndolos o bajándolos, y esto también contribuye a tu equilibrio.

En 1876, María Spelterina se convirtió en la única mujer capaz de cruzar las cataratas del Niágara sobre una cuerda floja. Hay una fotografía de ella a mitad del camino, en sereno equilibrio y con cestas de melocotones acopladas a los pies (para darle mayor dramatismo). Pero su apoyo más evidente en la foto es la larga vara horizontal que lleva consigo, la mayor ayuda para mantener el equilibrio. Los brazos se estiran hasta donde pueden, pero este sustitutivo de las extremidades inferiores era en gran parte el artífice del exquisito control que María ejercía sobre sí misma¹². Si empezara a perder el equilibrio, ocurriría muy lentamente, porque la

distancia entre los extremos de la vara hace que la misma torsión tenga un efecto menor. A María le preocupaba caerse hacia un lado, pero la larga vara también le habría complicado mucho girar de izquierda a derecha. Y eso mismo le pasaba al *T. rex*. El mismo hecho de la física que constituyó la mejor defensa para que María no cayera a las agitadas aguas del Niágara desde una altura de cincuenta metros, lo que habría supuesto una muerte segura, setenta millones de años antes impedía también a los *T. rex* cambiar rápidamente de dirección.

La atracción de la gravedad sobre los objetos sólidos es un concepto conocido, fundamentalmente porque nosotros mismos somos objetos sólidos que son atraídos. Pero alrededor de los objetos sólidos del mundo fluyen líquidos; el agua y el aire revolotean en respuesta a las fuerzas que actúan sobre ellos. Creo que es una gran tragedia que normalmente no podamos ver los fluidos moverse con la misma claridad con que vemos las hojas caer o los puentes elevarse. Los líquidos experimentan las mismas fuerzas, pero no están obligados a mantener la misma forma, y de ahí que el mundo de la mecánica de fluidos sea algo maravilloso: hay barridos, remolinos y serpenteos sorprendentes y visibles en cualquier lugar.

Lo precioso de las burbujas es que están en *todas* partes. Para mí son las heroínas olvidadas del mundo físico, que están formándose y explotando en hervidores y pasteles, en biorreactores y bañeras, haciendo todo tipo de cosas útiles y casi siempre fugaces en su existencia. Son una parte tan conocida de nuestras experiencias más nimias que, a menudo, ni siquiera las vemos. Hace algunos

años pregunté a un grupo de niños de entre cinco y ocho años dónde podrían encontrar burbujas, y todos me hablaron, muy contentos, de bebidas con gas, de bañeras y de acuarios. Pero el último grupo del día ya estaba cansado, y mi ánimo alegre solo recibió un silencio malhumorado y miradas al vacío como respuesta. Después de una larga pausa y mucho esfuerzo por mi parte, un niño de seis años que no parecía muy impresionado levantó la mano.

—Bueno —dije con alegría—, ¿dónde encontramos burbujas?

El niño me miró con una expresión que más bien quería decir « ¿En serio tengo que contestar?», y al final proclamó:

—En el queso..., y en los mocos.

No podía rebatir su lógica, aunque nunca se me había ocurrido pensar en eso, pero tenía que admitir que posiblemente tuviera mucha más experiencia que yo con mocos burbujeantes. Sin embargo hay al menos un animal para el que los mocos burbujeantes son la clave de su forma de vida. Se trata del caracol de mar púrpura, o *Cantina*.

Los caracoles que viven en el mar normalmente se deslizan por el suelo oceánico o habitan en las rocas. Si cogieras uno de ellos, lo arrancarás de su roca, lo subieras un poco hacia la superficie y lo soltaras, se hundiría en el acto. Arquímedes de Siracusa, el polímata de la antigua Grecia que dijo «Eureka», fue el primero en comprender el principio que determina cuándo algo va a flotar y cuándo se va a hundir. Es muy probable que él estuviera mucho más interesado en los barcos que en otras cosas, pero este mismo

principio se aplica a los caracoles, a las ballenas y a cualquier objeto que se sumerja parcial o totalmente en un fluido. Arquímedes comprendió que, en efecto, existe una competición entre el objeto sumergido —el caracol— y el agua que ocuparía ese espacio si el caracol no estuviera ahí. Tanto el caracol como el agua que lo rodea están siendo atraídos hacia el centro de la Tierra. Como el agua es un fluido, las cosas pueden moverse en ella con mucha facilidad. La atracción gravitacional que experimenta un objeto es directamente proporcional a su masa: si duplicamos la masa del caracol, duplicaremos también la atracción ejercida sobre él. Pero el agua que lo rodea también está siendo atraída hacia abajo, y si la atracción que experimenta el agua hacia abajo es mayor, el caracol va a tener que flotar en la superficie para que haya más espacio para el agua que queda debajo de él. Si aplicamos el principio de Arquímedes a nuestro desafortunado molusco resulta entonces que el caracol experimenta un empuje hacia arriba equivalente a la atracción gravitacional del agua que debería haber estado en ese espacio. Esta es la fuerza de flotabilidad, y todo objeto sumergido en un líquido la experimenta. En términos prácticos, significa que si la masa del caracol supera la del agua que ocuparía un agujero con la forma del caracol, el caracol ganará la batalla gravitacional y se hundirá. Ahora bien, si la masa del caracol es menor —y, por ende, menos densa—, el agua ganará la batalla de la atracción hacia abajo y el caracol flotará. La mayoría de los caracoles de mar son más densos que el agua marina y, por lo tanto, se hunden.

A lo largo de casi toda su historia, los caracoles de mar se hundían, y ya no había más que hablar. Pero en algún momento del pasado, un caracol de mar «normal» tuvo un mal día y una burbuja de aire quedó atorada en la capa protectora que envolvía sus huevos. Lo más ingenioso de la flotabilidad es que solo cuenta la densidad media del objeto en sí mismo. No hace falta modificar la masa del objeto. Lo único que puedes cambiar es el espacio que ocupa, y las burbujas de aire ocupan mucho. Un día, una burbuja de aire más grande se quedó atascada, el equilibrio se inclinó hacia el lado equivocado y el primer caracol de mar alzó el vuelo en el agua y se dejó llevar hacia la luz del sol. La puerta a esa enorme despensa que es la superficie marina se había abierto..., pero solo para los caracoles que consiguieran moverse hacia arriba; a partir de ahí, la evolución se puso manos a la obra.

Hoy en día, el *Cantina*, el descendiente de los primeros caracoles que se perdieron en el espacio, es un ejemplar común en los océanos más cálidos del mundo. De un color púrpura brillante, estos caracoles segregan mucosa, el mismo tipo de baba que vemos en las piedras del jardín a primera hora de la mañana, y usan su musculoso pie para doblar la mucosa y atrapar aire de la atmósfera. Se construyen una enorme balsa de burbujas, que suele ser más grande que ellos mismos, para asegurarse de que su densidad total sea siempre menor que la del agua marina en la que están. Así que flotan siempre, boca abajo —con la balsa de burbujas arriba y la concha hacia abajo—, al acecho de las medusas que pasen por allí.

Si encuentras una concha de caracol púrpura en la orilla del mar, es muy posible que sea de uno de estos.

La flotabilidad puede ser un indicador muy útil y rápido para saber qué contiene un objeto cerrado herméticamente. Por ejemplo, si coges dos latas de una bebida con gas del mismo tamaño, una *light* y la otra con su cantidad total de azúcar, y las sumerges en agua dulce, verás como la lata de bebida *light* flota, mientras que la otra se hunde. Las dos latas tienen exactamente el mismo volumen, así que la diferencia está únicamente en su interior, y no es otra que el denso azúcar. Una lata de 330 mililitros de refresco normal contiene entre 35 y 50 gramos de azúcar, y esta masa extra cuenta, ya que hace que la lata sea más densa que el agua. Esto significa que se impone al agua en la batalla contra la gravedad, y por eso se hunde. La masa del edulcorante en el refresco *light* es minúscula, así que esa lata está básicamente llena de agua y aire, y por eso flota. Otro ejemplo ligeramente más útil es el del huevo crudo. Los huevos frescos son más densos que el agua, de ahí que se hundan y se queden inmóviles en el agua fría. Pero si llevan ya varios días en la nevera, se habrán ido secando poco a poco, y mientras el agua se ha ido escapando de la cáscara, algunas moléculas de aire han ido entrando en la bolsa de aire que hay en el extremo redondeado del huevo para rellenar el espacio. Un huevo que ya tenga unos siete días se hundirá, pero se quedará de pie sobre el extremo puntiagudo, de forma que el aire adicional quede más cerca de la superficie. Y si el huevo flota completamente es que ya hace demasiado que lo tienes..., así que olvídate de comer tortilla!

Como es natural, si eres capaz de controlar el aire que llevas contigo y el espacio que ocupa, siempre puedes escoger entre flotar o hundirte. Cuando empecé a estudiar las burbujas, recuerdo que encontré un artículo escrito en 1962 que afirmaba taxativamente: «La causa de las burbujas no solo se encuentra en las olas rompientes, sino también en la materia en descomposición, los eructos de los peces y el metano del suelo marino». ¿Los eructos de los peces? Me pareció bastante obvio que esto había sido escrito por alguien estrecho de miras, arrellanado en un cómodo sillón de piel, probablemente en las profundidades de un club londinense y mucho más cerca del decantador de oporto que del mundo real. Pensé que era un error muy gracioso, y así lo manifesté. Tres años más tarde, mientras trabajaba bajo el agua en Curaçao, me volví y vi un tarpón enorme —de un metro y medio de largo— nadando justo por encima de mi hombro y eructando copiosamente por las agallas. Tuve que tragarme mis propias palabras. De hecho, muchos peces óseos tienen una bolsa de aire llamada vejiga natatoria que les ayuda a controlar su flotabilidad. Si puedes conseguir que tu densidad sea exactamente la misma que la de todo lo que te rodea, estarás en equilibrio y te quedarás donde allí estás. Las vejigas natatorias del tarpón no son algo frecuente —los tarpones son un raro ejemplo de pez que puede respirar aire directamente y además extraer oxígeno mediante las agallas—, pero tuve que admitir que los peces eructan. Eso sí: sigo manteniendo que no suponen una gran contribución a la cantidad total de burbujas oceánicas¹³.

Las consecuencias de la gravedad dependen de qué es lo que está siendo atraído. El Puente de la Torre es un objeto sólido, por lo que la gravedad puede cambiar la posición del puente, pero no su forma. El caracol también es un objeto sólido, y se mueve por el agua del océano, la cual puede moverse a su alrededor para adaptarse. Pero los gases también pueden fluir (su habilidad para flotar es la razón por la que llamamos fluidos tanto a gases como a líquidos). Los objetos sólidos también pueden moverse a través de los gases al seguir la atracción de la gravedad: un globo de helio y un zepelín se elevan por la misma razón que lo hace el baboso y burbujeante caracol. Ambos libran la batalla de la gravedad con el fluido que los rodea, y ambos pierden.

Así pues, la presencia de una fuerza gravitacional constante puede desestabilizar las cosas, lo que generalmente significa que hay fuerzas que no están en equilibrio y que todo se moverá de aquí para allá hasta que se restablezca el equilibrio. Si un objeto sólido se desestabiliza, se dará la vuelta o caerá, y cualquier líquido o gas que lo rodee se limitará a fluir a su alrededor para dejar sitio al movimiento. Pero ¿qué ocurre cuando el objeto inestable no es un objeto sólido como un globo sino el fluido en sí mismo?

Si enciendes una cerilla y prendes la mecha de una vela, habrás encendido una fuente de gas caliente y brillante. Las llamas de las velas han envuelto con su cálido resplandor a escribas, conspiradores, estudiantes y amantes durante siglos. La cera es un combustible suave y modesto, lo que hace que su transformación resulte mucho más asombrosa aún. Pero estas conocidas llamas

amarillas son como hornos compactos y potentes, con la fuerza suficiente para hacer añicos las moléculas y forjar diamantes diminutos, cada uno de los cuales está esculpido por la gravedad. Al encender la mecha, el calor de la cerilla derrite tanto la cera de la mecha como la que tiene a su alrededor, y en lo primero que se convierte es en líquido. Las ceras de parafina son hidrocarburos, largas cadenas de moléculas con una columna vertebral de carbono que tiene de veinte a treinta átomos de longitud. El calor no se limita únicamente a proporcionarles la energía necesaria para que repten los unos sobre los otros como en un nido de serpientes, que es precisamente lo que la cera líquida parece cuando ves sus moléculas. Algunos obtendrán tanta energía que se escaparán del todo, alejándose de la mecha a la deriva. Se forma entonces una columna de combustible gaseoso y caliente, tan caliente que ejerce una enorme presión en el aire circundante, ocupando un espacio extremadamente grande, si tenemos en cuenta que se trata de una cantidad relativamente pequeña de moléculas. Las moléculas son las mismas, de modo que la atracción gravitacional es, en su conjunto, la misma. Pero como ocupan más espacio, la atracción gravitacional por centímetro cúbico es ahora menor.

Igual que un caracol baboso y burbujeante en el océano, este gas caliente debe subir porque un aire frío y denso está intentando deslizarse por debajo de él. El aire caliente es empujado hacia arriba por una chimenea invisible, y mientras tanto se mezcla con oxígeno. Antes de que hayas retirado siquiera la cerilla de la vela, el combustible se estará haciendo pedacitos y ardiendo en el oxígeno,

lo que provoca que el gas se caliente todavía más. Estas son las partes azules de la llama, que llegan a la impresionante temperatura de 1400 °C. La fuente de calor que has creado se hace más intensa, y el aire caliente es empujado hacia arriba cada vez con mayor celeridad. Se alimenta desde abajo porque la mecha no es otra cosa que una esponja larga y delgada que va absorbiendo las diversas moléculas de cera que el horno va derritiendo.

Pero el combustible no arde de forma perfecta. Si lo hiciera, la llama se mantendría azul y las velas no servirían como fuentes lumínicas. A medida que el calor se quiebra y amedrenta a las largas cadenas de moléculas, parte del detritus deja de quemarse porque no tiene suficiente oxígeno al que agarrarse. La corriente transporta el hollín —diminutas motitas de carbono— hacia arriba, donde se calienta. Esta es la fuente de la acogedora luz amarilla que brilla cuando el hollín alcanza 1000 °C. La luz de una vela no es otra cosa que el resultado de un calor feroz, y esta luz no es más que el brillo de un ascua que arde en una hoguera en miniatura. Estas minúsculas partículas de carbono están tan calientes que desprenden la energía que les sobra en forma de luz. Se ha descubierto que, cuando arde, una vela no produce solamente hollín en forma de grafito (eso que a veces llamamos carbono negro). También produce pequeñas cantidades de unas estructuras más exóticas que se pueden formar cuando se unen los átomos de carbono: fullerenos, nanotubos de carbono y motas de diamante. Se estima que una llama de vela corriente produce 1,5 millones de nano diamantes por segundo.

Las velas son el ejemplo perfecto de lo que ocurre cuando un fluido debe reajustarse a sí mismo para acomodarse a la atracción de la gravedad. El combustible caliente en llamas sube muy rápidamente a medida que el aire frío lo empuja desde abajo, formando una corriente de convección constante. Si apagas la vela, la columna de combustible gaseosa seguirá fluyendo a raudales por encima de la vela durante unos segundos, y si acercas una cerilla desde arriba, verás como la llama salta a la mecha, al encenderse de nuevo la columna¹⁴.

Las corrientes de convección de este tipo ayudan a mover la energía y a distribuirla dondequiera que un fluido se caliente desde abajo. Son la razón por la que los calentadores de acuarios, la calefacción de suelo y las sartenes en el fogón son tan efectivos: ninguno de ellos funcionaría ni la mitad de bien de no ser por la gravedad. Cuando decimos que el «calor aumenta», no estamos siendo muy fieles a la verdad. En realidad, lo que pasa es que «el fluido más frío se hunde, puesto que gana la batalla gravitacional». Pero nadie agradece este tipo de puntualizaciones.

La flotabilidad no solo es importante para los globos aerostáticos, los caracoles y las cenas románticas a la luz de las velas. Los océanos, esos enormes motores de nuestro planeta, obedecen las órdenes de la gravedad, como todo lo demás. Las profundidades no están en calma. Unas aguas que no han visto la luz del sol durante siglos fluyen por el planeta en todas direcciones, en su largo y lento viaje hacia la luz del día. Pero antes de fijarnos en las profundidades, miremos hacia arriba. La próxima vez que veas un

punto moviéndose allá arriba, en el cielo, en un día claro —un avión de pasajeros a una altitud de crucero—, concédete un momento para pensar en lo alto que está: unos 10 kilómetros. Entonces, imagínate a ti mismo en el punto más profundo del suelo oceánico, el fondo de la fosa de las Marianas. La superficie oceánica estaría a la misma distancia a la que se encuentra ese avión ahora mismo¹⁵. E incluso la profundidad media de los océanos es de 4 kilómetros, un poco menos de la mitad de la distancia a la que vuela ese avión. El océano cubre el 70% de la superficie de la Tierra. Y eso es muchísima agua.

Pues bien, en esas profundidades oscuras se esconde un patrón conocido. El mismo mecanismo que hace danzar a las pasas en la limonada está también dirigiendo a los enormes océanos de la Tierra en su sosegado viaje alrededor del mundo. La escala es distinta y las consecuencias son de mayor alcance, pero el principio es exactamente el mismo. La parte azul de nuestro planeta azul está siempre en movimiento.

Pero ¿para qué iba a moverse? Los océanos han tenido millones de años para adaptarse a su situación. Sin duda, ya deberían haber llegado a dondequiera que estén yendo, ¿no? Hay dos cosas que están interviniendo constantemente: el calor y la salinidad. Son relevantes porque modifican la densidad, y un fluido que contiene densidades distintas fluirá para ajustarse a sí mismo mientras la batalla de la gravedad tiene lugar. Todos sabemos que el océano es salado, pero yo aún me quedo pasmada cada vez que me paro a pensar cuánta sal contiene. Para conseguir que una bañera entera

de las que tenemos en casa sea tan salada como el océano, habría que añadir al agua unos 10 kilos de sal, algo así como un cubo grande. Un cubo entero solo para una bañera. De todas formas, no sucede lo mismo en todas las partes del océano, ya que la salinidad varía entre el 3,1 y el 3,8%, y aunque esta diferencia parezca irrisoria, tiene su importancia. De la misma manera que al añadir azúcar a un refresco se hace más denso, la enorme cantidad de sal presente en el agua del mar provoca que esta sea más densa que el agua dulce. El agua fría es más densa que el agua caliente, y la temperatura de los océanos varía desde los 0 °C cerca de los polos a los 30 °C del ecuador. Por lo tanto, el agua fría y salada se hundirá, y el agua más caliente y menos salada subirá. Y este sencillo principio es lo que hace que el agua del mar esté continuamente viajando alrededor del mundo. Pueden pasar miles de años hasta que un poco de agua regrese al mismo punto del océano del que salió.

En el Atlántico Norte¹⁶, el agua se va enfriando a medida que el aire le arrebatara el calor. En las partes en que la superficie del mar se congela para formar hielo marino, ese hielo reciente es, básicamente, agua; la sal ha quedado atrás. En conjunto, esos dos procesos hacen que el agua del mar sea todavía más fría, salada y densa, por lo que empieza a hundirse, apartando de su camino al agua menos densa mientras responde a la llamada de la gravedad y encuentra el camino hacia el fondo del mar. En su lento serpenteo por el suelo marino, hay valles que la canalizan y crestas que le cierran el paso, como les pasa a los ríos. Desde el Atlántico Norte

avanza hacia el sur por el fondo del océano a unos pocos centímetros por segundo y, mil años después, se topa con su primer obstáculo: la Antártida. Incapaz de seguir avanzando hacia el sur, gira hacia el este y se encuentra con el océano Antártico. Esta gran rotunda acuosa situada en el extremo inferior del planeta une todas las aguas marinas del planeta porque, en su viaje alrededor del continente blanco, se mezcla con los extremos inferiores de los océanos Atlántico, Índico y Pacífico. El enorme y lento flujo de agua del Atlántico Norte se desliza alrededor de la Antártida hasta que vuelve a dirigirse hacia el norte, viajando, bien hacia el corazón del Índico, bien hacia el Pacífico. Al mezclarse gradualmente con el agua que lo rodea, su densidad se reduce, y termina encontrando la forma de volver a subir a la superficie, puede que incluso mil seiscientos años después de que el sol la bañara con sus rayos por última vez. La lluvia, la escorrentía de los ríos y los deshielos vuelven a diluir la sal, mientras que las corrientes impulsadas por el viento la empujan para que continúe su viaje hasta llegar, de nuevo, al Atlántico Norte, donde puede que el ciclo empiece enseguida otra vez. Este proceso recibe el nombre de «circulación termohalina», *termo* en referencia al calor y *halina* por la sal. A este giro oceánico a veces se lo llama «cinta transportadora oceánica», y aunque la denominación puede darnos una idea algo simplista del mecanismo en sí mismo, es cierto que estos flujos rodean el planeta y que es la gravedad la que los conduce. Las corrientes superficiales movidas por el viento han transportado durante siglos a exploradores y mercaderes. Pero el sistema transportador oceánico lleva en su

conjunto un cargamento que es igual de importante para nuestra civilización: el calor.

En el ecuador se absorbe más calor del Sol que en cualquier otra parte del planeta, porque el Sol está ahí más alto en el cielo y porque esta es la parte más ancha del planeta y, por lo tanto, hay más superficie de absorción. Calentar agua, aunque sea un poco, requiere mucha energía, por lo que podríamos decir que los océanos son como una enorme pila de energía solar. El cambiante océano nunca deja de redistribuir esa energía por todo el planeta, y la circulación termohalina es el mecanismo oculto tras los patrones del tiempo. Gran parte de nuestra fina y variable atmósfera revolotea por encima de una reserva constante de calor que está continuamente proporcionando energía y moderando las intensidades.

La atmósfera se lleva todas las alabanzas, pero los océanos son el poder que se esconde tras el trono. La próxima vez que mires un globo terráqueo o una imagen de la Tierra tomada por satélite, no pienses en los océanos como esos espacios azules y vacíos que hay entre los interesantes continentes. Imagina el empuje de la gravedad sobre esas corrientes gigantescas y lentas, y considera esas zonas azules como lo que son: el mayor motor del planeta.

Capítulo 3

La belleza de lo pequeño

La tensión superficial y la viscosidad

El café es un producto global de enorme valor, y la magia negra que se requiere para extraer la perfección de esta humilde semilla es una fuente constante de debate —y de cierto esnobismo— entre los entendidos. Pero mi interés personal en el café no tiene que ver con el proceso de tostado ni con la presión de la cafetera exprés. A mí lo que me fascina es lo que ocurre cuando se derrama¹⁷. Es una de esas rarezas de la vida cotidiana que nunca se cuestiona nadie. Un café derramado sobre una superficie dura no tiene nada de especial: es solo un poco de líquido con la forma de una mancha. Pero si dejas que se seque, cuando vuelvas encontrarás un cerco marrón que recuerda a la línea trazada alrededor de un cadáver en una película de detectives de la década de 1970. No cabe duda de que antes la mancha estaba llena de líquido, pero mientras se secaba, todo el café se ha desplazado hacia el exterior. Escudriñar un charquito de café para ver qué está pasando es como observar cómo se seca la pintura, solo que aquí se desperdicia cafeína. Pero aunque intentaras llevar a cabo dicha observación, no verías casi nada. La física que empuja el café de un lado para otro solo opera en escalas muy pequeñas, en general demasiado pequeñas para que podamos percibir las a simple vista. Pero lo que sí vemos son las consecuencias.

Si pudiéramos hacer zoom, veríamos un charco de moléculas de agua jugando a los coches de choque, y las partículas de café, marrones, esféricas y mucho más grandes, flotando en el centro del juego. Las moléculas de agua se atraen mutuamente con mucha fuerza, por lo que si una molécula se eleva un poco de la superficie, será inmediatamente atraída de nuevo para que se una de nuevo a las de abajo. Esto significa que la superficie del agua se comporta en cierta medida como una sábana de bordes elásticos, ya que empuja el agua hacia abajo para que la superficie permanezca siempre lisa. Esta aparente elasticidad de la superficie se conoce como tensión superficial (más tarde nos recrearemos en este punto). En los bordes del charco, la superficie del agua se curva hacia abajo con suavidad para llegar a la mesa, aunque el charco se mantiene en su sitio. Pero la habitación seguramente es cálida, y a cada poco una molécula de agua se escapa por completo de la superficie y flota en el aire en forma de vapor de agua. Es lo que se conoce como evaporación, un proceso que ocurre de forma gradual, y solo a las moléculas de agua. El café no puede evaporarse, de modo que queda irremediabilmente atrapado en el charco.

La astucia del proceso aparece a medida que el agua va escapándose, porque el extremo del agua está anclado a la mesa (luego veremos por qué). El agua está tan fuertemente pegada a la mesa que el borde no puede moverse. Pero la evaporación es más rápida en los bordes que en el centro, porque en ellos hay una proporción mayor de moléculas de agua expuestas al aire. La parte que no ves —mientras intentas convencer a tu camarada amante

del café de que está de moda observar cómo se seca la pintura— es que el contenido del charco se está moviendo. El café del centro del charquito tiene que fluir hacia los extremos para sustituir el agua perdida. Las moléculas de agua transportan las partículas de café como si se tratara de pasajeros, pero cuando llega el momento de escaparse en el aire, el café no puede seguirlos. Así que las partículas del café son transportadas poco a poco hacia los bordes, y cuando toda el agua se ha ido, lo único que queda es un anillo de café abandonado.

La razón por la que me fascina tanto este proceso es porque ocurre justo delante de nosotros, y porque, además, todo lo que hace que sea interesante es demasiado pequeño para poder verlo a simple vista. Este mundo de las cosas pequeñas es casi un universo aparte. Ahí abajo, las reglas que importan son distintas. Como enseguida veremos, todas las fuerzas a las que estamos acostumbrados, caso de la gravedad, por ejemplo, siguen presentes. Pero otras fuerzas, las que surgen a causa de la forma en que las moléculas danzan unas con otras, ganan relevancia. Cuando te sumerges en el mundo de lo pequeño, las cosas pueden parecer muy extrañas. Resulta que las reglas que operan a esta escala tan pequeña explican muchas cosas de nuestro mundo a mayor escala: por qué ya no hay nata en la leche, por qué se empañan los espejos, cómo beben los árboles... Pero también estamos aprendiendo a usar esas reglas para construir nuestro mundo, y veremos cómo nos van a ayudar a salvar millones de vidas gracias a la mejora en el diseño de hospitales y a nuevas pruebas médicas.

* * * *

Antes de empezar a preocuparte por las cosas que son demasiado pequeñas como para poder verlas, tienes que saber que están ahí. En este sentido, podría decirse que la humanidad se enfrentó a una trampa 22¹⁸: si no sabes que hay algo ahí, ¿por qué ibas a buscarlo? Pero esto cambió en 1665 con la publicación de un libro, el primer superventas científico: *Micrografía*, de Robert Hooke.

Robert Hooke fue el director de Experimentos de la Royal Society de Londres, y como era un investigador generalista, gustaba de curiosear entre los juguetes científicos del momento. *Micrografía* era un muestrario de imágenes de microscopio, diseñado para impresionar al lector con el potencial de este aparato pionero. Salía en el momento perfecto, puesto que esa era una época de gran experimentación y rápidos avances en la investigación científica. Las lentes llevaban varios siglos tocando a las puertas de la civilización humana, casi siempre subestimadas y consideradas como una simple novedad en lugar de herramientas científicas serias. Pero *Micrografía* les dio su momento de gloria.

Lo más maravilloso de este libro es que, aunque lleve puestos los ropajes del respeto y de la autoridad, como corresponde a las publicaciones de la Royal Society, es el resultado de los juegos de un científico, sin tener que avergonzarse por ello. Repleto de descripciones detalladas y de preciosas ilustraciones, es un volumen de producción costosa y con una presentación muy

cuidada. Pero más allá de todo eso, lo que Robert Hooke hizo es básicamente lo que hacen todos los niños cuando se les da un microscopio por primera vez: ir de acá para allá observándolo todo. Hay dibujos sumamente detallados de cuchillas y de picaduras de ortigas, de granos de arena y verduras quemadas, de cabellos y chispas, de peces y polillas y seda. El nivel de detalle revelado en este mundo diminuto era asombroso. ¿Quién iba a decir que el ojo de una mosca era tan hermoso? Pese a sus minuciosas observaciones, Hooke no pretendía hacer ningún estudio en profundidad. En el apartado titulado «grava en la orina» —los cristales que se suelen observar en el interior de los orinales—, especula con una forma de curar su dolorosa afección y, satisfecho, deja para otros el esfuerzo de encontrar una verdadera solución al problema:

Por lo tanto, quizás deba ser estudiado por un médico el hecho de que pudiera haber algo mezclado con la orina en que la grava o piedra se encuentra, que pudiera volver a disolver esta, la primera de las cuales parece, por sus formas regulares, haber sido en ocasiones cristalizada a partir de dicha orina. [...] Pero procederé a dejar dicha investigación a médicos o químicos, a quienes corresponde en mayor medida.

Y vaya si procede, ya que sigue jugueteando con moho y plumas y algas, y hasta con los dientes de un caracol y el aguijón de una abeja. Por el camino, acuña la palabra «célula» para describir las

unidades que conforman la corteza del corcho, marcando así el principio de la biología como disciplina independiente.

Hooke no solo había mostrado el camino hacia el mundo de lo pequeño; había abierto las puertas de par en par e invitado a todo el mundo a la fiesta. *Micrografía* inspiró a algunos de los microscopistas más famosos de los siglos posteriores, y también abrió el apetito científico del sofisticado Londres. Y esa fascinación surgía del hecho de que esta fabulosa recompensa había estado siempre ahí. Esa fastidiosa motita negra que pululaba sobre la carne podrida se revelaba ahora como un diminuto monstruo de patas peludas, ojos bulbosos y armadura reluciente. Fue un descubrimiento asombroso. Para entonces, grandes barcos habían cruzado el mundo, se habían descubierto nuevas tierras y nuevas gentes, y existía un gran entusiasmo sobre lo que podía encontrarse en lugares lejanos. A nadie se le había ocurrido que mirarse el ombligo podía haber sido algo enormemente infravalorado, y que incluso la pelusilla del ombligo podría tener mucho que decir sobre el mundo. Y una vez que se te pasaba el susto inicial de las patas peludas de la mosca, podías observar cómo funcionaban. El mundo, allí abajo, era mecánico, comprensible, y el microscopio daba sentido a cosas en las que los seres humanos habían reparado hacía años, pero que no habían sido capaces de explicar.

Pero incluso eso no fue más que el inicio del viaje hacia el mundo de lo pequeño. Todavía tuvieron que pasar más de dos siglos antes de que se confirmara la existencia de los átomos, cada uno de los cuales es tan pequeño que necesitaríamos cien mil para formar una

línea de la misma longitud que una de células de corcho. Tal como observó el reconocido físico Richard Feynman mucho tiempo después, ahí abajo hay mucho espacio. Los humanos nos movemos pesadamente en el punto medio de las escalas de tamaños, ajenos a las minúsculas estructuras sobre las que nuestro mundo se construye, y que a la vez también lo construyen a él. Pero trescientos cincuenta años después de la publicación de la *Micrografía* de Hooke, las cosas están cambiando. Podemos hacer mucho más que contemplar ese mundo como un niño que mira a través del cristal protector de un museo en el que no se le permite tocar nada. Ahora estamos aprendiendo a manipular átomos y moléculas en esa escala; el cristal se ha retirado y por eso podemos pasar al otro lado. Lo «nano» está en boga.

Si el mundo de lo minúsculo nos parece tan fascinante y, a la vez, extremadamente útil es porque, a ese nivel, las cosas funcionan en buena medida de una manera distinta. Algo que resulta imposible para un humano puede ser una habilidad esencial para la vida de una pulga. En ambos casos se aplican las mismas leyes de la física; la pulga existe en el mismo universo físico que tú y yo, pero son distintas las fuerzas prioritarias en cada caso¹⁹. Aquí arriba, en nuestro mundo, existen dos influencias dominantes. La primera es la gravedad, que nos atrae a todos hacia abajo. La segunda es la inercia; como somos criaturas muy grandes, para movernos o detenernos tenemos que aplicar mucha fuerza. Pero a medida que el tamaño disminuye, la atracción gravitacional y la inercia también se reducen. Y entonces se encuentran compitiendo con otras fuerzas

más débiles que siempre habían estado ahí, pero que resultaban insignificantes. Está, por un lado, la tensión superficial, la fuerza que mueve los gránulos de café a medida que el charco de café se seca. Y también está la viscosidad. En el mundo de lo pequeño, la viscosidad es justamente la razón por la que la leche ya no aparece cubierta de una apetecible capa de nata. Ellos siempre iban a por las botellas con tapones dorados o plateados. Si te levantabas lo suficientemente pronto y abrías la puerta de casa con sumo cuidado, los pillabas in fraganti: pajaritos alegres de ojos brillantes que se posaban en la botella y robaban apresurados unos traguitos de nata a través del agujero que habían abierto en la delgada tapa de aluminio, escudriñando con sus refulgentes ojos cuanto pasaba a su alrededor. Cuando se daban cuenta de que los habían pillado, se alejaban volando, probablemente para probar suerte en la puerta del vecino. Durante unos cincuenta años, los herrerillos fueron los mejores ladronzuelos de nata del Reino Unido. Aprendieron los unos de los otros que justo debajo de la endeble tapa se escondía un tesoro rico y graso, y ese conocimiento se extendió entre la población de herrerillos del país. Las demás especies de pájaros no parecieron captar este truco, pero los herrerillos siempre estaban allí cada mañana, esperando al lechero. Pero, de pronto, se les acabó la suerte, y no solo a causa de las botellas de plástico sino por algo más fundamental. Desde que los humanos empezaron a ordeñar vacas, la nata subía a la superficie de la leche. Pero hoy en día, ya no es así.

La botella sobre la que el herrerillo hambriento daba saltitos contenía una combinación de un montón de golosinas. La mayor parte de la leche —casi el 90%— es agua, pero en ella flotan libremente azúcares —la lactosa que algunas personas no toleran—, moléculas de proteína agrupadas en minúsculas semillas redondas y glóbulos de grasa de mayor tamaño. Forman un batiburrillo de cosas, pero si dejas que reposen un rato, surge un patrón. Los glóbulos de grasa de la leche son muy pequeños, miden entre 1 y 10 micrómetros, lo que significa que podrías meter entre 100 y 1000 de ellos en fila entre las marcas de los milímetros de una regla. Y esas diminutas masas amorfas son menos densas que el agua que las rodea. Hay menos «materia» en el mismo volumen de espacio. Así que, aunque todo ello se mueve de aquí para allá, hay pequeñas diferencias en las direcciones que toman. La gravedad está atrayendo hacia abajo el agua de alrededor con un poquito más de fuerza que la que afecta a los glóbulos de grasa, de forma que la grasa es empujada hacia arriba con delicadeza. Eso significa que la grasa flota, aunque sea muy poquito, e irá subiendo lentamente, abriéndose paso entre la leche. La cuestión es: ¿cuánto tardará en subir? Y aquí es donde la viscosidad del agua empieza a adquirir importancia. La viscosidad no es más que una forma de medir cuánto le cuesta a una capa de un fluido deslizarse por encima de otra. Imagina que estás removiendo el contenido de una taza. Mientras la cuchara da vueltas, el líquido que rodea a la cuchara tiene que moverse, dejando atrás al líquido que tiene al lado. El agua no es muy viscosa, por lo que a esas capas no les cuesta nada

discurrir entre ellas. Pero ahora imagina que la taza estuviera llena de sirope y tuvieras que removerlo. Cada molécula de azúcar se agarra a las que tiene alrededor con mucha fuerza. Para hacer que estas moléculas discurran entre ellas, primero tienes que romper esos vínculos, porque de otro modo las moléculas no pueden moverse. Todo esto hace que este fluido sea difícil de mover, y por eso decimos que el sirope es viscoso.

En la leche, los glóbulos de grasa son empujados hacia arriba porque flotan. Pero si quieren moverse ellos solos hacia arriba, tienen que apartar de su camino el líquido que los rodea. Dentro de este proceso de empuje, el líquido cercano tiene que pasar por encima, lo que hace que su viscosidad cobre relevancia. Cuanto más viscoso sea, mayor será la resistencia que tendrán que afrontar los glóbulos de grasa para subir.

Esta es la batalla que se está librando justo debajo de las patitas del herrero. Cada glóbulo de grasa se ve empujado hacia arriba por su flotabilidad, pero experimenta una fuerza de arrastre porque el líquido que lo rodea tiene que moverse para dejarlo pasar. Y las mismas fuerzas que actúan sobre el mismo tipo de glóbulo de grasa hacen concesiones distintas para los distintos tamaños de glóbulos. El efecto del arrastre es mucho mayor cuando eres pequeño, porque tu superficie es grande en relación con tu masa. Tienes muy poca flotabilidad a tu disposición para apartar de tu camino a una gran cantidad de esa materia que te rodea. Por eso, aunque un glóbulo de grasa más pequeño esté exactamente en el mismo líquido, tardará más en subir que uno más grande. En el mundo de lo

pequeño, la viscosidad normalmente gana a la gravedad. Las cosas se mueven lentamente, y tu tamaño exacto importa, y mucho.

En la leche, los glóbulos de grasa suben más rápidamente, y por el camino chocan contra otros más pequeños y lentos, y forman racimos. El tamaño de los racimos hace que el arrastre sobre ellos sea menor gracias a su flotabilidad, ya que son todavía más grandes que los glóbulos individuales, así que suben todavía más rápidamente. El herrerillo solo tiene que esperar posado en la tapa de la botella, y el desayuno estará servido.

Pero entonces surgió la homogeneización²⁰. Los fabricantes de leche descubrieron que si se extraía la leche a una presión muy alta mediante unos tubitos muy pequeños, lograban romper los glóbulos de grasa y reducir su diámetro en un 5%. Eso reduce la masa de cada uno de ellos en un 125%. Así, la débil flotabilidad que la gravedad proporciona a cada glóbulo se ve totalmente anulada por la fuerza de la viscosidad. Los glóbulos de grasa homogeneizados suben tan lentamente que, en realidad, no haría falta que lo hicieran²¹. Reducir su tamaño es suficiente para cambiar el escenario de la batalla, convirtiéndolo en un terreno donde la viscosidad obtendrá una victoria clara. La nata ya no sube a la superficie. Y por eso, a partir de entonces, los herrerillos tuvieron que buscarse otra forma de obtener su desayuno.

Así pues, las fuerzas son las mismas, es la jerarquía lo que cambia²². Tanto los gases como los líquidos son viscosos: aunque las moléculas de gas no se pegan las unas a las otras como sucede en los líquidos, se empujan mucho entre ellas, y el gran juego de los

coches de choque tiene el mismo efecto. Esta es la razón por la que un insecto y una bola de cañón no caen nunca a la misma velocidad, a menos que extraigas todo el aire circundante y los lances en un espacio vacío. La viscosidad del aire afecta mucho al insecto y casi nada a la bola de cañón. Si extraes el aire, la gravedad es la única fuerza que importa en ambos casos. Y un insecto diminuto que intenta volar por el aire usa las mismas técnicas que nosotros cuando nadamos en el agua. La viscosidad domina su ambiente, al igual que sucede en nuestro caso con la piscina. Más que volar, se diría que lo que hacen los insectos más pequeños es nadar en ese entorno aéreo.

La leche homogeneizada demuestra este principio, pero su aplicación no se limita a este caso. La próxima vez que estornudes, tal vez quieras considerar el tamaño de las gotitas que estás difundiendo por la habitación. Lo que evita que la nata suba, también evita que la enfermedad se propague.

La tuberculosis (TBC) ha convivido con los humanos durante milenios. La primera constancia que se tiene de ella se halló en unas momias del antiguo Egipto datadas en el 2400 a. C.; Hipócrates la llamó «tisis» en el año 240 a. C., y en la Edad Media se pedía a los monarcas europeos que curaran el «mal del rey». Cuando la revolución industrial llevó a las personas a vivir en las ciudades, la «consunción», la enfermedad de los pobres urbanos, fue la responsable de la cuarta parte de las muertes registradas en Inglaterra y Gales en la década de 1840. Pero el culpable no se descubrió hasta 1882: una bacteria diminuta llamada

Mycobacterium tuberculosis. Charles Dickens describió la apariencia común de quienes padecían consunción a partir de la tos, pero no pudo escribir sobre uno de los aspectos más importantes de su mal porque no se percibe a simple vista. La tuberculosis es una enfermedad que se transmite por el aire. Cada vez que el afectado tose expulsa por los pulmones miles de gotitas líquidas, que son como penachos de cruzados en miniatura. Algunas de ellas contienen la bacteria con forma de varilla de la tuberculosis, cada una con una longitud de tres milésimas de milímetro. Las gotitas líquidas son bastante grandes en su origen: pueden llegar a medir varias décimas de milímetro. Pues bien, estas gotitas son atraídas hacia abajo por la gravedad, y una vez que llegan al suelo, ya no se mueven de ahí. Pero todo esto no ocurre rápidamente, porque los líquidos no son los únicos que son viscosos. El aire también lo es, y tiene que ser apartado del medio cuando las cosas se mueven a través de él. A medida que las gotitas van cayendo por ahí, son golpeadas y empujadas por moléculas de aire que ralentizan su caída. De la misma forma que la nata sube lentamente a través de la leche viscosa hacia la superficie, estas gotitas se ponen igualmente en marcha para deslizarse entre el aire viscoso a fin de llegar al suelo.

Pero, en realidad, no es eso lo que ocurre. La mayor parte de la gotita es agua, y durante los primeros segundos en el aire exterior, esa agua se evapora. Lo que antes era una gotita del tamaño suficiente para ser atraída por la gravedad a través del aire viscoso se ha convertido en una simple motita, una sombra de lo que era. Si

en sus orígenes era una gotita de saliva en la cual una bacteria de tuberculosis flotaba libremente, ahora es una bacteria de tuberculosis cuidadosamente envuelta por unas sobras orgánicas nauseabundas. La atracción gravitacional ejercida sobre este nuevo paquetito no puede competir con los golpes del aire. Dondequiera que el aire vaya, la bacteria va con él. Al igual que las gotitas de grasa miniaturizadas en la leche homogeneizada de nuestra época, no es más que una simple pasajera. Y si aterriza en una persona con un sistema inmunitario débil, tal vez forme una nueva colonia que irá creciendo lentamente hasta que llegue un momento en que haya nuevas bacterias listas para ser expulsadas por la persona cuando esta tosa, reiniciando así el ciclo.

La tuberculosis es tratable siempre que se disponga de los fármacos adecuados, y por eso ha desaparecido prácticamente por completo en el mundo occidental. Pero en el momento en que escribo esto, la TBC sigue siendo la segunda causa de muerte de nuestra especie después del VIH/sida, y es un problema de extrema gravedad en los países en vías de desarrollo. Nueve millones de personas desarrollaron TBC en 2013, y un millón y medio de ellas murieron. La bacteria ha mutado para reaccionar frente a los antibióticos, y se ha hecho tan resistente a las incontables oleadas de medicamentos que ya es evidente que no puede ser erradicada únicamente mediante la medicina. La cantidad de cepas de TBC resistentes a múltiples fármacos va en aumento. Están surgiendo brotes en colegios y hospitales, y por eso, últimamente la atención se ha centrado en esas gotitas diminutas. En vez de curar la TBC una vez

contraída, ¿por qué no modificar los edificios para evitar la propagación de esos dañinos penachos, de modo que el contagio nunca llegue a darse?

La profesora Cath Noakes trabaja en el Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad de Leeds, y es una de las investigadoras que se está abriendo paso en este frente de batalla. Cath es una gran defensora del potencial de las soluciones relativamente simples que surgen de la comprensión profunda de estas diminutas gotitas que flotan en el aire. Los ingenieros como ella están aprendiendo cómo viajan estos pequeños vehículos de enfermedad, y resulta que su forma de desplazarse tiene muy poco que ver con lo que contienen y con cuánto tiempo llevan ahí. En cambio, tiene especial importancia la batalla de las fuerzas que afectan a la partícula, y los límites de esta batalla los traza el tamaño de la propia partícula. Se ha descubierto que las gotitas de mayor tamaño pueden viajar mucho más lejos de lo que jamás se había creído, ya que la turbulencia del aire puede mantenerlas en suspenso²³. Las más pequeñas pueden permanecer en el aire durante días, aunque la luz azul y la ultravioleta las debilitan. Si sabes en qué lugar de la escala de tamaños se encuentra la partícula que te concierne, puedes predecir hacia dónde irá. Por lo tanto, si estás diseñando un sistema de ventilación para un hospital, ahora puedes decidir si quieres eliminar o contener cierto tamaño de partículas, lo que controlará la propagación de enfermedades. Cath me ha contado que cada enfermedad transmitida por el aire podría requerir un plan de ataque distinto, dependiendo de la cantidad de aire que hará que

enfermes (en el caso del sarampión, muy poca) y el lugar del cuerpo en el que se establezca la enfermedad (los efectos de la bacteria de la TBC son distintos en los pulmones y en la tráquea). Estos estudios se encuentran todavía en fases muy preliminares, pero están avanzando a gran velocidad.

Los humanos han vivido a merced de la TBC durante generaciones, pero ahora podemos visualizar su propagación, y eso nos da la oportunidad de controlarla. Allí donde nuestros antepasados solo veían una estancia fétida y rebosante de enfermedad, contaminada por una misteriosa polución, nosotros somos capaces de entender ese sutil remolino de aire que envuelve a cada paciente, la clasificación y el movimiento de las partículas de enfermedad, y cómo se manifiestan las consecuencias. Los resultados de esta investigación se incorporarán a los diseños de los hospitales del futuro, y la ingeniería a escala macro salvará muchas vidas mediante su influencia en las partículas a escala micro.

La viscosidad tiene su importancia cuando se trata de algo pequeño que se mueve por un fluido único, como los glóbulos de grasa que suben a través de la leche o un virus diminuto que cae por el aire. La tensión superficial, su compañera en el mundo de lo pequeño, gana relevancia en el momento en que dos fluidos distantes entran en contacto. En nuestro caso, esto suele ocurrir cuando el aire toca el agua, y el ejemplo de aire mezclado con agua que más gusta a la gente es una burbuja²⁴. Así que empecemos con un baño de burbujas.

El sonido de una bañera llenándose es único y sumamente agradable. Anuncia una recompensa inminente tras un día duro, un remojón tras un partido de bádminton especialmente difícil o, simplemente, un pequeño placer. Pero en cuanto añades un poco de jabón para hacer espuma, el sonido cambia. El profundo murmullo se suaviza y acalla a medida que la espuma se va formando, y el punto en donde el agua termina y empieza el aire resulta cada vez más difícil de identificar. El aire queda atrapado en jaulas de agua, y lo único que nos ha hecho falta para lograrlo es una pequeña dosis de algo que venía en una botella.

Fue un grupo de científicos europeos de finales del siglo XIX los que resolvieron el rompecabezas de la tensión superficial. A los victorianos les encantaban las burbujas. La producción de jabón creció exponencialmente entre 1800 y 1900, y la espuma blanca lavó a los obreros de la revolución industrial. Las burbujas alimentaron la moral victoriana, ya que eran el símbolo perfecto de la limpieza y de la inocencia pura. Y también eran un buen ejemplo de cómo funcionaba la física clásica, apenas unos años antes de que aparecieran la teoría de la relatividad especial y la mecánica cuántica y reventaran la idea de un universo organizado, ordenado y obediente cual si fueran una fina aguja pinchando un globo. Pero aun así, esos hombres serios con barba y chistera no descubrieron los secretos de la ciencia de las burbujas ellos solos. Las burbujas eran tan universales que todo el mundo podía atreverse con ellas. Y aquí es donde entra en escena Agnes Pockels, a menudo presentada como una simple «ama de casa alemana», pero que en realidad fue

una pensadora crítica muy aguda que usó los limitados materiales a su disposición y una buena dosis de ingenuidad para examinar la tensión superficial por sí misma.

Nacida en Venecia en 1862, Agnes formaba parte de una generación que estaba firmemente convencida de que el lugar de la mujer estaba en casa; por eso permaneció en el hogar paterno, mientras que su hermano estudiaba en la universidad. Pero aprendió física avanzada gracias al material que este le enviaba, realizó sus propios experimentos en casa, y en general se mantuvo informada de los avances del mundo académico. Cuando se enteró de que lord Rayleigh, el famoso físico británico, había empezado a interesarse por la tensión superficial, algo sobre lo que ella había experimentado ampliamente, decidió escribirle. A él le impresionó tanto la carta en la que Agnes describía sus resultados que se la envió a la revista *Nature* para que la publicara y así pudiera ser leída por los grandes pensadores científicos de la época.

Agnes había hecho algo muy sencillo y, a la vez, muy inteligente. Había colgado un pequeño disco metálico —más o menos del tamaño de un botón— en el extremo de un cordel, y lo había dejado posado sobre el agua. Entonces midió cuánta fuerza hacía falta para separarlo de la superficie del agua. El misterio residía en que el agua retenía el disco; tenía que tirar con más fuerza para sacarlo del agua que para levantarlo de la mesa. Ese tirón del agua es lo que llamamos tensión superficial, de modo que, al medir el empujón, Agnes estaba midiendo la tensión superficial. A partir de ahí pudo analizar la superficie del agua, aunque la fina capa de

moléculas responsable del tirón era demasiado pequeña para poder percibirla a simple vista. Enseguida veremos cómo lo hizo; pero, primero, volvamos al baño.

Un baño lleno de agua pura es como un enjambre de inquietas moléculas de agua jugando a los coches de choque en una pista abarrotada. Pero una de las cosas que hace del agua un líquido tan especial es que todas estas moléculas se sienten fuertemente atraídas por las demás moléculas de agua que están a su alrededor. Cada una de ellas contiene un átomo de oxígeno grande y dos más pequeños de hidrógeno (de ahí salen las dos H y la O de la fórmula H_2O). El oxígeno está en medio de dos hidrógenos que lo flanquean a cada lado, formando una V poco pronunciada. Pero aunque el oxígeno se siente muy atraído y fuertemente unido a sus dos átomos de hidrógeno, también coquetea con otros que pasan por ahí. Así que está constantemente tirando del hidrógeno de las otras moléculas de agua. Esto es lo que hace que el agua se mantenga unida. Se le llama vinculación de hidrógeno, y es muy fuerte. En la bañera, las moléculas de agua están constantemente atrayendo a las otras moléculas de agua que hay alrededor, tirando de la masa de agua en su conjunto.

Las moléculas de agua de la superficie están algo abandonadas. Se ven atraídas desde abajo por otras moléculas de agua, pero no hay nada que tire de ellas desde arriba. Así que se tira de ellas desde abajo y hacia un lado, pero no hacia arriba; y la consecuencia es que la superficie del agua se comporta como una sábana elástica, que permanece bien estirada encima de las moléculas de agua que

quedan debajo de la capa superior, mientras que tira de ella misma hacia dentro para mantenerse lo más pequeña posible. Esto es la tensión superficial.

Mientras corre el agua, el aire es transportado hacia abajo en el interior de la bañera, formando burbujas. Pero cuando estas burbujas flotan hacia la superficie, no duran mucho. La cúpula redonda de la burbuja está estirando la superficie, y la tensión superficial no es lo suficientemente fuerte para arrastrarla de vuelta. Así que las burbujas explotan.

Una de las cosas que Agnes hizo fue disponer su botón de manera que pudiera tirar de él hacia arriba, pero sin aplicar la fuerza suficiente para despegarlo de la superficie. Y luego echó una gota de un líquido parecido al detergente sobre la superficie del agua que rodeaba al botón. Al cabo de un segundo aproximadamente, el botón salió disparado de la superficie. El detergente se había extendido por el agua y había reducido la tensión superficial. Para disminuir la tensión superficial basta con crear una capa fina en la superficie, de manera que las moléculas de agua no sean las que queden en la misma superficie.

Cuando llega el momento de añadir el jabón para hacer espuma, es también el momento de despedirnos de la superficie limpia, llana y minimalista. Esa pizca de sustancia aromática se hunde en el agua e inmediatamente hace todo lo que puede para esconderse en los bordes. Toda molécula tiene un extremo que disfruta del agua y otro que la detesta. Si el extremo que detesta el agua encuentra aire, se queda con él, pero el otro lado tampoco claudica. Así que allí donde

el agua entra en contacto con el aire, aparece una capa fina de jabón de espuma que cubre esa superficie. Tiene el grosor de una sola molécula, y cada una de ellas está colocada de la misma forma, es decir, con los extremos que disfrutan del agua sumergidos y los extremos que la detestan suspendidos en el aire. Esta capa fina hace que una superficie grande deje de ser un problema. La atracción del jabón de hacer espuma no es tan fuerte como la del agua, así que la sábana elástica se debilita mucho. Ahora lo que toca es hacer una fiesta en la superficie, y ahí es donde entra en escena la espuma. Al reducir la tensión superficial, el jabón de hacer espuma consigue que a las burbujas les resulte más fácil durar, porque su gran superficie es mucho más estable.

Llegados a este punto, seguramente merece la pena mencionar que solemos asociar la espuma blanca con la limpieza, pero en los detergentes actuales, los componentes que más se pegan a la superficie del agua y hacen espuma no son los más efectivos para eliminar la suciedad y la grasa de las prendas y los platos. Se pueden fabricar detergentes muy buenos que apenas hagan espuma, y de hecho la espuma suele acabar siendo un incordio. Pero los proveedores de productos para la limpieza fueron tan convincentes con sus argumentos de que la preciosa espuma blanca garantizaba una limpieza profunda que ahora esto les resulta un problema. Así que, hoy en día, se añaden agentes espumantes a tales productos para asegurar la creación de burbujas, porque, de lo contrario, los consumidores se quejan.

Como en el caso de la viscosidad, la tensión superficial es algo de lo que somos conscientes aquí arriba, en nuestra escala de tamaño, aunque normalmente es menos importante que la gravedad y la inercia. A medida que empequeñeces, la tensión superficial se abre paso a empujones en la escala jerárquica de las fuerzas. Esto explica por qué se empañan las gafas de natación y cómo funcionan las toallas. Pero la verdadera belleza del mundo de lo pequeño reside en que un objeto enorme puede contener muchos procesos pequeños, y los efectos de cada uno de ellos se suman. Por ejemplo, resulta que la tensión superficial, que únicamente domina las situaciones de menor escala, también posibilita la existencia de los seres vivos más grandes de nuestro planeta. Pero para llegar a ese punto, tenemos que detenernos a observar otro aspecto de la tensión superficial. Veamos qué ocurre cuando la superficie que separa un gas de un líquido choca contra un sólido.

La primera vez que nadé en mar abierto fue toda una aventura. Por suerte, antes de tirarme al agua no tenía ni idea de lo que iba a pasar, así que no me angustié. Cuando estuve trabajando en el Instituto Oceanográfico Scripps de San Diego, la gran prueba anual de mi equipo de natación consistía en llegar nadando desde la playa de La Jolla hasta el muelle de Scripps y volver, es decir, 4,5 kilómetros a través de un cañón submarino bastante profundo. La verdad es que yo solo había nadado en piscinas, pero, como siempre estoy dispuesta a probar cosas nuevas y había estado nadando mucho, me apunté a la prueba confiando en no parecer demasiado novata. Cuando entré en el agua se formó una gran aglomeración de

gente, pero luego la cosa mejoró. La primera parte de la prueba discurría por encima de un precioso bosque de algas, y era casi como volar. La luz del sol brillaba entre los enormes troncos de kelp tal como lo hace en los bosques de la superficie terrestre, y luego las algas desaparecían en las turbias profundidades, recordándome que había muchas criaturas nadando ahí abajo que yo no alcanzaba a ver. Cuando dejamos las algas atrás, las aguas se agitaron y tuve que fijarme mucho más en el rumbo que llevábamos; pero cada vez me costaba más. El muelle se alzaba borroso en el horizonte, y tampoco veía nada cuando miraba hacia abajo. Solo al cabo de un rato me di cuenta de que la razón por la que había desaparecido todo era que se me habían empañado las gafas. ¡Ay!

En el interior de mis gafas de plástico, el sudor se había evaporado de la piel caliente de alrededor de los ojos. Cuanto más me esforzaba, más se evaporaba. El aire atrapado entre mi cara y las gafas se había convertido en una pequeña sauna, caliente y húmeda. Pero el océano que me rodeaba era agradable y fresco, y enfriaba las gafas desde el exterior. Cuando las moléculas de agua que había en el aire chocaban contra el plástico frío, desprendían su calor y se condensaban, volviendo a su forma líquida. Pero ese no era el problema. El mayor problema era que todas esas moléculas de agua se topaban unas con otras en el interior de mis gafas y se quedaban unidas, ya que la atracción entre ellas era mucho mayor que la ejercida por el plástico. La tensión superficial las atraía hacia el interior, obligándolas a agruparse en gotitas diminutas para reducir al mínimo la superficie. Cada gotita era minúscula: tenía de

10 a 50 micrómetros de longitud. Así que, para ellas, la gravedad era insignificante en comparación con las fuerzas superficiales que las pegaban al plástico, por lo que habría sido una tontería pararme creyendo que así se caerían por sí solas.

Cada una de las gotitas actuaba como una lente, doblando y reflejando la luz que la alcanzaba. Cuando levanté la cabeza para buscar el muelle, las gotitas salieron al encuentro de la luz que había estado viajando hacia mis ojos. Como una casa de los espejos en miniatura, habían desordenado la imagen de tal forma que lo único que veía era una revoltijo gris y amorfo. Me detuve un momento para limpiarme las gafas, y durante un rato recuperé la visión clara del muelle. Pero luego el vaho regresó. Y una vez más tuve que limpiarme las gafas. Vaho. Limpiar. Vaho. Limpiar. Al final, decidí seguir de cerca a mi compañera de nado porque llevaba un gorro de color rojo brillante, y el rojo lograba atravesar las fastidiosas gotitas de agua.

Cuando llegamos al muelle, nos detuvimos a comprobar que todo el mundo estuviera bien. Ahora que tenía un poco de tiempo para pensar, por fin recordé algo que me había enseñado un buceador hacía apenas una semana. «Escupe en las gafas y frota la saliva por el interior del plástico», me había aconsejado. Cuando me lo dijo hice una mueca de asco, pero como no me apetecía nadar por el cañón completamente ciega, escupí sobre las gafas. Y así fue como la vuelta resultó una experiencia completamente distinta. En parte porque mi compañera había decidido que estaba aburrida y quería terminar de una vez, y a mí me costaba seguirle el ritmo. Pero,

principalmente, fue distinta porque podía ver: veía nadadores, algas, la playa a la que nos dirigíamos y hasta el pececito curioso que se asomaba de vez en cuando. En cierto modo, la saliva humana actúa como el detergente: reduce la tensión superficial. Mis gafas eran aún una mini sauna y el agua seguía condensándose, pero la tensión superficial no tenía la fuerza suficiente para agrupar el agua en gotitas. Estaba extendida en una fina capa que cubría toda la superficie. Puesto que no tenía que lidiar con bloques de agua ni con choques ni límites, la luz podía atravesar el agua en línea recta, y yo veía con toda claridad. Ya en la playa, salí trastabillando del agua sintiéndome eufórica, en parte por el alivio de haber terminado la prueba, y en parte por mi nueva comprensión de lo que el mundo submarino nos ofrecía.

He aquí un método para evitar que las cosas se empañen: extiende una fina capa de surfactante sobre la superficie en cuestión. Para ello se pueden usar muchas cosas: saliva, champú, crema de afeitar o un caro anti vaho comercial. Si el surfactante está listo para actuar, toda agua que se condense quedará inmediatamente revestida por él. Este revestimiento debilita la tensión superficial e influye en la batalla de fuerzas que tiene lugar en cada gotita de vaho para que el agua cubra el plástico de forma uniforme. El agua puede pegarse a toda la superficie de las gafas siempre que no haya fuerzas mayores que la atraigan y la despeguen. Aquí, la tensión superficial es la única fuerza capaz de competir, así que, cuando la debilitas, el problema desaparece²⁵.

Por tanto, una de las soluciones consiste en reducir la tensión superficial. Pero hay otra: aumentar la atracción de las gafas. Una gota que esté sola se hará una bolita. Si la pones encima de plástico o cristal, se mantendrá erguida y apenas tocará la superficie, ya que las moléculas de agua se reorganizarán de tal forma que haya las menos posibles tocando el plástico. Pero si pones la gota en una superficie sólida que atraiga las moléculas de agua prácticamente con la misma fuerza que otras moléculas acuosas, el agua se acurrucará en esa superficie. En lugar de una gota de agua orgullosa y casi esférica, obtendrás una gota aplanada que siente la atracción de la superficie tanto como la de sus vecinas. Hoy en día, las gafas que me compro tienen un revestimiento interior que atrae el agua (y que se denomina «hidrófilo»). El agua se sigue condensando, pero se extiende por toda la superficie, atraída por el revestimiento. La condensación en las gafas es inevitable, pero el vaho es cosa del pasado²⁶.

Debilitar la tensión superficial es útil, pero esa atracción entre las diversas moléculas de agua es muy fuerte. Y cuanto más pequeño sea el volumen de agua que te interese, más importancia tendrá. Así que podría decirse que la tensión superficial es realmente útil cuando funciona como un sistema de cañerías en las escalas más diminutas. Ahí abajo, no necesitas bombas ni sifones ni grandes cantidades de energía para remover el agua; solo debes conseguir que las cosas sean lo suficientemente pequeñas para que la gravedad resulte irrelevante y deje a la tensión superficial hacer

todo el trabajo. Fregar el suelo es aburrido, pero el mundo sería muy distinto si no lo hiciéramos.

Soy una cocinera caótica y razonablemente competente, pero me interesa mucho más el proceso del cocinado que los rastros de destrucción que voy dejando tras de mí. Esto me angustia un poco cuando cocino en casas ajenas. Hace unos años, me puse a hacer una tarta de manzana para el grupo internacional de voluntarios con el que trabajaba en un colegio polaco²⁷. La cosa no empezó bien. La alta y fiera cocinera del colegio bramó «¡Nooo!» con cierto entusiasmo cuando le pregunté si podía utilizar su cocina, y me llevó unos confusos segundos recordar que estábamos hablando en polaco, y que para decir «sí» ellos dicen «no». Mi polaco no era muy bueno, y no comprendí todos los detalles que me dio después, pero sí que interioricé un mensaje muy claro: había que dejar la cocina limpia. Perfectamente limpia. Sin una sola mancha. Impoluta. Pues bien, resulta que, después de haberse marchado a su casa y de que yo hubiera recopilado todos los ingredientes, lo primero que hice fue —no podía ser de otra manera— volcar un enorme cartón de leche que acababa de abrir.

Mi primera reacción fue desear que la leche desapareciera para que la estricta cocinera no supiera que había llegado siquiera a existir. La leche es resbaladiza y pegajosa, no se puede recoger ni barrer, y está en concreto avanzaba por el suelo de la cocina a un ritmo alarmante. Pero existe una herramienta muy útil para juntar líquidos, para hacer que se quede todo en un mismo sitio; y se llama toalla.

En cuanto la leche llegó a la toalla, el líquido empezó a recibir órdenes de un montón de fuerzas nuevas. Las toallas están hechas de algodón, y el algodón atrae el agua. Ahí abajo, en la escala de lo diminuto, las moléculas de agua se estaban pegando a las fibras del algodón, trepando poco a poco por las superficies de cada fibra. Y las moléculas de agua se sienten tan atraídas las unas a las otras que la primera en tocar la toalla no puede trepar hacia arriba por sí sola. Únicamente puede subir si se lleva a la siguiente molécula de agua con ella. Y esta otra debe llevarse a la siguiente. Así que el agua trepa por las fibras de algodón, llevándose consigo todos los demás componentes de la leche. Las fuerzas que hacen que el agua se pegue a las fibras de la toalla son tan potentes que la exigua atracción de la gravedad es totalmente irrelevante. Todo lo que se había derramado subía ahora con la misma alegría.

Pero esta es solo la mitad de la historia. La genialidad de la toalla reside en su pelusa. Si una toalla solo pudiera recubrir sus fibras con una fina capa de agua, no serviría para recoger mucho líquido. Pero esta pelusa le proporciona muchas bolsas de aire y túneles estrechos. Cuando el agua entra en uno de esos estrechos túneles, se ve atraída hacia arriba desde todos los lados, y el agua del medio simplemente se deja arrastrar. Cuanto más se estrecha el túnel, mayor es la superficie de que dispone cada una de las gotas de agua del medio. Las toallas de pelusa tienen una amplia superficie y huecos muy estrechos por todas partes, lo que les permite absorber mucha agua.

Mientras observaba el charco de leche desaparecer en el interior de la toalla, las diminutas moléculas de agua se agrupaban y se iban empujando las unas a las otras en la pelusa. Las del fondo simplemente se dejaban llevar por la multitud, pegadas a las moléculas de agua que tenían al lado. Las que estaban en contacto con el algodón se adherían a este y a las moléculas de agua por el otro extremo, manteniendo su posición. Las que estaban en contacto con la parte seca de la toalla se aferraban al nuevo algodón seco y, una vez adheridas, atraían hacia arriba a las que tenían debajo, llenando así los huecos de la estructura. Las que estaban en la superficie tiraban de las moléculas de agua que tenían justo debajo, procurando rodearse de la mayor cantidad posible de moléculas de agua y tirando del agua hacia arriba en el proceso. A esto se lo llama «capilaridad». La gravedad estaba atrayendo toda esa leche, estuviera donde estuviera, dentro de la pelusa de la toalla. Pero la gravedad no podía competir con las fuerzas que lo mantenían todo unido, las fuerzas de arriba, donde la leche había entrado en contacto con el algodón seco dentro de millones de minúsculas bolsas de aire. Mientras daba la vuelta a la toalla y la restregaba, se iban llenando distintas partes del tejido, almacenando agua en las bolsas de aire.

El agua seguirá trepando a través de los huecos, trayendo más agua consigo, hasta que la suma de esas pequeñas fuerzas provenientes de una gran cantidad de bolsas quede finalmente equilibrada con la atracción del planeta. Esta es la razón por la que, cuando introduces el extremo de una toalla en agua, el líquido se extiende

rápidamente hacia arriba unos centímetros y luego se detiene. En ese momento, el peso del agua está exactamente equilibrado por la atracción hacia arriba de la tensión superficial. Cuanto más estrechos sean los túneles en la pelusa, más superficie contribuirá a la tensión superficial y, por tanto, más arriba llegará la cota del agua. Aquí, la escala es de suma importancia, ya que si fabricaras pelusa con la misma forma pero de un tamaño cien veces mayor, nunca sería absorbente. En cambio, cuando el tamaño se reduce, la jerarquía de fuerzas cambia y el agua sube. Lo mejor de todo es que si pones la toalla a secar, se evaporará el agua de esas bolsas y desaparecerá en el aire. Es difícil encontrar una forma mejor de resolver este problema; la toalla recoge y contiene el líquido hasta que este flota por sí solo²⁸.

Una vez solucionado el asunto del derrame, terminé la tarta y dejé la cocina en un estado adecuadamente pulcro. Pero un último problema estaba aún por llegar; un problema que ninguna superficie científica podría haberme ayudado a solucionar. La nata montada que serví con la tarta de manzana estaba asquerosa, tal como demostraron las caras de los consumidores de tarta. No fue la mejor forma de aprender la palabra polaca para decir «agria», que era la que precedía en el bote a la palabra «crema». En fin, como suele decirse, de los errores se aprende, y este en concreto seguro que no lo volveré a cometer.

La razón por la que las toallas se hacen de algodón es que este está compuesto, en gran medida, de celulosa, es decir, largas cadenas de azúcares a las que las moléculas de agua se aferran muy fácilmente.

Algodón, papel de cocina, papel barato: todos ellos son absorbentes porque tienen una estructura de pelusa en una escala diminuta, hecha de celulosa, a la que le encanta el agua. La cuestión es: ¿cuáles son los límites de esta física que tanto depende del tamaño? Si haces los túneles tan pequeños como sea posible en términos físicos, ¿qué se puede lograr con ellos? Las toallas no son lo único que absorbe agua por túneles diminutos hechos de celulosa. La naturaleza lo hizo mucho antes que nosotros. El ejemplo más poderoso de lo que la física de lo pequeño es capaz de hacer es también el organismo vivo más grande del planeta: la secuoya gigante.

* * * *

El bosque es tranquilo y húmedo. Es como si siempre hubiese sido así, como si aquí los cambios fueran algo excepcional. El sotobosque entre los troncos de los árboles está cubierto por una alfombra de musgo y helechos, y los únicos sonidos que se oyen son los cantos de pájaros que no vemos y los chirridos graves e inquietantes de los árboles que reorganizan su peso. Arriba se ve el cielo azul entre las delgadas ramas verdes, y bajo mis pies hay agua por todas partes: arroyos, pedazos de tierra húmeda, riachuelos aventureros que bajan hacia el valle. Mientras camino, mi subconsciente me incita a estar alerta porque una sombra acecha en el bosque, algo que no parece pertenecer a este lugar. Pero no es un depredador; es un árbol: uno de los auténticos gigantes, un coloso milenario que se

esconde entre los jóvenes, dejando claro su estatus en el bosque con su magnífica sombra.

En el pasado, la secuoya costera (*Sequoia sempervirens*) cubría grandes extensiones de esta parte del norte de California. Hoy en día, esos inmensos bosques han quedado reducidos a unas pequeñas franjas verdes, y yo estoy visitando una de las más famosas, el Parque Nacional Redwood, en el condado de Humboldt. Estos gigantes impresionan porque su tronco está totalmente recto y en vertical, y el cielo es su única meta. El árbol más alto del planeta está aquí, y tiene unos impactantes 116 metros de altura²⁹. Durante mi excursión, camino entre árboles cuyos troncos miden dos metros de diámetro o más. Seguramente, lo más sorprendente de todo es que justo detrás de las profundas rugosidades y surcos de su corteza, estos árboles siguen generando nuevos anillos. Están vivos. Las diminutas hojas perennes que cuelgan a cien metros por encima de mi cabeza están capturando la energía del sol, almacenándola y creando lo que hará que el árbol siga creciendo.

Pero la vida exige agua, y el agua está aquí abajo, donde yo me encuentro. Por eso, en todas las partes del bosque, el agua fluye hacia arriba. Y este flujo nunca se ha interrumpido, ni una sola vez desde que estos árboles brotaron de su semilla. Algunos de ellos llevan aquí desde la caída del Imperio romano. Ya estaban aquí, entre la niebla californiana, cuando Gengis Kan arrasó Asia, cuando Robert Hooke publicó *Micrografía* y cuando los japoneses bombardearon Pearl Harbor. Y ni una sola vez en todo ese tiempo, el agua ha dejado de fluir. La razón por la que podemos estar seguros

de ello es que el proceso entero depende de que el flujo no se detenga nunca. No hay forma de reiniciarlo. Se trata de una obra de fontanería sumamente inteligente, y la magnífica pieza de arquitectura viviente que lo mantiene todo en funcionamiento debe su efectividad a que solo mide unos nanómetros de ancho.

El agua viaja por el xilema, un sistema de diminutas tuberías de celulosa que se extienden por todo el árbol, desde las raíces hasta las hojas. Lo que conocemos como «madera» es básicamente eso, aunque la parte más interior deja de participar de este sistema de cañerías a medida que el árbol crece. La capilaridad, el mecanismo que hizo que mi toalla fuera absorbente, solo tiene fuerza para absorber el agua durante unos cuantos metros por las cañerías del árbol. Y eso, a un árbol alto, no le sirve. Las raíces del árbol también pueden generar su propia presión para empujar el agua hacia arriba por las cañerías, pero eso solo permitiría empujar el agua algunos metros más. La mayor parte del trabajo no se consigue empujando, ya que el agua está siendo atraída. Se trata de un sistema que funciona en todos los árboles, pero las secuoyas son las reinas en esto.

Me siento en un tronco caído, justo al lado de uno de los gigantes, y alzo la vista. Unos metros por encima de mi cabeza, la brisa agita las diminutas hojas. Para hacer la fotosíntesis necesitan la luz del sol, dióxido de carbono y agua. El dióxido de carbono proviene del aire y entra en el árbol a través de unas bolsas diminutas llamadas estomas que están situadas en la parte inferior de las hojas. En el interior de esas bolsas hay una red de fibras de celulosa, y entre las

fibras se abren túneles llenos de agua. Son los extremos superiores de las cañerías de agua, que se han ramificado incontables veces, disminuyendo de tamaño cada vez que llegan a los estomas. Aquí, en el punto en el que las cañerías de agua entran finalmente en contacto con el aire, cada una de ellas mide unos diez nanómetros de ancho³⁰. Las moléculas de agua se mantienen fuertemente aferradas a las paredes de celulosa de cada túnel, y la superficie del agua se curva hacia abajo formando una especie de bol nanoscópico. La luz del sol calienta la hoja y el aire que contiene, y a veces proporciona la energía suficiente a una de esas moléculas de agua de la superficie para apartarla de la multitud que tiene debajo. Esa molécula de agua evaporada se aleja de la hoja y se adentra en el aire. Pero ahora el bol nanoscópico ha perdido su forma: es demasiado profundo. La tensión superficial lo está atrayendo hacia el interior, agrupando cada vez más las moléculas de agua para reducir el área de la superficie. Hay muchas moléculas nuevas que podrían rellenar el hueco, pero todas ellas están más atrás en el túnel. Así que el agua del túnel es atraída hacia delante para que sustituya a la molécula perdida. Y, entonces, el agua que se encuentra rezagada en el túnel tiene que moverse para sustituir a esa molécula, y así sucesivamente por todo el árbol, hasta llegar abajo. Dado el diminuto tamaño del túnel, la tensión superficial puede ejercer una atracción enorme sobre el agua que tiene debajo, la suficiente —cuando se suma la contribución de un millón de hojas diferentes— como para atraer a la columna de agua entera hacia la parte alta del árbol. Es asombroso. La gravedad está

atrayendo toda el agua que contiene el árbol, pero la combinación de muchas fuerzas pequeñas unidas está ganando la batalla³¹. Y no se trata únicamente de la batalla contra la gravedad; las fuerzas ascendentes también están venciendo a la fricción de las paredes de los tubos mientras el agua es empujada a través de los pequeños túneles.

Auténticos bebés crecen a mi alrededor en el suelo del bosque: son árboles de un año de edad. Sus columnas de agua apenas están empezando a formarse. A medida que el árbol nuevo crece, su sistema de cañerías se expande sin romperse jamás, por lo que la parte superior de la columna de agua moja constantemente los estomas. El agua es atraída por el aire a medida que el árbol crece. Este no puede rellenar la cañería si se vacía, pero puede mantenerla siempre llena mientras sigue creciendo. Sea cual sea la altura que alcance un árbol, esta columna de agua no debe romperse jamás. La razón por la que las secuoyas más altas están cerca de la costa es que la niebla costera ayuda a mantener las hojas húmedas³². Es menos el agua que tiene que llegar desde las raíces hasta el extremo de la copa, lo que permite que el sistema sea más lento y los árboles puedan crecer más.

Este proceso de la evaporación del agua de las hojas de los árboles se llama transpiración, y ocurre cada vez que miras un árbol bañado por el sol. En realidad, estas enormes y perezosas secuoyas son enormes conductos de agua que chupan agua del suelo del bosque, y que luego desvían una parte para llevar a cabo la fotosíntesis y finalmente liberan en el aire el agua restante. Todos

los árboles hacen lo mismo. Los árboles son una parte esencial de los ecosistemas de la Tierra, y no serían capaces de trepar hacia el cielo a menos que pudieran llevar agua consigo. Y lo bonito de todo esto es que no necesitan un motor o una bomba de agua activa para hacerlo: reducen el problema, lo solucionan aplicando las reglas de lo pequeño, y luego repiten el mismo proceso muchos millones de veces hasta que lo convierten en la física de los gigantes.

El diminuto mundo en el que la tensión superficial, las fuerzas capilares y la viscosidad prevalecen sobre la gravedad y la inercia siempre ha formado parte de nuestra vida cotidiana. Puede que los mecanismos sean invisibles, pero sus consecuencias no lo son. Y hoy en día no somos meros espectadores que admiran la elegancia y el exotismo de lo que ocurre ahí abajo. Estamos empezando a ser ingenieros que trabajan en ese pequeño mundo. Existe un nombre para el campo que tan rápidamente se está desarrollando en el marco de las cañerías liliputienses, la manipulación y el control de los fluidos que fluyen a través de túneles estrechos: es la «microfluídica». La mayoría de nosotros no hemos oído esta palabra, pero en el futuro tendrá un gran impacto en nuestras vidas, especialmente en lo relativo a la medicina.

Hoy en día, las personas diabéticas pueden controlar el nivel de azúcar de su sangre con ayuda de un dispositivo electrónico muy sencillo y de unas tiras reactivas. Cuando una gotita de sangre entra en contacto con la tira, esta la absorbe rápidamente gracias a la capilaridad. Entre los diminutos poros de la tira se esconde una enzima, la glucosa oxidasa, que produce una señal eléctrica cuando

reacciona con el azúcar de la sangre. Este dispositivo portátil mide esa señal, y, ¡tachán!, en la pantalla aparece una precisa medición del nivel de azúcar en sangre. Es fácil tomarse este ejemplo como la descripción de lo obvio: el papel absorbe un fluido para que pueda ser medido. ¿Qué tiene de especial? Pues que es una demostración sencilla de este principio. En realidad, la cosa se complica mucho más.

Si puedes mover un fluido a través de unos tubos y filtros diminutos, almacenarlo en algún recipiente, mezclarlo con otros químicos por el camino y ver los resultados, ya tienes todos los elementos de un laboratorio de química. No hacen falta tubos de ensayo, probetas o microscopios. Esta es precisamente la premisa de la industria en expansión del «*lab on a chip*» (laboratorio en un chip): el desarrollo de dispositivos pequeños para realizar pruebas médicas. A nadie le gusta que le extraigan un vial entero de sangre, pero desprendernos de una sola gota no cuesta tanto. Los dispositivos de diagnóstico de pequeño tamaño suelen ser más baratos para facilitar su distribución. Y ni siquiera hace falta fabricarlos con materiales sofisticados como polímeros o semiconductores; con papel, ya sirve.

Un equipo de investigadores de Harvard liderado por el profesor George Whitesides está trabajando en ello. Han diseñado kits de diagnóstico del tamaño de un sello; están hechos de papel, pero contienen un laberinto de túneles de un papel al que le encanta el agua y paredes enceradas que detestan el líquido elemento. Al poner una gota de sangre u orina en la parte correcta del papel, la acción

capilar la arrastra por el túnel principal, la divide y la desvía a varias partes sujetas a diagnóstico. Cada una de ellas contiene los ingredientes necesarios para distintas pruebas biológicas, y cada reserva cambiará de color en función de los resultados de la prueba³³.

Los investigadores sugieren que alguien que esté muy lejos del médico podría realizar la prueba allí donde esté, hacer una fotografía del resultado con su móvil y mandársela por *e-mail* a un especialista que sepa interpretarla. Como idea es fantástica. El papel es barato, el dispositivo no requiere electricidad, es ligero y lo único que se necesita para desecharlo es una simple llama. Como ocurre con todo este tipo de dispositivos, todavía tendrá que superar muchos controles y verificaciones antes de que sepamos si esta idea que parece tan simple puede llegar a aplicarse en el mundo real. Pero es difícil no creer que, de una forma u otra, dispositivos como este llegarán a formar parte de la medicina del futuro.

La genialidad de todo esto es que, cuando nos enfrentemos a un problema, podremos optar por trabajar en la escala que más facilite la resolución del problema. Es como poder escoger qué leyes de la física quieres tener a tu favor. Lo pequeño es, sin duda, maravilloso.

Capítulo 4

Un momento en el tiempo

La marcha hacia el equilibrio

El mejor sitio para comer en un domingo aburrido es un pub inglés. Más que fruto del diseño, las entrañas de estos establecimientos parecen haber surgido por adición: están formadas por un batiburrillo de estancias de formas extrañas que se esconden en un viejo esqueleto de roble. Te sientas a una mesa dispuesta entre cuñas de latón pulidas y fotografías de la época georgiana en la que se premiaba a los mejores cerdos y pides una buena comida de pub. Siempre te la sirven junto con un bol de patatas fritas y un bote de ketchup de cristal, pero esta combinación tiene su precio. Durante décadas, estas barras de roble han presenciado un ritual imperecedero. El ketchup debe ser extraído del bote y, para ello, hay que luchar. Todo empieza cuando un alma optimista coge el ketchup y lo sostiene boca abajo sobre el bol de patatas. Nunca funciona, pero casi nadie se salta este paso. El ketchup es una sustancia densa y viscosa, y la débil atracción de la gravedad no es suficiente para extraerlo del bote. Está hecho de esta forma por dos razones. La primera es que la viscosidad evita que las especias se hundan hasta el fondo si el bote se abandona durante un tiempo; y así no hace falta agitarlo para asegurarse de que está bien mezclado. La segunda y más importante es que la gente quiere que toda patata quede cubierta por una buena capa de salsa, y eso no

se consigue si es demasiado líquida. Pero, en cualquier caso, recordemos que todavía no está en la patata. Sigue dentro del bote. Tras unos segundos, y después de haber constatado que este bote de ketchup es tan inmune a la gravedad como todos los que ha manejado en su vida, el esperanzado comedor de patatas procede a agitar el bote. La agitación se vuelve cada vez más violenta, hasta que llega un momento en que golpea el culo de la botella con la otra mano. Justo cuando los demás comensales se están echando hacia atrás para evitar la catástrofe sobre sus chaquetas, una cuarta parte del contenido de la botella sale disparada de golpe. Lo extraño es que el ketchup puede fluir muy fácil y rápidamente, como bien demuestra la densa capa de salsa que ahora cubre el bol (y seguramente media mesa). Pero el caso es que no lo hace hasta que se decide a salir, y entonces fluye con un entusiasmo considerable. ¿Qué está pasando aquí?

Lo que ocurre con el ketchup es que, si intentas empujarlo con cuidado, actúa casi como un sólido. Pero una vez que lo fuerzas a moverse rápidamente, actúa mucho más como un líquido y fluye con suma facilidad. Cuando está en el interior del bote o encaramado sobre una patata, la atracción de la gravedad es muy débil, así que actúa como un sólido y se queda donde está. Pero si lo agitas con la fuerza suficiente y consigues moverlo, actúa como un líquido y se mueve con rapidez. Todo tiene que ver con el tiempo. La misma acción realizada rápidamente o, por el contrario, de manera lenta proporcionará resultados totalmente distintos.

Básicamente, el ketchup consiste en unos cuantos tomates triturados y aderezados con un toque de vinagre y especias. Si se deja tal cual, es líquido, acuoso y bastante anodino. Pero en la botella acecha un 0,5% de otro elemento: moléculas alargadas que están formadas por una cadena de azúcares unidos. Es goma xantana; en sus inicios surgía de las baterías, pero hoy en día es un aditivo muy común. Cuando el bote reposa sobre la mesa, estas moléculas alargadas se rodean de agua y están algo enredadas con otras cadenas de carácter similar. Ellas son las que mantienen el ketchup en su sitio. Cuando nuestro amante de la preciada salsa agita el bote con más fuerza, estas moléculas alargadas se desenredan un poco, aunque se vuelven a enmarañar con bastante rapidez. Puesto que los golpes en el culo del bote empujan el ketchup a más velocidad, los enredos se van deshaciendo, y en un momento dado las moléculas son movidas de su sitio a mayor velocidad, por lo que esos enredos no pueden volver a formarse. Una vez que se supera este punto crítico, el comportamiento sólido desaparece y el ketchup sale hacia el exterior del bote³⁴.

Existe una forma de evitar este problema, pero pese a que la gente come muchísimas patatas con ketchup, es sorprendentemente rara de ver. La táctica de girar el bote y golpear la base no es demasiado útil, porque el ketchup al que queremos obligar a hacerse líquido está muy cerca de la zona que estamos golpeando. El cuello de la botella sigue bloqueado por un pegote espeso e inmóvil. La solución pasa por conseguir que el ketchup del cuello se haga líquido, y para ello hay que inclinar el bote y dar unos golpecitos en el mismo

cuello. La cantidad que saldrá será limitada, porque ese ketchup es el único que es líquido. De este modo evitaremos golpear a nuestros acompañantes con los codos —y hasta los salvaremos de algún chorro perdido de ketchup— y además conseguiremos que nuestras patatas no naden en un mar de salsa.

El tiempo tiene su importancia en el mundo físico, porque la velocidad a la que ocurren las cosas siempre importa. Si haces algo el doble de rápido, a veces consigues el mismo resultado en la mitad de tiempo. Pero, muy a menudo, consigues un resultado completamente distinto. Esto es bastante útil, y nos aprovechamos de ello para controlar nuestro mundo de diversas formas. También hay mucho tiempo con el que podemos jugar, en el sentido de que existen muchas escalas de tiempo distintas en las que pueden ocurrir las cosas. El tiempo tiene su importancia en el caso del café, de las palomas y de los edificios altos, y a cada uno de ellos les afecta una escala de tiempo distinta. No se trata únicamente de retocar las cosas cotidianas de nuestra vida para nuestra comodidad. Resulta que si la vida es posible es porque el mundo físico nunca acaba de alcanzarse a sí mismo. Pero empecemos por el principio. Empecemos con una criatura que, como todos sabemos, nunca alcanza nada; es la mascota de los que siempre llegan en último lugar.

* * * *

Me hallaba en Cambridge, un día de pleno sol, y finalmente tuve que admitir que un caracol me había vencido.

No es corriente aficionarse a la jardinería en tu último curso de carrera, pero la casa que compartía con tres amigos tenía un jardín, y la tentación era demasiado grande. En las horas sueltas que me quedaban libres aquel año entre el trabajo y el deporte, me dediqué a podar con pasión el enorme matojo de ortigas que había conquistado el jardín, y así fue como descubrí un tesoro enterrado en forma de ruibarbos y rosales. Mi padre se rio de mí por plantar patatas —«típico de polacos», dijo—, pero ellas no eran más que una parte de mi nuevo huerto. Lo mejor de todo es que había un invernadero mugriento con escombros y una parra en su interior. Las plantas de semillero —puerros y remolacha, creo— podrían crecer si se las resguardaba antes de sembrarlas en primavera en el propio huerto. A finales de febrero planté semillas en bandejas y esperé a que crecieran nuevas plantas.

Pasó un tiempo, y no germinaba nada, pero, en cambio, lo que sí había eran muchos caracoles. Cuando iba con mi regadera, me encontraba con que un molusco engreído se había apoltronado en el centro de cada bandeja, rodeado por tierra pelada, y, de vez en cuando, aparecía algún indicio de brote verde carcomido. Sin darme por vencida, eché a los caracoles del invernadero, volví a plantar las semillas y coloqué las bandejas encima de unos ladrillos para que a los caracoles les resultara más difícil colarse. Dos semanas más tarde, las plantas nacientes habían desaparecido, y había más caracoles que nunca. Probé entonces distintos enfoques, ninguno de

ellos fructífero, hasta que solo me quedó una idea. Esta vez, cogí varios pares de macetas vacías y coloqué sobre ellas unas cuantas bandejas boca abajo, de modo que parecían champiñones gigantes con dos tallos. Engrasé los bordes de cada bandeja y luego coloqué las bandejas con las plantas de semillero encima de los champiñones-bandeja. Después de cambiar el abono, planté mis últimas semillas, crucé los dedos y me fui a repasar mis clases de física de la materia condensada.

Las plantas de semillero crecieron tranquilamente durante unas tres semanas. Y entonces, inevitablemente, llegó el día en que encontré un caracol gordo y feliz en el lugar en el que deberían haber estado mis plantitas de semillero. Recuerdo estar de pie en el invernadero, analizando con detalle forense las posibles rutas que esta criatura podría haber seguido. Solo había dos. Primera opción: podría haber trepado por las paredes del interior del invernadero y haberse deslizado por el interior del techo, y luego haberse lanzado de una forma u otra en el lugar preciso para caer en un semillero. Me pareció improbable. Segunda opción: se había deslizado por el banco y luego trepado por los laterales de las macetas, había usado su baba para seguir por el borde exterior de la bandeja boca abajo y, después de subir por el borde sin caerse, había emprendido su camino por la superficie de la bandeja hasta llegar a las plantas. En cualquier caso, debía admitir que se había ganado la recompensa³⁵. ¿Cómo era posible que un caracol hiciera algo así? Ambas opciones implicaban que debía deslizarse boca abajo, pegado a la superficie únicamente con su mucosa. Si observas los movimientos de un

caracol, verás que son diferentes de los de una oruga: cuando se mueve no se eleva más allá de la superficie. Está completamente pegado a la baba, y aun así, de alguna forma, consigue darse la vuelta. Pero es que esa baba es el arma secreta del caracol, porque actúa justo igual que el ketchup.

Si observas a un caracol moverse, no verás mucho porque el borde exterior de su pie se está moviendo a una velocidad constante y lenta. Todo lo que ocurre en los bordes pasa lentamente, y esto es lo que hace que la mucosidad sea como el ketchup inmóvil: espesa, densa y difícil de mover. Pero debajo, justo en el medio, hay olas musculares que se mueven desde el extremo hacia la cabeza del caracol. Cada ola empuja la mucosidad hacia delante con mucha fuerza, obligándola a moverse muy rápido. Y exactamente igual que el ketchup, la mucosidad es pseudoplástica, por lo que si la empujas muy rápidamente, de pronto fluye con suma facilidad. El caracol navega en la superficie de esta mucosidad líquida sobre esas olas musculares, aprovechándose de que la resistencia es menor. También necesita de la espesa baba para tener algo contra lo que empujar. La única razón por la que los caracoles —y las babosas— pueden moverse es que la misma mucosidad puede actuar como un sólido o como un líquido, en función de la velocidad a la que la obliguen a moverse. La mayor ventaja de este método es que los caracoles no se caen cuando se deslizan boca abajo porque nunca se elevan más allá de la superficie.

¿Y cómo consigue la baba hacer todo esto? Es un gel de moléculas alargadas que reciben el nombre de glicoproteínas y que están

completamente mezcladas. Cuando el caracol está quieto, se forman eslabones químicos entre las cadenas, y por eso actúa como un sólido. Pero cuando empujas con la fuerza suficiente, esos eslabones se rompen súbitamente, y todas las moléculas alargadas pueden deslizarse libremente las unas sobre las otras como si fueran espaguetis. Si vuelve a quedarse quieto, los eslabones se formarán otra vez y, un segundo más tarde, volverá a aparecer el gel.

De haber sabido todo esto, ¿habría podido proteger a mis plantas de semillero? Parece ser que, si hubiera decidido usar una superficie a la que no pudieran pegarse o trepar, tampoco las habría protegido. Su mucosidad se puede aferrar a prácticamente todo lo que puedas encontrar en casa, hasta a los forros antiadherentes. Algunos experimentos han demostrado que los caracoles pueden aferrarse incluso a superficies extremadamente hidrofobias, aquellas a las que el agua apenas puede siquiera tocar. Es un logro bastante impresionante, pero seguro que será más fácil de admirar por quienes no tengan preciosas plantitas de semillero que proteger.

Este mismo proceso explica también por qué a veces la pintura no gotea. Cuando está en reposo, la pintura es espesa y pegajosa. Pero cuando la empujas con la brocha se hace mucho menos viscosa y es fácil extender una capa fina y uniforme por la pared. En cuanto retiras la brocha, la pintura vuelve a ser muy viscosa y, por lo tanto, no gotea por la pared antes de secarse.

* * * *

El ketchup y los caracoles son pequeños, pero la misma parte de la física puede tener graves consecuencias en una escala mucho mayor. En 2002 visité una encantadora y pacífica ciudad llamada Christchurch, en Nueva Zelanda. En esa región, la tierra está formada por sedimentos, capas y más capas de partículas diminutas que han sido depositadas por el río Avon durante milenios. Es un lugar precioso, pero la ciudad se alzaba sobre una bomba de relojería. A las 12.51 horas del 22 de febrero de 2011, se registró un terremoto de magnitud 6,3 a apenas diez kilómetros del centro. El seísmo fue grave por sí solo, puesto que mató a muchas personas y destruyó infinidad de edificios. Pero los sedimentos sobre los que se había construido la ciudad solamente eran fuertes y sólidos si permanecían inmóviles. Como al ketchup, una agitación fuerte los convertiría en un líquido. Los detalles de la escala pequeña presentan algunas diferencias, ya que, en lugar de romperse los eslabones entre las largas cadenas de moléculas, el agua se cuela entre los granos de arena y los separa, permitiéndoles fluir. Pero la física general es la misma: cuando se agita rápidamente, el sólido suelo empieza a fluir como un líquido.

Un coche es un objeto pesado, así que la gravedad hace que empuje con fuerza contra el suelo en el que se encuentra. Los coches no se hunden en el suelo porque este es lo suficientemente sólido para resistir ese empuje. Pero durante unos minutos en Christchurch, esa regla general se rompió. Ese día, había muchos coches aparcados en arcenes de arena, apoyados en una tierra que llevaba décadas sin moverse. En cuanto el terremoto agitó el suelo, las

capas de arena fueron forzadas a deslizarse las unas sobre las otras y de un lado a otro con extraordinaria rapidez. Si esto hubiera ocurrido lentamente, los coches habrían estado a salvo. Pero sucedió tan rápido que el agua se metió entre los granos de arena, y estos no tuvieron tiempo de volver a asentarse antes de verse forzados a moverse de nuevo en otra dirección. Así que, en lugar de arena sobre arena, de pronto el suelo estaba formado por una mezcla de arena y agua que no tenía ningún tipo de estructura fija. Todos los coches que estaban aparcados encima de esta mezcla se hundieron en esa papilla mientras el zarandeo proseguía. Pero en cuanto se detuvo, a los granos de arena solo les llevó un segundo asentarse levemente, de modo que estaban siendo aguantados por otros granos de arena y no por agua. El suelo se había solidificado de nuevo, pero, para entonces, los coches estaban medio enterrados.

Este proceso fue el responsable de muchos daños en Christchurch. Los coches se hundieron en el aluvión y los edificios se derrumbaron porque el suelo no podía mantenerlos en pie. A esto se lo llama «licuefacción», y hace falta algo tan fuerte como un terremoto para mover los sedimentos a la velocidad suficiente como para que ocurra. Pero si mueves un suelo arenoso y blando lo bastante rápido, su fuerza se desvanecerá. Esta es también la razón por la que revolverse en arenas movedizas es una muy mala idea. Si luchas y te resistes, las arenas movedizas actúan como un líquido y no podrás evitar hundirte. Muévete con lentitud, y así podrás al menos tener la oportunidad de controlar dónde estás. El tiempo

importa. Cuando cambias la escala temporal de lo que estás haciendo, en general, el resultado también cambia.

Solemos decir que algo ocurrió tan rápido que «pasó en un abrir y cerrar de ojos». En un parpadeo invertimos la tercera parte de un segundo, y el tiempo de reacción medio de un humano es más o menos de un cuarto de segundo. Parece bastante rápido, pero piensa en lo que tiene que ocurrir en ese lapso cuando estás haciendo una prueba estándar para medir el tiempo de reacción. Cuando los rayos de luz alcanzan tu retina, unas moléculas especializadas en la detección se giran, lo que provoca una cadena de reacciones químicas que causan una pequeña corriente eléctrica. Esta señal viaja por el nervio óptico hacia el cerebro, donde estimula las células cerebrales para que se transmitan señales las unas a las otras mientras comprenden que esta acción requiere una reacción. Entonces las señales eléctricas viajan a los músculos, ralentizándose cuando son transportadas por los huecos entre las células nerviosas por medio de la difusión química. Cuando se ha recibido la orden de contraer, las moléculas de la fibra muscular se van solapando hasta que tu mano presiona el botón. Y todo ello, para que puedas hacer algo lo más rápido posible.

Nuestra fantástica complejidad va en perjuicio de la velocidad. Considero a los humanos animales bastante lentos, criaturas que avanzan pesadamente por el mundo físico a causa de la infinidad de fases que implica todo lo que hacemos. Mientras andamos con nuestro lento caminar por el mundo, muchos sistemas físicos más simples se encargan de muchísimas cosas. Pero esos procesos

rápidos y sencillos pasan demasiado rápido como para que los veamos. Te puedes hacer una idea de este mundo si viertes una sola gota de leche en tu café desde bastante altura. Puede que lo único que veas es la gota rebotar en la superficie antes de que caiga definitivamente en la bebida. Esto se halla justo al límite de las cosas más rápidas que somos capaces de ver. Mi tutor del doctorado solía decir que, si eres rápido, puedes decidir que ya no quieres leche y atraparla cuando rebota, pero estoy casi segura de que necesitarías la ayuda de algo más pequeño y rápido que un humano para lograrlo.

La idea de lo mucho que nos perdemos porque somos lentos inspiró mi doctorado. Me fascinaba la idea de un mundo que podía estar haciendo cosas justo delante de mis narices, cosas que son demasiado pequeñas y demasiado rápidas para que las veamos. Así que escogí un tema de doctorado que me permitía jugar con la fotografía de alta velocidad, una tecnología que me permitía ver las partes del mundo que normalmente son invisibles para nosotros porque ocurren demasiado rápido. Pero ese tipo de cámaras solo están al alcance de los humanos. ¿Qué haces si tienes el mismo problema pero eres una paloma?

En 1977, un científico con iniciativa llamado Barrie Frost convenció a una paloma para que caminara por una cinta de correr. Este es uno de esos experimentos que seguramente hoy en día ganaría un premio Ig Nobel, ya que es el ejemplo perfecto de un hecho científico que primero te hace reír y luego pensar. Pues bien, resulta que a medida que la cinta se iba moviendo lentamente hacia atrás, el

pájaro tenía que andar hacia delante para mantenerse en el mismo sitio. Al parecer, la paloma pilló el truco bastante rápido, pero algo faltaba cuando avanzaba lentamente. Si alguna vez te has sentado en la plaza de alguna ciudad y has seguido con la mirada a las palomas que se mueven dando saltitos en busca de comida, te habrás dado cuenta de que, mientras caminan, mueven la cabeza hacia delante y hacia atrás. Siempre he pensado que debe de ser bastante incómodo, ya que parece extraño hacer todo ese esfuerzo extra. Pero la paloma de la cinta no movía la cabeza, y eso le dijo a Barrie algo muy importante sobre el característico balanceo del animal. Es obvio que el pájaro no necesitaba hacerlo para caminar, así que no tenía nada que ver con la física de la locomoción. El balanceo de la cabeza tenía que ver con lo que veía. Aunque la paloma estuviera caminando sobre la cinta, todo lo que la rodeaba seguía en el mismo sitio. La paloma mantenía la cabeza quieta, ya que lo que veía se mantenía exactamente igual todo el tiempo. Eso hacía que el entorno circundante fuera fácil de ver. Pero cuando una paloma camina por el suelo, el escenario cambia constantemente a medida que avanza. Resulta que estos pájaros no pueden ver lo suficientemente «rápido» como para captar el variable escenario. De manera que no es que vayan balanceando la cabeza hacia delante y hacia atrás mientras caminan; lo que hacen es empujar la cabeza hacia delante, dar un paso para que su cuerpo se ponga al mismo nivel, y volver a empujar la cabeza hacia delante. La cabeza se mantiene en la misma posición mientras dan el paso, y de esta forma las palomas tienen más tiempo para analizar la escena

antes de moverse a la siguiente. Hacen una fotografía de lo que las rodea y luego sacuden la cabeza hacia delante para hacer la siguiente fotografía. Si te pasas un rato observando a una paloma, te convencerás de esto (aunque requiere un poco de paciencia, ya que suelen ser bastante rápidas³⁶). Nadie parece saber con certeza por qué algunos pájaros son tan lentos al recopilar información visual que tienen que mover la cabeza, mientras que otros no lo hacen. Pero los más lentos no pueden seguir el ritmo del mundo sin fraccionarlo primero en una imagen congelada.

Nuestros ojos pueden seguirnos el paso, pero si quieres examinar algo de cerca mientras caminas o corres, normalmente sientes la necesidad de detenerte un momento para mirarlo con detenimiento. Tus ojos no pueden recoger información a la velocidad suficiente para obtener todos los detalles mientras te mueves. En realidad, los humanos jugamos exactamente al mismo juego que las palomas — sin el movimiento de cabeza—, pero nuestro cerebro cose los retales de información para que no nos demos cuenta. Nuestros ojos saltan de un punto a otro, añadiendo información a la imagen mental que creamos cada vez que se detienen. Si te miras en el espejo y diriges la vista hacia el reflejo de uno de tus ojos y luego al del otro, te darás cuenta de que nunca ves el movimiento de tus ojos, aunque cualquier persona que esté a tu lado verá cómo van de un lado a otro. Tu cerebro ha cosido los retales de tu percepción de la escena de tal forma que nunca te percatas de que hay un salto; pero estos saltos ocurren constantemente.

La cuestión es que solo somos un poquito más rápidos que la paloma, y esto pone de relieve cuántas cosas deben de ser más rápidas que nosotros. Estamos acostumbrados a vivir nuestra vida en una variedad limitada de escalas temporales —podemos seguir cosas que duran desde un segundo hasta varios años—, pero existen muchas más. Sin la ayuda de la ciencia, somos incapaces de ver cualquier cosa que ocurra en solo unos milisegundos o a lo largo de milenios. Solo percibimos lo que coincide en el medio con nosotros. Por eso los ordenadores pueden hacer tantas cosas, y en parte por eso parecen tan misteriosos. Pueden cumplir con lo que tienen que hacer en períodos cortísimos de tiempo, así que se ponen a trabajar y terminan tareas increíblemente complejas antes de que nosotros percibamos siquiera el paso de ese tiempo. Los ordenadores son cada vez más rápidos, pero no somos capaces de percibir el porqué, puesto que nosotros no distinguimos entre una milésima de segundo y un nanosegundo: ambos pasan demasiado rápido. Pero eso no significa que la distinción no sea significativa.

Lo que ves depende de la escala temporal desde la que estás mirando. Para entender este contraste, vamos a comparar algo rápido y algo pesado, por ejemplo, una gota de lluvia y una montaña.

Una gota de agua grande tarda un segundo en caer seis metros, que es lo que mide un edificio de dos plantas. ¿Y qué ocurre durante ese segundo? Esta gota es un grupo de moléculas de agua inquietas, cada una de las cuales está fuertemente anclada a las demás, pero va cambiando de compañeras constantemente dentro del grupo.

Como hemos visto en el capítulo anterior, toda molécula de agua está compuesta por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno, uno a cada lado, de forma que entre los tres forman una V. La molécula entera puede doblarse y estirarse mientras va saltando por la red laxa de miles de millones de moléculas idénticas a ella. En ese segundo, la molécula puede llegar a saltar doscientas mil millones de veces. Si nuestra molécula llega al borde de la multitud se encontrará con que fuera de la gota no hay nada más que pueda competir con la enorme atracción de la masa, así que siempre es atraída de vuelta al centro. La forma del típico dibujo de una gota es pura ficción: las gotas adoptan muchas formas, pero ninguna tiene extremos puntiagudos. Cualquier parte puntiaguda será rápidamente redondeada, porque las diversas moléculas no pueden resistir la atracción de la multitud. Pero a pesar de la fuerza de esa atracción, nunca se consigue una forma perfecta. Se reajustan constantemente como respuesta a los golpes del aire. Una gota puede ser aplastada, pero enseguida se volverá a recomponer, a doblarse sobre sí misma, a estirarse como si fuera una pelota de rugby y a volver a doblarse 170 veces en ese único segundo. El glóbulo está constantemente tambaleándose y reinventándose, porque hay una lucha continua entre las fuerzas externas que intentan dividirlo y la fuerte atracción de la multitud, que quiere mantenerlo unido. A veces una gota de agua se aplana como una tortita, se estira como un paraguas delgado, y luego explota en un cúmulo de gotas diminutas. Y todo esto ocurre en menos de un segundo. Nosotros no vemos nada de todo eso, pero el caso es que

esa gotita ha cambiado de forma mil millones de veces en un abrir y cerrar de ojos. Entonces la gotita se estampa contra la roca y la escala temporal cambia.

Esta roca es granito. Para la memoria humana, no se ha movido ni ha cambiado un ápice. Pero hace cuatrocientos millones de años hubo un volcán en el hemisferio sur, y el magma de su interior se coló entre los huecos de las rocas volcánicas. Durante los siguientes milenios, el magma se enfrió y se dividió lentamente en cristales de distintos tipos, convirtiéndose así en duro granito. Con el paso del tiempo, la enorme roca se fue desgastando por efecto de las glaciaciones, quedó desconchada por las plantas y el hielo, y se fue puliendo con la lluvia. Al desgastarse, el volcán también emprendía un viaje. Desde la gran explosión que terminó con él, este pedazo de continente se ha ido moviendo lentamente hacia el norte. Por él pasaron y desaparecieron muchas especies y edades geológicas mientras la maquinaria del planeta juntaba y separaba las piezas del puzle que no encajaban en su superficie. Hoy en día, cuando ha transcurrido una décima parte de la edad total de nuestro planeta, lo único que queda de aquel imponente volcán de antaño son los tristes restos de sus entrañas expuestas al aire. Lo llamamos Ben Nevis, y es la montaña más alta de las islas Británicas.

Cuando tú y yo observamos la montaña o la gota, el cambio que percibimos es insignificante. Pero eso es a causa de nuestra propia percepción del tiempo, no tiene nada que ver con lo que estamos mirando.

Vivimos insertos en escalas temporales, y a veces nos cuesta tomarnos en serio los demás tiempos. No se trata solo de la diferencia entre el *ahora* y el *entonces*, es el vértigo que sentimos cuando pensamos en lo que ese «ahora» significa en realidad. Podría ser una milésima de segundo o un año. La perspectiva cambia totalmente según observemos acciones increíblemente rápidas o bien otras de lentitud glacial. Pero la diferencia no tiene que ver tanto con cómo están cambiando las cosas, sino que más bien se trata de cuánto van a tardar en hacerlo. ¿Tardar en hacer qué? En encontrar un estado de equilibrio. Si fuera por el mundo, nada cambiaría una vez alcanzada esta posición final, porque no tiene ningún motivo para hacerlo. Al final, no hay fuerzas que muevan nada, porque todas están en equilibrio. El mundo físico, todo él, siempre tiene el mismo objetivo: el equilibrio.

Piensa en las compuertas de un canal. Las esclusas fueron inventadas por la razón más ingeniosa: para permitir a los barcos de los canales subir montañas. Funcionan porque las gabarras se pueden propulsar hacia delante contra la corriente del agua, pero solo si esta es muy lenta. Ninguna barcaza podría subir una cascada por sí sola, pero con la ayuda de una esclusa, sí puede subir una montaña. Una esclusa consiste en dos juegos de compuertas que forman todo un cuello de botella en el canal y que aíslan agua y la atrapan entre ellas. En un extremo de la esclusa, el nivel del agua es más alto que en el otro. Cualquiera que quiera subir o bajar por el canal tendrá que pasar por la esclusa. Pongamos que hay un barco esperando abajo. Inicialmente, el agua

que hay entre las compuertas está a la misma altura que el canal cuando está bajo. Las compuertas inferiores se abren, el barco avanza hacia el interior de la esclusa y las compuertas inferiores se cierran. Seguidamente se abre la compuerta superior, solo un poco, y el agua entra en la esclusa. Esta es la parte importante. Mientras las compuertas superiores estaban cerradas, el agua del lado más alto no tenía ningún motivo para moverse. Estaba en el lugar más bajo que podía, en equilibrio. No había ningún sitio en el que pudiese estar mejor, y por eso se habría quedado allí indefinidamente. Pero en el momento en que se abre un hueco que la conecta con el agua atrapada entre las compuertas, todo cambia. De pronto, hay una ruta hacia un lugar mejor. La gravedad no deja nunca de atraer el agua hacia abajo, y acabamos de abrir la puerta para que el agua responda a la atracción de la gravedad y vaya más abajo todavía. Así que fluye hacia el interior y se une al barco, y sigue llenando la esclusa hasta que el nivel del agua en el interior es el mismo que el de fuera de la esclusa. No hacía falta nada más que proporcionarle el camino hacia un nuevo equilibrio. Pero ahora el barco está al mismo nivel que la parte alta del canal, y cuando las compuertas se abran del todo, podrá avanzar a contracorriente, en dirección contraria a la muy lenta corriente del canal. A sus espaldas, una vez que las compuertas se han cerrado de nuevo, todo está en equilibrio. El agua de la esclusa permanecerá allí indefinidamente porque no tiene otro sitio mejor adonde ir. Todas las fuerzas están en equilibrio. En algún momento, un barco entrará en la esclusa desde arriba, alguien abrirá la compuerta inferior y el

agua fluirá hacia la parte del canal que discurre corriente abajo, donde seguirá su camino para encontrar un nuevo equilibrio.

Lo que aprendemos de esto es que en el mundo se pueden lograr muchas cosas si conseguimos controlar el equilibrio. Si las dejamos a su aire, las cosas se mueven hasta que todo alcanza el equilibrio, y luego se quedan tal como están. Para hacer algo, primero tienes que mantener el control de tu propio equilibrio. Si quieres mover los postes de la portería a tu antojo, puedes hacer que las cosas fluyan en la dirección que más te convenga y solo cuando tú lo digas.

La idea de que el mundo físico siempre tenderá a moverse hacia el equilibrio —que los líquidos calientes y los fríos se mezclarán hasta que todo esté a la misma temperatura, o que un globo se expandirá hasta que la presión sea igual dentro que fuera— está relacionada con el concepto de que el tiempo solo va en una dirección. El mundo no puede correr hacia atrás. El agua nunca fluirá por sí sola a través de una esclusa desde el nivel más bajo al nivel más alto. Esto significa que, si buscas sistemas que se muevan hacia el equilibrio, siempre podrás saber cómo avanzar. Mover cosas mediante la fuerza bruta consumirá buena parte de tu energía, pero, en cambio, influir en la velocidad del camino hacia el equilibrio suele consumir muy poca. Y, además, suele ser extremadamente útil.

La Presa Hoover es uno de los mayores logros de la ingeniería civil del último siglo. Al conducir hacia ella desde Las Vegas, zigzagueas por un paisaje rojo y rocoso en el que parece imposible que pueda esconderse algo grande. Las únicas pistas que apuntan a que podría haber algo inusual en las cercanías provienen de los ocasionales

destellos de un agua azul que está completamente fuera de lugar en el desierto. Y cuando doblas una curva, ahí la tienes, a ella y a sus 7,5 millones de toneladas: un tapón de hormigón gigante atascado en el medio de este accidentado paisaje norteamericano.

Hace un siglo, el río Colorado discurría libremente por su estrecho cañón. La lluvia que caía en las Montañas Rocosas y en las vastas llanuras del este era canalizada hacia abajo por una serie de valles hasta el golfo de California. El problema al que se enfrentaban los agricultores y los habitantes de las ciudades río abajo no era la cantidad de agua —había mucha—, sino el momento en que llegaba. En primavera podía haber enormes inundaciones que destruían los campos, pero en otoño solo llegaba un mísero goteo que no era suficiente para abastecer a la creciente población. El agua siempre surgía de las mismas montañas y llanuras y siempre desembocaba en el mismo trocito del océano. Pero los agricultores y los habitantes de la zona necesitaban controlar cuándo iba a llegar esa agua³⁷, y, sobre todo, evitar que bajara toda de golpe. Así que construyeron un tapón.

Una gota de agua que ha viajado desde las Rocosas hasta el Gran Cañón se encuentra ahora en el lago Mead, el enorme pantano que se construyó detrás de la presa. No tiene otro sitio adonde ir, al menos por ahora. La clave de todo esto es que esa gota se encuentra aquí, elevada, porque no puede bajar más. En 1930, una gotita que emprendiera su viaje desde el Gran Cañón habría ido descendiendo ciento cincuenta metros más hasta encontrar descanso. Pero después de 1935, cuando se terminó la presa, esa misma gota podía

llegar a este mismo punto y seguir estando ciento cincuenta metros por encima del suelo del valle. Lo mejor de todo es que contenerla ahí no requiere ninguna energía, lo único que se necesita es un obstáculo situado con astucia para evitar que se mueva. Y así es como se encuentra en un equilibrio creado por los humanos, perfectamente quieta.

Hasta que, por supuesto, los humanos decidan que quieren que se dirija a otro sitio. Ellos pueden controlar el flujo gracias a la presa, con la cual racionan el agua que abastece al resto del río Colorado. Ya no se producen inundaciones, y además el río nunca deja de fluir por completo. Y todavía hay otra ventaja. Mientras el agua dirigida fluye hacia el exterior de la presa, la enorme presión que ha creado mueve unas turbinas que producen energía hidroeléctrica. Gracias al movimiento de esta agua, cientos de miles de personas pueden vivir y trabajar en los áridos desiertos del suroeste norteamericano.

La Presa Hoover fue construida para controlar los tiempos del flujo del agua, pero el principio que pone en práctica va mucho más allá del uso del agua. Cuando se trata de extraer energía, en realidad lo único que hacemos es colocar algunos obstáculos a la energía que ya estaba de camino desde un sitio a otro. El mundo físico siempre tiende al equilibrio, pero a veces podemos controlar dónde está el equilibrio más cercano y la rapidez con que algo puede llegar a él. Al controlar ese flujo, también controlamos los momentos en que se liberará la energía. Entonces nos aseguramos de que, a medida que la energía fluye a través de nuestros obstáculos artificiales mientras viaja hacia el equilibrio, vaya haciendo algo útil para nosotros. No

creamos energía, pero tampoco la destruimos. Lo único que hacemos es mover los postes de la portería para cambiar su curso. Como muchas civilizaciones anteriores a la nuestra, nos enfrentamos al problema de los recursos limitados. Los combustibles fósiles están hechos de plantas que crecieron a base de utilizar la energía del sol; cambiamos el curso de esa energía dirigiéndola hacia una salida alternativa —un calor moderado—, lo que equivale al fondo del río cuando hablamos en términos de utilidad. Los combustibles fósiles son la energía equivalente a las presas, las cuales almacenan la energía en un equilibrio temporal. Cuando llegamos nosotros, extraemos esos combustibles y les damos el empujón que necesitan, estamos escogiendo el momento en que la energía se libera, ya que abrimos un camino hacia otro equilibrio accesible, para lo cual nos valemos de una llama y de la descomposición química en dióxido de carbono y agua. El problema es que los recursos de «río arriba» que adoptan la forma de combustibles fósiles son limitados, y en algunas generaciones hemos liberado una energía que se tardó millones de años en acumular. Las reservas de combustibles fósiles se están vaciando, y no se volverán a llenar hasta dentro de millones de años. Las energías renovables, como la hidroelectricidad generada por la Presa Hoover y muchas otras, cambian el curso de la energía solar que discurre por el mundo. El reto que nuestra civilización afronta sigue siendo el mismo: ¿cómo podemos detener e iniciar el flujo de la energía de forma eficiente para hacer lo que queramos sin cambiar demasiado el mundo?

La próxima vez que enciendas algún aparato que funcione a pilas, estarás escogiendo el momento en que se libera la energía de la pila: abrirás una puerta eléctrica y la energía recorrerá los circuitos del aparato para ayudarte a hacer algo útil. Después, terminará convirtiéndose en calor, que es lo que habría hecho de todas formas. Esto es lo que hacen los interruptores, todos sin excepción. Son los porteros que controlan el tiempo de un flujo; un flujo cuyo viaje solo tiene un destino: el equilibrio. Si dejamos que el flujo salga con toda su fuerza, obtendremos un resultado; si lo desaceleramos y dejamos que gotee en los momentos que a nosotros nos convenga, obtendremos un resultado completamente distinto. Aquí el tiempo importa porque solo hay una dirección en la que ir: al escoger cuándo el flujo puede moverse hacia el equilibrio, y la velocidad de ese flujo, obtenemos un gran control sobre el mundo. Pero no siempre ocurre que las cosas alcancen el equilibrio y luego se detengan. Si van a mucha velocidad al acercarse al punto de equilibrio, puede que sigan su camino y pasen de largo. Esto abre las puertas a un amplio abanico de fenómenos, y también a algunos problemas.

El té de media tarde es una pausa obligada en mi jornada laboral. Pero últimamente he notado que incluso tomarme una taza me obliga a bajar el ritmo, y no me refiero solo al rato que tarda el agua en hervir. Mi despacho en la University College de Londres está al final de un largo pasillo, y la sala de té está justo en el otro extremo. El camino de vuelta a mi despacho con una taza llena de té es el momento del día en el que mi ritmo es más lento, ya que mi paso

normal cuando estoy trabajando va desde «ligero» a «velocidad de carrera». No es que la taza esté demasiado llena; el problema es el chapoteo, que empeora a cada paso. Cualquier persona sensata aceptaría caminar más despacio como una solución razonable, pero cualquier físico haría algunos experimentos primero, solo para comprobar que esta sea la única solución posible. Nunca se sabe lo que se puede descubrir. Y yo no iba a claudicar ante lo obvio sin luchar antes.

Si llenas una taza de agua, la dejas sobre una superficie plana y la empujas un poco, el agua empezará a chapotear de un lado a otro. Lo que ocurre es que mientras mueves la taza, esta se mueve, pero inicialmente el agua se queda atrás, así que se amontona contra el lado de la taza que has empujado. Entonces tienes una taza en la que el nivel del agua es más alto en un lado que en el otro, así que la gravedad atrae el agua más alta hacia abajo, mientras que el agua del otro lado es empujada hacia arriba. Por un momento, la superficie vuelve a ser llana, pero el agua no tiene motivo alguno para dejar de moverse, así que sigue subiendo en el otro lado. La gravedad está tirando de ella mientras se mueve, pero tarda un poco en lograr detener el agua por completo. Para cuando se ha detenido, el nivel del agua es más alto en el segundo lado que en el primero, y entonces el ciclo empieza de nuevo. Si la taza está en una superficie plana, el chapoteo de un lado al otro acabará desapareciendo y se alcanzará finalmente el equilibrio. Pero si estás andando, las cosas cambian.

La raíz del problema está en el ciclo. Si haces la prueba del empujón con tazas de distintos tamaños, verás que el chapoteo es el mismo en todas ellas, pero que es más rápido en una taza estrecha y más lento en una de boca ancha. Una taza prácticamente llena siempre chapotea la misma cantidad de veces por segundo, sea cual sea la intensidad del empujón inicial. Pero esa cantidad depende de la taza, y lo que más importa es el radio de la taza.

Existe un conflicto entre la fuerza de la gravedad, que lo atrae todo hacia el equilibrio, y el momento del fluido, que está en su apogeo justo cuando atraviesa la posición de equilibrio. En una taza grande hay más fluido y más espacio en el que moverse, así que el ciclo tarda más en reiniciarse. La frecuencia particular de cada taza se conoce como su «frecuencia natural», es decir, la velocidad a la que chapoteará si la empujas y luego la dejas para que recupere el equilibrio por sí misma.

Me pasé un rato jugando con las tazas en mi despacho. Tengo una muy pequeña con el retrato de Newton que solo mide cuatro centímetros de ancho. En ella, el agua chapotea unas cinco veces por segundo. La más grande es de unos diez centímetros de ancho, y chapotea unas tres veces por segundo. Esta taza grande es vieja y fea y nunca me ha acabado de gustar, pero la conservo porque hay días en los que, simplemente, una necesita mucho té.

Cuando salgo de la sala de té con mi taza llena y doy un par de pasos rápidos por el pasillo, empieza el chapoteo. Si quiero llegar a mi despacho sin haber derramado el té, tengo que evitar que el chapoteo aumente. Este es el punto decisivo del problema. Mientras

camino, no puedo evitar mecer la taza ligeramente. Si el ritmo de esa mecedura coincide con la frecuencia natural del chapoteo, este aumentará. Cuando empujas a un niño en un columpio, lo haces a un ritmo regular que coincide con el del columpio, así que el balanceo aumenta. Lo mismo ocurre con el té. A esto se lo llama resonancia. Cuanto más se acerque el empuje externo a la frecuencia natural del chapoteo, mayores son las probabilidades de que el té se derrame. El problema para los sedientos humanos es que la mayoría de la gente camina a un paso que está muy cerca de coincidir con la frecuencia del chapoteo natural de una taza estándar. Cuanto más rápido camines, más te acercas a ella. Casi parece que el sistema hubiera sido diseñado para hacerme ir despacio, pero en realidad se trata solo de una coincidencia incómoda.

De modo que no existe una solución que sea verdaderamente satisfactoria. Si uso la taza pequeña, chapotea demasiado rápido para que mi paso lo empeore, así que el té no se derramará. Pero no me conformo con tomarme un chorrillo de té. Si utilizo la taza más grande, mi paso ligero estará muy cerca de su frecuencia natural, y el desastre estará a tres pasos de distancia. La única solución es bajar el ritmo para que la mecedura de mi paso sea mucho más lenta que la frecuencia del chapoteo³⁸. Haberlo intentado me hace sentir mejor conmigo misma, pero la lección que he extraído es que no puedo luchar contra la dependencia temporal de la física.

Cualquier cosa que se balancee —u oscile— tendrá una frecuencia natural. Está fijada por la situación y por la relación entre la fuerza

que experimente la atracción hacia el equilibrio y la velocidad a la que las cosas se mueven cuando llegan a ese punto. El niño en el columpio es solo un ejemplo, como también lo son un péndulo, un metrónomo, una mecedora y un diapasón. Cuando vas cargado con una bolsa de la compra y parece que esta se balancee a un ritmo que no coincide con el de tus pasos, es porque está balanceándose a su frecuencia natural. El tañido de las campanas grandes es grave porque su tamaño hace que tarden mucho en ir y volver, así que su sonido es de baja frecuencia. Se obtiene mucha información sobre el tamaño de los objetos si se los escucha, y la razón reside en que podemos escuchar cuánto tardan en vibrar.

Estas escalas temporales especiales son muy importantes para nosotros, porque podemos usarlas para controlar el mundo. Si no queremos que la oscilación aumente, tenemos que asegurarnos de que el sistema no sea empujado al mismo ritmo que su frecuencia natural. Eso es a lo que juega el té. Pero si queremos que una oscilación se mantenga sin demasiado esfuerzo, lo empujaremos hacia su frecuencia natural. Y las personas no son las únicas que se aprovechan de este factor; los perros también lo hacen.

Inca está lista y en posición, concentrada en la pelota de tenis como un corredor que espera la señal de salida. Cuando levanto el palo de plástico que sostiene la pelota, se pone en tensión, y luego la pelota vuela sobre su cabeza y ella sale disparada, henchida de entusiasmo y aparentemente con una energía inagotable. Su dueño Campbell y yo charlamos mientras *Inca* corre feliz por la hierba cubierta de maleza. No nos trae la pelota que le hemos lanzado

porque ya tiene otra en la boca —por lo visto, es algo «típico de los spaniel»—, pero cuando la encuentra se sienta a su lado hasta que la alcanzamos y lanzamos la primera pelota todavía más lejos. Después de media hora de correr sin parar, finalmente se sienta, golpeando la hierba con la cola, y nos mira jadeante.

Me arrodillo a su lado y le acaricio el lomo. Tanto correr ha hecho que tenga calor. No está sudando porque los perros no sudan, pero eso no significa que no tenga que librarse del exceso de calor. Esos jadeos parecen requerir mucho esfuerzo, consumir mucha energía y generar todavía más calor. Resulta paradójico. A *Inca* no le turban mis reflexiones, simplemente está feliz de ser acariciada, y un hilo de saliva cae de su boca abierta. Después de haber estado corriendo, mi respiración vuelve a la normalidad bastante gradualmente, pero cuando *Inca* deja de jadear, ella lo hace súbitamente. Unos ojos grandes y marrones me miran, y yo me pregunto cuánto tiempo más necesita para recuperarse antes de querer volver a jugar con la pelota.

Sin duda, la forma más eficiente de liberar calor es evaporando el agua, y por eso sudamos. Transformar agua líquida en gas requiere muchísima energía y, muy convenientemente, el gas se aleja flotando, llevándose la energía consigo. Como los perros no sudan, su piel no produce agua que pueda evaporarse, pero tienen mucha agua en las fosas nasales. Lo que hace el jadeo es empujar tanto aire como sea posible por el interior húmedo de la nariz para deshacerse del calor rápidamente. Como si quisiera demostrar este hecho, *Inca* empieza a jadear de nuevo. Yo diría que está respirando

unas tres veces por segundo, lo que parece mucho esfuerzo; pero lo mejor de todo es que no lo es. Sus pulmones funcionan como un oscilador. Este ritmo es el más eficiente para su respiración, porque es la frecuencia natural de sus pulmones. Al aspirar, las paredes elásticas de sus pulmones se ensanchan y, tras un rato, lo elástico retrocede con la fuerza suficiente para dar la vuelta al ciclo. Justo cuando los pulmones vuelven a su forma natural, ella invierte un poco de energía en reiniciar el ciclo. Lo único malo es que cuando respira tan rápido, no permite que el aire llegue hasta el fondo de los pulmones, por lo que no está obteniendo demasiado oxígeno adicional durante todo este proceso. Por eso no es esta su forma habitual de respirar. Pero cuando la necesidad de perder calor es más fuerte que la necesidad de obtener oxígeno, y gracias a que presiona los pulmones a la frecuencia adecuada, *Inca* obtiene todo el aire que puede por la nariz aplicando el menor esfuerzo posible. Así que los jadeos generan una cantidad de calor ínfima en comparación con la que está perdiendo. Aspira por la nariz, pero también mantiene la boca completamente abierta porque babear también la ayuda a bajar la temperatura, ya que la evaporación de la saliva contribuye igualmente a liberar un poco de energía térmica. El jadeo se vuelve a detener e *Inca* fija la mirada en la pelota que había abandonado. Basta una sola mirada a Campbell — lo tiene bien entrenado— para que el juego empiece de nuevo.

La frecuencia natural de algo depende de su forma y de lo que esté hecho, pero el factor más importante es el tamaño. Por eso los perros pequeños jadean más rápidamente. Sus pulmones son

diminutos y, por su naturaleza, se inflan y desinflan muchas más veces por segundo. Jadear es una forma muy eficiente de perder calor si eres pequeño. Pero esa eficiencia disminuye a medida que el tamaño aumenta, y quizás por eso los animales más grandes sudan (especialmente los que no están cubiertos de pelo, como nosotros).

Todo objeto tiene su propia frecuencia natural, y a menudo más de una si existen distintos patrones de vibración posibles. A medida que el tamaño de los objetos aumenta, estas frecuencias suelen ser más bajas. Hacer que un objeto enorme se mueva puede requerir un gran empujón, pero incluso un edificio puede vibrar, aunque sea muy lentamente. De hecho, un edificio puede actuar como un metrónomo, como si fuera una especie de péndulo al revés: la base está fija y la parte de arriba se mueve. El viento es más rápido en las alturas que al nivel del suelo, y esto basta para que un edificio alto y estrecho reciba el empujón que hará que se balancee a su frecuencia natural. Si alguna vez has subido a un edificio alto en un día ventoso, seguramente lo habrás notado. Un solo ciclo puede durar unos cuantos segundos. Esta sensación es desconcertante para los humanos, así que los arquitectos dedican mucho tiempo a pensar cómo pueden reducir este balanceo. No pueden hacer que desaparezca por completo, pero sí pueden modificar la frecuencia y la flexibilidad para que se note menos. Si lo sientes en tus propias carnes, no te preocupes, ya que el edificio habrá sido diseñado para curvarse y no se derrumbará. Puede que el viento sea racheado, pero no empuja a un ritmo regular que pueda igualar la frecuencia natural del edificio, así que el balanceo no superará cierto límite. En

cambio, el temblor de un terremoto propaga ondas por el suelo, enormes olas que se expanden desde el epicentro y que poco a poco inclinan el terreno de lado a lado. ¿Qué ocurre cuando un edificio alto y un terremoto entran en contacto? En la mañana del 19 de septiembre de 1985, la capital de México empezó a moverse. Las placas tectónicas de debajo del borde del océano Pacífico, a unos 350 kilómetros de distancia, chocaron entre sí y generaron un terremoto de magnitud 8 en la escala de Richter. En Ciudad de México, el temblor duró entre tres y cuatro minutos y redujo la ciudad a escombros. Se estima que unas diez mil personas perdieron la vida, y la estructura de la ciudad sufrió grandes daños. La recuperación duró años. La Oficina Nacional de Estándares de Estados Unidos y el Servicio Geológico de este país mandaron un equipo de cuatro ingenieros y un sismólogo para evaluar los daños. Su detallado informe mostró que una horrible coincidencia de frecuencias había sido responsable de gran parte de los peores desperfectos.

Para empezar, Ciudad de México está asentada sobre los sedimentos de un lago que llenan una cuenca de roca dura. Los dispositivos de control de terremotos mostraron unas hermosas ondas regulares de la misma frecuencia, a pesar de que las señales de los terremotos suelen ser mucho más complejas. Resulta que la geología de los sedimentos del lago les proporcionó una frecuencia natural de oscilación, y por eso habían amplificado cualquier ola que hubiese durado más de dos segundos. La cuenca entera se

había convertido en un tablero por un rato y había temblado prácticamente a una sola frecuencia.

La amplificación fue lo suficientemente grave. Pero cuando observaron los daños concretos, los ingenieros descubrieron que la mayoría de los edificios que se habían derrumbado o que habían resultado severamente dañados eran los que tenían entre cinco y veinte pisos de altura. Los edificios más altos o más bajos —y había muchos de ambos— habían sobrevivido prácticamente intactos. Dedujeron que la frecuencia natural del temblor se había acercado mucho a la frecuencia natural de los edificios medianos. Al recibir un empuje regular y duradero a la misma frecuencia, estos edificios habían vibrado como un diapasón, y no hubo nada que hacer.

Hoy en día, los arquitectos se toman muy en serio el control de la frecuencia natural de los edificios. Incluso a veces se celebra la gestión de los temblores. En el Taipéi 101, un monstruo de 509 metros de altura que se alza en Taiwán y que fue el edificio más alto del mundo desde 2004 hasta 2010, no te puedes perder los miradores de los pisos 87 al 92. Esta sección del edificio está hueca, y en su interior se encuentra suspendido un péndulo esférico de 660 toneladas pintado en color dorado. Es precioso y, a la vez, extraño. Y también útil. Está ahí no solo por su extravagancia estética, sino para reforzar la resistencia del edificio a los terremotos. Su nombre técnico es amortiguador de masa, y la idea es que cuando haya un terremoto —algo muy frecuente en Taiwán—, el edificio y la esfera se balanceen independientemente el uno del otro. Cuando se desencadena un terremoto, el edificio se balancea

hacia un lado y tira del péndulo esférico hacia el mismo lado. Pero para cuando la esfera se ha movido en esa dirección, el edificio ya se ha balanceado hacia el otro lado y vuelve a tirar de la esfera. Así pues, la esfera está constantemente moviéndose en la dirección opuesta a la del edificio, reduciendo así el balanceo. La esfera se puede mover un metro y medio en cualquier dirección y reduce la oscilación general del edificio en un 40%.³⁹ Los humanos del interior se sentirían mucho más tranquilos si el edificio no se moviera nunca, pero los terremotos desajustan el equilibrio del edificio con su movimiento, así que este debe hacer lo propio. Los arquitectos no pueden evitar que esto ocurra, pero pueden modificar lo que ocurre en el viaje de vuelta. Los ocupantes del edificio no tienen otra opción que agarrarse a su asiento mientras la enorme torre se balancea más allá de su posición de equilibrio y luego de vuelta, hasta que la energía se pierde y se recupera la serena inmovilidad.

* * * *

El mundo físico siempre tiende al equilibrio. Esta es una ley fundamental de la física, conocida como segunda ley de la termodinámica. Pero las reglas no dicen nada sobre la velocidad a la que hay que llegar. Toda inyección de energía aparta a los objetos de su equilibrio, mueve los postes de la portería, y aquellos tienen que empezar desde el principio el proceso para detenerse. La vida es posible porque explota este sistema: lo usa para mover la energía de un lado a otro, controlando la velocidad del flujo hacia el equilibrio.

Pese a que vivo en una gran ciudad, las plantas siguen formando parte de mi vida. Desde mi ventana veo como la brillante luz del sol baña los semilleros de lechugas, las matas de fresa y las hierbas que tengo en el balcón. La luz que incide sobre el suelo de madera es absorbida por la misma madera, la cual se calienta, y ese calor es finalmente dispersado por el aire y por el resto del edificio. El equilibrio se alcanza con bastante rapidez, y en el curso de este proceso no ocurre nada demasiado emocionante. Pero la luz del sol que cae en mis hojas de cilantro está entrando en una fábrica. En lugar de ser convertida directamente en calor, se desvía para ser puesta al servicio de la fotosíntesis. La planta usa la luz para desajustar el equilibrio de las moléculas, y de esta forma se queda la energía para sí misma. La maquinaria de la planta controla el camino más fácil hacia el equilibrio, y así utiliza esa energía por fases a fin de crear moléculas que actúen como pilas químicas, y entonces las emplea para convertir en azúcares el dióxido de carbono y el agua. Es como un sistema de canales para transportar energía tremendamente complejo, con sus correspondientes compuertas, circunvalaciones, cascadas y ruedas hidráulicas, y en el que el flujo de la energía se controla cambiando la velocidad a la que esta recorre cada sección. En lugar de fluir directamente hasta abajo, se fuerza a la energía a crear moléculas complejas por el camino. Estas moléculas no se encuentran en equilibrio, pero la planta las puede conservar hasta que necesita su energía, y entonces las coloca en algún sitio en donde puedan dar un paso más hacia el equilibrio, y luego otro más. Cuando los rayos del sol

caen sobre el cilantro, le están proporcionando energía para mantener la fábrica en marcha, en su continua búsqueda de equilibrio mientras la inyección de energía mueve los postes de la portería. Al final me comeré el cilantro, lo que proporcionará una inyección de energía a mi sistema. Usaré esa energía para mantener mi organismo alejado del equilibrio, y mientras siga comiendo, el sistema no será capaz de seguir el ritmo. No alcanzará el equilibrio. Pero yo decido cuándo comer, y mi cuerpo decide cuándo usar esa energía; y todo, gracias al control de las compuertas.

Teniendo en cuenta lo común que es la vida en este planeta, es sorprendente que nadie pueda articular una única definición de lo que significa. Reconocemos la vida cuando la vemos, pero el mundo de las cosas vivas casi siempre puede proporcionar una excepción a cualquier regla sencilla. Una de estas definiciones habla de la creación de una situación de desequilibrio y su aprovechamiento para construir complejas fábricas de moléculas que se pueden reproducir y evolucionar. La vida es algo que puede controlar la velocidad a la que la energía fluye por su sistema, manipulando la corriente para mantenerse. Nada que esté en equilibrio puede estar vivo. Y esto hace que el concepto de desequilibrio sea una pieza clave de dos de los grandes misterios de nuestros tiempos: cuál es el origen de la vida y si hay vida en algún otro punto del universo.

Hoy en día, los científicos creen que la vida podría haber surgido en fuentes hidrotermales hace 3700 millones de años. En el interior de las fuentes había agua caliente alcalina. En el exterior, el agua de los océanos estaba más fría y era ligeramente ácida. Al mezclarse, se

alcanzó el equilibrio en la superficie de la fuente. Parece ser que la vida primigenia podría haber surgido porque se encontraba en medio de ese camino hacia el equilibrio, actuando como un portero. El flujo hacia el equilibrio se desvió para crear las primeras moléculas biológicas. Entonces, ese primer peaje podría haber evolucionado hasta convertirse en una membrana celular, la muralla situada en torno a todas las células que separa el interior (donde hay vida) del exterior (donde no la hay). La primera célula prosperó porque pudo contener el equilibrio, y esa fue la puerta de entrada a la hermosa complejidad de nuestro mundo viviente. Y, probablemente, esto sea igual de cierto para otros mundos.

Es sumamente probable que haya vida en otras partes del universo. Hay tantas estrellas, con tantos planetas y tantas situaciones distintas que, por muy extrañas que sean las condiciones necesarias para formar vida, seguro que se habrán dado en otros lugares. Pero las probabilidades de que esa vida nos mande una señal de radio para decirnos que está ahí son nimias. Con unas magnitudes tan distintas a todo lo demás, el espacio es tan grande que, para cuando nos llegue alguna señal, la civilización que la creó seguramente se habrá extinguido hace tiempo. Sin embargo, podría ser que la mera existencia de vida estuviera emitiendo señales hacia el cosmos de forma completamente inintencionada. En la cumbre del volcán inactivo Mauna Kea, en la isla de Hawái, hay dos telescopios bajo sendas cúpulas, dos enormes esferas idénticas de color blanco colocadas una al lado de la otra sobre una cresta. Lo primero que me vino a la cabeza cuando las vi fue que eran como

dos ojos de rana gigantescos que miraran hacia el cosmos. Es el Observatorio Keck, y estos dos enormes ojos puede que sean los que lleguen a ver los primeros indicios de vida fuera de nuestro sistema solar. Cuando mundos desconocidos pasan por delante de las lejanas estrellas en torno a las que orbitan, la luz de los astros brilla a través de la atmósfera, y esos gases dejan su huella en la luz. Los telescopios Keck están empezando a recoger estas huellas, y puede que pronto sean capaces de detectar atmósferas que no se hallan en equilibrio. Si registran demasiado oxígeno como para que sea sostenible, o demasiado metano, o el gas que sea, este podría ser un indicio de vida en el planeta en cuestión, una vida que altera el equilibrio de su mundo mientras se esfuerza por no caer en las garras del equilibrio. Tal vez nunca tengamos esta certeza. Pero puede que sea lo más cerca que jamás lleguemos a estar de saber que hay otros organismos ahí fuera: la prueba de que algo controla la velocidad del avance hacia el equilibrio mientras construye complejidades vivas que nunca llegaremos a ver.

Capítulo 5

Creando olas

Del agua al wifi

Cuando vas a la playa, es casi imposible estar siquiera un rato de espaldas al mar. Sabes que es un error, tanto porque te estás perdiendo las grandiosas vistas como porque al estar mirando hacia el otro lado no ves en qué anda ocupado el océano. Y es extrañamente reconfortante observar la frontera entre el mar y la tierra, ya que no deja nunca de renovarse y cambiar. Cuando vivía en La Jolla, en California, mi recompensa tras un largo día de trabajo era pasear en dirección al océano, sentarme en una roca y observar las olas mientras el sol se ponía. A solo cien metros mar adentro, las olas eran largas y bajas, difíciles de ver. A medida que avanzaban hacia la orilla crecían y se hacían más evidentes, hasta que finalmente rompían en la playa. Me podía pasar horas observando la inacabable cantidad de olas nuevas.

Las olas son algo que todos reconocemos con facilidad, pero pueden ser difíciles de describir. Las de la orilla son una procesión de crestas, una forma ondulada en la superficie del agua que viaja de aquí para allá. Podemos medirlas si observamos la distancia entre los picos consecutivos de las olas y la altura de los propios picos. Una ola del mar puede ser tan diminuta como las ondas que expandes cuando soplas para enfriar el té, o más grande que un barco.

Pero las olas tienen una característica bastante rara, y en La Jolla son los pelícanos quienes la ponen de relieve. Los pelícanos pardos viven a lo largo de la costa, y tienen un aspecto tan ancestral que una se pregunta si es que han volado por un agujero del espacio-tiempo y se han saltado unos millones de años. Sus picos son extremadamente largos y, por regla general, están pegados al cuerpo. A menudo se ven grupitos de estas curiosas aves deslizándose solemnemente justo por encima de las olas, en paralelo a la costa. De vez en cuando, se zambullen bruscamente en la superficie del océano. Y aquí viene la parte interesante. Las olas sobre las que estaban sentados rodaban sin cesar hacia la orilla, pero los pelícanos no se movían de su sitio.

La próxima vez que te sientes en la orilla y observes las olas rodando hacia ti, mira atentamente las aves marinas que se quedan en la superficie⁴⁰. Las verás muy tranquilas, como si fueran pasajeros transportados arriba y abajo cada vez que pasa una ola, pero en realidad no están yendo a ningún sitio⁴¹. Lo que esto nos dice es que el agua tampoco está yendo a ningún sitio. Las olas se mueven, pero lo que se «olea» —el agua— no se mueve. La ola no puede ser estática; todo esto solo funciona si la forma está en movimiento. Así que las olas siempre se mueven. Llevan consigo energía (porque cambiar la forma del agua para que forme una ola y luego deshacerla requiere energía), pero no mueven «cosas». Una ola es una forma en movimiento continuo que transporta energía. Creo que por eso me resultaba tan terapéutico sentarme en la playa y

mirar el mar. Podía ver como las olas traían energía constantemente a la orilla, y como el mar en sí mismo no cambiaba nunca.

Hay olas de muchos tipos, pero hay algunos principios básicos que incumben a todas. Las ondas de sonido que crea un delfín, las olas de agua que crea un guijarro y las ondas de luz que emite una estrella lejana tienen mucho en común. Y hoy en día no nos limitamos a responder a las olas y a las ondas que nos vienen de la naturaleza.

* * * *

También hacemos nuestra propia aportación —muy sofisticada— al propio flujo, y con ella conectamos elementos muy diversos de nuestra civilización. Pero que los humanos usen de forma consciente las olas para fortalecer lazos culturales no es nuevo: la historia empezó hace siglos, en medio de un océano gigante.

Un monarca haciendo surf en las olas del océano puede parecer algo sacado de un sueño particularmente extraño. Pero hace doscientos cincuenta años en Hawái, todos los reyes y reinas, todos los jefes y jefas tenían una tabla de surf, y la destreza real en el deporte nacional era motivo de orgullo. Había unas tablas largas y estrechas llamadas *olo* que estaban reservadas para las élites, mientras que el vulgo usaba otras más cortas y manejables llamadas *alaia*. Las competiciones abundaban y proporcionaban el escenario perfecto para muchas historias y leyendas de Hawái⁴². Cuando vives en una preciosa isla tropical rodeado de un océano de un color azul

profundo, construir toda tu cultura alrededor de juegos acuáticos parece perfectamente sensato. Pero los hawaianos pioneros del surf tenían algo más a su favor: las olas adecuadas. Su pequeña nación isleña en el centro del gran océano estaba perfectamente situada. La geografía de Hawái y la física se encargaban de filtrar las complejidades del océano, y los reyes y las reinas del lugar surfeaban sobre sus consecuencias.

Mientras los hawaianos dedicaban sus cantos a pedir al mar quieto y en calma que se levantase para poder surfear, parece que el océano a miles de kilómetros de allí tenía un aspecto muy distinto. Los vientos de las fuertes tormentas empujaban la superficie del mar, descargando energía en el momento en que forzaban al agua a convertirse en olas. Pero las olas de las tormentas son una mezcla confusa de ondas cortas y largas que viajan en distintas direcciones, rompiéndose y reconstruyéndose y chocando entre sí. Las tormentas de invierno son comunes en una latitud de 45 grados, así que ocurrirían al norte de Hawái en el invierno del hemisferio norte, y al sur de la isla cuando era invierno en el hemisferio sur. Pero las olas tienen que viajar. Cuando los vientos de la tormenta desaparecían, ese trozo de océano ondulado se expandiría incluso más allá de los límites de la tormenta y llegaría a aguas tranquilas. Una vez allí, podía tener lugar un proceso de selección. La verdadera naturaleza de ese confuso barullo se revelaría, no como un caos desordenado, sino como un grupo de olas de distintos tipos que se ponían unas encima de las otras. Las olas con una longitud de onda más larga — es decir, aquellas en las que la distancia entre los picos es mayor—

viajan más rápidamente que las que tienen una longitud de onda más corta. Así pues, las primeras en escapar serían las olas más largas, corriendo hacia fuera por delante de sus primas más cortas. Pero en su viaje, la ola tendrá que pagar un precio. Todo cuanto la rodea irá robándole lentamente la energía, y el precio por kilómetro es más alto para las olas más cortas. No solo están perdiendo la carrera, también están perdiendo su energía, y no tardan mucho en desvanecerse. Días después, y a miles de kilómetros de la tormenta, las únicas que perduran son las olas más largas, un oleaje regular y tranquilo que se propaga por el planeta entero.

Así pues, la primera ventaja de Hawái es que está en un punto lo suficientemente alejado de las enormes tormentas como para percibir las únicamente en ese movimiento residual, tranquilo y ordenado de las olas largas. Su segunda ventaja es que el océano Pacífico es muy profundo y los extremos volcánicos de las islas son bastante empinados. Las olas viajan por la superficie oceánica sin problemas hasta que de pronto se encuentran con una pendiente inclinada. Entonces, toda la energía que se había dispersado por las profundidades se concentra en los puntos poco profundos, lo que hace que la altura de las olas crezca. Y a muy poca distancia, en la orilla, los hawaianos esperaban el último suspiro de esos lentos monstruos mientras las olas se levantaban con tal inclinación que tenían que ir a romper a las perfectas playas de las islas. Y cuando llegaban, allí estaban los reyes y las reinas, preparados para recibirlas con sus tablas de surf.

Las olas de agua son posiblemente las primeras de las que tenemos conciencia. Algo sobre lo que se mece un pato tranquilamente es fácil de imaginar y de entender. Pero hay infinidad de clases de ondas, y son muchos los principios que se aplican a todas ellas. Todas tienen longitud de onda, que es la distancia entre un pico y el siguiente. Puesto que están en movimiento, tienen también una frecuencia, es decir, la cantidad de veces que completan un ciclo — desde que alcanzan su pico hasta que bajan a su vientre, y vuelta a empezar— en un segundo. Todas las ondas tienen también velocidad, pero algunas de ellas —como las de agua— viajan a velocidades distintas, en función de su longitud de onda. El problema es que, en la mayoría de los casos, no vemos qué es lo que causa esa ondulación. Las ondas sonoras viajan por el aire y son ondas de presión: en lugar de una forma que se mueve, lo que se propaga es un empuje. Las ondas más difíciles de imaginar son las más comunes: las ondas luminosas, las cuales se mueven por campos eléctricos y magnéticos. Pero aunque no podamos ver la electricidad, sí vemos los efectos de la luz que ondea a nuestro alrededor⁴³.

Una de las principales razones por las que las ondas son interesantes y útiles es que el ambiente por el que pasan suele cambiarlas. Cuando una onda es vista, oída o detectada, trae consigo un tesoro escondido de información porque lleva la firma del lugar en el que ha estado. Pero esa firma solo se estampa de formas relativamente sencillas. A una onda pueden pasarle tres cosas: puede ser reflejada, refractada o absorbida.

* * * *

Si te das una vuelta por la pescadería del supermercado y miras qué hay disponible, comprobarás que lo más abundante es de color plateado. Las excepciones son los peces tropicales como el salmonete y el pargo rojo, además de habitantes del fondo marino como el lenguado y la platija. Pero principalmente estás viendo peces que nadan en mar abierto en grandes bancos, como los arenques, las sardinas y la caballa. El plateado es un color interesante porque en realidad no es un color. Es solo la palabra que usamos para describir algo que actúa como un trampolín para la luz y hace que rebote. Todas las ondas pueden ser reflejadas y casi todos los materiales reflejan algo de luz. Lo que hace especial al plateado es que devuelve absolutamente toda la luz, sin hacer ninguna distinción. Todos los colores son tratados de la misma forma. Al metal pulido se le da muy bien este truco, y es útil porque el ángulo en que llega la luz es el mismo que cuando se va. Si coges una fotografía del mundo y usas un espejo para hacer rebotar la luz en otra dirección, verás que los ángulos relativos de todos esos rayos se mantienen igual. Es difícil pulir el metal con la perfección necesaria para obtener una imagen perfecta, y ciertamente los espejos han sido muy valorados en la historia de la humanidad. Y, sin embargo, no damos importancia a los peces plateados. Los peces ni siquiera pueden usar el metal; para ser plateados, tienen que construir estructuras que producen el mismo resultado a partir de

moléculas orgánicas. Eso es complicado y, por lo tanto, caro en términos evolutivos. Si eres un arenque, ¿por qué te preocupas?

Los arenques vagan por el mar en grandes bancos, alimentándose de pequeñas criaturas parecidas a las gambas y confiando en no cruzarse con los grandes carnívoros: delfines, atunes, bacalaos, ballenas y leones marinos. Pero los océanos son enormes y no hay muchos sitios donde esconderse. La única solución es la invisibilidad, o el recurso más parecido que tenga a su disposición la naturaleza: el camuflaje. ¿Deberían ser azules los peces, para coincidir con el agua que los rodea? El problema es que el tono exacto de su piel depende del momento del día y de lo que haya en el agua, así que cambia constantemente. Pero, para poder sobrevivir, los arenques tienen que ser exactamente como el agua que queda a su cola. Así que se convierten en espejos nadadores, porque el océano vacío que tienen detrás es exactamente igual que el océano vacío que tienen enfrente. Pueden reflejar el 90% de la luz que los alcanza, casi como un espejo de aluminio de gran calidad. Al devolver las ondas luminosas a los ojos de algún depredador potencial, los arenques pueden nadar por el océano tras un escudo de luz.

La reflexión no resulta siempre tan perfecta. En la mayoría de los casos, los objetos solo reflejan una parte de la luz. Pero eso es perfectamente útil si tenemos dos objetos, situados uno al lado del otro, y queremos distinguirlos. El que refleja luz azul es mi taza, y el que refleja luz roja es la taza de mi hermana. Por lo tanto, la reflexión importa cuando una onda choca contra una superficie.

Pero no es lo único que puede ocurrir cuando una onda encuentra un obstáculo. La refracción puede mover las ondas de forma más sutil, alterando su forma de avanzar.

Si una reina hawaiana observara la costa desde un acantilado, contemplando cómo se formaba el oleaje, se habría dado cuenta de que, aunque las olas del océano procedan cada día de direcciones distintas, en el momento en que llegan a la orilla, siempre lo hacen en paralelo a la playa. Las olas nunca vienen de lado, sea cual sea la dirección en que esté orientada la costa. Y esto es así porque la dirección de las olas depende de la profundidad del agua, y las olas que se forman en aguas más profundas viajarán más rápido. Imagina una playa larga y recta en la que las olas vienen ligeramente de la izquierda. La parte de la cresta de la ola que queda a la derecha, más lejos de la orilla, está en aguas más profundas. Así pues, avanza con mayor rapidez, hasta alcanzar la parte de la ola que está más cerca, y toda la cresta de la ola se mueve en la dirección de las agujas del reloj a medida que se acerca a la orilla, alineándose con la playa. Cuando la ola rompe, la cresta de la ola está en paralelo a la orilla. Se puede cambiar la dirección a la que avanza una ola si se cambia la velocidad de algunas partes de su cresta con respecto a las otras. A esto se lo llama refracción.

Es fácil imaginar cómo cambia la velocidad de una ola, pero ¿qué pasa con la luz? Los físicos siempre hablan de «la velocidad de la luz». Es una velocidad inimaginablemente rápida, y un elemento crucial en el legado más famoso de Einstein: las teorías de la relatividad especial y general. La idea de que existe una «velocidad

de la luz» constante fue en su momento controvertida, difícil de aceptar y brillante. Por eso me siento un poco mal al decirte que jamás en tu vida has detectado una onda luminosa que viajara a la velocidad de la luz. Incluso el agua ralentiza la luz, y para comprobarlo solo necesitas una moneda y una taza.

Coloca la moneda plana en el fondo de la taza de forma que toque el lado que te queda más cerca. Ahora agáchate hasta que el borde de la taza esconda la moneda y no puedas verla. La luz viaja en línea recta, y en este punto no hay ninguna línea recta que pueda viajar desde la moneda hasta tus ojos. A continuación, y sin mover la cabeza ni la taza, llena esta de agua. La moneda aparecerá. No se ha movido un ápice, pero la luz que emitía ha cambiado de dirección en cuanto ha salido del agua, y ahora sí puede alcanzar tus ojos. Es una demostración indirecta de que el agua ralentiza la luz. Cuando la luz se encuentra con el aire, vuelve a acelerar y la onda se curva en un ángulo al cruzar esa frontera. A esto lo llamamos refracción, y el agua no es la única que lo provoca: cualquier cosa que atraviese la luz ralentizará su paso, pero en distintas medidas. El término «velocidad de la luz» alude a su velocidad en el vacío, cuando la luz viaja a través de la nada. El agua ralentiza la luz en un 75% de esa velocidad, el cristal en un 66%, y en un diamante la luz se da un paseo al 41% de su velocidad máxima. Cuanto más se ralentiza, mayor será la curvatura en la frontera con el aire. Por eso los diamantes son mucho más brillantes que la mayoría de las piedras preciosas, porque ralentizan la luz mucho más que las demás⁴⁴. Y esa curvatura de la luz es la

única razón que hace que puedas ver el cristal, el agua o los diamantes. El material en sí mismo es transparente, así que no lo vemos directamente. Lo que vemos es que algo está jugando con la luz que le llega por detrás, e interpretamos ese algo como un objeto transparente.

Está muy bien que podamos ver los diamantes, lo que sin duda será un alivio para todo aquel que haya desembolsado una buena suma para comprarse uno; pero la refracción no tiene que ver solo con la estética. La refracción nos ha dado las lentes. Y las lentes abrieron las puertas a un vasto campo de la ciencia: el de los microscopios para descubrir gérmenes y las células de las que estamos hechos, los telescopios para explorar el cosmos y las cámaras para registrar continuamente los detalles. Si las olas luminosas siempre viajaran a la velocidad de la luz, no tendríamos nada de eso. Vivimos en una bañera de ondas luminosas, y esas ondas están constantemente siendo reflejadas y refractadas, ralentizadas y aceleradas mientras avanzan. Igual que en el caos de la tormentosa superficie oceánica, a nuestro alrededor hay infinidad de ondas luminosas de distintos tamaños que se solapan y avanzan en todas direcciones. Pero nuestros ojos seleccionan y refractan, mantienen algunas ondas fuera y ralentizan otras, y así ordenan una pequeñísima fracción de esa luz para que podamos darle sentido. La reina hawaiana que contemplaba las olas desde el acantilado lo hacía gracias a las ondas luminosas, y la misma física funciona para ambas.

Todo esto está muy bien si te alcanzan unas ondas y quieres verlas después de haber sido reflejadas o refractadas. Pero ¿qué ocurre si nunca llegan a alcanzarte?

Una de las pequeñas rarezas de la vida es que si le das a un niño ceras de colores y le dices que dibuje agua saliendo de un grifo, el agua de su dibujo será azul. Pero nadie ha visto nunca que salga agua azul de los grifos. El agua corriente es incolora (si la tuya no lo es, te recomiendo que llames a un fontanero). Si vieras que de un grifo sale agua azul, no te la beberías. Pero, en los dibujos, el agua siempre es azul.

En las fotografías satelitales de la Tierra, los océanos son, sin ninguna sombra de duda, azules. Y no es por la sal, ya que hay charcos de agua dulce descongelada en las cumbres de los glaciares, y también son de un color azul espectacular. Casi parece como si alguien hubiera llenado los charcos en el hielo con colorante alimentario. Pero en los puntos en que el agua gotea por encima del hielo para unirse al resto del agua descongelada, es incolora. Lo que afecta al color no es lo que haya en el agua, sino cuánta agua tengas.

Las ondas luminosas que golpean la superficie del agua, o bien se reflejan de nuevo hacia el cielo, o bien atraviesan la superficie y avanzan hacia las profundidades. Pero, a veces, una partícula diminuta o incluso la propia agua actúan como un obstáculo que manda la onda en otra dirección. Este re direccionamiento puede ocurrirle tantas veces a una misma onda luminosa que al final termina volviendo al aire. Y en ese largo viaje, el agua ha filtrado la

luz. Las ondas luminosas que provienen del sol son una mezcla de muchas longitudes de ondas o, en otras palabras, de todos los colores del arcoíris. Pero el agua puede absorber la luz, y, de hecho, absorbe algunos colores más que otros. El primero en desaparecer es el rojo, ya que bastan unos metros de agua para que el rojo desaparezca por completo. Y luego los amarillos y los verdes se desvanecen a las pocas decenas de metros. Sin embargo, la luz azul apenas es absorbida, y puede llegar a recorrer distancias enormes. Así pues, para cuando la luz está viajando hacia fuera del océano, prácticamente lo único que queda es el color azul. La razón por la que el agua corriente es incolora es que no hay suficiente cantidad para que se note la diferencia. El agua del grifo tiene color, el mismo que el resto del agua que encontramos en el mundo. Pero ese color es tan débil que es preciso juntar una enorme cantidad de agua para llegar a ver el efecto que esta ejerce sobre las ondas que la atraviesan⁴⁵. Cuando ves el color, resulta espectacular, y entonces comprendes que la cereza azul cielo es la elección correcta. Pero eso no te lo enseñaría nunca un grifo.

Así pues, a medida que las ondas avanzan, pueden ser absorbidas por cualquier cosa que atraviesen. Es un proceso de desgaste muy lento en el que la energía de la onda se va perdiendo de poquito en poquito. La cantidad que se pierde depende del tipo de onda del que se trate y de su longitud. Toda esta variedad nos indica que es mucho lo que las ondas hacen y lo que nos pueden explicar. Podemos ver y oír algunos de sus contrastes en uno de mis fenómenos atmosféricos favoritos: la tormenta.

Una tormenta es un espectáculo magnífico, una forma drástica de recordarnos que el aire es mucho más que un mero relleno del cielo. Nuestra atmósfera es el hogar de enormes cantidades de agua y de energía, y estas enormes materias primas suelen ser empujadas de un lado al otro de manera lenta y pacífica. Las nubes de tormenta, los poderosos cumulonimbos, se desarrollan con el propósito de reequilibrar la atmósfera cuando ese empuje suave deja de ser suficiente. El proceso empieza cuando el aire húmedo y caliente que flota cerca del suelo empuja hacia arriba el aire más frío que tiene encima, lo que le proporciona enormes cantidades de energía. En el centro de esta enorme nube, el aire caliente y húmedo se eleva rápidamente, agitando la atmósfera que tiene encima y liberando enormes gotas de lluvia. Y lo más impresionante es que esa agitación provoca que las cargas eléctricas se separen y se redistribuyan en distintas partes de las nubes. Las cargas se acumulan hasta que alguna nube cercana o la misma Tierra son atravesadas por enormes pulsos de corriente eléctrica que se llevan el exceso de carga eléctrica. Cada relámpago dura más o menos un milisegundo, pero el trueno resuena por el paisaje durante bastante más. Me encantan los rayos y los truenos, tanto por el espectáculo teatral que ponen en escena como porque nos permiten echar un vistazo al motor de la atmósfera. Las tormentas producen opuestos muy improbables: el relampagueo afilado y sorprendente de los rayos en contraste con el retumbar profundo y arrastrado de los truenos. Pero ambos son preciosos ejemplos de la versatilidad de las ondas.

El relámpago es temporal. Esta conexión eléctrica es como un tubo hecho de atmósfera que se calienta en exceso y conecta la nube de tormenta con la Tierra o tal vez con otra nube. Es un pasillo lleno de moléculas que han sido desintegradas a causa de la energía que ha pasado zumbando por su lado. Durante un breve instante, la temperatura de esa tubería puede llegar a los 50 000 °C, y por eso su resplandor es blanco azulado. Un gigantesco pulso de ondas luminosas sale disparado de ese tubo, llenando el paisaje, pero las ondas se mueven a tal velocidad que desaparecen en un instante. Cuando el tubo que transporta la corriente eléctrica se calienta, se expande hacia los lados, golpeando el aire que tiene a su alrededor. Este enorme pulso de presión se propaga por el aire, siguiendo la luz, pero de manera mucho más lenta. Son las ondas sonoras y, por ende, el trueno. Sabemos que los relámpagos existen porque crean ondas sonoras y luminosas.

Lo más importante de las ondas es que son una forma de permitir que la energía se mueva, pero sin tener que mover aire, agua o cualquier otra «cosa» a la vez. Esto significa que las ondas pueden viajar por el mundo con mucha facilidad, afectando a lo demás de una forma que resulta interesante y útil, sin llegar a poner el mundo patas arriba ni causar graves contratiempos. Un relámpago libera mucha energía, y las ondas sonoras y luminosas pueden transportar parte de esa energía hacia el resto del mundo, distribuyéndola por doquier. Aunque el aire no se mueve mientras las ondas sonoras se propagan, a su paso se transfieren enormes cantidades de energía. Las ondas sonoras y las luminosas son dos

tipos distintos de ondas, pero en ambas se aplican los mismos principios básicos. Por ejemplo, tanto la luz como el sonido pueden ser modificados por el ambiente que atraviesan. En el caso de los truenos, podemos oír lo que les ocurre a las ondas.

Mi lugar favorito está como a un kilómetro de distancia de un relámpago. Cuando el destello ha anunciado que el sonido está en camino, me gusta imaginar cómo la enorme presión se propaga hacia mí en forma de leves ondeos. Mientras contemplo el paisaje veo directamente a través de esas ondas, pero el primer ruido atronador aún tarda unos segundos en alcanzarme. Estas ondas sonoras avanzan a unos 340 metros por segundo, o 1234 kilómetros por hora, lo que significa que tardan 7,5 segundos en cubrir un kilómetro. Ese fuerte ruido es parecido al que se produjo cuando el relámpago se expandía por el suelo. Pero si el trueno tiene ese sonido tan característico es porque lo que oigo justo después del ruido inicial es algo que proviene de un poco por encima del relámpago. Ha surgido como el mismo sonido, pero ha tardado más en alcanzarme porque ha tenido que recorrer un camino empinado y, por tanto, más largo. Y entonces, mientras el trueno retumba, oigo el sonido de cada vez más arriba de ese mismo relámpago. El primer ruido tarda cinco segundos en alcanzarme, el sonido que proviene de un kilómetro y medio más arriba tarda dos segundos, y el sonido de tres kilómetros aún tardará otros cuatro segundos en llegar. Todas estas ondas sonoras empezaron a avanzar más o menos al mismo tiempo, pero en sitios distintos. Y eso significa que mientras escucho, puedo percibir cómo la atmósfera altera esas

ondas. A medida que pasa el tiempo, la única diferencia entre ellas es que han viajado desde más lejos. Por eso, los sonidos más agudos —ese primer ruido súbito— desaparecen muy rápidamente, ya que la atmósfera absorbe las ondas de alta frecuencia, pero las ondas de baja frecuencia siguen tronando. A medida que transcurre el tiempo, y las ondas han viajado más y a mayor distancia, el tono general se vuelve cada vez más grave, porque las notas más altas son consumidas por el aire, pero las notas más bajas siguen sonando. Si estás lo suficientemente lejos, el aire se las lleva todas y el sonido nunca te alcanza. Pero el relámpago tiene un alcance mayor, ya que las ondas luminosas son distintas y no dependen del aire para su avance. El aire no las absorbe tan fácilmente, pero sí pueden ser alteradas de otras formas mientras se mueven por el mundo.

En cierto modo, las ondas son algo muy sencillo. Una vez que han surgido, siempre están de camino a otra parte. Y ya sean ondas sonoras, olas marinas u ondas luminosas, pueden ser reflejadas, refractadas o absorbidas por el ambiente que las rodea. Y nosotros vivimos en medio de este torrente de ondas, percibiendo los patrones de todas las que nos dan pistas sobre lo que nos rodea. Nuestros ojos y oídos se ajustan a las vibraciones que nos alcanzan, vibraciones que transportan dos bienes muy importantes: energía e información.

* * * *

En un día gris y lúgubre de invierno, una buena tostada hace maravillas. El único problema es que la gratificación no es instantánea. Yo suelo poner el agua a hervir para hacer té, meter el pan en la tostadora y caminar con impaciencia por la cocina mientras espero que el pan esté listo. Después de haber fregado un par de tazas y ordenado la superficie de trabajo, suelo encontrarme a mí misma observando la tostadora mientras hace su trabajo. Lo que más me gusta de las tostadoras es que puedes ver que están haciendo algo, porque los elementos caloríficos se vuelven de un rojo brillante. No se limitan a calentar el aire que entra en contacto con ellos, sino que también irradian energía lumínica. Y este brillo es como un termómetro incorporado. Puedes saber lo caliente que están dichos elementos solo por su color. Este rojo brillante me dice que el interior de mi tostadora ha alcanzado los 1000 °C de temperatura. Es un calor tremendo, suficiente para derretir el aluminio o la plata. Pero si está brillando con un color rojo cereza, eso significa que su temperatura es de 1000 °C. Esta regla proviene de la forma en que funciona nuestro mundo. Todo lo que está a esa temperatura es del mismo tono de rojo, y otros colores indican temperaturas distintas. Si observas carbón ardiente y ves que los pedazos que están hacia el interior son de color amarillo, sabrás que su temperatura es de unos 2700 °C. Si hay algo de color blanco candente, estará a 4000 °C o más. Pero si piensas en ello, tú mismo percibirás que es algo muy extraño. ¿A santo de qué están los colores relacionados con la temperatura?

Mientras observo el interior de la tostadora, estoy viendo cómo la energía transforma su calor en luz. Una de las partes más sofisticadas del funcionamiento del universo es que cualquier cosa que tenga una temperatura por encima del cero absoluto está constantemente convirtiendo parte de su energía en ondas luminosas. Y la luz debe viajar, así que la energía sale disparada hacia el entorno circundante. El elemento calorífico que se halla al rojo vivo está convirtiendo parte de esa energía en ondas luminosas de color rojo, las que están en el extremo de la longitud de onda del arcoíris. Pero la mayor parte de la energía que emite son de longitudes de onda aún más largas, y estas ondas reciben el nombre de infrarrojas. Son iguales que la luz que vemos, lo único que cambia es que son más largas. Solo podemos detectarlas de forma indirecta, sintiendo el calor allí donde ha sido absorbido. Aunque no podamos verlas, las ondas infrarrojas son esenciales para una tostadora, ya que son las que calientan la tostada.

Los objetos calientes desprenden más luz a unas longitudes de onda que a otras. En cualquier temperatura, hay un pico en la longitud de onda que representa la mayor parte de la luz, y la luz que se irradia se desvanece a ambos lados de ese pico. La tostadora muestra un enorme abombamiento en el infrarrojo, y el extremo de ese abombamiento es el rojo visible. Así que lo que yo veo es el rojo. No puedo ver la luz que está calentando mi tostada, sino el extremo de unas longitudes de onda más alargadas.

Si tuviera una super tostadora capaz de alcanzar una temperatura más alta, digamos unos 2500 °C, los elementos caloríficos serían de

color amarillo. Eso es así porque el objeto más caliente desprendería una luz con unas longitudes de onda más cortas, así que los extremos visibles incluirían más colores del arcoíris: rojo, naranja, amarillo y un poquito de verde. Cuando vemos luz verde y roja a la vez, la interpretamos como si fuera amarilla. Solo algo que estuviera a esta temperatura desprendería exactamente este segmento del arcoíris. Y si la temperatura sube todavía más —si tuviera una hiper tostadora que pudiera alcanzar los 4000 °C—, la luz que se desprende incluirá el espectro de colores completo, hasta el azul. Cuando vemos todos los colores del arcoíris a la vez, vemos el blanco. De modo que algo que desprende ese color candente está, de hecho, desprendiendo el arcoíris; lo que pasa es que todos los colores están mezclados. El inconveniente de la hiper tostadora sería que derretiría prácticamente cualquier cosa con la que intentarás construirla. Pero tostaría el pan bastante rápido...; y, seguramente, la cocina entera. Así pues, una tostadora es solo una forma de hacer ondas. Las ondas luminosas rojas que puedes ver son solo algunas de las que aquella ha creado gracias a su temperatura. Las ondas infrarrojas que no ves son las que calientan tu tostada. Por eso la tostadora tuesta únicamente la superficie del pan, porque solo las partes que la luz alcanza pueden absorber los infrarrojos y calentarse. La razón por la que me distrae mirar la tostadora mientras espero es que imagino toda la luz que está irradiando y que no soy capaz de ver. Pero sé que está ahí, porque ese brillo rojo me lo está indicando.

Naturalmente, esto tiene trampa. El problema de este método de generar ondas luminosas es que siempre obtienes el mismo conjunto de ondas. No se pueden elegir algunas y rechazar otras. Un pedazo de carbón de color naranja, el acero fundido o cualquier otra cosa que esté a 1500 °C debe emitir la misma colección de colores juntos. Esto significa que podemos medir la temperatura de algo a partir de su color, siempre que esté lo suficientemente caliente para que podamos ver los colores. La temperatura de la superficie del Sol es de unos 5500 °C, y por eso irradia luz blanca. De hecho, esta es la razón por la que podemos ver las estrellas en el cielo nocturno: están a una temperatura tan elevada que su luz debe desprenderse de su superficie y cruzar el universo, y es precisamente ese color tan específico lo que nos indica su temperatura.

Y nosotros —tú y yo— también tenemos color a causa de nuestra temperatura. No es un color que podamos percibir, pero es visible para unas cámaras especiales que están ajustadas para captar el tipo de infrarrojo correspondiente. Los humanos estamos mucho más fríos que la tostadora, pero eso no quiere decir que no brillemos. Emitimos unas ondas luminosas cuya longitud de onda es, en su mayoría, entre diez y veinte veces más larga que la de la luz visible. Nuestra temperatura corporal nos convierte en una bombilla de infrarrojos. Y lo mismo pasa con los perros, los gatos, los canguros, los hipopótamos y, en definitiva, con todos los mamíferos de sangre caliente. Cualquier cosa que esté por encima del cero absoluto (la escalofriante temperatura de -273 °C) es una

bombilla de este tipo, con colores que van desde el infrarrojo hasta longitudes de onda más largas —las microondas— a medida que la temperatura desciende.

Así que vivimos bañados por las ondas, y no solo por las que son visibles, esas que podemos ver si miramos en la dirección correcta. El Sol, nuestros cuerpos, el mundo que nos rodea e incluso la tecnología que creamos, todo está creando ondas luminosas sin cesar. Y lo mismo ocurre con las ondas sonoras, las notas agudas y las graves, los ultrasonidos que los murciélagos usan para cazar y los infrasonidos de los que se valen los elefantes para seguir la meteorología. Lo increíble es que todas estas ondas pueden estar viajando por la misma habitación y ninguna de ellas interferirá con las demás. Las ondas sonoras son siempre las mismas, no importa que una habitación esté a oscuras o llena de luces de discoteca. Las ondas luminosas no se ven afectadas por los recitales de piano o el llanto de un bebé. Accedemos a todo esto cuando abrimos los ojos y usamos los oídos. Lo que hacemos entonces es desviar algunas de las partes útiles de semejante torrente, seleccionando las ondas que nos proporcionan la información que nos resulta más útil.

Pero ¿con cuáles nos quedamos? La respuesta será distinta según nos fijemos en los coches autónomos más innovadores o en un animal que necesita sobrevivir en un bosque. Ahí fuera hay una riqueza enorme de información, y cada uno escoge las ondas que le serán de mayor utilidad. Por eso las ballenas azules y los delfines mulares apenas se oyen los unos a los otros, y esa es la razón por la

que a ninguno de ellos les importa un ápice el color de tu traje de neopreno.

* * * *

El golfo de California se extiende a lo largo de la costa oeste de México. Es un estrecho refugio oceánico de unos 1100 kilómetros de longitud que se abre al Pacífico en su extremo sur. El agua azul del canal está protegida por unos picos montañosos oscuros y escarpados que arañan el cielo en ambas costas. Algunas especies marinas migran enormes distancias a través de los océanos para alimentarse y descansar aquí. Un pescador que se balancee sobre su pequeño bote en medio del canal apreciará la calma. Y por calma entendemos que las olas que mecen a ese pescador son suaves y relativamente sencillas. La luz del sol baña el lugar durante el día, reflejada únicamente por el agua azul y la roca pulida. Las olas con su chapoteo y el bote con sus chirridos desprenden las únicas ondas sonoras. Un delfín solitario salta y, por un instante, forma parte de este mundo en calma, y luego cae, salpica y regresa a un mundo completamente distinto, un mundo que no se caracteriza precisamente por su calma. Ahí abajo está el barullo desbordante de un ecosistema en pleno funcionamiento.

El delfín emite un silbido agudo mientras se sumerge en las profundidades, comunicándose de este modo con el resto del grupo que lo sigue. Y cuando sus congéneres lo alcanzan, el agua se llena de chasquidos, de ondas cortas y definidas emitidas desde la frente

de cada delfín y que rebotan por todas partes. Las que llegan al primer delfín le son transmitidas desde la mandíbula hasta el oído, de forma que cada animal se construye una imagen sonora de cuanto lo rodea. Los silbidos, chillidos y chasquidos hacen que aquello suene como una calle bulliciosa. Son las ondas sonoras de una comunidad en marcha. Después de pasar un rato en la superficie respirando y jugando, la manada se sumerge de nuevo en el azul más profundo y oscuro para llevar a cabo una misión concreta: cazar. Las ondas luminosas que eran tan comunes por encima de la superficie escasean aquí abajo. El agua absorbe las ondas luminosas con mucha rapidez, así que la información proporcionada por la luz es escasa. Los ojos de los delfines funcionan tanto dentro como fuera del agua, pero si la luz les resulta útil es por cómo han evolucionado estos órganos oculares. Los delfines no pueden distinguir los colores, ¿de qué les iba a servir eso en un mundo en el que apenas existe variedad de colores? Su mundo es azul, pero ellos jamás lo sabrán. No pueden ver el azul, así que ven su mundo acuoso de color negro. Pero lo que sí ven es el destello de los peces plateados que se cruzan en su camino; en definitiva, ven lo que necesitan ver.

La superficie oceánica es como un espejo en el País de las Maravillas de Alicia, ya que separa dos mundos pero es fácil de atravesar. Las ondas tienden a rebotar en la interfaz, de manera que el sonido del aire se queda en el aire y el sonido del océano permanece en el océano. En el aire, la luz viaja con mucha facilidad y el sonido viaja razonablemente bien. En el océano, las ondas

luminosas son absorbidas rápidamente, pero las ondas sonoras viajan de manera rápida y eficiente. Si quieres saber lo que ocurre a tu alrededor en el océano, tienes que detectar las ondas sonoras. Las ondas luminosas suelen servir de poco, a menos que estés observando algo muy próximo y que esté cerca de la superficie.

Pero ahí abajo, el mundo del sonido es el que impera. Los delfines usan sonidos muy agudos, algunos con longitudes de onda diez veces más cortas que las de cualquier sonido que nosotros podamos percibir. Estas longitudes de onda cortas hacen que su mecanismo de ecolocalización pueda captar incluso pequeñísimos detalles sobre la forma de lo que tienen delante. Pero los sonidos agudos no viajan muy lejos, así que no se puede oír a la manada de delfines desde el otro lado del canal. Hay otros sonidos que viajan mucho más lejos que los chillidos de los delfines. Está el murmullo grave de un barco lejano, el tintineo de las burbujas de las salpicaduras en la superficie, la pequeña explosión parecida a la de las palomitas del camarón pistola, y luego un grito grave, tan grave que los delfines ni siquiera lo oyen. El grito se repite. A unos quince kilómetros de distancia, hay una ballena azul que está llamando a las demás y el sonido hace eco por todo el canal. La ballena no usa la ecolocalización, así que no necesita ondas agudas. Pero sí que necesita que el sonido viaje muy lejos, lo que requiere un tono grave (una longitud de onda larga). Una onda sonora de longitud larga puede viajar enormes distancias, y las ballenas barbadas —las azules, las de aleta y las minke, entre otras— necesitan comunicarse a distancias muy largas. Las ballenas no son capaces

de oír los chillidos de los delfines y los delfines no son capaces de oír el canto de las ballenas. Pero el agua lo transporta todo, es como un gran torrente de información para cualquier criatura que sintonice con ella.

Así pues, el océano tiene su propio torrente de ondas luminosas y sonoras, pero de una forma totalmente distinta al del aire. El sonido es el rey ahí abajo, y las ballenas y los delfines son daltónicos porque los detalles de las ondas luminosas no les importan.

Sin embargo, existen algunas similitudes entre la atmósfera y el océano. Así como las longitudes de las ondas sonoras más largas viajan más lejos por debajo del agua, igualmente las longitudes de las ondas luminosas más largas viajan más lejos en su paso por el aire. Hace algo más de un siglo, los humanos también aprendieron a comunicarse a miles de kilómetros de distancia. Puesto que vivimos en el aire, no usamos ondas sonoras. Nuestras comunicaciones a larga distancia usan ondas luminosas. Cuando estas tienen longitudes de onda muy largas, las llamamos ondas de radio. Y el uso más primitivo e importante de esta tecnología consistía en mandar información a través de los océanos. Si su tripulación hubiese comprendido realmente la información que estos nuevos sistemas de comunicación transportaban, quizás el *Titanic* no se hubiese llegado a hundir.

Justo después de la medianoche del 15 de abril de 1912, pulsos circulares de ondas de radio se propagaron desde un puñado de lugares en el Atlántico Norte. Los patrones se iniciaban y detenían esporádicamente, y todos ellos se desvanecían a medida que las

ondas se alejaban de su fuente. Algunas de estas ondas llegaron a otros lugares que también estaban emitiendo, desde donde fueron transmitidas de nuevo. Las ondas más potentes provenían de un lugar situado a unos seiscientos cincuenta kilómetros al sur de Terranova, en Canadá, donde Jack Phillips estaba usando uno de los radiotransmisores marinos más potentes del momento para pedir ayuda. El enorme *RMS Titanic*, el barco más grande del mundo, se estaba hundiendo. Desde la cubierta de los botes salvavidas, en la parte más alta del barco, Jack enviaba pulsos eléctricos cortos hacia la antena que se hallaba atada entre los mástiles. Las oscilaciones del cable aéreo emitían toscas ráfagas de ondas de radio desde el barco, y los operadores de radio de los otros navíos podían descodificar el patrón y entender el mensaje.

Si la radio funciona es porque este tipo de ondas no viajan en una sola dirección, sino que se propagan en todas direcciones. No es preciso conocer la posición exacta de la persona que está escuchando, y, además, hay muchas personas que pueden escuchar las mismas ondas. Los pulsos que el *Titanic* emitía pudieron ser detectados por el *Carpathia*, el *Baltic*, el *Olympic* y algunos barcos más a varios centenares de kilómetros de distancia. Puede que la información que se transmitió fuera limitada y el medio algo precario, pero por primera vez en la historia de la humanidad era posible mantener una conversación desde un punto al otro del océano. La llegada de la tecnología de la radio cambió el transporte marino para siempre. Veinte años antes, el *Titanic* habría desaparecido bajo las olas él solo, y se habría tardado más o menos

una semana en deducir que había naufragado. La primera señal transatlántica por radio se había emitido tan solo diez años antes. Pero esa noche, gracias a las ondas que se propagaron en la oscuridad, los barcos cercanos estuvieron informados de la tragedia mientras estaba ocurriendo. Los pulsos en *staccato* no eran aleatorios. Las ondas tenían patrones, y cada patrón transmitía un mensaje enviado por un humano y que había sido emitido a través de las enormes distancias del océano a la velocidad de la luz. Aquello constituyó una gran revolución en la comunicación humana. Fue el grito que marcó el verdadero inicio de la era de la radio.

Una de las razones por las que el hundimiento del *Titanic* fue tan famoso es que ocurrió en la cúspide de esta nueva era. Demostró el gran potencial de las ondas de radio, ya que el *RMS Carpathia* llegó dos horas después de que el *Titanic* naufragara, a tiempo de salvar muchas vidas. Pero también demostró que el sistema de radio estaba en aquel entonces demasiado poco desarrollado para ser útil. La transmisión de los mensajes era lenta, y algunas de las advertencias sobre los icebergs que había recibido el *Titanic* se habían perdido entre la oleada de mensajes triviales o sobre temas más generales que les habían llegado. Pero lo más importante es que las toscas ráfagas de ondas provocaban que las señales se confundieran fácilmente. ¿Quién estaba a la escucha y quién al habla? A veces, los mensajes no eran oídos en su totalidad, o ni siquiera eran percibidos. Para usar ondas que emitan información, debes alterarlas de alguna forma a fin de que el receptor vea un

patrón. Pero todos aquellos barcos estaban o «encendidos» o «apagados», es decir, que recibían una ráfaga de ondas de radio, o no recibían nada. Solo había un canal y todos debían compartirlo. Las ondas de radio no eran las únicas que zumbaron por el océano aquella noche. El *Titanic* disparó bengalas de socorro, y el *Californian*, que estaba cerca, intentó establecer contacto usando un reflector de señales para emitir destellos de luz visible. Pero las ondas de radio podían llegar mucho más lejos, gracias a una particularidad muy conveniente de la atmósfera. Más arriba, hay una capa, llamada ionosfera, que actúa como un espejo parcial para las ondas de radio. Así pues, las señales de radio del *Titanic* no se extendieron por la superficie del océano, sino que rebotaban en la atmósfera y luego volvían a bajar. Por eso las ondas de radio pueden viajar a través de los océanos, aunque la curvatura de la Tierra impida que el emisor y el receptor estén dentro de sus respectivos campos visuales. Las ondas reflejas pueden viajar alrededor del planeta porque la reflexión les permite avanzar por la superficie curvada. En el cielo no hay un espejo equivalente para la luz visible. Jack Phillips siguió llenando el cielo nocturno con pulsos de ondas de radio, transmitiendo la posición del barco a cualquiera que pudiera estar escuchando, hasta que el agua inundó la sala de comunicaciones. Él no sobrevivió, pero la comunicación por radio a larga distancia hizo que 706 personas de las 2.223 que había a bordo se salvaran. Y vivieron para ver un mundo que pasó de estar en un silencio de radio total a una comunicación cacofónica a través de estas ondas invisibles. Hoy en día no existe prácticamente

ningún sitio al que no lleguen, y la civilización humana está más interconectada que nunca.

Las ondas luminosas gobiernan nuestro mundo. Son el vehículo que nos proporciona la pequeña fracción de las sobras solares que mueven el planeta. Nos conectan con el resto del universo. Pero en el siglo pasado, nuestra civilización empezó a desarrollar una nueva relación con toda una serie de ondas luminosas posibles: el espectro electromagnético. Mientras que antes éramos consumidores pasivos, agradecidos por la energía y la información que recibíamos accidentalmente, ahora somos productores y usuarios prolíficos de ondas luminosas. Nuestra sofisticación para manipular la luz ha abierto la puerta a una destreza colosal para controlar nuestro mundo, a la capacidad de emitir información casi instantáneamente a casi cualquier humano, y a poder hablar, en este preciso momento, con cualquier persona del planeta que disponga de un teléfono móvil. Pero el torrente de ondas solo se puede comprender si se dispone de algún mecanismo para separar los mensajes que están siendo enviados. Afortunadamente, las ondas nos proporcionaron la solución, y no necesitarás un kit de experto para comprobarlo por ti mismo.

Las Grandes Montañas Humeantes de Tennessee son espectaculares: una enorme sucesión de valles y picos cubiertos por un bosque de un verde intenso. La serenidad y la naturaleza incólume del bosque me sorprendieron especialmente porque para llegar hasta allí tuvimos que atravesar la ciudad natal de Dolly Parton. Conocía a la gran cantante de country, por supuesto, pero

no estaba preparada para Dollywood, un enorme parque temático que celebra todo lo relativo a Tennessee, a la música country, a las atracciones de feria y, por supuesto, a la propia Dolly. Y esto era solo el epicentro. Los sombreros vaqueros de color rosa, las guitarras cuajadas de adornos y aquel omnipresente fondo de música country llegaban hasta las ciudades vecinas, así como las largas melenas rubias, las chaquetas tejanas de estilo *vintage* y la conocida hospitalidad sureña. La copa de bourbon de después de la cena parecía una regla cultural inquebrantable, aunque yo, la verdad, hubiera preferido un sombrero de cowboy. Pero todo eso cambió cuando subimos a las montañas al día siguiente. La multitud avanzaba cargada de tumbonas y neveras portátiles, y, llegado un punto, se acomodaban tranquilamente para contemplar el bosque. Todo lo que interrumpiera la completa oscuridad estropearía la escena, así que se apagaron todas las luces, y las linternas y los teléfonos quedaron prohibidos. Cuando empezó a ocultarse el sol, las luciérnagas comenzaron a danzar. El bosque brillaba con los destellos de millones de insectos emisores. Estábamos allí para hacer un documental de ciencia, y solo disponíamos de una noche para capturar aquel ritual. El problema de grabar algo así es que necesitas moverte y ver por dónde vas. Nos dijeron que si era estrictamente necesario, podíamos usar luces rojas, ya que por lo visto no molestan tanto a las luciérnagas como las luces blancas. Así que merodeamos por el bosque desprendiendo una tenue luz roja. Sobre la una de la madrugada, las luciérnagas ya casi habían parado, así que nos preparamos para grabar el

último segmento. Mientras el director y el cámara disponían las luces, yo me coloqué en un claro completamente a oscuras con mi linterna frontal roja, acurrucada bajo una tela de fondo negro para aplacar el frío y garabateando lo que iba a decir. Cuando los demás estuvieron listos, me reuní con ellos y abrí la libreta para refrescar por última vez las ideas que se me habían ocurrido. Pero bajo la luz blanca de la linterna frontal del director, no podía leer mis notas. En la página había dos tipos de anotaciones, escritas en rojo y en azul, justo encima las unas de las otras. Era imposible leer nada.

Si quisieras demostrar lo radicalmente distintas que son las longitudes de ondas, sería difícil encontrar un ejemplo mejor que este. Comprendí entonces que debía de haber escrito en esa página con un bolígrafo rojo al principio del día. Bajo la luz blanca, es fácil ver la tinta roja sobre el papel blanco. Pero cuando estás bajo una luz roja, la tinta roja es invisible. El papel blanco reflejaba la luz roja de vuelta hacia mis ojos. Y la tinta roja también reflejaba luz roja de vuelta hacia mis ojos. Con mi linterna frontal, que emitía luz de este mismo color, la página parecía estar vacía porque la luz roja estaba rebotando en ella de la misma forma. Luego hice más anotaciones en la misma página, pero con tinta azul. La tinta azul sí que la veía porque no refleja la luz roja, y de este modo había un contraste entre la tinta y el papel. Si hubiese alumbrado la página con una linterna frontal azul, habría podido ver la tinta roja pero no la azul. Como si estuviera moviendo el sintonizador de la radio, podría haber escogido qué leer simplemente escogiendo el color de la iluminación que debía usar. La luz roja tiene una longitud de onda

más larga que la azul, de modo que al escoger la longitud de onda a la que iba a prestar atención, escogí también la información que iba a recibir.

De hecho, esto es justamente como sintonizar una emisora de radio. La mayoría de los métodos que usamos para detectar la luz (y otros tipos de ondas) solo detectan un abanico limitado de longitudes de onda. Si pasa una onda con longitud diferente, no hay manera de saber que está ahí. Mi libreta demostró que esto ocurre con los colores visibles, pero también es cierto para los invisibles. El mundo que nos rodea está atestado de ondas luminosas distintas, y todas ellas se encuentran superpuestas como si fueran anotaciones escritas en tintas de diferentes colores. No interactúan entre ellas ni alteran los otros colores presentes. Cada una es totalmente independiente. Puedes escoger entre detectar ondas de radio cuya longitud sea muy larga y escuchar una cadena de radio. O puedes presionar el botón de un mando que emite señales infrarrojas que solo tu televisor puede captar. O puedes escribir en una página con tinta roja. O puedes esperar a que tu teléfono móvil te señale qué redes wifi están disponibles, las cuales están siendo emitidas en distintos colores, cierto, pero las longitudes de onda de estos colores corresponden a microondas. Esta cacofonía de información está ahí todo el tiempo, cada longitud de onda está siempre ahí, solapándose con las demás. Y solo si buscas la información de la forma adecuada llegarás a saber que se encuentra a tu disposición. Pintamos la imagen del mundo con un abanico muy limitado de longitudes de onda (los colores visibles del arcoíris), pero estos

colores visibles no están afectados en absoluto por el resto de colores que hay ahí fuera.

El hecho de que las ondas con longitudes distintas no se afecten mutuamente es muy útil. Podemos recoger solo las que nos interesan y hacernos los sordos tranquilamente ante las demás. Todo lo que rodea a cada longitud de onda incide sobre ella de distintas formas. El mundo clasifica y filtra las ondas según su longitud. Por eso, aunque yo crecí cerca del gris, nuboso y lluvioso Mánchester, donde rara vez podíamos contemplar el cielo nocturno, solo me separaban 23 kilómetros del mayor telescopio del Reino Unido. El telescopio Lovell, alojado en el Observatorio Jodrell Bank, es un radiotelescopio enorme cuyo plato reflector mide 76 metros de diámetro. E incluso en los días más grises de Mánchester, cuando los nubarrones se amontonan y forman capas de varios kilómetros de ancho, este telescopio tiene una vista perfecta del cielo. Para la luz visible, cuya longitud de onda no llega a la millonésima parte de un metro, entrar en una nube es como entrar en una máquina de *flipper* gigante. La luz rebota y es enviada de aquí para allá hasta que queda totalmente absorbida. Pero las enormes ondas de radio, que son todas exactamente iguales excepto en su longitud de onda, que es de unos cinco centímetros, atraviesan sin problemas todos esos obstáculos minúsculos sin inmutarse. La próxima vez que te pille la lluvia en Mánchester, piensa en ello. Puede que te anime un poco pensar que los astrónomos son capaces de ver la magnificencia del cosmos, aunque tú no alcances siquiera a ver las copas de los árboles⁴⁶. O puede que no.

Si la Tierra es habitable es solo porque hay distintas longitudes de onda luminosas que interactúan de formas distintas con las cosas que tocan. La energía fluye desde el caliente Sol como una amplia sinfonía de ondas luminosas, y nuestro planeta rocoso intercepta una pequeñísima fracción de ese torrente. La energía que esa pequeñísima fracción transporta es la que nos da calor. Pero si eso fuera todo, la temperatura media de la superficie terrestre sería de unos heladores $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de sus cómodos $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ actuales. Lo que nos salva de la congelación permanente es el efecto «invernadero» de la Tierra. Su funcionamiento tiene que ver con longitudes de onda luminosas distintas que interactúan con la atmósfera de diversas maneras.

Imagina las vistas desde una ladera en uno de esos días que parecen sacados de los dibujos animados, en los que el cielo está completamente azul, a excepción de algunas nubecitas blancas que parecen de algodón y que merodean por el cielo solo para proporcionar variedad. Si estás mirando terrenos llanos, verás hierba, árboles verdes y tierra oscura. La luz del sol ilumina la escena, salvo allí donde las nubes proyectan su sombra. Pero lo que llega a la tierra que tienes delante es diferente de lo que salió del incandescente Sol. La atmósfera ha absorbido las largas longitudes de onda infrarrojas y la mayoría de las longitudes de onda ultravioletas, mucho más cortas, pero la luz visible ha seguido su camino sin inmutarse. La atmósfera ya ha seleccionado qué ondas llegarán al suelo. Y coinciden con las que podemos ver. Para las longitudes de onda visible, el cielo actúa como una «ventana

atmosférica», permitiendo que todo entre. Hay otra ventana para las ondas de radio —por eso los radiotelescopios pueden ver el cosmos—, pero el aire bloquea la mayoría de las demás ondas.

Cuanto más oscura sea la tierra que ves, más ondas visibles estará absorbiendo. Y la energía absorbida al final termina convirtiéndose en calor. Si tocas un suelo oscuro en un día soleado, sentirás ese calor. El resto es reflejado hacia arriba, y desde allí se aleja a través de esa ventana atmosférica. Si hay algún alienígena observándonos desde ahí arriba, nos estará viendo a través de ella.

Pero ahora, el suelo se ha calentado. Y de la misma forma que el elemento calorífico de la tostadora, debe liberar energía luminosa a causa de su temperatura. Está relativamente frío, y por eso no vemos el brillo. Pero para las longitudes de onda infrarrojas más largas, el suelo caliente es como una bombilla. Y aquí es donde entra en juego el efecto invernadero. La mayor parte de la atmósfera se limitará a dejar que estas ondas infrarrojas pasen. Pero algunos gases —el agua, el dióxido de carbono, el metano y el ozono— juegan en otra liga. Aunque solo son una pequeña fracción de la atmósfera total, absorben las ondas infrarrojas con mucha fuerza. Se los conoce como gases de invernadero. Mientras observas el paisaje, puedes ver cómo la luz visible se separa de la superficie, pero no puedes captar los rayos infrarrojos. Si pudieras, verías cómo se difuminan a medida que se alejan del suelo. La atmósfera está absorbiendo las ondas infrarrojas mientras viajan hacia arriba. Esas moléculas no tardarán mucho en liberar su energía y volver a emitirla en forma de más ondas infrarrojas. Pero aquí viene lo

importante. Cuando las nuevas ondas sean emitidas, serán enviadas en todas direcciones, indiscriminadamente; solo algunas de ellas viajarán hacia arriba y saldrán de la atmósfera. Algunas viajarán hacia abajo y el suelo las reabsorberá. Así pues, una parte de esta energía en movimiento queda atrapada en la atmósfera. Ese poquito de calor extra es lo que mantiene a nuestro planeta más caliente de lo que debería estar, permitiendo así que exista el agua líquida. Luego debe establecerse un nuevo equilibrio; y al final, tiene que llegar y salir la misma cantidad de energía, porque de lo contrario estaríamos calentándonos cada vez más. La Tierra se calienta hasta que puede liberar suficientes ondas infrarrojas para que todo cuadre.

Este es el «efecto invernadero»⁴⁷. La mayor parte es natural, ya que nuestra atmósfera contiene mucha agua y dióxido de carbono y todo está en equilibrio cuando la temperatura media de la superficie es de 14 °C. Pero con la quema de combustibles fósiles, los humanos estamos añadiendo dióxido de carbono a la atmósfera, de modo que hay más cantidad de esa energía que está viajando hacia arriba atrapada ahí. Esto modifica el equilibrio, así que el planeta se calentará hasta que se llegue a un nuevo equilibrio. Las cantidades de dióxido de carbono implicadas son muy pequeñas: el CO₂ suponía 313 partes de millón de la atmósfera en 1960, y 400 partes en 2013. En comparación con las otras moléculas que hay ahí arriba, es un aumento ínfimo. Pero esas moléculas escogen absorber ciertas ondas. El metano absorbe todavía más infrarrojos que el dióxido de carbono. Por lo tanto, estos gases importan. El

efecto invernadero es lo que hizo que nuestro planeta fuera habitable, pero también tiene el potencial de cambiar la temperatura considerablemente. Y todo ello ocurre con ondas que no podemos percibir a simple vista, pero ahora ya podemos medir sus consecuencias.

Hay todo tipo de ondas propagándose por nuestro mundo: están las enormes ondas de radio, las minúsculas ondas luminosas visibles, las olas del océano, las pesadas y graves ondas sonoras emitidas por las ballenas debajo del agua y las señales de alta frecuencia —y su correspondiente eco— que emiten los murciélagos. Cada tipo de onda atraviesa y avanza a las demás a toda velocidad. Pero todavía nos queda una pregunta por contestar. ¿Qué ocurre cuando una onda se encuentra con otra que es de su mismo tipo? La respuesta es maravillosa si tienes una perla iridiscente en la mano, pero algo que conviene evitar si estás intentando hablar por el móvil.

La *Pinctada maxima* puede encontrarse en el lecho marino, a apenas unos metros bajo la superficie de un mar turquesa cercano a Tahití y a otras islas del Pacífico Sur. Cuando se alimenta, abre ligeramente las valvas de su concha y succiona agua del mar, varios litros al día. El molusco que habita en el interior de esta concha filtra las pequeñas partículas de alimento y luego expulsa agua limpia de vuelta al océano. Podrías nadar por encima de una de ellas y no darte ni cuenta, ya que el exterior de la concha es áspero y anodino, con motitas de color beis y marrón. Estas aspiradoras del océano tienen un aspecto en consonancia: son animales funcionales y sin ningún tipo de elegancia. El interior de las ostras

no fue diseñado para ser visto. Y, sin embargo, Cleopatra, María Antonieta, Marilyn Monroe y Elizabeth Taylor fueron dueñas orgullosas de lo que surge cuando una ostra saca el máximo provecho de una tarea engorrosa y que las ha creado: las perlas. La *Pinctada maxima* es la ostra perlada del Pacífico Sur.

De vez en cuando, un agente irritante entra en la parte errónea de la ostra. Como no tiene forma de expeler al intruso, la ostra extiende algo inocuo sobre él, exactamente lo mismo que usa para cubrir el interior de su concha. Es la versión molusco de barrer algo bajo la alfombra, aunque en este caso se hace una alfombra a medida en lugar de utilizar una que ya estuviera ahí. Esta capa está hecha de diminutas plaquetas planas unidas con pegamento orgánico y apiladas las unas sobre las otras. Cuando ha empezado el proceso de recubrimiento, la ostra sigue trabajando. Recientemente se ha descubierto que la perla gira a medida que se va formando, dándose la vuelta quizás una vez cada cinco horas. Las mareas y las estaciones vienen y se van, los tiburones, las mantas y las tortugas pasan por encima, y la ostra, asentada tranquilamente en su sitio, va filtrando el agua del océano mientras la perla en ciernes va dando lentas piruetas en la oscuridad.

La serenidad impera durante años, hasta que nuestra ostra tiene un día increíblemente malo y es sustraída del océano por un humano y abierta con una palanca. Cuando la luz del sol baña la perla por primera vez, las ondas lumínicas rebotan en su blanca y brillante superficie. Pero no solo rebotan en las plaquetas superiores; algunas consiguen penetrar varias capas más y rebotan desde allí, o

incluso puede que reboten algunas veces en el interior de las capas antes de volver a salir. Así que estamos ante una situación en la que tenemos una única clase de onda —consideremos únicamente la luz verde del Sol— que se está solapando con otras ondas de su mismo tipo. Las ondas siguen sin afectarse mutuamente, pero se suman. A veces, la onda de luz verde que rebota en la superficie se alinea perfectamente con la onda de luz verde que ha rebotado desde una capa más abajo. Los picos y los vientres de la forma de la onda coinciden a la perfección. Así que salen al mundo juntas, como una sola onda verde reforzada. Pero puede que la luz roja que llega desde el mismo ángulo y que rebota en las capas de la misma forma no se alinee tan exactamente. Los picos de una onda roja se alinean con los vientres de otra onda roja. Súmalas y ya no queda nada que viaje en esa dirección.

Estas capas de plaquetas son la razón por la que un molusco que se alimenta filtrando agua en el Pacífico Sur puede crear algo que es ansiado por las personas más glamurosas de nuestra sociedad. Las capas son tan finas y diminutas que tienen el tamaño adecuado para influir en la alineación de las ondas luminosas. Su papel es agitar la luz un poco para que las ondas del mismo tipo se solapen. Las ondas se suman —un físico diría que interfieren las unas con las otras— y el resultado son patrones de colores. Desde algunos ángulos, las ondas luminosas reflejadas se refuerzan, de manera que vemos destellos rosas y verdes en la brillante superficie blanca. Desde otros ángulos, puede que lo que se alinee sea solo el azul, o nada en absoluto. Al girar una perla bajo la luz del sol, vemos los

destellos que provienen de las ondas que se han sumado. A esto lo llamamos iridiscencia: un brillo de apariencia misteriosa que es altamente apreciado por los humanos porque es tan escaso como bello. Lo que ocurre es que las perlas crean un patrón irregular de ondas luminosas y, cuando te mueves a su alrededor, ves distintas partes del patrón. Pero a nosotros nos parece que la perla brilla, y eso nos cautiva. En los últimos tiempos, los humanos han aprendido a diseñar el mundo a esta escala por sí mismos; pero incluso ahora, seguimos relegando el trabajo duro a las ostras.

Las perlas demuestran lo que ocurre cuando se solapan ondas del mismo tipo. A veces las crestas y los vientres se alinean y suman unas con otras, creando así una onda más fuerte que viaja en una dirección específica. En otras ocasiones se anulan entre ellas, de manera que no hay ninguna onda viajando en esa dirección. Aparecerá un nuevo patrón de ondas siempre que haya algo que permita a estas ondas reflejarse, o cuando haya más de una fuente que las produzca: piensa, por ejemplo, en dos guijarros iguales lanzados al agua el uno junto al otro y en las ondas que propagarán y que se solaparán.

Pero esto nos plantea algunas incógnitas. ¿Qué ocurre cuando se solapan otros tipos de ondas idénticas? ¿Y qué pasa con los teléfonos móviles? Todos hemos visto grupitos de gente apiñada en los que todos están hablando por teléfono con distintas personas desde móviles del mismo modelo. Están conectados al mundo mediante las ondas, los mismos tipos de ondas que cientos o miles de personas están usando en la misma ciudad. La comunicación

por radio mientras el *Titanic* se hundía se vio obstaculizada porque veinte barcos estaban usando en el Atlántico Norte la misma tecnología y los mismos tipos de ondas para emitir señales. Pero hoy en día podría haber cien personas en un mismo edificio manteniendo conversaciones independientes con el mismo modelo de móvil. ¿Cómo hemos conseguido organizar esta cacofonía de ondas para que sea posible algo así?

Imagina que observas una ciudad bulliciosa desde arriba. Un hombre que camina por la calle se saca el móvil del bolsillo, toquetea la pantalla y se acerca el teléfono a la oreja. Ahora, añade un superpoder a tu visión: la capacidad de ver las ondas de radio de distintas longitudes como colores distintos. Las ondas verdes se propagan en todas direcciones desde el móvil del hombre, muy fuertes y brillantes en el teléfono y cada vez más pálidas a medida que se alejan. A cien metros de distancia hay una estación base de telefonía móvil que detecta las ondas verdes y descodifica el mensaje, identificando el número al que quiere llamar. Entonces la estación base emite su propia señal de vuelta al teléfono del hombre —otra propagación de ondas verdes—, pero el color de esta nueva señal es ligeramente distinto del verde original. Este es el primer truco de las telecomunicaciones modernas. Mientras que el *Titanic* solo podía emitir una señal que era una mezcla de infinidad de longitudes de onda distintas, nuestra tecnología actual es increíblemente precisa en cuanto a qué longitudes de onda son enviadas y cuáles son recibidas. La longitud de onda de una señal del teléfono era de 34,067 centímetros, y la longitud de onda usada

para emitir la señal de retorno era de 34,059 centímetros. El teléfono y la estación base pueden escuchar y hablar en canales cuyas longitudes de onda son distintas en una ínfima fracción del 1%. Nuestros ojos son incapaces de distinguir los colores con tanta precisión. Pero al igual que la tinta roja y la tinta azul del papel blanco de mi libreta, estas ondas son diferentes y no se interfieren entre ellas. Mientras el hombre camina por la calle, las ondas verdes que se propagan desde su teléfono tienen un patrón, el mensaje que se está transmitiendo. Una mujer al otro lado de la calle también está hablando por teléfono, usando, de nuevo, una longitud de onda solo mínimamente distinta. Pero la estación base las diferencia. Por eso el gobierno vende el ancho de banda según su rango; si tu compañía de teléfono está usando ese rango, puedes hacer todos los cambios entre canales que quieras, por pequeños que sean, siempre que tu dispositivo sea capaz de diferenciarlos. Así pues, mientras observamos esta parte de la ciudad, vemos muchos puntos brillantes, que son los teléfonos emitiendo señales. Las señales rebotan en los edificios y poco a poco son absorbidas por el ambiente, pero la mayoría de ellas alcanzan una estación base antes de debilitarse del todo.

Mientras el hombre que estábamos observando camina por la calle, alejándose de la estación base, vemos mayor variedad de colores. Las calles hacia las que avanza están llenas de manchas rojas de radio, todas ellas centradas en la siguiente estación base, la cual está emitiendo muchas tonalidades de rojo a los teléfonos de alrededor. A medida que la fuerte señal verde de la primera estación

base se difumina, el teléfono del hombre detecta las frecuencias nuevas y empieza a comunicarse con la nueva estación base. No sabe que se está acercando al borde de la sección «verde», pero cuando llega a ese límite su teléfono cambia las longitudes de onda y pasa a emitir tonalidades de rojo. Estas nuevas señales no las recoge la estación base original, sino que son transmitidas por la nueva estación roja. Si sigue caminando, puede que llegue a zonas en las que veamos las ondas de radio amarillas o azules, gracias a nuestra radio visión de superhéroe. Ningún parche del mismo color se toca; pero si el hombre sigue caminando un poco más, puede que entre en una zona verde. Este es el segundo truco de las redes de telefonía móvil. Al mantener la intensidad de la señal muy baja, nos aseguramos de que las señales solo lleguen a la estación de base más cercana. Esto significa que un poco más adelante, puede que haya una nueva estación que use las mismas frecuencias verdes. Pero las señales de las dos estaciones verdes son demasiado débiles para llegar a alcanzarse mutuamente, así que la interferencia no es un problema. La información fluye desde y hacia el centro de cada célula —así es como llamamos al espacio que rodea a cada estación—,⁴⁸ pero no interfiere con la información de otras células. No importa que todo el mundo esté hablando a la vez, porque todos están usando ondas ligeramente diferentes. Y la tecnología es capaz de separar estas conversaciones sintonizando los receptores con una precisión increíble. Si tu móvil emite señales a una longitud de onda que es errónea en una pequeñísima fracción, el mensaje nunca se enviará. Pero la increíble precisión de la tecnología

moderna permite que las sutilezas más ínfimas sean suficientes para distinguir unas ondas de otras.

Y esto es lo que nos rodea mientras caminamos cada día. Por encima de nuestras cabezas zumban las ondas solapadas que emiten nuestros teléfonos, las redes wifi, las cadenas de radio, el Sol, los calefactores y los mandos a distancia. Y estas son solo las ondas luminosas. Luego están también las sonoras: los graves retumbos de la Tierra, la música jazz, los silbidos para llamar a un perro y los ultrasonidos que se usan para limpiar el instrumental en alguna clínica dental de la ciudad. Y luego están las ondas de la taza cuando soplamos para enfriar nuestro té, las olas del océano y las ondulaciones de la superficie terrestre provocadas por algún terremoto. Y aún hay más. Nunca paramos de llenar el mundo de más y más ondas, ya que las usamos para detectar y conectar los detalles de nuestras vidas. Pero todas ellas se comportan básicamente de la misma forma. Todas tienen su propia longitud de onda; todas pueden ser reflejadas, refractadas y absorbidas. Si entiendes los principios básicos de las ondas, el truco para emitir energía e información sin tener que usar nada tangible, habrás logrado comprender una de las mayores herramientas de nuestra civilización.

En 2002 estuve trabajando en Nueva Zelanda en un centro de excursiones ecuestres situado en las cercanías de Christchurch. Una tarde sonó el teléfono y, para mi sorpresa, era una llamada para mí. El aparato era inalámbrico, así que pude salir fuera con él y sentarme en la ladera mientras contemplaba el atardecer sobre los

campos neozelandeses. Era mi abuela. Había decidido llamarme (para entonces yo llevaba fuera del Reino Unido alrededor de seis meses y todavía no había hablado con mi familia), así que marcó número por número y ahí estaba yo, al otro lado. Mientras me preguntaba con ese acento suyo de Lancashire sobre la comida, los caballos y el trabajo, yo estaba totalmente distraída, meditando en lo extraño de aquella situación. Me encontraba en la otra punta del planeta, lo más alejada de mi familia de lo que podría estar en la Tierra (12 742 kilómetros en línea recta, y 20 000 si seguimos el vuelo de un cuervo vigoroso), y ahí estaba la abuela en el teléfono..., hablando. Charlando como si nada. Pero el caso es que un planeta entero nos separaba. Nunca he acabado de asimilar lo desconcertantes que fueron esos diez minutos. Hoy en día, nuestro planeta está conectado mediante ondas. Podemos hablar con quien queramos, todo el rato, gracias a ondas que no vemos. Es un logro descomunal y, en esencia, muy extraño. El trabajo de inventores como Marconi y sucesos como el hundimiento del *Titanic* mostraron el camino hacia el mundo de hoy día, en el que damos estas conexiones por sentado. Me siento agradecida de haber nacido lo suficientemente pronto para haber podido sentir el asombro que este hecho concreto merece. Nuestros ojos no son capaces de detectar estas ondas, y siempre es difícil apreciar lo que resulta invisible. Pero la próxima vez que llames por teléfono, piensa en ello. Una onda es algo extremadamente sencillo, pero si la usas con inteligencia, puede llegar a encoger el mundo.

Capítulo 6

¿Por qué a los patos no se les enfrían los pies?

El baile del átomo

La sal suele considerarse como un bien cotidiano que guardamos en los armarios y que nunca es el centro de atención. Pero si observas con atención un puñado de granos de sal, verás que es sorprendentemente brillante. Y la cosa mejora a medida que te acercas. Míralos con una lupa y verás que su forma no es aleatoria ni tosca ni, mucho menos, irregular. Cada uno es un precioso cubo diminuto con los lados muy rectos, de más o menos un milímetro de longitud. Por eso brillan, porque la luz se refleja en esos lados rectos como si fueran espejos en miniatura, y todos los granos de sal centellean cuando mueves el montoncito bajo la luz. Esa cosa tan anodina que hay dentro del salero está hecha de esculturas minúsculas, y todas ellas tienen la misma forma. No es que los fabricantes de sal lo hagan a propósito; es que la sal se forma así. Y de este modo nos da una pista sobre su composición.

La sal es cloruro sódico y está compuesta de la misma cantidad de iones de sodio y de cloruro⁴⁹. Puedes pensar en ellos como si fueran pelotas de distintos tamaños, ya que el cloruro tiene casi el doble de diámetro que el sodio. Cuando se está formando la sal, cada uno de sus componentes tiene un lugar fijo en una estructura muy específica.

* * * *

Como si fueran huevos en una pila de hueveras gigantes, los iones de cloro forman filas y columnas hasta que completan una cuadrícula perfectamente cuadrada. Los iones de sodio, más pequeños, caben en los espacios que quedan libres, de forma que cada cajita de ocho iones de cloruro tiene un ion de sodio en el centro. Un cristal de sal no es más que una enorme cuadrícula de este tipo, un cubo cuyos lados tienen alrededor de un millón de átomos de longitud. Cuando los cristales de la sal crecen, tienden a hacerlo formando una capa entera que cubre toda la superficie antes de empezar con la próxima capa, de modo que el cubo conserva la regularidad de sus lados a medida que crece. Es como un archivo a escala atómica, ya que cada componente está perfectamente apilado en su sitio. Y así los lados planos de cada cubo pueden reflejar la luz como un espejo.

No podemos ver los átomos por separado, pero sí que podemos ver el patrón de su estructura porque el cristal de sal entero no es más que ese mismo patrón repetido una y otra vez. La sal es muy sencilla, y un grano grande de sal es simplemente más de lo mismo. Los lados planos que hacen brillar la sal están ahí porque los átomos individuales han de colocarse en lugares concretos dentro de una estructura rígida. El azúcar también brilla, pero cuando observas más de cerca los cristales de azúcar —especialmente los más grandes, los del azúcar granulado—, verás algo todavía más bello. Estos cristales son pilares puntiagudos de seis lados. Cada molécula de azúcar está compuesta de 45 átomos distintos, pero

esos átomos se mantienen anclados los unos a los otros de una forma que se repite en cada molécula independiente. Una molécula de azúcar es como un ladrillo de una escultura cristalina, aunque sus formas sean bastante complicadas para ser ladrillos. De la misma forma que los cristales de sal, bastante más simples, estos también se apilan los unos encima de los otros en una estructura regular, y solo pueden seguir un patrón. E insisto, no podemos ver los átomos, pero sí que podemos ver el patrón porque todo el cristal es como una pila gigantesca, un rascacielos de moléculas. Y como los lados de estos pilares de seis lados también son planos, el azúcar brilla tanto como la sal.

La harina, el arroz y las especias molidas no brillan porque sus estructuras son mucho más complejas, puesto que están formadas de pequeñas fábricas vivientes que llamamos células. La única razón por la que los lados de los cristales de la sal y del azúcar son perfectamente planos es que su estructura es muy simple: no hay más que filas y columnas de átomos colocados en posiciones concretas. Y esa repetición perfecta solo es posible gracias a los miles de millones de ladrillos idénticos que ahí se encuentran: los átomos. El brillo es lo que nos recuerda que existen cada vez que añadimos al té una cucharada de azúcar.

Aunque no podemos ver los átomos con nuestros propios ojos, lo que sí podemos ver son las consecuencias de lo que está ocurriendo ahí abajo, en el mundo de lo diminuto. Lo que sucede en el nivel más bajo de la escala de tamaño afecta directamente a lo que

podemos hacer en las escalas más grandes de nuestra sociedad. Pero antes es preciso creer que existen los átomos.

Hoy en día, damos por sentada la existencia de los átomos. El concepto de que todo se construye a partir de unas pelotitas minúsculas de materia es relativamente fácil de entender, y tiene sentido para nosotros porque hemos crecido con él. Pero solo hace falta retroceder al año 1900 para encontrar un sesudo debate científico sobre si los átomos existían realmente. Con la aparición de la fotografía, los teléfonos y la radio se había proclamado una nueva era tecnológica, pero aún no se había llegado a un acuerdo sobre la «materia» que lo formaba todo. Muchos científicos consideraban que los átomos eran una idea razonable. Por ejemplo, los químicos habían descubierto que los distintos elementos parecían reaccionar conforme a índices fijos, lo que tenía mucho sentido si lo que se necesitaba era un átomo de esto más dos de aquello para crear una única molécula. Pero los escépticos se resistían a aceptar semejante idea. ¿Cómo se podía estar seguro de que algo tan pequeño se encontraba ahí realmente?

Muchas décadas más tarde, se atribuyó una frase al científico y escritor de ciencia ficción Isaac Asimov que expresa perfectamente cómo se llega a los descubrimientos científicos por regla general: «La frase más excitante que se puede oír en la ciencia, la que anuncia nuevos descubrimientos, no es “¡Eureka!” (¡lo encontré!), sino “Hum..., qué raro...”». La confirmación definitiva de la existencia de los átomos es el ejemplo perfecto de la ciencia siguiendo ese camino, pero tardó casi ochenta años en ocurrir. El reloj se puso en marcha

en 1827, cuando el botánico Robert Brown estaba observando en el microscopio unos granos de polen suspendidos en agua. Había unas partículas diminutas que se estaban separando del polen, y estas eran (tanto entonces como ahora) lo más pequeño que se podía observar en un microscopio. Robert Brown se dio cuenta de que incluso cuando el agua estaba perfectamente quieta, esas pequeñas partículas seguían moviéndose. Al principio pensó que era porque en realidad estaban vivas, pero luego observó lo mismo en materia inerte. Era algo extraño, y no sabía qué explicación darle. Pero escribió sobre ello y, en las décadas siguientes, muchos otros percibieron el mismo fenómeno. Ese extraño correteo empezó a conocerse como «movimiento browniano». Nunca se detenía, y las partículas más diminutas eran las únicas que correteaban. Algunas personas propusieron explicaciones, pero nadie llegó a desentrañar el misterio.

En 1905, el empleado de una oficina de patentes suiza que más adelante sería famoso en el mundo entero publicó un artículo basado en su tesis doctoral. A Einstein se lo conoce sobre todo por sus estudios sobre la naturaleza del tiempo y del espacio y por sus teorías de la relatividad especial y general, pero el tema de su tesis doctoral era la teoría estadística molecular de los líquidos, y en artículos publicados en 1905 y 1908 presentó una rigurosa explicación matemática del movimiento browniano. Supongamos, dijo, que el líquido está compuesto de muchas moléculas, y que esas moléculas están continuamente rebotando las unas contra las otras. El líquido no era más que una sustancia dinámica y

desorganizada, con moléculas chocándose las unas contra las otras, y acelerándose y desacelerándose y cambiando de dirección en cada choque. Entonces ¿qué ocurre en una partícula más grande, una que es mucho más grande que las moléculas? Pues que es golpeada desde diversas direcciones. Pero como esos choques son aleatorios, algunas veces la partícula recibe más golpes de un lado que del otro, así que se mueve un poco hacia un lado. Y entonces vuelve a ser aleatoriamente golpeada hacia arriba con más frecuencia que hacia abajo, y se mueve un poquito a causa de ello. Así que el correteo de una partícula más grande no es más que la consecuencia de los golpes que recibe por parte de miles de moléculas mucho más pequeñas. Robert Brown no podía ver las moléculas, pero sí que podía percibir las partículas más grandes. El correteo que Einstein predijo coincidía con lo que Brown había visto. Y eso solo podía darse si el líquido estaba realmente compuesto de moléculas que chocaban entre sí. De modo que los nódulos independientes de materia —los átomos— tenían que existir. Y lo que es aún mejor, una de las ecuaciones de Einstein predijo el tamaño que deberían tener los átomos para poder provocar el correteo que se había observado. Y entonces, en 1908, Jean Perrin llevó a cabo experimentos aún más detallados que corroboraban la teoría de Einstein. Los últimos reacios no tuvieron más remedio que claudicar ante las nuevas pruebas. El mundo estaba formado por muchos átomos diminutos, los cuales correteaban por todas partes sin cesar, y de este modo se pudo finalmente afirmar la existencia de los átomos y seguir adelante.

Esos dos descubrimientos fueron de la mano. La vibración constante de los átomos tampoco fue una coincidencia, ya que explica algunas de las leyes físicas más importantes que afectan al funcionamiento del mundo.

Una de las consecuencias más relevantes del nuevo entendimiento de los átomos y las moléculas fue que, en adelante, fenómenos como el movimiento browniano tendrían que explicarse por medio de la estadística. No tenía ningún sentido controlar los átomos por separado, calcular qué ocurría exactamente cuándo chocaban con otros y seguir la pista de cada uno de los miles de millones de átomos que hay en una sola gota de líquido. Lo que se hacía era más bien un cálculo estadístico de lo que ocurriría en caso de que se dieran infinidad de colisiones aleatorias. Era imposible predecir si la partícula browniana se movería exactamente un milímetro hacia la izquierda. Pero lo que sí podía afirmarse, después de repetir el experimento hasta la saciedad, era que acabaría alejándose un milímetro de su punto de inicio *promedio*. Esta media podía calcularse con mucha precisión, y eso sería lo máximo que ibas a conseguir, un promedio. De aquí se dedujo que la física era algo más caótica de lo que se creía en 1850, pero podía explicar muchísimas cosas. Una vez conocida la existencia de los átomos, incluso cosas cotidianas como la ropa empapada parecían mucho más interesantes.

El primer programa que presenté para la BBC trataba sobre la atmósfera terrestre y los patrones de las condiciones meteorológicas en el mundo entero. Para prepararlo me pasé tres días analizando el

fenómeno climatológico más famoso e importante del mundo: el monzón de la India. El monzón marca un cambio anual en los patrones del viento en el subcontinente indio, de manera que todos los años, entre junio y septiembre, los vientos contrarios traen lluvia. Y es mucha, muchísima lluvia. Así que nos fuimos para allá para contar de dónde provenía toda esa agua. Nos hospedábamos en unas cabañas de madera diminutas situadas en una playa muy tranquila de Kerala, en el extremo sur de la India. El primer día de rodaje fue largo y accidentado. El clima monzónico es muy variable, lo cual puede resultar frustrante si necesitas un par de horas con las mismas condiciones climatológicas para grabar una sección del programa. Un sol abrasador daba paso a una hora de lluvias intensas, luego llegaba un fuerte vendaval y luego volvíamos al sol abrasador. Pero hacía calor todo el día, y a mí la lluvia nunca me molesta siempre que no sienta frío. Tener frío no es divertido. Cada vez que llovía me quedaba totalmente empapada, y tenía que buscar la manera de que mi ropa pareciera un poco más seca cuando volvía a salir el sol. El problema de ser la persona que se pone delante de la cámara es que eres la única que tiene que llevar la misma ropa todo el rato. Así que me busqué un rinconcito donde mis cosas pudieran secarse un poco, y tuve la sensación de que me pasaba horas cambiándome de ropa para que coincidieran con el tiempo que hacía. Sobre las siete de la tarde, se abrieron los cielos (otra vez) y me empapé (una vez más) y, como el sol ya se estaba poniendo, decidimos dar el día por terminado.

Escurrí mi camiseta y mis pantalones cortos lo mejor que pude, usé una toalla para secarlos todo lo posible —lo que los dejó «húmedos»—, y luego los tendí y me fui a cenar. La ropa se quedó allí hasta las seis de la mañana del día siguiente, que era cuando me levantaba para empezar a trabajar. Pero cuando cogí los pantalones, no es que estuvieran húmedos, es que estaban todavía más mojados que la noche anterior. Y no solo estaban mojados, sino además muy fríos, porque la temperatura había descendido durante la noche. ¡Ay! Pero, como no tenía otros iguales, me los tuve que poner y caminar por la playa intentando parecer conmovida por el amanecer, y sin dejar traslucir que en realidad estaba temblando.

En un gas, las moléculas no suelen atraerse las unas a las otras, y por eso pueden propagarse para llenar cualquier recipiente en el que las metas. Con los líquidos, la cosa es un poco distinta. Siguen jugando a los coches de choque, pero las moléculas están mucho más juntas, tanto que prácticamente se están tocando todo el rato. En el aire, a temperatura ambiente, la distancia media entre un par de moléculas de gas es de unas diez veces la longitud de una molécula sola. Pero en un líquido, las moléculas están justo al lado unas de otras. Siguen correteando mientras chocan con las moléculas que tienen al costado, y pueden abrirse paso entre ellas con bastante facilidad, pero se mueven más lentamente que las moléculas de gas. Y puesto que son más lentas y están más cerca las unas de las otras, las moléculas de un líquido sienten la atracción de otras moléculas cercanas. Por eso los líquidos forman gotas. La temperatura es la cantidad de energía cinética que tiene

cada molécula. En una gotita de un líquido frío, las moléculas no se mueven mucho y por eso permanecen unidas. Si calientas esa gota, la velocidad media de las moléculas aumentará, y algunas terminarán teniendo algo más de energía que la media.

Para que una molécula pueda escapar del líquido, necesita disponer de la energía suficiente para huir de la atracción de las demás. Esto es la evaporación, y ocurre en el momento en que una molécula ha adquirido la energía suficiente para escapar de un líquido y alejarse flotando por sí sola para unirse a un gas. Mis prendas mojadas estaban llenas de agua líquida, de moléculas que se movían lentamente alrededor de las demás, pero que no tenían la energía necesaria para poder escapar. Durante esos tres días de monzón, intenté todo lo que se me ocurrió para secar la ropa. Secar prendas suele significar ponerlas en una situación que proporcionará a las moléculas del agua líquida la energía suficiente para escapar y poder así dirigirse hacia otro sitio. Durante los estallidos de sol abrasador, el agua líquida absorbía la energía del sol y las moléculas de agua se iban escapando lentamente. Pero cuando se nublaban, mi lucha estaba condenada al fracaso. El problema era que había demasiada agua en el aire: el aire que soplaba hacia la playa desde el océano estaba cargado de ella. Al brillar sobre el océano, el sol calentaba la capa más superficial. Las moléculas del agua del océano también juegan a los coches de choque, y cuanto más se calienta el agua, más rápido se mueven, en términos generales. A medida que se calentaba la superficie del océano, había más moléculas que terminaban acumulando la velocidad suficiente

para escapar. Estas moléculas escapaban hacia la atmósfera para pasar del estado líquido al gaseoso. Así que el aire caliente y húmedo que llegaba a la playa estaba ya lleno de moléculas de agua huidas. Y ahora estaban jugando a los coches de choque con las demás moléculas que había en el aire.

Cuando me mojaba la lluvia, el calor que desprendía mi cuerpo calentaba mi ropa y proporcionaba energía suficiente a algunas de las moléculas de agua que llevaba encima para que pudieran escapar hacia el aire. Eso hacía que mi ropa se fuera secando. Pero lo malo era que el aire estaba tan cargado de moléculas de agua que estas iban chocando con mi ropa y se quedaban pegadas. Cuando eso ocurría, simplemente se hundían en la muchedumbre líquida, lo que hacía que mi ropa estuviera aún más mojada. La razón que hacía que mi ropa nunca llegara a secarse era que la cantidad de moléculas de agua que se evaporaban y se alejaban de ella se encontraba en perfecto equilibrio con la cantidad de moléculas de agua que se condensaban en el aire. Esto supone el ciento por ciento de humedad: cada molécula que se evapora es sustituida por otra que se condensa. Si la humedad está por debajo del ciento por ciento, habrá más moléculas que salgan del líquido de las que llegan, así que, cuanto mayor sea esa diferencia, más rápido se secarán las prendas.

Y por la noche, la cosa empeoraba. Cuando el aire se enfriaba, todas las moléculas se movían más lentamente. Así que todavía había más moléculas que se desaceleraban lo suficiente como para pegarse a mi camiseta y a mis pantalones, y la ropa estaba todavía más

mojada. El punto en el que hay más moléculas que se condensan de las que se evaporan se llama punto de condensación, y las gotas líquidas que se forman son el rocío o la condensación. Algunas moléculas seguirán teniendo la energía suficiente para separarse del líquido y unirse al gas, pero la cantidad es ínfima si la comparamos con las moléculas que vienen del otro lado. Si hubiera podido calentar mi ropa, habría aumentado la cantidad de moléculas que se evaporaban, quizás lo suficiente como para volver a cambiar el equilibrio, haciendo así que la ropa se secase. Pero tal como estaban las cosas, tanto mi ropa como el resto de la India siguieron mojadas. La cuestión es que siempre está teniendo lugar un intercambio. Esa forma estadística de observar las moléculas marinas es importante porque las moléculas no hacen todas lo mismo. En ese mismo preciso instante y en el mismo lugar, algunas moléculas se estarán evaporando y otras se estarán condensando. Lo que vemos depende solamente del equilibrio entre estas dos posibilidades.

A veces resulta muy útil que todas las moléculas de la multitud se comporten de forma diferente. Por ejemplo, cuando el sudor se evapora, solo las moléculas con más energía logran escapar. La consecuencia es que la velocidad media de las que se quedan atrás disminuye. Por eso sudar nos enfría: las moléculas que escapan se llevan consigo mucha energía.

En general, la ropa tarda bastante en secarse. Es un proceso pacífico. De vez en cuando, una molécula de agua particularmente energética se encuentra en la superficie del agua con la energía suficiente para escapar, y se marcha flotando. Pero no tiene por qué

sucedan siempre así, y, de hecho, la evaporación violenta puede ser muy útil, especialmente cuando estás cocinando. Resulta que la fritura, un método de cocción que suele considerarse «seco», le debe muchísimo al agua.

Mi fritura favorita es la de queso halloumi, algo que siempre he considerado como la alternativa vegetariana al beicon tradicional. Para hacerlo, caliento aceite en una sartén de fondo grueso mientras voy troceando el queso en tiras largas. En silencio, el aceite va subiendo de temperatura hasta que alcanza unos 180 °C, y si no sintiera su calor, nunca me daría cuenta de que algo está ocurriendo. Pero en cuanto echo las primeras tiras de queso, la paz se ve interrumpida por unos fuertes chasquidos y por chisporroteos. En cuanto el queso entra en contacto con el aceite ardiente, su capa más superficial se calienta hasta alcanzar casi la misma temperatura que el aceite en apenas una fracción de segundo. Las moléculas de agua de la superficie del queso tienen de pronto muchísima energía adicional, mucha más de la que necesitan para escapar del líquido y alejarse flotando en forma de gas. Así que se apartan violentamente las unas de las otras, produciendo una serie de pequeñas explosiones gaseosas en el momento en que las moléculas se liberan del líquido. Estas burbujas de gas son lo que veo en la superficie del queso, y es de ahí de donde proviene el ruido. Pero las burbujas juegan un papel importante. Mientras el agua gaseosa siga brotando del queso, el aceite no podrá entrar. Apenas puede tocar la superficie, solo lo justo para transmitir energía térmica. Por eso, freír alimentos a temperaturas bajas hace

que sean grasientos y blanduzcos: las burbujas no se forman lo suficientemente rápido como para mantener el aceite a raya. Mientras se cocina el queso, algo de calor se transfiere a su volumen y así es como se calienta. Los bordes exteriores sueltan mucha agua, porque la temperatura es demasiado elevada para que el agua líquida pueda quedarse ahí. Por eso la superficie exterior está crujiente, porque se ha secado. La tostadura surge de las reacciones químicas que se dan cuando las proteínas y los azúcares del queso se calientan. Pero la súbita transición de agua líquida a gaseosa es el quid de la fritura. Y freír comida implica que habrá chisporroteo: si lo estás haciendo bien, no hay forma de evitarlo.

* * * *

La transición de gas a líquido, y viceversa, ocurre sin cesar a nuestro alrededor. Pero la transición de líquido a sólido, y viceversa, no la vemos tan a menudo. La mayoría de los metales y los plásticos se funden a una temperatura que está muy por encima de las temperaturas con que convivimos en nuestra vida diaria. Las moléculas más pequeñas como el oxígeno, el metano y el alcohol se funden a unas temperaturas extraordinariamente bajas, la clase de temperaturas que requieren congeladores más sofisticados. El agua es una molécula inusual, ya que se funde y se evapora a temperaturas que se dan a nuestro alrededor con bastante frecuencia. Pero cuando pensamos en el agua congelada, solemos pensar en los polos norte y sur de la Tierra. Son fríos, blancos y

siempre los asociamos a las grandes expediciones del siglo XX que llevaron a los humanos a algunos de los entornos más inhóspitos del planeta. La congelación del agua les ocasionó muchos problemas, pero a veces también les proporcionó soluciones inesperadas.

La transición de gas a líquido se basa en que las moléculas se aproximan lo suficiente entre ellas hasta que se tocan, mientras siguen moviéndose con la libertad suficiente para fluir las unas sobre las otras. La transición de líquido a sólido está relacionada con el momento en que esas moléculas se quedan fijas en su sitio. La congelación del agua es el ejemplo más común de este hecho, pero casi nada se congela de la misma forma que el agua. En ningún sitio es más visible esta peculiaridad que en el gélido norte: el océano Ártico.

Si viajas al punto más septentrional de Noruega, te sitúas en la costa y miras todavía más al norte, verás el mar. Durante los meses de verano en los que no hay hielo, la luz del sol alimenta las veinticuatro horas del día a enormes bosques móviles de plantas oceánicas diminutas, un festín estacional que atrae a peces, ballenas y focas. Entonces, hacia el final del verano, la luz empieza a desaparecer. La temperatura de la superficie del agua, que solo había alcanzado los 6 °C incluso en el cenit del verano, empieza a caer. Las moléculas de agua, que se deslizan y se escurren las unas sobre las otras, se ralentizan. El agua es tan salada aquí que puede llegar a -1,8 °C y mantenerse líquida. Pero en una noche oscura y despejada, empieza a formarse el hielo. Una lámina de hielo puede

ser transportada por el aire hasta el agua, y si las moléculas de agua más lentas se encuentran con él, se le pegarán. Pero no se pueden pegar en cualquier sitio. Cada molécula nueva se coloca en un lugar fijo en relación con las demás, y el revoltijo de moléculas animadas es sustituido por un cristal en el que las moléculas de agua perfectamente ordenadas forman un entramado hexagonal. Y a medida que la temperatura sigue cayendo, el cristal de hielo aumenta de tamaño.

Lo más raro de los cristales de agua es que las moléculas rigurosamente alineadas ocupan más espacio en este momento que cuando estaban correteando por un ambiente cálido. En casi todas las demás sustancias, el hecho de que las moléculas se colocaran en una cuadrícula regular haría que estuvieran más cerca las unas de las otras que cuando se las dejara moverse libremente. Pero el agua no se comporta así. Nuestro cristal en aumento es menos denso que el agua de alrededor y, por lo tanto, flota. Al congelarse, el agua se dilata. Si no fuera así, el hielo recién congelado se hundiría, y los océanos polares tendrían un aspecto muy distinto. Pero tal como funcionan las cosas, la temperatura sigue cayendo, el hielo se dilata al tomar forma, y el océano se procura una sólida capa de agua blanca.

Hay muchas cosas emocionantes en el gélido Ártico: los osos polares, el hielo, la aurora boreal... Pero, a mí personalmente, hay una parte de la historia del Ártico que me apasiona; una historia que nos habla de las peculiaridades del hielo cuando se forma y de cómo colaborar con la naturaleza en lugar de luchar contra ella.

Una historia sobre un buque regordete y ancho que sobrevivió a uno de los viajes más extraordinarios de la historia de las exploraciones polares. El nombre de ese buque es *Fram*.

A finales del siglo XIX, los exploradores se sentían atraídos por el Polo Norte. No se encontraba demasiado lejos de la civilización occidental, y, además, las partes septentrionales de Canadá, Groenlandia, Noruega y Rusia ya habían sido visitadas y cartografiadas, aunque fuera de manera aproximada. En cambio, el Polo Norte seguía siendo un misterio. ¿Era tierra firme o solo mar? Nadie había llegado al polo jamás, así que no se sabía. Aquel periplo derrotaba a los exploradores una y otra vez porque el hielo marino aumentaba y se contraía y no dejaba de cambiar. Cuando cambiaban las condiciones meteorológicas, el hielo marino podía apilarse sobre sí mismo, creando rugosidades y seísmos. El agarre de este hielo podía hacer los barcos añicos. El buque norteamericano *Jeannette* sufrió este típico destino en 1881, quedando atrapado en el hielo marino durante meses a poca distancia de la costa norte de Siberia. A medida que bajaban las temperaturas y las moléculas de agua marina se fijaban en el fondo del entramado de hielo de la superficie marina, el hielo en expansión se pegaba al casco del barco. Tras varios meses de expansión y contracción del hielo, que primero apretaba y luego soltaba el barco, el *Jeannette* sucumbió y quedó aplastado. Los exploradores que salían al hielo sólido desde sus navíos se enfrentaban a varios peligros: el hielo se podía fundir y abrir enormes canales, que era imposible franquear sin un barco. Desde

cualquiera de los países del círculo polar ártico había cientos de kilómetros hasta el polo, y el hielo cambiante era un tremendo obstáculo.

Tres años después del hundimiento, los inconfundibles restos del *Jeannette* aparecieron cerca de Groenlandia. Fue un hallazgo asombroso porque el pecio había cruzado el Ártico de un lado al otro. Los oceanógrafos se preguntaban si había una corriente que saliera de la costa siberiana, atravesara el Polo Norte y siguiera hasta Groenlandia. Y a un joven científico noruego llamado Fridtjof Nansen se le ocurrió algo de lo más audaz. Si pudiera construir un barco capaz de resistir el hielo, podría llevarlo a Siberia y dejar que se congelara en el hielo en el mismo lugar en que el *Jeannette* había naufragado; y quizás tres años más tarde aparecería en Groenlandia. Pero uno de los aspectos cruciales era que, de camino, Nansen pudiera pasar por encima del Polo Norte. Sin expediciones a pie o en barco..., simplemente dejando que el hielo y el viento se encargaran de todo el trabajo. El único problema era la espera. Como recompensa por su idea, Nansen fue tildado de genio y, a la vez, ridiculizado como un loco. Pero, aun así, no se dio por vencido. Consiguió el dinero y contrató a uno de los mejores arquitectos navales de la época, porque el barco debía superar a cualquiera de los que habían surcado los océanos. Y así es como nació el *Fram*.

La dificultad residía en que, a medida que se congela el agua, sus moléculas deben posicionarse en el sitio que las corresponde dentro del rígido entramado. Si la temperatura desciende lo suficiente, se quedarán pegadas. Y si no tienen espacio para colocarse en su

lugar, empujarán todo cuanto las rodea para poder hacerse sitio. Los barcos que se habían quedado varados en el hielo sufrían porque el hielo ocupaba cada vez más espacio al dilatarse, y nadie sabía el grosor que aquel podía alcanzar en pleno Ártico. El *Fram* resolvió este problema de una forma admirablemente sencilla. Se construyó para que fuera regordete y ancho, con solo 39 metros de eslora y 11 de manga. El casco era curvado y liso, prácticamente no tenía quilla y los motores y el timón se podían elevar para sacarlos del agua. Cuando llegó al hielo, el *Fram* se convirtió en un bol flotante. Y si aprietas desde abajo algo curvo como un bol o un cilindro, lo que hará será moverse hacia arriba. Si la opresión del hielo era demasiado fuerte, lo único que le ocurriría al *Fram*—teóricamente, al menos— sería que al final acabaría empujado hacia arriba para quedar asentado sobre el hielo. Estaba hecho de una madera que, en algunas de sus partes, superaba el metro de ancho, y gozaba de un buen aislamiento para mantener caliente a la tripulación. En junio de 1893, zarpó de Noruega acompañado de un enorme apoyo popular y de una tripulación de trece miembros que lo llevarían alrededor de la costa norte de Rusia hasta llegar al lugar en donde el *Jeannette* se había hundido. En septiembre avistaron hielo cerca de los 78 °N, y poco después el barco se encontró totalmente rodeado de él. Cuando el hielo empezó a atraparlo, crujió y gimió, pero a medida que se dilataba a su alrededor, el *Fram* se iba elevando, exactamente como se había previsto. Aun atrapado por el hielo, el buque seguía su camino.

Durante los tres años siguientes, el *Fram* flotó junto con el hielo marino, dirigiéndose hacia el norte con una lentitud desesperante: no recorría más de una milla diaria. A veces retrocedía o giraba sobre sí mismo. El caprichoso hielo lo apretaba y lo volvía a soltar, y el barco se elevaba o bajaba en consecuencia. Nansen mantenía a la tripulación ocupada con mediciones científicas, pero el lento avance era cada vez más frustrante. Cuando el *Fram* llegó a los 84 °N, se hizo evidente que no iba a llegar al polo, que estaba a 410 millas náuticas. Nansen escogió a un acompañante y se bajó del barco para esquiar en el hielo e intentar llegar a donde su barco no podía. Estableció un nuevo récord llegando más al norte que nadie antes, pero aun así se quedó a 4° del polo. Siguió a través del Ártico hacia Noruega y, en 1896, se encontró con otro explorador, Franz Josef Land. El *Fram* y los otros once miembros de la tripulación continuaron su camino, y el hielo los llevó a la latitud 85,5 °N, apenas unas millas más al sur del nuevo récord de Nansen. El 13 de junio de 1896, se soltó del hielo al norte de Spitsbergen, justo donde habían planeado originalmente.

Aunque el *Fram* nunca llegara al polo, las mediciones científicas que se tomaron durante su viaje fueron de un valor incalculable. Se pudo saber con toda certeza que el Ártico era un océano y no tierra firme, que el Polo Norte estaba escondido bajo una capa cambiante de hielo marino y que sí que existía una corriente que cruzaba el Ártico entre Rusia y Groenlandia. El *Fram* emprendió otros dos grandes viajes. El primero fue una expedición cartográfica en el Ártico canadiense de cuatro años de duración. Y el segundo, en

1910, llevó a la Antártida a Amundsen y a sus hombres, quienes llegarían al Polo Sur antes que el capitán Scott. Hoy descansa en su propio museo en Oslo, elogiado como el mayor símbolo de la exploración polar noruega. En lugar de luchar contra la inexorable expansión del hielo, el *Fram* se había servido de ella para cruzar el extremo superior del mundo.

La expansión del hielo cuando se congela nos es tan familiar que ni siquiera reparamos en ella. Si ponemos un cubito en la bebida, flota: así es como funcionan las cosas. Pero hay una forma muy fácil de comprobar que el agua congelada es exactamente igual que la líquida, solo que ocupa más espacio. Si pones agua en un vaso transparente y añades unos cuantos trozos de hielo de gran tamaño, verás que estos flotan mientras que la mayor parte del hielo queda por debajo de la superficie del agua, excepto un 10% que sobresale por encima del nivel del líquido. Puedes marcar con un rotulador este nivel en la parte exterior del vaso. La pregunta es: a medida que el hielo se derrita, ¿el nivel del agua subirá o bajará? Cuando se haya derretido, todas esas moléculas de agua que están sobresaliendo por encima del nivel del agua tendrán que unirse al resto del líquido. ¿Significa esto que el nivel del agua subirá? Esto es auténtica física coctelera para compartir en las fiestas, si es que tienes la paciencia suficiente —o estás lo suficientemente aburrido— para ponerte a observar cómo se derrite el hielo en una fiesta.

La respuesta es sencilla, y, si no me crees, deberías comprobarlo por ti mismo. El nivel de agua no cambiará en absoluto. Cuando las moléculas del hielo se vuelvan líquidas de nuevo, se podrán colocar

aún más juntas. Esto significa que cabrán perfectamente en el hueco que la parte sumergida del hielo estaba ocupando. Esa parte del cubito de hielo que sobresale por encima del nivel del agua es exactamente del mismo tamaño que el volumen adicional que el cubito ha adquirido a causa de su dilatación en el momento de la congelación. No puedes ver a los átomos en su cuadrícula, pero sí puedes ver el espacio adicional que necesitan cuando se congelan⁵⁰. El agua se transforma del estado líquido al sólido de una forma muy particular: los átomos del sólido tienen un sitio específico dentro de la cuadrícula. A esto se lo llama cristal incluso cuando no es el brillante foco de atención de una tiara. Un material cristalino no es otra cosa que un material cuya estructura fija se repite en el estado sólido, como es el caso de la sal o del azúcar. Pero existe otro tipo de sólidos que no tienen este posicionamiento estricto. La estructura de tales sólidos se parece más a la de un líquido congelado en camino hacia otro sitio. A pesar de que su posicionamiento atómico esté ocurriendo en una escala minúscula y que sea demasiado pequeño para que podamos verlo, a veces podemos llegar a ver el efecto que tiene en un objeto que hayamos cogido. El ejemplo más obvio es el del cristal. Recuerdo que la primera vez que vi sopladores de vidrio fue en un viaje que hice con mi familia a la isla de Wight cuando tenía unos ocho años de edad. Quedé fascinada por los delicados glóbulos de vidrio derretido y por cómo brillaban y se hinchaban cual si fueran globos, cambiando constantemente su hermosa forma bulbosa. Al irnos, prácticamente tuvieron que arrastrarme, porque yo habría podido pasarme todo el día

observando esa magia, la que iba haciendo fluir unas gotas que finalmente se convertían en jarrones. Esto ocurrió mucho antes de que pudiera hacer lo que realmente quería: probarlo por mí misma. Pero una fría mañana de aquel mismo año, mi prima y yo llegamos a una casita de piedra en la que alguien iba a descorrer la cortina y a enseñarnos cómo se hacía la magia.

Todo empezó con un charquito de vidrio fundido en un pequeño horno que era de color naranja brillante porque estaba a la tremenda temperatura de 1080 °C. Protegidas con guantes de kevlar, seguimos las instrucciones y metimos unas largas varas de hierro en el charco y las giramos para que el vidrio meloso se fuera enrollando en el hierro a medida que íbamos girándolo. Esta era la parte fácil. Lo difícil era todo lo demás. El soplado de vidrio es como un convencimiento controlado, y había tres formas de persuasión que podíamos aplicar. Calentar el vidrio hace que se ablande. Manteniéndolo quieto se consigue que la gravedad lo atraiga hacia abajo sin tener que tocarlo. Y si la vara de hierro es hueca, puedes soplar burbujas en esa masa amorfa y derretida.

Nos fuimos turnando para practicar los tres métodos, y lo que más nos sorprendió fue la rapidez con que cambia la naturaleza del vidrio. Cuando sale la masa fundida del horno, tienes que girar continuamente el hierro porque está muy líquida; si dejas de hacerlo, goteará en el suelo. Al cabo de unos minutos ya pudimos hacer rodar la masa por un banco de trabajo, y entonces parecía tener la consistencia de la plastilina. Apenas tres minutos después, podías dar un golpecito en el banco y oír el típico «chin» que

esperarías de un objeto de cristal sólido. Lo divertido del vidrio es que estás manipulando un líquido, jugando con la suavidad y las curvas que ofrecen los líquidos. Un pedazo de vidrio sólido y frío no es más que un líquido que fue interrumpido y congelado en el tiempo como un personaje de cuento de hadas. El carácter del vidrio viene de la forma en que los átomos se mueven en torno unos de otros. Su modalidad más común —con la que estábamos practicando— es el vidrio de cal sodada. Básicamente está compuesta de sílice —dióxido de silicio, SiO_2 , el componente principal de la arena—, pero también contiene una pizca de sodio, calcio y aluminio. Lo que confiere al vidrio su característica peculiaridad es que sus átomos, en lugar de tener lugares fijos en una cuadrícula regular, están todos desordenados. Cada átomo está conectado con los de alrededor, y no habrá demasiado espacio libre entre ellos, pero es todo bastante caótico. A medida que el vidrio se calienta, los átomos se revuelven todavía más, separándose muy poco, y como no tienen que adoptar una posición fija obligatoriamente, les resulta muy fácil ir deslizándose unos encima de otros. El vidrio fundido que cogimos del horno estaba compuesto de átomos provistos de muchísima energía térmica y que se podían deslizar con facilidad por encima de los demás mientras la gravedad los atraía hacia abajo. Pero a medida que se iban enfriando en el aire, los átomos se movían un poco menos, estableciéndose un poquito más cerca los unos de los otros, y por eso el líquido se volvió más viscoso.

Lo más ingenioso del vidrio es que, a medida que se enfría, los átomos no tienen tiempo de colocarse en un patrón regular tipo huevera, así que no lo hacen. El vidrio se solidifica cuando los átomos son ya demasiado lentos para poder deslizarse por encima de los demás. No es fácil definir con exactitud la demarcación entre líquido y sólido.

Nuestra primera tarea era hacer una esfera, lo que era una forma elegante de decir que nosotras soplábamos para hacer una burbuja de vidrio y luego observábamos a la profesora cómo fijaba un círculo de vidrio fundido en la parte superior. Hacer la burbuja costaba trabajo; cuando terminé, me dolían tanto las mejillas que parecía que acabara de hinchar un globo especialmente tozudo. La parte más delicada del proceso viene justo al final, cuando se debe separar la pieza de vidrio ya terminada de la vara de hierro. Tienes que tirar y moldear el vidrio para que quede una fina protuberancia donde quieres separarlo. Entonces limas esa protuberancia para introducir unas grietas diminutas, y luego llevas todo al banco de finalización, lo golpeas en el hierro con muchísimo cuidado, y así la burbuja de vidrio se despega. Todo iba a la perfección hasta que llegamos a la última burbuja, ya que las grietas que acabábamos de hacer no quisieron esperar: la esfera se soltó del extremo de la vara justo cuando estaba ya casi terminada, se estrelló contra el suelo de hormigón y rebotó. Dos veces. La profesora lo recogió todo muy rápidamente y no pasó nada. Pero esa delicada membrana de vidrio había rebotado. Y parece ser que de haber caído un minuto más tarde, cuando habría estado algo más fría, se habría hecho añicos.

Esta era la lección del vidrio. El comportamiento de sus átomos depende de su temperatura. Cuando está caliente, los átomos pueden fluir libremente los unos sobre los otros. Si lo enfrías lo suficiente como para que no esté pegajoso, los átomos se podrán apretar y rebotar, lo que hará que el vidrio, a su vez, rebote. Si está todavía un poco más frío, los átomos estarán completamente congelados en su posición. Cualquier átomo que sea empujado fuera de su sitio abrirá una grieta en un sólido frágil y quebradizo, y el cristal puede acabar reducido a afiladas esquirlas. El vidrio es enormemente satisfactorio porque captura la belleza curvilínea de un líquido sin que tengas que preocuparte de hacia dónde va este. Tiene la estructura atómica de los líquidos —una muchedumbre bastante caótica—, pero sin duda es un sólido. Su rebote lo delata: la elasticidad es algo propio de los sólidos, no de los líquidos. Y puedes observar las consecuencias de esa estructura en la forma de comportarse del material cuando la temperatura cambia.

Este puede ser un buen momento para desmontar algunos mitos sobre las ventanas viejas. A veces se ha dicho que lo que hace que las ventanas de hace trescientos años sean más anchas en la base que en la parte superior es que el cristal ha ido escurriéndose hacia abajo con el paso del tiempo. No es verdad. El vidrio de las ventanas no es un líquido y, por tanto, no está fluyendo hacia ningún sitio. Esto ocurre porque esas hojas de vidrio fueron hechas mediante un método increíblemente ingenioso: una masa de vidrio fundido se pegaba en una vara de hierro, la cual era girada muy rápidamente hasta que el cristal fluía hacia un disco plano⁵¹. Después, este disco

se enfriaba y se cortaba para hacer las hojas de las ventanas. El inconveniente de este método es que el disco siempre será más grueso en el centro. Las hojas de las ventanas con forma de rombo se cortaban dejando la parte más gruesa en un extremo, y cuando se ponían en la ventana, el lado más grueso solía colocarse abajo para que la lluvia cayera con más facilidad. De modo que el vidrio no se movía hacia abajo; fue puesto así a propósito.

A nuestras burbujas de vidrio no se les permitió enfriarse enseguida. Las metieron en un horno toda la noche, en donde la temperatura iría bajando poco a poco hasta alcanzar la temperatura ambiente por la mañana. Se hacía así porque cuando el vidrio es sólido, los átomos no están totalmente fijos en su lugar. Si calientas algo, su distribución atómica cambia ligeramente, incluso si el cambio de temperatura no es lo suficientemente notable para convertir algo sólido en líquido. Lo mismo ocurrió cuando las burbujas de vidrio se enfriaron: los átomos se movieron un poco. El horno se usa para que esa redistribución ocurra de forma lenta y uniforme en toda la estructura. Si esta redistribución fuera desigual, las fuerzas internas desequilibradas podrían quebrar el vidrio. Y, una vez más, esas presiones internas adicionales son producto del mismo principio: las posiciones de los átomos pueden ser fijas, pero la distancia entre los átomos contiguos no lo es. Cuando calentamos algo, por regla general aumenta de tamaño.

* * * *

Los dispositivos de medición digital tienen muchas ventajas, pero también un inconveniente muy claro: nos desconectan totalmente de lo que la medición significa realmente. Una de las pérdidas más sentidas es la del termómetro de cristal, una herramienta esencial en laboratorios y hogares durante dos siglos y medio. Todavía se venden y, de hecho, yo todavía los uso en mi laboratorio, pero en muchos sitios han sido sustituidos por sus alternativas digitales. La línea brillante de mercurio que recuerdo de mi infancia ha sido sustituida por alcohol coloreado, pero la versión moderna es, en esencia, igual que el dispositivo que Fahrenheit inventó en 1709. Se trata de una estrecha varilla de cristal con un tubito en el centro que va de lado a lado. En el extremo inferior, el tubo se ensancha hasta formar una especie de bulbo, una reserva de líquido. Si metes este extremo del termómetro en cualquier sitio —en la bañera, bajo la axila, en el mar—, ocurre algo tan sofisticado como sencillo. La temperatura está directamente relacionada con la cantidad de energía térmica de la materia en cuestión. En los líquidos y los sólidos, la energía térmica se expresa mediante el movimiento de los átomos y de las moléculas. Si metes el termómetro en la bañera, estarás rodeando el cristal frío de agua caliente. Las moléculas del agua se mueven más rápidamente, de modo que sacudirán a los átomos del cristal, proporcionándoles la energía que necesitan para corretear con mayor rapidez. Aquí el calor viaja por conducción. Así que cuando metes el termómetro en la bañera, la energía térmica fluye hacia el interior del cristal. Los átomos del cristal no van a ningún sitio, simplemente se mueven nerviosos por el lugar,

vibrando de un lado a otro. La temperatura del cristal es la medición de ese nerviosismo, y ahora el cristal está más caliente que antes. Entonces, los átomos del cristal chocan con el alcohol del líquido hasta que este también empieza a moverse más rápido. Esta es la primera parte del proceso, en la que el bulbo del termómetro se calienta hasta alcanzar la temperatura de su alrededor.

Cuando los átomos de un sólido vibran más rápido a causa de un calor adicional, empujan ligeramente a los que tienen cerca. El cristal ocupa más espacio cuando está caliente porque sus nerviosos átomos necesitan ese espacio. Por eso las cosas se dilatan cuando se calientan. Pero las moléculas de alcohol se separan mucho más a medida que ganan velocidad, lo que hace que el alcohol se dilate unas treinta veces más que el cristal cuando están expuestos al mismo cambio de temperatura. Ahora el alcohol que hay en el bulbo del termómetro ocupa mucho más espacio que antes, pero el único espacio extra que hay se encuentra en la parte superior del tubo. Así que a medida que las moléculas del alcohol vibran y se empujan las unas a las otras, el líquido sube por el tubo. La distancia que recorre está directamente relacionada con la energía térmica de sus moléculas, y las marcas del termómetro corresponden a la cantidad de energía térmica del líquido. Es hermosamente simple. Cuando el líquido del bulbo se enfría, el alcohol ocupa menos espacio a medida que sus moléculas pierden velocidad. Cuando se calienta, ocupa más espacio porque sus moléculas vibran con más energía. Así que leer un termómetro de cristal es medir cuánto se están empujando los átomos.

Cada material se dilata en una proporción distinta al calentarse. Por eso dejar correr agua caliente sobre la tapa de un bote de mermelada que se ha quedado pegada puede ser muy útil: tanto el cristal como la tapa de metal se dilatarán, pero el metal se dilata mucho más que el cristal. Cuando se ha dilatado es mucho más fácil de abrir, ya que, aunque la diferencia en el tamaño sea demasiado pequeña para poder percibirla, sí que notamos el resultado.

En general, los sólidos se dilatan menos que los líquidos cuando se calientan. La dilatación es solo una pequeña fracción del volumen total, pero basta para que se note la diferencia. La próxima vez que cruces andando un puente, fíjate en las bandas de metal que hay a cada lado de la carretera. Seguramente estén compuestas de dos placas dentadas con forma de peine. Son juntas de dilatación y, una vez que reparas en ellas, te das cuenta de que son bastante comunes. La idea es que, cuando la temperatura suba y baje, los peines permitan que los materiales del puente se dilaten y se contraigan sin que se rompan ni se quiebren. Si las secciones del puente se dilatan, los dientes de los peines son empujados hacia delante; si el puente se contrae, los dientes se mueven hacia atrás sin que ello abra un gran socavón en la carretera.

La dilatación térmica puede resultar elegante y útil en un termómetro, pero a escalas mayores puede tener graves consecuencias. Uno de los problemas que causan los gases de efecto invernadero que los humanos emitimos es que el nivel del mar sube constantemente. Hoy en día, la subida global media es de unos tres

milímetros por año, y va en aumento. A medida que los glaciares y las capas de hielo se derriten, el agua que estaba fija sobre la tierra se encuentra ahora fluyendo hacia el mar, lo que significa que hay más agua en los océanos. Pero eso supone aproximadamente la mitad de la subida actual. La otra mitad proviene de la dilatación térmica. A medida que los océanos se calientan, van ocupando más espacio. La estimación más aproximada actualmente es que el 90% de la energía adicional que la Tierra ha adquirido a causa del calentamiento global ha terminado en los océanos, y esa subida adicional del nivel del mar es la consecuencia.

* * * *

El mes de agosto en la meseta Antártica Oriental es tranquilo y silencioso. Mientras el hemisferio norte disfruta del verano, la Antártida gira en la oscuridad en la parte inferior del mundo. En la cordillera de altas montañas que atraviesa la meseta, es casi el final de una noche que ha durado cuatro meses. Aquí nieva muy poco, pero el grosor de la superficie del hielo es de unos seiscientos metros. El clima es apacible. La energía térmica se está escapando constantemente hacia el cielo estrellado, y no hay luz solar que la sustituya. Este déficit significa que, a lo largo de la cordillera de altas montañas, la temperatura constante es de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. El 10 de agosto de 2010, una ladera alcanzó los $-93,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura más fría jamás registrada en la Tierra.

En los cristales de hielo que forman la nieve, la energía térmica se almacena en forma de energía cinética a medida que los átomos se mueven alrededor de la posición que tienen asignada en el hielo sólido. Así que la respuesta a la pregunta « ¿Cuánto frío puede llegar a hacer?» parece fácil: la temperatura más fría posible será el punto en el que los átomos se detengan por completo. Pero incluso en el lugar más frío del planeta, en donde no hay vida ni luz, sigue habiendo movimiento. La meseta entera está formada por átomos que se agitan, y tienen más o menos la mitad de la energía cinética que tendrían justo antes de que el hielo se derrita a los 0 °C. Si pudieras quitarles hasta el último resto de esa energía, estarían todo lo fríos que pueden llegar a estar. A esta temperatura se la denomina cero absoluto y corresponde a $-273,15$ °C. Es igual para todos los átomos y en cualquier situación, y nos indica que no hay nada de energía térmica. En comparación, incluso la Antártida en pleno invierno, el lugar más frío del planeta, parece bastante cálida. Afortunadamente, supongo, es muy difícil ralentizar los átomos hasta que se detienen por completo. Hace falta mucha ingenuidad para estar seguro de que nada de lo que hay alrededor transferirá energía a tu muestra y la echará a perder. Pero hay científicos que consagran sus vidas a inventar métodos extremadamente inteligentes para retirar la energía térmica de la materia. Es el campo de la criogenia, y está abriendo la puerta a dispositivos que son útiles incluso en el cálido mundo en el que vivimos, en especial los imanes mejorados y la tecnología de las imágenes médicas. Sin embargo, simplemente pensar en tener mucho frío nos resulta muy

incómodo a la inmensa mayoría, así que ver a los patos moverse por el hielo con sus patas al aire y su particular balanceo puede resultar desconcertante. Winchester es un lugar precioso del sur de Inglaterra, con una catedral antigua y un sinfín de salas de té extremadamente inglesas en las que se sirven grandes bollos en refinados platitos de porcelana. Puede ser espectacular en verano, cuando hay flores de mil colores y un cielo espectacularmente azul que le dan aspecto de postal. Pero un año llevé a una amiga allí en un día nevoso de invierno, y era aún más bonito. Abrigadas con bufandas y gruesos abrigos, bajamos a buen paso por la calle principal hasta que llegamos al sencillo río del pueblo y al suave manto de nieve intacta que había en las riberas. Lo que más me gusta de Winchester no tiene nada que ver con los edificios de piedra, ni con el rey Arturo, ni con los bollitos. Lo que me había hecho arrastrar a mi amiga por todo el pueblo en un día terriblemente frío era algo mucho más prosaico: los patos. Caminamos una distancia corta por la nieve siguiendo el curso del río y llegamos por fin al lugar.

Justo al llegar, un pato que estaba en la orilla avanzó por el último tramo de hielo y saltó al agua. Y luego hizo exactamente lo mismo que los demás: se puso de cara al agua, chapoteó como un loco y se inclinó para aventurarse en el interior del agua en busca de comida. El río es muy poco profundo en este punto, así que el agua fluye muy rápidamente. Hay plantas en el fondo, fáciles de alcanzar, pero los patos tienen que chapotear frenéticamente para quedarse en un sitio y poder buscar comida. El río de Winchester forma parte de la

rutina de los patos, pero a mí me parece un entretenimiento delicioso. Todos chapotean sin parar, mirando siempre en la misma dirección, y parece que nunca se detienen.

Una niña que teníamos al lado bajó la vista para mirar sus botas cubiertas de nieve, señaló con el dedo a un pato que estaba en la orilla helada y le hizo a su madre una pregunta clave: «¿Por qué a él no se le enfrían los pies?». Su madre no contestó porque justo en ese momento empezó la gran comedia. Uno de los patos chapoteadores se había acercado demasiado a otro, lo que provocó un estallido de graznidos, aleteos y picoteos. Lo más gracioso fue que, con el revuelo de la disputa, se les había olvidado chapotear, así que ambos fueron arrastrados corriente abajo, sin dejar de graznar ni un momento. Tras unos segundos se dieron cuenta de lo rápido que se estaban moviendo, dejaron de pelearse y se pusieron a chapotear para regresar al sitio del que venían. Tardaron un buen rato.

Al agua le faltaba poco para estar congelada, y, aun así, los patos seguramente no sentían frío. Bajo la superficie del agua, los patos esconden una forma extremadamente ingeniosa de prevenir la pérdida de calor a través de los pies. El problema reside en la transferencia del calor. Si pones algo caliente junto a algo frío, las moléculas del objeto caliente —más rápidas y energéticas— chocarán con las moléculas del objeto frío, y de este modo se transfiere la energía térmica del objeto caliente al frío. Por eso el flujo térmico siempre tiene que ir en esa dirección, porque las moléculas cuya vibración sea más lenta no pueden transferir

energía a las que vibran más rápido, pero resulta fácil hacerlo en la dirección contraria. Así que la energía térmica suele ser distribuida hasta que todo está a la misma temperatura y se alcanza el equilibrio. El verdadero problema para los patos es el flujo sanguíneo de sus patas. La sangre proviene del corazón, en el calentito centro del pato, así que está a 40 °C. Si esa sangre se acerca a la gélida agua, perderá su calor muy rápidamente, porque la diferencia de temperatura es muy grande. Así que cuando vuelva al cuerpo del pato, el animal transferirá su calor a la sangre fría y él se enfriará. Los patos pueden restringir un poco el flujo de sangre hacia sus patas, de forma que haya menos sangre con el riesgo de enfriarse, pero eso no soluciona el problema del todo. Por eso aplican un principio mucho más sencillo. Se trata de que, cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre dos objetos que se tocan, más rápidamente fluirá el calor del uno hacia el otro. O, en otras palabras, cuanto más similares sean las temperaturas de dos objetos, más tardará el calor en fluir del uno al otro. Y esto ayuda a los patos una barbaridad.

Mientras los patos chapoteaban frenéticamente, la sangre caliente fluía hacia abajo por las arterias de sus patas. Pero estas arterias se hallan justo al lado de las venas que transportan la sangre desde las patas. La sangre de las venas estaba fría, así que las moléculas de la sangre caliente empujaban las paredes de los vasos sanguíneos, que a su vez empujaban la sangre más fría. La sangre caliente que se dirigía hacia los pies se enfrió un poco, y la sangre que volvía hacia el cuerpo se calentó ligeramente. En la zona inferior de la

pata, las arterias y las venas están normalmente más frías, pero las arterias siguen estando algo más calientes. Así que el calor fluye desde las arterias hacia las venas. En el extremo de las patas, el calor que provenía del cuerpo del pato está siendo transferido a la sangre que vuelve en la otra dirección, sin acercarse a las extremidades del pato. Pero la sangre sí que da la vuelta completa. Para cuando llega a sus patas palmeadas, ya está prácticamente a la misma temperatura que el agua. Y como las patas no están mucho más calientes que el agua, el calor que pierden es ínfimo. Entonces, mientras la sangre sube de camino hacia el centro del pato, la sangre que baja la va calentando. A esto se le llama «intercambiador de calor por contracorriente», y es una forma increíblemente ingeniosa de evitar la pérdida de calor. Si el pato puede asegurarse de que no le llegue calor a las patas, habrá prácticamente eliminado la posibilidad de perder energía de esa forma. Así que los patos pueden corretear tranquilamente por el hielo precisamente porque tienen los pies fríos. Y, a ellos, eso no les importa. Esta estrategia ha evolucionado en infinidad de ocasiones en el reino animal. Los delfines y las tortugas tienen una red de vasos sanguíneos parecidos en sus colas y aletas para poder mantener su temperatura interna cuando nadan en aguas frías. Los zorros árticos disponen del mismo sistema: sus patas están en contacto directo con el hielo y la nieve, pero ellos son capaces de mantener calientes sus órganos vitales. Es algo muy sencillo, pero sumamente eficaz.

Como mi amiga y yo no teníamos forma de aplicar el mismo truco, no duramos demasiado en la nieve. Después de presenciar unas cuantas grescas más entre patos que se peleaban a gran velocidad, y de haber expresado la correspondiente admiración por los que debían de ser los patos más en forma del mundo, nos fuimos a comprar un par de bollos enormes.

* * * *

Tras miles de experimentos llevados a cabo por varias generaciones de científicos, hemos llegado a la conclusión de que la dirección fija del flujo térmico es una ley de la física fundamental. El calor siempre fluirá desde el objeto más caliente al más frío, y esto nunca variará. Sin embargo, esta ley fundamental no dice nada de la velocidad a la que esa transferencia debe ocurrir. Cuando pones agua hirviendo en una taza de cerámica, puedes sujetarla por el asa hasta que el agua se haya enfriado por completo, y no te quemarás porque el asa no se calienta demasiado. Pero si metes una cuchara de metal en agua hirviendo y la sujetas, empezarás a quejarte apenas unos segundos después. El metal conduce el calor con mucha rapidez, mientras que la cerámica lo conduce muy lentamente. Esto debe de significar que a los metales se les da mejor transferir las vibraciones de las moléculas más energéticas. Pero tanto los metales como la cerámica están hechos de unos átomos que se hallan anclados en su sitio y solo pueden vibrar en esa

posición concreta. ¿De dónde viene entonces la diferencia en su conductividad?

La taza de cerámica demuestra lo que ocurre si confías en que átomos enteros se transfieran sus vibraciones. Como hemos dicho, cada átomo empuja al siguiente, y finalmente la energía se va transfiriendo por la cadena. Por eso puedes sostener la taza por el asa sin quemarte, porque este método para transportar energía es lento, y mucha de esa energía se perderá en el aire antes de llegar a tu mano. La cerámica, igual que la madera y los plásticos, son considerados malos conductores térmicos. Pero la cuchara toma un atajo. En los metales, la mayoría de los átomos están fijados en su sitio, como en la cerámica. La diferencia es que cada átomo del metal tiene algunos electrones en su borde que no están unidos a ellos con demasiada firmeza. Más adelante hablaremos sobre los electrones, pero lo que ahora nos importa es que son unas minúsculas partículas con carga negativa alojadas en un enjambre que rodea el exterior del átomo. En la cerámica están fijados a su sitio, pero en el metal pueden cambiar de lugar con los átomos adyacentes, así que mientras los átomos de los metales tienen que permanecer en sus posiciones dentro del entramado, sus electrones tienen libertad para pasearse por doquier. Forman una nube de electrones compartida por todos los átomos del metal y son extremadamente móviles. Y precisamente estos electrones son la clave de la conducción térmica de los metales. En cuanto viertes agua hirviendo en la taza, las moléculas del agua transfieren un poco de energía térmica a las paredes de la cerámica, y desde ahí se

va trasladando poco a poco por toda la taza a medida que los átomos se van chocando los unos contra los otros. Pero en cuanto el agua caliente toca la cuchara, transfiere sus vibraciones a los átomos del metal que están fijos y a su nube de electrones. Los electrones son diminutos, partículas capaces de vibrar y de zumbear por toda una estructura con mucha rapidez. Así que mientras tú sujetas la cuchara, los diminutos electrones se están abriendo paso por el interior del metal, transfiriendo las vibraciones térmicas mucho más rápidamente de lo que los átomos son capaces. Es esta nube de electrones lo que hace que la energía térmica suba hacia el extremo de la cuchara tan rápidamente, calentando a su paso todo el metal. El cobre es, de largo, el mejor metal para esto: conduce el calor cinco veces más rápido que una cuchara de acero. Por eso algunas sartenes tienen la base de cobre, pero las asas están hechas de hierro. De este modo el cobre distribuye el calor con rapidez y equidad por la comida, pero la energía térmica no llega al asa. Una vez demostrada la existencia de los átomos, la siguiente cuestión que se nos plantea es cómo se comportan en las diversas situaciones. Y eso nos lleva directamente a comprender qué es la energía térmica en realidad. Solemos hablar del calor como si fuera un fluido capaz de avanzar a través o hacia el interior o exterior de los objetos que nos rodean. Pero, en realidad, no es más que energía cinética que se va distribuyendo a medida que los objetos entran en contacto mutuo. La temperatura mide justamente esta energía cinética. Podemos controlar la manera de compartir energía usando materiales que sean buenos conductores del calor, como los

metales, o, por el contrario, malos conductores del calor, como la cerámica. Cuando observamos cómo se controla el calor y el frío en nuestra sociedad, vemos que un sistema destaca sobremanera por lo mucho que cambia nuestras vidas. Los humanos invertimos mucho tiempo en asegurarnos de que no pasamos frío, pero cuando se trata de comida y de productos farmacéuticos, tenemos una enorme infraestructura invisible para mantenerlos fríos. Vamos a echar un vistazo a las neveras y los congeladores antes de terminar este capítulo.

Si un pedazo de queso se calienta y sus moléculas aceleran su bailoteo, hay más energía en el sistema, lo que significa que hay más energía disponible para que se den las reacciones químicas. En el caso del queso, esto implica que cualquier microbio que se encuentre en la superficie puede acelerar su fábrica interna e iniciar el proceso de descomposición. Por eso la refrigeración es útil. Si enfriamos la comida, las moléculas se ralentizan, y la energía que se requiere para que los microbios se queden pegados no está disponible. Por eso el queso dura mucho más en la nevera que a temperatura ambiente. Gracias al ingenioso mecanismo que tiene detrás, la nevera enfría el aire de su interior generando más aire caliente en el exterior⁵²¹. El frío nos permite conservar la comida porque limita el cambio de las moléculas.

Imagina cómo sería la vida si no existiera la refrigeración. Y no estoy hablando solo de que no tuviéramos helados ni cerveza fría.

* * * *

Tendríamos que ir a comprar mucho más a menudo, porque la verdura no nos duraría fresca. Tendríamos que vivir muy cerca de una granja si quisiéramos leche, queso o carne, y muy cerca del océano o de un río si quisiéramos pescado. Solo podríamos comer ensalada cuando fuera la temporada de la lechuga. Podemos conservar algunos alimentos encurtiéndolos, secándolos, salándolos o enlatándolos, pero nada de eso sirve si te apetece comer en diciembre un tomate fresco.

Detrás de los supermercados hay una gran cadena de almacenes, barcos, trenes y aviones, todos ellos refrigerados, que les suministran sus productos. Los arándanos cultivados en Rhode Island pueden venderse en California una semana después de su recolección porque desde que fueron arrancados y hasta que se colocan en la estantería del supermercado, en ningún momento se ha permitido que absorbieran la energía suficiente del ambiente que los rodeaba para calentarse. Podemos comer los alimentos a nuestra disposición sin ningún miedo porque han sido privados de energía térmica hasta que han llegado a nuestras manos. Y esto no sucede solo con la comida. Muchos medicamentos también deben mantenerse fríos. Las vacunas pueden estropearse con facilidad si se permite que se calienten, y una de las complicaciones que entraña llevarlas a países en vías de desarrollo es que hay que mantenerlas refrigeradas durante todo el camino. Las neveras y los congeladores que tenemos en nuestras cocinas y en las consultas médicas son el último paso de una cadena ininterrumpida de frío

que se extiende por todo el mundo, conectando granjas y ciudades, fábricas y consumidores. Cuando nos calentamos leche para prepararnos una taza de chocolate caliente, esa es la primera vez que la leche ha estado caliente desde que fue pasteurizada justo después de salir de la ubre de la vaca. Y cuando confiamos en que podemos beberla sin ningún riesgo, estamos confiando en la enorme cadena de frío que nos la ha traído. Los átomos de la leche han sido privados de energía térmica durante todo el proceso, de modo que las reacciones químicas que habrían estropeado la leche han sido prácticamente eliminadas en su totalidad. Evitar que los átomos tengan demasiada energía térmica es lo que hace que nuestros alimentos no entrañen riesgos para la salud.

La próxima vez que metas un cubito de hielo en una bebida, observa cómo se deshace e imagina las diminutas vibraciones atómicas que distribuyen la energía a medida que esta fluye desde el agua hacia el interior del cubito. Aunque no puedas ver los átomos, sí puedes ver las consecuencias de sus acciones.

Capítulo 7

Cucharas, espirales y sputnik

Las reglas del girar

Una de las mejores cosas de las burbujas es que siempre sabes dónde encontrarlas: en las alturas. O bien están de camino hacia lo alto, tambaleándose hacia arriba en peceras o piscinas, o acurrucadas con las demás en la superficie del champán o de la cerveza. No cabe duda: las burbujas siempre encuentran el camino hacia el punto más alto del líquido en el que se encuentran. Pero la próxima vez que remuevas tu té o tu café, observa lo que está ocurriendo en la superficie. La primera cosa curiosa que ocurre es que, a medida que mueves en círculos la cuchara, se abre un agujero en la superficie del té. A medida que el líquido se arremolina, el centro del té se hunde y los bordes se elevan. Y la segunda cosa curiosa es que las burbujas del té están girando tranquilamente en el fondo del agujero. No están en los bordes, el punto más elevado. Permanecen escondidas en el punto más bajo de la superficie, y se quedan ahí. Si las empujas, encontrarán la manera de volver. Si haces más burbujas en los bordes, bajarán en espiral hacia el centro. Curioso comportamiento. Cuando empiezo a remover el té, estoy empujando el líquido con la cuchara. Lo empujo hacia delante, pero no puede avanzar mucho porque enseguida se topa con la pared de la taza. Si hiciera lo mismo con una cuchara en una piscina, el agua de delante de la cuchara avanzaría hacia delante, y seguiría avanzando hasta mezclarse con el resto del agua.

Pero en la taza no hay espacio para que eso ocurra. Aunque la pared de la taza no se vaya a mover, eso no significa que no empuje a su vez cualquier líquido que choque contra ella. Es una pared, y el té no puede atravesarla. Puesto que el té no puede avanzar en línea recta, empieza a moverse por la taza en círculos. Pero a medida que avanza, se va acumulando en las paredes porque ellas son las únicas que pueden empujarlo hacia atrás. El té seguirá intentando avanzar en línea recta, y la única razón por la que se mueve en círculos es porque está siendo obligado a girar.

Esta es la primera lección sobre cosas que giran. Si de pronto las liberaras de sus restricciones, seguirían moviéndose en la misma dirección que en el momento de la liberación. Imagina un lanzador de disco que gira sobre sí mismo mientras sujeta el disco. Tras algunas rotaciones, el disco se está moviendo a una velocidad increíblemente rápida, pero permanece en su círculo porque está siendo sujetado con firmeza. El atleta tiene que llevarlo continuamente hacia el centro del giro, siguiendo la línea de su brazo. En el instante en que lo suelta, el disco avanza en línea recta en la misma dirección y con la misma velocidad que tenía antes de ser soltado.

Mientras remuevo el té, se forma un agujero en el líquido porque todas las partes del té intentan moverse en línea recta, pero eso hace que se suba por los laterales de la taza y, por lo tanto, queda menos en el centro. Cuando dejo de remover, el agujero sigue ahí porque el líquido sigue girando. A medida que el remolino se va deteniendo, el empuje que hace que el té siga moviéndose en

círculos es menor, y por eso hay menos líquido acumulado en los laterales. Podemos apreciar todo esto en los líquidos porque tienen libertad de movimiento, así que pueden cambiar de forma.

Y en el centro de los círculos, las burbujas siguen girando. Lo que nos dice su presencia en el centro es que ese es el lugar menos favorable para ellas. Cuando tenemos un vaso de cerveza sobre la mesa, las burbujas suben hacia la superficie porque la cerveza está ganando la competición para quedarse más cerca del fondo. Y lo mismo pasa con el té. Las burbujas están en el medio porque el té está ganando la competición para moverse hacia los laterales. El líquido es más denso que el gas, así que el gas flota hacia el espacio restante.

Nuestra civilización está repleta de cosas que giran, como las secadoras, los lanzadores de discos, las tortitas y los giroscopios. La propia Tierra gira mientras rodea el Sol. Girar es importante porque te permite hacer un montón de cosas interesantes que a veces requieren fuerzas enormes y montones de energía, sin llegar a moverte del sitio. Lo peor que puede ocurrir es que termines donde empezaste. Las burbujas del té no son más que el comienzo. Este mismo principio explica también por qué no lanzarías un cohete desde la Antártida y cómo miden los médicos si tienes suficientes glóbulos rojos. Girar también podría tener un papel importante en la red eléctrica del futuro. Y todas estas posibilidades provienen de una restricción: lo único que no se puede hacer mientras se gira es avanzar en línea recta.

Cuando giras sin parar en un círculo, debe haber algo que te esté atrayendo o empujando hacia dentro, obligándote a cambiar de dirección constantemente. Esto sucede en cualquier cosa que gire, cualquiera que sea su situación. Si esa fuerza adicional se elimina, simplemente seguirás avanzando en línea recta. Así que si quieres moverte en círculo, necesitas algo que te proporcione un empuje adicional hacia el interior. Cuanto más rápido vayas, más fuerte tendrá que ser ese empuje, porque cuanto más rápido quieras girar, más fuerza necesitarás. A los deportes espectáculo les vienen muy bien los circuitos, ya que se benefician de lo mismo que cualquier cosa que gire. Puedes alcanzar velocidades enormes sin siquiera moverte del sitio, y seguro que no te moverás de donde los espectadores pueden verte. Para poder recibir el empuje suficiente hacia el interior que haga posible la permanencia en pista, en algunos deportes se ha ampliado la construcción de los circuitos. El ciclismo en pista es el mejor ejemplo. Pero lo que a mí me aterrorizó cuando intenté practicarlo no fueron las distancias..., sino lo empinada que estaba la pista. Siempre me ha gustado montar en bicicleta, pero aquello era harina de otro costal. El interior del velódromo olímpico de Londres es un espacio brillante y de grandes dimensiones y extrañamente silencioso. Cuando entras en ese espacio de quietud, te equipan con una bicicleta delgada y aparentemente poco agradable que no tiene frenos sino una sola marcha y el sillín más incómodo que he probado en mi vida. Cuando estuvo reunido todo el grupo de la clase de principiantes, salimos hacia la pista haciendo clop, clop, clop y nos agarramos al

pasamos mientras encajábamos los pies en los pedales. La pista parecía gigantesca. Tiene dos lados rectos muy largos, y luego las grandes secciones inclinadas a cada lado que se alzaban sobre nuestras cabezas. Son tan empinadas —llegan a alcanzar los 43 °C— que parece que, en el fondo, el diseñador hubiese querido construir una pared. Ir en bicicleta parecía lo último que se debería hacer en ese sitio. Pero ya era demasiado tarde para nuestro grupito. La pista nos esperaba.

Antes de nada, nos hicieron dar una vuelta por la superficie ovalada que está en el interior de la pista principal. La superficie era perfectamente lisa, y aquí las bicis cobraban mucho más sentido. Luego nos dijeron que nos aventuráramos hacia el exterior, hacia la línea de color azul claro que marcaba la primera elevación. Y luego, sintiéndonos un poco como pajarillos a los que su madre empuja fuera del nido para que aprendan a volar, nos enfrentamos a la sección principal, tal como nos dijeron.

Enseguida me llevé una desagradable sorpresa. Había supuesto que la inclinación sería gradual, pero de eso nada. La pendiente de la parte inferior es bastante similar a la de arriba del todo. En cuanto te adentras en la pista de carrera, estás pedaleando por una inclinación bastante importante. Pedaleo más rápido parecía una buena idea, pero solo porque obligaba a mi cerebro a tomar todas las decisiones con lógica mientras yo me esforzaba en fingir que el instinto no existía. Al cabo de tres vueltas, me olvidé de lo insufriblemente incómodo que era el sillín. Seguimos dando más y más vueltas, como hámsteres locos en una rueda gigante, parando

de vez en cuando para que los instructores pudieran comprobar cómo íbamos. Veinticinco minutos después, seguía estando aterrorizada, pero ya empezaba a aprender.

El truco está en hacer que la bici se incline hacia el interior de tal forma que quede perpendicular con respecto a la pista. La única forma de hacerlo sin resbalarte por la pendiente consiste en pedalear muy rápido, porque entonces actúas como el remolino de té. La bici quiere seguir avanzando en línea recta y en horizontal, pero no puede porque la pista curvada se interpone en su camino. Ese empuje de la pista proporciona la fuerza hacia el interior que te mantiene avanzando en círculos. El empuje de la bici sobre la pista es tan fuerte que, cuando sumas ese empuje a la gravedad, es como si la gravedad hubiera cambiado de dirección. En ese momento eres atraído hacia la pista en lugar de hacia el centro de la Tierra. Cuanto más rápido pedaleas, más cambias la dirección de la gravedad efectiva. Todavía sientes como si estuvieras pedaleando por una pared, pero al menos es una pared a la que estás pegado por algo que te resulta familiar.

Entendía la teoría, pero la práctica era un poco diferente. Para empezar, no hay descanso. No puedes dejar de pedalear porque no puedes dejarte llevar por la inercia. Si las ruedas giran, tus piernas también, y no hay más que hablar. Hubo un par de ocasiones en las que me paré instintivamente, como habría hecho en la carretera si necesitara unos segundos de descanso, y fui recompensada con un subidón de adrenalina cuando la bici me hizo saltar del sillín. Con estas bicicletas, no puedes confiar en la inercia en absoluto. Tienes

que seguir avanzando, no importa lo que te duelan las piernas. Si bajas el ritmo, resbalas pendiente abajo. Esta experiencia me hizo sentir más respeto por los atletas que se dedican a este deporte día tras día. Y luego están todas esas personas con las que tienes que competir. Si subes para adelantar a alguien, estás tomando una ruta más larga, así que tienes que aumentar mucho tu velocidad para poder intentarlo siquiera. Yo me contenté con mantener los adelantamientos al mínimo.

Lo que había que entender era que si haces las cosas como es debido, las inclinaciones más empinadas te darán un empuje más fuerte hacia el interior. Y la razón por la que necesitas ese empuje en los extremos y no por los lados es que los extremos semicirculares están justo donde cambias de dirección. Cuanto más rápido cambies de dirección, mayor será el empuje que tendrás que aplicar. Si intentaras pedalear igual de rápido en una pista llana con la misma forma, derraparías hacia los lados, ya que la fricción de la llanta por sí sola no puede proporcionar ese empuje hacia el interior. El velódromo apareció cuando el mundo del ciclismo se negó a permitir que la fricción limitara su necesidad de velocidad interior.

Si alguna vez te has preguntado cómo se siente una moneda mientras rueda por el embudo de una hucha de donaciones, esta es la mejor forma de descubrirlo. Una hora después, yo estaba totalmente entusiasmada a causa de la adrenalina, y muy contenta de que fuera ya hora de parar⁵³. Lo que más me asustaba de mi atracción hacia la pista por efecto de la gravedad era saber que, si

me detenía súbitamente, se volverían las tornas. Y pensar que la gravedad te atrae hacia abajo no es nada bueno cuando estás pedaleando en una pared de 43 °C de inclinación.

La pista atrae al ciclista hacia abajo de la misma forma que el suelo nos está empujando constantemente. Si el suelo que pisas se desvaneciera súbitamente, caerías a causa de la atracción de la gravedad. Así que el suelo está resistiendo ese empuje para contrarrestar el tirón hacia abajo de la gravedad. Los ciclistas sienten cómo la pista los empuja hacia arriba al mismo tiempo que son empujados hacia el interior. Y, en conjunto, la sensación que tendrán es que la gravedad les está atrayendo hacia abajo y hacia fuera.

Hay una competición de ciclismo cuyo nombre es de lo más atinado, ya que se llama «200 metros lanzados a contrarreloj». Supongo que uno debe sentirse como si lo hubieran lanzado a la pista, aunque en realidad esta prueba debe su nombre a que los participantes han ganado velocidad antes de que se ponga en marcha el cronómetro. El récord mundial en estos momentos está en manos de François Pervis, con 9,347 segundos. Eso son 21 metros por segundo. Para que pueda girar por el extremo de la pista a esa velocidad, la pista tiene que estar empujándolo hacia el interior con prácticamente la misma fuerza con que el suelo lo está empujando hacia arriba. Lo que mantenía a François pegado a la pista era una fuerza que era casi el doble que la gravedad normal.

Tal como vimos en el segundo capítulo, una fuerza de fondo constante como la gravedad resulta útil para todo tipo de cosas,

aunque algunas de ellas —como, por ejemplo, separar la nata— pueden llevar mucho tiempo. Pero la rotación nos ofrece una alternativa. No tenemos que mudarnos a otro planeta para disfrutar de los beneficios del aumento de la gravedad. Los ciclistas pueden prácticamente doblar su gravedad efectiva en la parte superior de la pista, pero los mejores ciclistas de pista del mundo «solo» pueden llegar a los ochenta kilómetros por hora. En teoría, podrías seguir girando cada vez más rápido y las fuerzas que te afectan seguirían ganando fuerza.

¿Recuerdas que, en el segundo capítulo, la gravedad ayudó a las gotitas de nata a separarse del resto de la leche y a subir hacia la superficie? Si la fuerza que atrae hacia abajo a la leche es igual de potente que la gravedad, a las gotitas de grasa les llevará varias horas separarse. Pero si pones la leche en un tubo largo y rotatorio y lo haces girar a mucha velocidad, el tirón hacia fuera es tan fuerte que las gotitas de nata se separarán en apenas unos segundos. Así es como la nata se separa de la leche hoy en día: nadie espera el rato que haga falta para que ocurra de forma natural. La producción alimentaria moderna no tiene tiempo que perder. Puedes generar un tirón tan fuerte como quieras haciendo que algo gire, siempre que puedas girarlo a la velocidad necesaria. Una centrifugadora es justamente eso: un brazo giratorio que puede agarrarse a un objeto, tirando de él hacia el interior para que gire y haciendo que dicho objeto sienta como si estuviera siendo apretado contra el lado exterior por una fuerza extraordinaria.

Puedes hacer que esas fuerzas giratorias internas sean tan fuertes que puedan separar por sí mismas cosas que jamás se habrían despegado bajo la sola acción de la gravedad. Por ejemplo, si alguna vez te hacen un análisis de sangre para ver si tienes anemia, los técnicos de laboratorio meterán una muestra de tu sangre en una centrifugadora y le darán vueltas tan rápido que esta experimentará una fuerza hacia el exterior que será unas veinte mil veces mayor que la gravedad. Los glóbulos rojos son demasiado pequeños para separarse, en circunstancias normales, a causa de la gravedad, pero no pueden resistirse a las fuerzas generadas por la centrifugadora. Bajo esas condiciones, solo se tarda cinco minutos en tirar de todos los glóbulos rojos desde el centro del aparato hacia el fondo del tubo. Son más densos que el líquido en el que se encuentran, así que ganan la carrera hacia el fondo. Una vez reunidos en el fondo, se puede extraer el tubo y medir el porcentaje de tu sangre que está compuesto de glóbulos rojos, simplemente midiendo el grosor de la capa inferior. Esta es una prueba muy sencilla que puede indicar un amplio abanico de problemas en tu salud, y que también se usa para analizar la sangre de los atletas, con el fin de comprobar si se han dopado. Si no fuera por las fuerzas que genera el giro, esta medición resultaría mucho más difícil y costosa. Y estas fuerzas pueden aplicarse a cosas mucho más grandes que las muestras de sangre. Una de las centrifugadoras más grandes del mundo está diseñada para hacer girar a un ser humano.

Muchas personas envidian a los astronautas por las aventuras que viven: las increíbles vistas del planeta en el que vivimos, los

dispositivos técnicos con que pueden jugar, la infinidad de historias fabulosas que pueden contar y los elogios que obtienen por dedicarse a uno de los trabajos más excepcionales y más difíciles de conseguir del mundo. Pero si preguntas a la gente qué es lo que más envidian de ellos, casi siempre contestarán lo mismo: la ingravidez. Flotar por ahí sin tener que preocuparse de «arribas» o «abajos» parece algo tan emocionante como relajante. Así que puede resultarnos extraño que los astronautas en período de formación tengan que estar igual de preparados para el problema contrario: las fuerzas que exceden a la gravedad. Hoy en día, la única forma de viajar al espacio es dentro de un cohete que acelera a gran velocidad. Pero el descenso hacia la Tierra es todavía peor: cuando penetran en la atmósfera se pueden generar fuerzas de cuatro a ocho veces más potentes que la gravedad, justo el tipo de fuerzas con las que un piloto de guerra tiene que lidiar cuando hace giros muy ajustados a gran velocidad. Si te mareas levemente cuando un ascensor acelera, puede que la aeronáutica no sea para ti. En función de la dirección que adopten esas fuerzas g adicionales, habrá mayor o menor cantidad de sangre que es dirigida hacia tu cerebro o alejada de él, y que puede llegar a romper los diminutos capilares de tu piel. Los detalles no son necesariamente agradables. Pero los humanos no solo pueden sobrevivir a dichas fuerzas, sino que además pueden trabajar mientras están sometidos a ellas — como sucede, por ejemplo, cuando se pilota una nave espacial de vuelta a la Tierra—, y ambas cosas resultan mucho más fáciles si ya

se está acostumbrado a hacerlo. Y, por esa razón, se ha encontrado la manera de entrenar a quienes se encuentran en esas situaciones. Hoy en día, todos los astronautas y cosmonautas pasan largos períodos de tiempo en el Centro de Entrenamiento de Cosmonautas Gagarin, situado en la Ciudad de las Estrellas, al noroeste de Moscú. Entre las aulas, las instalaciones médicas y los modelos a escala de naves espaciales, se encuentra la centrifugadora, cuyo brazo se extiende 18 metros hacia fuera. La cápsula que hay en el extremo se puede cambiar en función de lo que se necesite ese día. En el curso de las pruebas que todo astronauta en ciernes ha de pasar, tendrá que sentarse en la cápsula mientras el brazo rota cada dos o cuatro segundos, lo que no parece demasiado hasta que calculas que, en ese caso, la cápsula tiene que estar moviéndose a 97 o 193 kilómetros por hora. Cuando han demostrado que tienen lo que hay que tener, los astronautas pueden practicar en estas condiciones, trabajando en constante observación para comprobar cómo reaccionan sus cuerpos. Pero este centro no es solo para astronautas; los pilotos de pruebas y los pilotos de guerra también entrenan aquí. Incluso se ofrece la misma experiencia a cualquier persona que se pueda permitir pagar lo que vale. Conviene, no obstante, que tengas en cuenta que lo único en lo que todo el mundo parece estar de acuerdo es en que resulta muy incómoda. Pero si quieres sentir una fuerza constante extremadamente potente, tendrás que someterte a esta rotación.

El uso de la centrifugadora es una forma de explotar las fuerzas que se generan cuando algo gira, ya que se aprovecha la capacidad de

generar una fuerza muy potente en una dirección concreta, y se trata como si fuera gravedad artificial. Pero existe otra forma de utilizar las fuerzas que se obtienen a partir de la rotación. Tanto el té como el ciclista y el astronauta están confinados, y a todos se les ha forzado a girar en círculo porque había una barrera sólida que los empujaba, evitando que se movieran hacia fuera. Pero ¿qué ocurre si estás girando y no hay nada externo que pueda atraparte en un camino circular que ya está fijado? Es algo bastante habitual. Los balones de rugby, las peonzas y los discos voladores giran sin que ninguna fuerza externa los empuje hacia el interior. Pero la mejor forma de ver qué está ocurriendo en estos casos es mucho más divertida y, además, se come: nos la proporciona la pizza.

Para mí, la pizza perfecta debería tener una masa crujiente y fina, porque es la base crucial, y, al mismo tiempo, sencilla, que permite a los ingredientes brillar. La masa de la pizza sale de una especie de pelota, de una estructura viva que necesita ser amasada y alimentada para obtener lo mejor de ella. Transformar esa pelota en una fina hoja sin que se rompa es una habilidad esencial de todo pizzero, y algunos van todavía más allá y convierten esa habilidad en todo un espectáculo. Los chefs que lanzan las pizzas al aire han dominado el truco de dejar que la rotación haga el trabajo por ellos. ¿Por qué empujar y punzar cada trozo de masa con los dedos si puedes dejar que la física se encargue de todos esos engorrosos detalles? Especialmente cuando ese disco volador te confiere la misteriosa aura de un mago de la masa.

El lanzamiento de masa de pizza se ha convertido en un auténtico deporte con su propio campeonato del mundo anual. Hay incluso algunos que se autoproclaman «acróbatas de pizza», cuyo número consiste en mantener en constante rotación una base de pizza (o dos) mientras la hacen volar y dar vueltas alrededor de su cuerpo durante varios minutos. Nadie parece comer pizza hecha de una masa tan viajada, pero sin duda es impresionante. Sin embargo, hay muchos pizzeros que giran su masa brevemente sin hacer de ello un espectáculo y, aun así, tienen intención de convertirla en la cena de alguien. ¿Qué es lo que se consigue al girarla?

Hace poco, unos amigos obsesionados con la pizza me llevaron a un restaurante muy agradable con cocina abierta, y pregunté si podía mirar mientras el cocinero de turno giraba la masa de la pizza. Los jóvenes cocineros italianos soltaron alguna risilla, pero luego se reunieron alrededor del que se atrevió a presentarse voluntario. Con la misma dosis de timidez y de orgullo por poder presumir de sus habilidades, golpeó una bola de masa para aplanarla un poco, luego la cogió con una mano y, con un rápido movimiento de la muñeca, hizo piruetas con ella en el aire.

Lo que sucedió a continuación pasó muy rápido. En cuanto el círculo de masa se separó de su mano, se vio libre de cualquier cosa que pudiera empujarla o tirar de ella desde el exterior. Tener en mente un único punto del borde resulta muy útil, ya que está moviéndose en círculo, pero solo porque tiene el resto de la masa pegado a él, impulsándolo hacia el interior. Esta atracción hacia dentro es necesaria siempre que algo ha de rotar. En el caso del

ciclista, la pista está constantemente empujando la bici hacia el exterior, de modo que el ciclista tiene que curvarse hacia el interior y hacia el centro en lugar de seguir en línea recta. En cuanto a la pizza, es el tirón desde el medio lo que hace que el borde de la masa se curve en dirección hacia el centro. Sea cual sea el caso, siempre tiene que haber una fuerza dirigida hacia el centro de la rotación. Pero la masa es suave y elástica. Si tiras de ella, se estira. El centro de la masa está tirando del borde hacia el interior, pero eso significa que hay una fuerza que tira de la masa entera. Y por eso se estira. Cuando un objeto sólido gira, la rotación genera fuerzas en su interior que no vemos. El tirón interno que mantiene la pizza de una sola pieza es también el que está estirando la masa, y el borde se va alejando del centro cada vez más. Para un chef pizzero, la genialidad de su trabajo reside en que el tirón interno es uniforme y simétrico. La pizza entera está girando, de modo que toda la masa se estira para alejarse del centro.

En ocasiones tú también puedes sentir estas fuerzas internas tirando de ti. Si sujetas una bolsa que contenga en horizontal un objeto razonablemente pesado y empiezas a dar vueltas sobre ti mismo, notarás un tirón que intenta estirar tu brazo. Es el tirón hacia el interior que mantiene la bolsa girando en círculo. Afortunadamente para ti, tu brazo es mucho menos elástico que la masa de la pizza, y por eso mantiene la misma longitud de siempre. Pero cuanto más largo sea tu brazo y más rápido gires, mayor será el tirón que sentirás.

Mientras la masa de pizza giraba en el aire, el mismo tirón que mantenía el borde moviéndose en círculos estaba estirando paulatinamente la masa hacia el exterior. Diría que la masa estuvo en el aire menos de un segundo, pero cuando subió era una especie de tortita de bastante grosor, y al bajar se había convertido en un bonito círculo suave y fino. El chef no paraba de darle vueltas y hacerla saltar, pero esta vez las fuerzas internas que tiraban de ella eran tan fuertes que la masa se partió por la mitad, y lo que bajó fue un triste emplasto hecho jirones. El chef sonrió abochornado.

—Por eso no solemos hacerlo —dijo—. La masa con la que mejor salen las pizzas es demasiado blanda para girarla, y por eso la estiramos a mano en la tabla⁵⁴.

Resulta que la masa que se usa en las competiciones acrobáticas se hace siguiendo una receta especial para que sea elástica y resistente, pero la textura de la pizza cocinada con ella no es necesariamente de lo mejorcito. Justo en el borde de la pizza, la fuerza interna del tirón puede llegar a ser entre cinco y diez veces más potente que la gravedad, y por eso las bases de pizza se estiran mucho más rápido cuando les das vueltas que si simplemente las sostienes en alto y dejas que caigan con su propio peso.

Una base de pizza dando vueltas es algo agradable de ver porque va cambiando de forma en respuesta a las fuerzas que están completamente escondidas en su interior. Al girar algo siempre se genera un tirón que va desde el centro hacia el borde —ya sea una pelota de rugby o un disco volador—, pero no es algo que puedas deducir a partir de estos objetos sólidos, porque son lo

suficientemente resistentes como para no estirarse. O, más bien, se estiran tan poco que nos resulta imperceptible. Pero el caso es que todo se estira, aunque sea un poco. Incluso la Tierra.

* * * *

Nuestro planeta está girando constantemente mientras viaja alrededor del Sol. Y como en la masa de pizza, hay fuerzas que tiran hacia dentro de él y mantienen cada trocito de roca moviéndose en círculo. Por suerte para nosotros, la gravedad tiene la fuerza suficiente para evitar consecuencias extremas como las que afectan a la masa, y la Tierra se mantiene bastante esférica. Pero es que, además, nuestro planeta tiene algo que llamamos «protuberancia ecuatorial», un nombre que nos resulta útil y que a la vez parece un eufemismo para evitar decir que alguien ha comido demasiada tarta. Si te colocas en el ecuador, estarás 21 kilómetros más lejos del centro de la Tierra que alguien que esté en el Polo Norte. Nuestro planeta se mantiene entero gracias a la gravedad, y su rotación es lo que le da su forma característica. Y aunque el Everest sea la montaña más alta de la Tierra, su cima no es el punto más lejano del centro de la Tierra. Ese mérito le corresponde a un volcán de Ecuador que se llama Chimborazo. Su cima está a solo 6.268 metros del nivel del mar (la del Everest queda a 8.848 metros), pero se encuentra justo encima de la protuberancia ecuatorial. Así que si te colocas en la cumbre del Chimborazo, estarás unos dos kilómetros más lejos del centro terráqueo de lo que lo estará

cualquier persona que se haya dejado la piel subiendo al Everest; aunque si se lo mencionas, seguramente no le sentará nada bien.

En términos generales, las fuerzas que genera la rotación pueden resultarnos útiles de dos maneras. La primera es la pizza, ya que hacer girar algo sin confinarlo genera un tirón en el interior del objeto mientras este trata de mantenerse de una pieza al mismo tiempo que gira. La otra es el ciclista: si pones en su camino una pared que limite aquello que rota con algo que devuelve el empuje, se puede generar sobre el objeto una gran fuerza constante parecida a la gravedad. Pero, en ambos casos, hay un tirón o un empuje hacia el interior que han de venir de alguna parte. Si esa fuerza que va hacia el interior desaparece, el objeto no puede seguir moviéndose en círculos.

Solo los objetos sólidos pueden mantenerse de una pieza como la masa de la pizza. Los líquidos y los gases no están unidos de este modo⁵⁵. Es una diferencia que te resultará enormemente útil si tienes una mezcla de objetos sólidos y líquidos, porque podrás separarlos. La genialidad de una secadora de ropa reside en que las prendas quedan atrapadas en el tambor, y este las empuja continuamente hacia el interior, de modo que no pueden parar de girar. Pero el agua de la ropa no está fija en su sitio. Como tiene libertad de movimiento, puede seguir yéndose hacia el exterior por los huecos de los tejidos. Solo se moverá en círculos si hay algo sólido que la empuja hacia el interior. De lo contrario, se irá alejando paulatinamente del centro, y cuando encuentre un agujero

en el tambor saldrá volando hacia un lado, escapando del círculo por completo.

Cuando haces girar algo y luego lo dejas ir, primero tiras de ello con la fuerza justa hacia el interior para que siga girando, y después retiras esa fuerza de golpe. Cuando no hay tirón hacia el interior, el objeto no tiene por qué seguir girando. Así que, simplemente, sigue moviéndose en línea recta. Durante la Edad Media, este principio revolucionó las guerras que se desencadenaron en Europa y en el este del Mediterráneo, ya que permitió que los ingenieros pudieran construir grandes armas de asedio que echarían abajo las fortalezas de piedra. Y yo misma lo he usado para lanzar botas de agua, aunque en mi caso no resultó muy efectivo.

Cuando terminé de defender mi tesis doctoral, justo después de decirme que había aprobado, el miembro externo del jurado me sonrió desde el otro lado de la mesa y me preguntó qué iba a hacer esa tarde. No me cabe duda de que estaba esperando que dijera que mis planes incluían fiestas, bares y ebriedad. Lo que no esperaba era que le contestara que iba a coger la bici para adentrarme en los campos de Cambridgeshire para ver si encontraba a algún granjero que me diera una o dos ruedas de tractor viejas. Le expliqué que estaba fabricando un artilugio para lanzar botas de agua, que tenía que usar chatarra y que quería tenerlo terminado a finales de la semana siguiente. El examinador frunció el ceño, alzó las cejas durante un instante y luego, fingiendo no haberme oído, me preguntó qué planes tenía en el plano profesional. Pero era cierto. Me había unido a un equipo inusual, formado únicamente por

mujeres, que participaba en un espectáculo ambulante de *Scrapheap Challenge*, una competición en la que se fabrican objetos a partir de chatarra. El desafío consistía en construir algo que pudiera competir en el lanzamiento de botas de agua y que pudiera usarse repetidamente en Dorset Steam, una feria anual en la que se muestran máquinas y vehículos de vapor. Éramos tres, no teníamos dinero ni apenas tiempo y, desde mi punto de vista, la única opción a nuestro alcance era una tecnología antigua y muy efectiva: el trabuquete.

Un trabuquete es un aparato extremadamente ingenioso que se fue diseñando a lo largo de los siglos gracias a la contribución de la antigua civilización china, de los imperios bizantino e islámico y, finalmente, de la Europa occidental. Cuando se afinó en los siglos XI y XII, demostró ser una bestia pesada capaz de demoler castillos que, hasta entonces, se habían considerado impenetrables. Un trabuquete podía lanzar rocas de cien kilos a cientos de metros de distancia. Las armas de asedio de este tipo contribuyeron a la desaparición de las motas de los castros, que eran muy útiles estratégicamente pero estaban construidas por entero con madera y tierra. Las rocas sólidas eran su única defensa, y así es como las fortalezas de piedra se convirtieron en la norma general.

El trabuquete tenía las mismas ventajas para mi equipo que para los guerreros medievales: es un instrumento de mecánica sencilla y extremadamente efectivo. Cogimos unos tubos de andamio de una obra cercana, rebuscamos en el contenedor de escombros de la universidad para encontrar algo con lo que hacer una honda,

convencí a los técnicos del Laboratorio Cavendish para que me dejaran una barra de metal de cinco metros de longitud, y, una vez reunido el material en el campo de juego de la facultad, nos pusimos a trabajar. El Churchill College de Cambridge había sido mi hogar durante casi ocho años, y los empleados estaban acostumbrados tanto a mí como a la súbita aparición de artilugios innovadores. Al pensar en ello, todavía me asombra —y me siento muy agradecida por ello— la alegre aceptación con que nos acogían cada vez que se nos ocurría una nueva locura. Esa semana, en el otro extremo del campo, alguien estaba probando un globo estratosférico para mandar al espacio un osito de peluche.

La estructura básica de un trabuquete es muy sencilla. Se construye un armazón en el que hay un eje giratorio a unos dos o tres metros del suelo, y se le fija una barra larga, como si fuera un enorme balancín, pero el eje debe colocarse de modo que la barra sobresalga mucho más por un lado que por el otro. La estructura tiene entonces la forma de una A que parece llevar encima un palo enorme. El lado más largo es el que primero toca el suelo. Se fija la honda en el extremo más largo y se la coloca en el suelo por debajo de la estructura. La primera vez que montamos el artilugio era un día soleado, perfecto para lanzar cualquier cosa.

Entonces nos topamos con un problema. Lo hermoso de los trabuquetes —a menos que tú seas el objetivo de una de sus piedras— es que utilizan la gravedad para hacer que el balancín y la honda giren. Se coloca un peso en el lado más corto del balancín y, en cuanto cae, inclina muy rápidamente la parte del balancín que

queda más cerca de ti. La barra gira alrededor del eje, trazando un círculo verticalmente, y la honda también gira en el otro extremo de la barra. De manera que te encuentras rodeado de mucha rotación rápida, y si el proyectil que hay en la honda gira en el eje es porque está siendo impulsado hacia el interior por la cuerda. Hasta aquí, todo bien. Lo primero que teníamos que hacer era llegar a ese punto, pero no encontrábamos nada que pesara lo suficiente para mover la estructura entera. Me ofrecí voluntaria para balancearme en la barra como un peso humano, pero ni siquiera eso bastaba. Estábamos totalmente atascadas. Esa noche me pasé un rato explicando mis frustraciones a un grupo de amigos, ignorando por completo su invitación a servirme más pastel. Entonces uno de ellos me ofreció sus pesos de buceo, y a la mañana siguiente me armé con un cinturón de buceo que pesaba diez kilos y lo volvimos a intentar. Esta vez funcionó a la perfección. Me balanceé bajo el eje, el balancín subió y la honda se balanceó sobre la estructura. Todo giraba. Ya podíamos pasar a la siguiente fase.

La honda solo está sujeta por medio de un pequeño nudo, y el truco consiste en que cuando la honda se encuentra casi en su punto más elevado, el nudo se deshace. La honda ha quedado suelta, lo que significa que la fuerza que estaba tirando del proyectil hacia el interior y manteniéndolo en el círculo ha desaparecido, y entonces la situación cambia. En ese momento, el proyectil de la honda está avanzando hacia delante y hacia arriba a mucha velocidad. En cuanto queda liberado de la fuerza interior, lo que hace es avanzar en línea recta. Y como antes estaba avanzando hacia delante y hacia

arriba, simplemente sigue en esa dirección. Pero no sale directamente del centro del giro. Continúa hacia un lado, como si siguiera una línea que estuviera marcándole el camino del círculo del giro. Esa era la teoría. Pusimos un zapato en la honda y lo alineamos todo. Luego me puse de espaldas al campo y bajé el balancín; el otro extremo subió, llevando consigo la honda, tanto alrededor del eje como por encima de él. Justo en el momento exacto (¡a la primera!) la honda se soltó y el zapato salió volando por encima de mi cabeza en dirección al campo. No me gustaría probarlo con una piedra, pero el zapato demostró la teoría perfectamente. Nuestro artilugio podía al menos lanzar una bota de agua, y, dado el tiempo que teníamos, era nuestra mejor opción. Después de practicar un poco más, desmontamos la estructura para llevarla a la competición del día siguiente.

Al llegar a la feria de Dorset Steam, nuestra burbuja de confianza se vio dañada gravemente. Todos los demás equipos estaban compuestos por hombres de mediana edad que se habían pasado meses en sus garajes construyendo artilugios magníficamente decorados para lanzar botas de agua. El montoncito de tubos de andamio y moqueta desechada que habíamos reunido en tan solo unos días parecía estéril y poco apreciado. Pero pusimos al mal tiempo buena cara y lo montamos todo. Los trabajadores de la competición —también hombres de mediana edad— vinieron a echar un vistazo.

—Lo de que saltes sobre el balancín es una tontería —dijo uno—. Tendríais que hacer como los guerreros medievales y tirar de la palanca con una cuerda. Sería mucho más efectivo.

Cuando argüí que el contrapeso fue lo que provocó el éxito de este aparato no me hicieron caso. La razón por la que este artilugio no se convirtió en una potente arma de asedio hasta el siglo XI es, precisamente, que intentaban hacerla funcionar mediante la fuerza de los propios soldados. Pero los trabajadores se metieron las manos en los bolsillos, adujeron que tirar de una cuerda era una idea mucho mejor e insinuaron que, dado que no éramos más que unas mujeres entusiastas pero inexpertas, deberíamos estar agradecidas de recibir su ayuda, y no se marcharon hasta que mis compañeras claudicaron y estuvieron de acuerdo con ellos. No había tiempo para discusiones. La competición estaba a punto de empezar.

La primera prueba consistía en lanzar en dos minutos todas las botas de agua posibles más allá de una línea colocada a unos veinticinco metros de distancia. Los cinco mejores equipos pasarían a la siguiente fase de la competición, en la que se trataba de ver quién podía lanzar más lejos. El cronómetro se puso en marcha. Entre las tres tiramos de la cuerda, girando el balancín y tirando de la honda. Pero las tres primeras botas apenas pasaron por encima de nuestras cabezas. No éramos capaces de tirar hacia abajo lo suficientemente rápido como para que el balancín rotara como debía. Lo intentamos de nuevo. Y volvimos a hacerlo. Al rato convencí a mis compañeras de que esta táctica no funcionaba y nos

organizamos para seguir la idea original. Me puse los pesos de buceo, salté sobre el pequeño armario archivador que habíamos colocado como plataforma, me balanceé por debajo del eje, y fiuuuu..., la primera bota salió disparada por encima de mi cabeza y cruzó la línea. Otra vez. Coloco la bota en la honda, salto sobre el archivador, me balanceo, y ¡fiuuuu! Otra vez. Pero en ese momento sonó el silbato. Se había acabado el tiempo. Lanzar dos botas más allá de la línea no bastaba. No íbamos a pasar a la siguiente fase. Los hombres de mediana edad se compadecieron de nosotras. «Más suerte la próxima vez», dijeron. Me escondí del que había sugerido que tiráramos de la cuerda, porque estaba furiosa con él. ¡Funcionaba! Nuestra sencilla estructura de tubos y moqueta y de física sofisticada funcionaba, y lo había hecho de la forma que yo había predicho. Podríamos haber competido contra el resto de aquellos preciosos artilugios tan primorosamente pintados. Pero el cambio de planes del último momento nos había hundido por completo⁵⁶. La mayoría de las demás máquinas estaban basadas en métodos mucho menos eficientes. Sí, eran de colores, pero nosotras teníamos a nuestro favor la eficiencia y la simplicidad de la física.

Mi éxito personal con los trabuquetes es pues algo limitado, pero hace ochocientos años esta idea tan sofisticada revolucionó el modo de hacer la guerra. Ser capaz de lanzar pesadas rocas con gran precisión significaba que podías golpear el mismo trozo de la muralla de un castillo hasta que cediera. Durante cerca de dos siglos, los trabuquetes fueron cada vez más grandes y más elaborados, y se los conocía con sobrenombres como «el tirachinas

de Dios» o «el lobo de la guerra». Para construirlos se necesitaban grandes cantidades de madera, pero poder lanzar una roca de 150 kilos a tus enemigos cada pocos minutos bien lo merecía. Girar la roca y la honda en torno del eje te permite alcanzar una velocidad muy elevada en un período de tiempo muy corto. No pretendes que la rotación dure para siempre; solo estás usándola para alcanzar una gran velocidad. Cuando el proyectil ya está yendo lo suficientemente rápido, retiras la fuerza que ejerces hacia el interior justo cuando va en la dirección deseada. Y entonces lo sueltas y sale disparado en esa misma dirección. Hasta que la pólvora no fue lo bastante fiable como para que los cañones fueran una auténtica arma en lugar de un peligro, el trabuquete siguió siendo la mejor opción disponible en lo que respecta a la eficiencia destructiva.

* * * *

Hay muchas cosas que giran. Por ejemplo, en este instante, tú y yo estamos girando. Giramos alrededor del eje de la Tierra una vez al día, aunque no lo percibimos porque la Tierra es tan grande que cambiamos de dirección muy lentamente. Si estuviéramos en el ecuador, nuestra velocidad lateral sería de 1674 km/h. En Londres, desde donde escribo estas líneas, giro a una velocidad lateral de 1046 km/h porque estamos más cerca del eje de rotación. Pero si todos vivimos en un enorme planeta giratorio, y si un objeto suelto en la superficie de algo que gira sale disparado en línea recta cuando lo sueltas, ¿por qué seguimos estando aquí abajo? La

respuesta es que la atracción interior de la gravedad es lo suficientemente fuerte para evitar que el planeta nos deje ir. De hecho, incluso cuando estás en órbita, el planeta no te ha dejado ir en realidad. Y cuando estás de camino hacia ahí arriba, esa velocidad adicional que te da la rotación de la Tierra puede ser realmente útil.

El 4 de octubre de 1957, una diminuta esfera de metal llamada Sputnik soltó los primeros sonidos de la era espacial, y el mundo los escuchó boquiabierto. El primer satélite artificial de la Tierra fue una enorme hazaña tecnológica. El Sputnik orbitó alrededor de su planeta base cada 96 minutos y, cada vez que pasaba, cualquiera que tuviera una radio de onda corta podía oír su distintivo pip, pip, pip. Estados Unidos se había levantado esa mañana con la alegría complaciente de la mejor nación del mundo, y se fue a dormir impactado por la idea de que quizás no lo era. En menos de un año, los soviéticos ya habían lanzado el Sputnik II, un satélite más grande en el que iba una perra llamada *Laika*. Los aterrorizados estadounidenses no habían mandado nada al espacio, pero habían fundado la NASA, la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio. La carrera espacial había empezado, ahora de verdad.

Pero ¿cuál fue la verdadera hazaña del Sputnik? No se trataba únicamente de subir; cualquier cosa que esté cerca de algo tan grande como un planeta tiene que seguir la máxima de que «Todo lo que sube, baja». El truco de poner satélites en órbita empieza por subir, pero el verdadero talento está en retrasar la bajada todo lo posible. El Sputnik no había escapado de la gravedad de la Tierra,

porque no era ese el objetivo. Douglas Adams lo resumió perfectamente y con toda exactitud, salvo por el pequeño detalle de que estaba hablando de volar y no de los viajes espaciales orbitales: «El truco consiste en aprender a tirarse al suelo y fallar». El Sputnik estaba constantemente cayendo hacia la Tierra, pero fallaba siempre.

El Sputnik fue lanzado desde el desierto de Kazajistán, desde donde ahora está el Cosmódromo de Baikonur, una enorme instalación de lanzamiento espacial. El cohete que transportaba el Sputnik se impulsó hacia arriba a través de la parte más densa de la atmósfera y luego se giró lateralmente, acelerando en horizontal alrededor de la curvatura de la Tierra. Cuando las últimas partes del cohete cayeron, el Sputnik ya estaba zumbando alrededor del planeta a una velocidad de unos 8,1 kilómetros por segundo, o unos 29.000 kilómetros por hora. Aquí es donde se invierten los mayores esfuerzos cuando algo entra en órbita, pues se trata más de viajar lateralmente que hacia lo alto.

La pequeña esfera metálica no se había liberado de la gravedad en absoluto. De hecho, necesitaba de la gravedad para seguir ahí, para asegurarse de que se mantenía en órbita y que no continuaba hacia delante sin cesar, dejando la Tierra atrás. Mientras zumbaba hacia delante a esa enorme velocidad, la Tierra estaba atrayéndolo hacia abajo con casi toda la fuerza que la gravedad tiene en el suelo⁵⁷. Pero como la velocidad lateral del Sputnik era tan grande, para cuando cayó un poco hacia la Tierra, ya había avanzado tanto hacia delante que esta se había curvado debajo del satélite. Y a medida

que seguía cayendo, la superficie de la Tierra también seguía curvándose. Este es el precioso equilibrio que proporciona estar en órbita. Avanzas lateralmente de una forma tan rápida que caes hacia el suelo y fallas. Y puesto que prácticamente no hay resistencia frente al aire, puedes seguir cayendo y fallando, y así dar vueltas y más vueltas.

Para poder entrar en órbita, tienes que ir a una velocidad lateral lo suficientemente rápida como para que este equilibrio funcione. Y Kazajistán ya tiene una velocidad lateral bastante significativa, puesto que pasa alrededor del eje de la Tierra una vez al día. Cuanto más lejos estés del eje de rotación, mayor será tu velocidad lateral. Así que si lanzas algo desde un lugar cercano al ecuador, la ventaja con la que sales es significativa. Se necesita una velocidad lateral de unos 8 kilómetros por segundo para que la órbita baja terrestre entre en activo. La velocidad de Kazajistán es de unos 400 metros por segundo. Así que si efectúas el lanzamiento hacia el este, acompañando la rotación de la Tierra, salir de Kazajistán en lugar del Polo Norte significa que ya tienes hecho el 5% del trabajo.

En la secadora, la parte exterior del tambor empuja las prendas hacia el interior para que no puedan escapar. En el velódromo, lo que me empujaba hacia el interior era la pista alarmanamente inclinada.

* * * *

Y en cuanto al Sputnik, el diminuto y ruidosillo heraldo de la primera aventura de la humanidad en el espacio interestelar, era la gravedad la que cumplía ese cometido. Todo lo que gira necesita algo que tire del objeto en cuestión o que lo empuje constantemente hacia el centro de la rotación. Y si esa fuerza desaparece, tanto las prendas de la secadora como el Sputnik habrían seguido avanzando en línea recta. Esto demuestra que la gravedad sigue teniendo importancia a unos cuantos kilómetros por encima de nuestras cabezas. Pero, claro, la mejor parte de estar en el espacio es que flotas. ¿Qué pasa con todos esos astronautas que flotan en la gravedad cero, intentando no derramar nada porque si no se pasarán días flotando por ahí? Ahora mismo, la Estación Espacial Internacional está orbitando por encima de nuestras cabezas. Los astronautas que viven en esta enorme instalación científica dicen con orgullo que están volando para llevar a cabo misiones concretas, y yo no se lo envidio. Suena mucho menos emocionante decir que te vas a pasar seis meses cayendo. Pero no están volando sino cayendo. Los astronautas y la estación espacial hacen como el Sputnik, que caía al suelo y fallaba.

Cuando estás en caída libre, no sientes la gravedad porque no hay nada que empuje hacia el otro lado. Como los astronautas no sienten nada que les devuelva ese empuje, no son conscientes de que la gravedad está ahí. Es como ese momento en el que el ascensor empieza a bajar, y durante unos instantes te sientes más ligero; eso ocurre porque el empuje del suelo es entonces menos fuerte. Si el ascensor cayera a toda velocidad a través de un hueco

muy profundo, también te sentirías como si flotaras. Cuando estás en órbita, no te has librado de la gravedad, solo has encontrado la forma de ignorarla. Pero, aunque no la sientas, sigue ahí, y es su atracción hacia abajo la que te mantiene girando alrededor del planeta.

La rotación es útil para muchas cosas, pero a veces es todo un fastidio. Por ejemplo, ¿por qué las tostadas siempre caen con la mantequilla hacia abajo? Acabas de sacar con dos dedos la tostada caliente de la tostadora y la has cubierto con una capa de mantequilla que empieza a deshacerse. Basta que te distraigas un momento mientras alargas el brazo para coger el té para que, de un codazo, la tostada acabe en el borde de la mesa. Se balancea unos segundos y, al final, se cae al suelo, boca abajo. La apetitosa mantequilla derretida está en ese instante decorando el suelo. Limpiarlo es una pesadez, y más todavía cuando empieza a invadirte la sensación de que, por algún motivo, el universo te la está jugando. ¿Por qué se ha caído la tostada de la manera más engorrosa posible? ¿Por qué se da la vuelta de esa forma? Este es un fenómeno real. Varias personas han llevado a cabo experimentos en los que, con suma paciencia, han empujado muchas tostadas para que se cayeran de la mesa, y la realidad es que caen mantequilla abajo con mucha más frecuencia que con la mantequilla arriba. Depende un poco de cómo empieza la caída, pero, en general, así es como funciona el mundo, y no hay nada que hacer. Y no tiene relación alguna con el peso adicional de la mantequilla, ya que esta se filtra sobre todo por el centro de la

tostada y, aunque no lo hiciera, la masa que aporta es ínfima en comparación con la masa total del pan.

La primera pregunta es: ¿por qué se da la vuelta? Ocurre tan rápido que es difícil de ver y, en cualquier caso, si hubieses estado atento a la tostada, seguramente no la habrías tirado. Puedes observar cómo ocurre si estás dispuesto a sacrificar una tostada⁵⁸o un salvamanteles o un libro de tamaño similar. Pon la tostada plana sobre la mesa, más bien cerca del borde, y empújala hacia el precipicio. Justo cuando la mitad de la tostada sobresale de la mesa, pasan dos cosas: una es que la tostada empieza a balancearse en el borde como un balancín, y la otra es que empezará a deslizarse hacia fuera sin necesidad de empujarla. A partir de aquí, la tostada se encargará de todo ella solita: se deslizará, se dará la vuelta, y ¡plaf!

Así pues, la rotación empieza cuando un poco más de la mitad de la tostada está fuera de la mesa. La clave de todo reside en que, en ese instante, la mesa está soportando por primera vez menos superficie de tostada que la que sobresale del borde. La gravedad está tirando de toda la tostada. La mesa la empuja hacia arriba, pero el aire no puede impulsarla. Es cuestión de equilibrio, como pasa con el balancín. El punto central es el momento en que la gravedad y la atracción que ejerce sobre el trozo que sobresale tiene la fuerza suficiente para levantar la parte que sigue en la mesa. En física, la posición de este punto central se llama «centro de masas», lo cual quiere decir que, si el eje de un balancín se encontrara en ese punto, estaría perfectamente equilibrado.

Cuando te das cuenta de que la tostada está cayendo ya es demasiado tarde para hacer nada al respecto. Cuando la tostada ya se ha deslizado por completo, tardará un tiempo fijo en caer. Si tu mesa es de unos 75 centímetros de altura, la tostada tardará menos de medio segundo en llegar al suelo. Pero cuando ha empezado a rotar ya no tiene ningún motivo para parar, y la tostada sigue girando mientras cae⁵⁹. Puesto que la gravedad es siempre la misma, y casi todas las mesas son igual de altas, la tostada siempre tiene la misma velocidad de rotación. En 0,4 segundos rotará 180°. Como la mantequilla estaba arriba al principio, terminará abajo. El comportamiento físico es prácticamente el mismo todas las veces, así que el resultado es prácticamente el mismo todas las veces: las tostadas caen mantequilla abajo.

Curiosamente, solo hay una cosa que puedes hacer para alterar el resultado⁶⁰, pero trae consigo un importante riesgo de consecuencias indeseadas. Justo cuando te das cuenta de que has golpeado la tostada y esta empieza a balancearse en el borde, la física sugiere que debemos darle otro buen golpe lateral. La tostada terminará en la otra punta de la habitación, pero como se pasa menos tiempo balanceándose en el borde, no girará con tanta velocidad a medida que cae y puede que no rote lo suficiente para darse la vuelta antes de llegar al suelo. Así que las posibilidades de que caiga mantequilla arriba son elevadas, pero también puede terminar bajo el sofá o pegada al perro.

Las tostadas empiezan a girar porque hay dos cosas que las llevan a hacerlo: tienen un punto sobre el que girar y una fuerza que tira de

ellas en ese giro. No importa que la fuerza solo se dirija hacia abajo en línea recta y que no esté constantemente tirando de la tostada en un círculo. Lo que importa es que esa fuerza basta para mover la tostada —siempre que el centro de masas esté en el aire y no sobre la mesa—, y que, aunque sea solo durante un rato, tira de la tostada alrededor del eje. Y una vez que empieza la rotación, seguirá su curso hasta que algo la detenga.

Este es el principio que rige la rotación de los huevos de la que hablamos en la introducción. Si piensas en todas las cosas que giran libremente —como los discos voladores, las monedas que hacemos girar, las pelotas de rugby o las peonzas—, te darás cuenta de que lo que hacen es seguir a lo suyo. Sería muy raro que hicieras que una moneda diera vueltas y que luego dejara de girar por sí misma antes de que la cogieras⁶¹. Todo lo que gira tiene un momento angular, que es la medida de la cantidad de rotación del objeto. A menos que algo —como la fricción o la resistencia del aire— lo ralentice, el objeto seguirá girando indefinidamente. Esta es la ley de la conservación del momento angular. Si algo gira, seguirá haciéndolo a menos que suceda algo y lo detenga.

Estoy bastante segura de que, cuando era pequeña, el mareo se consideraba una especie de juguete interno. Si te aburrías, siempre podías ponerte a dar vueltas, en parte para ver quién aguantaba más y, en parte, porque era gracioso que toda persona se cayera en cuanto se detenía. El mareo en sí mismo no parecía causar demasiados problemas, ya que esa desorientación breve y divertida aparecía solo cuando parabas. Es una pena que los adultos casi

nunca juguemos a esto, ya que, si lo hiciéramos, podríamos entendernos mejor. El sentimiento de desorientación lo causa algo que ocurre en los oídos y que no vemos, pero de lo que nuestro cerebro es plenamente consciente.

Volvamos a los huevos duros y los crudos que mencioné en la introducción. Se colocan los huevos, todavía con cáscara, sobre uno de sus lados y se los hace girar. Cuando llevan unos segundos girando, pones el dedo encima de cada uno de ellos rápidamente para detener la rotación. Ambos se detienen. Apartas los dedos y, entonces, uno de los huevos empieza a girar de nuevo. El huevo que es sólido ha parado de girar por completo cuando has detenido la cáscara, pero cuando frenas el huevo crudo, lo único que haces es parar la cáscara. El fluido de su interior está todavía girando; no está conectado a la cáscara, así que no tiene ninguna razón para dejar de girar, de manera que el fluido empuja la cáscara hasta que esta empieza a girar de nuevo.

Cuando te pones a dar vueltas, la mayor parte de ti es, afortunadamente, como el huevo duro. Todo se mueve a la vez. Así que cuando paras de girar, tu cerebro, tu nariz y tus orejas también paran. Pero los oídos no. En cada oído hay unos canales pequeños y semicirculares que están llenos de fluido precisamente porque eso les permite comportarse como el huevo crudo. El fluido no tiene que coincidir con el movimiento de su contenedor porque no está unido a él. Esta es una de las formas que tiene tu cuerpo de sentir dónde estás; hay unos pelos diminutos que detectan cómo se está moviendo el fluido, y tu cerebro lo hace coincidir con lo que ves. Si

la cabeza rota, el fluido de los canales curvados no rota con la misma velocidad, así que pasa alrededor de ellos porque todavía no ha alcanzado la misma velocidad. Pero si das vueltas durante un rato, el fluido también empieza a girar. Solo tarda unos segundos en alcanzar la misma velocidad, y entonces el fluido de tus oídos estará girando a la vez que los canales, igualando el movimiento de su contenedor. Si te detienes súbitamente, el fluido no se detiene. Igual que ocurre con el huevo crudo, el contenedor se ha parado, pero el fluido sigue su curso. De modo que tu oído le está diciendo a tu cerebro que te estás moviendo, pero tus ojos le dicen que no es así. Es entonces cuando te mareas, cuando tu cerebro está intentando entender qué es lo que está ocurriendo en realidad. Al final, el fluido del oído deja de rotar porque su contenedor se ha detenido, y el mareo desaparece.

Esta es una de las razones por las que, al hacer sus piruetas, las bailarinas de ballet fijan la vista en una única dirección mientras giran, y mueven la cabeza muy rápidamente durante el resto del giro para volver a la misma dirección cuando su cuerpo las alcanza. Gracias a este movimiento de parada y reinicio tan rápido, el fluido del interior no llega a alcanzar un giro continuo, así que la bailarina no se siente desorientada al detenerse.

Hay dos aspectos importantes en la conservación del momento angular. El primero es que todo aquello que no esté girando necesita un empuje para empezar a hacerlo, ya que nada puede empezar a girar por sí mismo. Y el segundo es que cualquier cosa que ya esté girando seguirá haciéndolo a menos que algo la empuje para que se

detenga. En nuestra vida cotidiana, normalmente es la fricción la que proporciona ese empuje que hace que las cosas se detengan. De esta forma, la peonza finalmente se detiene y la moneda que has hecho girar pierde tanta velocidad que termina por caerse. Pero en las situaciones en las que no haya fricción, las cosas sí seguirán girando indefinidamente. Por eso la Tierra tiene estaciones.

En el norte de Inglaterra, las estaciones son el ritmo que convierte mis recuerdos en un hogar acogedor. Largos paseos por el canal de Bridgewater en los calurosos días del verano, partidos de hockey bajo la llovizna otoñal, conducir de vuelta a casa en el frío de la Nochebuena polaca, la alegría de que los días de primavera se alarguen...; la variedad era parte de la gracia de todo aquello. Una de las cosas más difíciles de sobrellevar cuando vivía en California era la ausencia de ese ritmo; parecía como si el tiempo no se moviera, y eso me resultaba profundamente desconcertante. Todavía hoy vivo las estaciones con mucha intensidad. Me gusta poder identificar mi lugar en el ciclo anual mediante las pistas que lo caracterizan, incluso en la sociedad moderna: los animales, el aire, las plantas y el cielo. Y la base de toda esa riqueza es la parte de la física que hace que las cosas giren a menos que algo las detenga.

La rotación tiene una dirección, el eje sobre el que todo gira. Imaginamos el eje de la Tierra como una línea que va desde el Polo Sur al Polo Norte y que sobresale un poco, apuntando hacia el espacio. Pero al haber sido golpeada por desechos del sistema solar hace tiempo —especialmente cuando ocurrió la gran colisión que

creó la Luna—, la peonza que es la Tierra no apunta hacia arriba en relación con el resto del sistema solar. Imagina que estás mirando un plano del sistema solar en una mesa, y que en ese plano se ve el Sol en el medio y los planetas a su alrededor. El eje de la Tierra está ligeramente desviado hacia la izquierda. Y ahora que está girando en torno a ese eje inclinado, tiene que seguir girando alrededor del mismo eje. Así que cuando la Tierra se encuentra a la izquierda del Sol desde la posición en que lo estamos mirando, el extremo norte del eje está apuntando en dirección opuesta al Sol, hacia el espacio. Pero seis meses después, cuando la Tierra queda a la derecha del Sol, el extremo norte del eje sigue apuntando a la izquierda, es decir, que en esos momentos apunta en dirección al Sol. El eje de rotación de la Tierra no cambia de dirección a medida que gira alrededor del Sol; no hay nada que lo empuje, así que debe seguir girando igual que lo había venido haciendo hasta entonces. Pero eso significa que el Polo Norte recibe más o menos luz solar en función del lugar en que la Tierra esté orbitando. Nuestro ciclo de las estaciones sale de aquí⁶². Tenemos el ciclo del día y de la noche porque la Tierra nunca deja de rotar, y el ciclo de las estaciones porque el eje de esa rotación está inclinado⁶³.

La rotación forma parte de nuestras vidas de muchas formas. Pero hay un dispositivo en concreto que depende de la rotación, uno que es probable que veamos cada vez más en el futuro: el volante de inercia. Cualquier cosa que esté rotando gana energía adicional gracias a su rotación. Así pues, si un objeto que esté rotando seguirá haciéndolo indefinidamente, esto también significa que

puede funcionar como un almacén de energía. Si puedes recuperar la energía a medida que ralentizas la rotación, lo que tienes es una batería mecánica. Y el volante de inercia es justamente eso, y no es nuevo: llevan dando vueltas en el mundo desde hace siglos. Pero una nueva hornada de volantes de inercia está a punto de llegar a nuestra sociedad, un conjunto de dispositivos modernos extremadamente eficientes que podrían ayudarnos a resolver un problema importante.

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta cualquier red eléctrica es tener que compensar la oferta y la demanda en escalas de tiempo muy cortas. Si todo el mundo se pone a hacer la cena aproximadamente a la misma hora, el uso de energía en el país subirá durante alrededor de una hora y luego caerá. Idealmente, alguien que supervisara el sistema podría permitir la entrada de energía en la red según fuera necesario para igualar el pico de consumo. Pero eso resulta problemático cuando la energía proviene de una central eléctrica de carbón que tarda horas en encenderse y apagarse. Y quizás ni siquiera se podría controlar el ritmo ni el momento en que se generara la energía. Una de las dificultades con que se topan muchas fuentes de energía renovable es que no puedes decidir cuándo se generará la energía; es fácil almacenar energía mientras brilla el Sol, pero ¿qué pasa si no necesitas esa energía en ese momento?

A eso se podría responder que, en tal caso, lo único que hace falta es una batería que almacene la energía extra hasta que pueda ser utilizada. Pero las baterías eléctricas no son las más adecuadas

para este fin. Son caras de fabricar, normalmente requieren metales relativamente raros, tienen una cantidad limitada de ciclos de carga y descarga, y, además, existen límites en la velocidad a la que pueden almacenar y liberar la energía. Como respuesta a estas limitaciones, en los últimos años han surgido diversos prototipos de volantes de inercia. Y parece que esta tecnología podría ofrecernos una solución útil, al menos en algunas ocasiones. Un volante de inercia es un disco o cilindro giratorio y pesado cuyos soportes tienen la menor fricción posible. Una vez que empieza a girar, ya no se detendrá. Y puesto que hay energía asociada a la rotación, ese giro puede almacenar energía. Cualquier exceso de energía que haya en la red eléctrica se usa para hacer girar el volante, y este seguirá girando, reteniendo así la energía. Entonces, cuando se quiere recuperar esa energía, lo que hay que hacer es ralentizar el volante, convirtiendo la energía en electricidad. Se pueden cargar y descargar los volantes de inercia tantas veces como se quiera, y además liberan su energía con mucha rapidez. Solo se pierde un 10% de la energía que teníamos al inicio, y son dispositivos que requieren muy poco mantenimiento. Y lo que es aún mejor, se pueden fabricar según las necesidades de cada cual: los hay pequeños para colocarlos junto con los paneles solares del tejado o fabricados como un gran conjunto para moderar los picos de la red eléctrica. Incluso se están probando volantes de inercia pequeños y portátiles en los autobuses híbridos, para que almacenen la energía cuando el autobús frena y se la devuelvan a las ruedas cuando el autobús necesita aumentar la velocidad de nuevo. Los volantes de

inercia son atractivos porque están basados en una idea maravillosamente simple: la conservación del momento angular. Los huevos, las peonzas y el té removido siguen el mismo principio, pero se necesita una tecnología moderna y eficiente para convertirlo en una solución práctica. Todavía estamos en los albores de la materialización de esta tecnología, pero es muy probable que en el futuro veas girar volantes de inercia en muchas ocasiones.

Capítulo 8

Cuando los opuestos se atraen

Electromagnetismo

Un bolso que se ordene solo parece una quimera, pero puede que a fin de cuentas no sea algo imposible. El año pasado fui al Museo de la Ciencia de Londres para comprar unos bonitos imanes con forma de esfera, unos cuantos para un amigo y otros para mí misma, pues así es como tendríamos que actuar siempre cuando se trata de juguetes científicos, ¿no? Hice una parada para tomarme un chocolate caliente y jugar unos segundos con mis nuevos juguetes, y luego metí el puñado de imanes entre los jerséis que llevaba en la parte superior de mi bolsa de viaje y seguí mi camino. Dos días después, en Cornwall, recordé que hacía tiempo que no veía los imanes y rebusqué para ver dónde estaban. Cuando los encontré, estaban en el fondo de la bolsa, y al grupo de imanes se habían añadido siete monedas, dos clips y un botón metálico. Me estaba empezando a felicitar a mí misma por haber encontrado una forma nueva de mantener mi bolsa ordenada cuando me di cuenta de que en el fondo había otras monedas sueltas que no habían participado del juego. Así que empecé a clasificar las monedas para ver cuáles se quedaban pegadas y cuáles no. Algunas de diez peniques sí que se pegaban, pero otras no. Nada que tuviera un valor mayor de veinte peniques se quedaba adherido. La mayoría de las monedas de uno y dos peniques se pegaban, pero no las que databan de antes de 1992.

Los imanes son muy selectivos. No ejercen ningún tipo de atracción sobre la inmensa mayoría de los materiales, como, por ejemplo, los plásticos, las cerámicas, el agua, la madera y los seres vivos. Pero la cosa cambia cuando se trata del hierro, el níquel o el cobalto: todos ellos correrán hacia el imán si tienen la libertad de hacerlo. Es un pensamiento un tanto extraño, pero si el hierro no fuera uno de los materiales más comunes del mundo, seguramente el magnetismo no formaría parte de nuestra vida cotidiana. Este elemento forma por sí solo el 35% de la masa de la Tierra, y el acero —que es hierro en su mayor parte, con algunos añadidos— es una parte esencial de nuestras infraestructuras modernas. Si las puertas de los frigoríficos no estuvieran hechas del acero del que tanto nos fiamos, los imanes de nevera nunca habrían existido. Pero el acero está por doquier, así que el magnetismo es algo común.

Los imanes de mi bolsa organizaban las monedas según su composición. Las monedas modernas de uno y dos peniques están compuestas de un núcleo de acero cubierto por una fina capa de cobre en la superficie. Antes de 1992, estaban hechas con un 97% de cobre. A mis ojos, los peniques nuevos y los antiguos son prácticamente idénticos, pero los imanes responden a sus entrañas ocultas⁶⁴. La plateada moneda de veinte peniques no se pega a los imanes porque, curiosamente, está hecha de cobre prácticamente en su totalidad, igual que las monedas más antiguas de diez peniques; pero todas las acuñadas a partir de 2012 están hechas de acero niquelado. Todo lo que se pegó al imán estaba hecho de hierro

casi en su totalidad, incluso aquellas monedas que por su color parecen de cobre.

Los imanes están rodeados de un campo magnético, algo que podríamos llamar un «campo de fuerza». Esto significa que hay una zona a su alrededor que puede repeler y atraer a otros objetos, incluso si el imán no los está tocando directamente. Es una idea un poco extraña, pero así es como funciona el mundo. El problema de los campos magnéticos es que no los vemos y, en general, tampoco los sentimos, así que son difíciles de imaginar. Pero lo que sí vemos es el efecto que tienen, y eso nos puede servir de ayuda para imaginarlos. Y lo más importante sobre los imanes es que todos tienen dos extremos muy diferenciados: el polo norte y el polo sur.

El norte magnético de un imán atraerá al sur magnético de otro imán, pero dos polos norte se repelerán mutuamente. Mis monedas no eran magnéticas, pero los imanes se sirvieron de un truco muy inteligente para atraerlas. En el interior de una de mis monedas nuevas de un penique, los campos magnéticos de cada una de las partes del hierro que las forman apuntan en direcciones distintas. Estas partes se llaman dominios, y los campos magnéticos de los átomos de su interior están todos alineados. Cada dominio tiene su propio campo magnético, pero como los nortes magnéticos de todos los dominios apuntan aleatoriamente en direcciones diversas, se anulan los unos a los otros y la cosa queda en nada. Al acercar una moneda a uno de los imanes, el fuerte campo magnético del imán estaba empujando a todos los dominios del interior de la moneda por separado. Los átomos no se movían, pero su campo magnético

cambió rápidamente de dirección para que el extremo norte estuviera lo más alejado posible del norte de mi imán. Esto provocó que todos los polos sur de los dominios de la moneda se alinearan para estar lo más cerca posible del imán. Y como los polos opuestos se atraen, el polo sur de la moneda fue atraído por el polo norte del imán, y así fue como la moneda se pegó. En cuanto separé la moneda del imán, todos sus dominios magnéticos volvieron a apuntar en direcciones totalmente aleatorias.

Es un fenómeno extraño, pero los humanos hemos aprendido a usarlo de formas que ya están totalmente integradas en nuestras vidas. Lo vemos en algo tan sencillo como las monedas, los clips y los imanes de nevera; pero, en última instancia, los imanes son esenciales para los métodos de generación de energía que usamos para hacer funcionar nuestro mundo. En el interior de todos y cada uno de los dispositivos que proporcionan electricidad a nuestra red, hay un imán. Sin embargo, los imanes no lo hacen todo solos y el magnetismo es solo la mitad de la historia. Está ligado de un modo muy básico a la electricidad, algo tan vital para la sociedad moderna que ya casi ni reparamos en ello.

El escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke dijo que «toda tecnología lo suficientemente avanzada es indistinguible de la magia». Juntos, la electricidad y el magnetismo son responsables de más tecnologías mágicamente avanzadas que casi cualquier otra cosa. Si prestas atención a la física, verás que estas fuerzas invisibles son las dos caras de un mismo fenómeno: el electromagnetismo. Están totalmente unidas y se influyen

mutuamente. Pero antes de centrarnos en esa conexión, indaguemos un poco más en el lado que nos resulta más conocido: la electricidad. Por desgracia, la primera vez que la mayoría de nosotros siente la electricidad de forma directa, duele.

* * * *

Rhode Island es una parte diminuta y agradable del noreste de Norteamérica que durante dos años fue mi hogar. Su sobrenombre oficial es el «Estado del Océano», y a los oriundos de la zona se les ha pasado totalmente por alto la ironía de que el estado más pequeño del país tenga en su apelativo el rasgo más gigantesco del planeta. La mentalidad de los habitantes de Rhode Island se apoya en dos pilares: la costa y el verano. Allí, lo que se hace es salir a navegar, comer cangrejo en los restaurantes, degustar ensalada de caracol⁶⁵ e ir a la playa. Pero los inviernos son fríos. Entonces los turistas desaparecían, los vecinos hibernaban, y el aceite de oliva de mi cocina se solidificaba si apagaba la calefacción cuando salía de casa.

En los mejores días de invierno, al despertarme sentía una quietud especial que me decía, incluso antes de abrir los ojos, que había nevado por la noche. Para alguien que creció en el gris y húmedo Mánchester, aquello era siempre motivo de excitación. Todo me encantaba; todo, excepto un momento que se repetía. Después de ponerme las ceñidas botas de invierno, retirar la nieve de la entrada con la pala y reírme al ver cómo las ardillas escarbaban en esa

materia blanca, caminaba como podía hacia mi coche, envuelto en la quietud. Y todas las mañanas en las que nevaba, en cuanto tocaba el coche por primera vez, sentía el chasquido penetrante de una descarga eléctrica. Nunca me acordaba a tiempo. ¡Ay!

Siempre pensaba que, de alguna forma, la culpa era del coche, pero, contemplándolo en perspectiva, me doy cuenta de que él no tenía ninguna culpa. Mientras caminaba por la entrada hacia el coche, llevaba conmigo un pequeño rebaño de polizones que buscaban una vía de escape. El dolor era solo el efecto secundario de su salto al barco. Estos polizones eran electrones, fragmentos de materia increíblemente pequeños que resultan ser uno de los ladrillos más importantes con que se construye nuestro mundo. Lo maravilloso de los electrones es que no necesitas un moderno acelerador de partículas ni un experimento sofisticado para saber que se están moviendo. En la situación adecuada, nuestros cuerpos pueden detectar su movimiento por sí solos; lástima que lo registren en forma de dolor.

Lo primero en lo que debemos fijarnos es en la composición de los átomos. En el interior de cada átomo hay un gran núcleo que constituye casi todo su «material». Este núcleo tiene una carga eléctrica positiva importante, de modo que casi nunca estará solo. La carga eléctrica es un concepto extraño, pero mantiene nuestro mundo de una pieza. Solo hay tres tipos de ladrillos que forman prácticamente todo lo que vemos —los protones, los electrones y los neutrones—, y cada uno de ellos lleva asociada una carga eléctrica distinta. Los protones son mucho más grandes que los electrones y

su carga es positiva. Los neutrones son de un tamaño similar al de los protones, pero no tienen carga eléctrica. Y, en comparación, cada electrón es minúsculo, pero tiene la suficiente carga eléctrica negativa para compensar a un protón. Esta mezcla de ladrillos dicta la estructura de nuestro mundo. En el centro de cada átomo, los protones y los neutrones se agrupan para formar un núcleo robusto. Pero la electricidad del átomo debe estar compensada. Las cargas eléctricas afectan al mundo porque las cargas distintas se atraen y las iguales se repelen, como hemos visto con mis imanes y las monedas. Así las cosas, los diminutos electrones se enjambran alrededor del enorme núcleo porque su carga es negativa y, por lo tanto, es atraída hacia la carga positiva que hay en el centro. En general, las cargas positivas y las negativas se anulan las unas a las otras, pero la atracción mantiene al átomo de una pieza. Toda la materia que vemos está llena de electrones, pero como todo permanece en equilibrio, no los vemos. Solo llaman nuestra atención cuando se mueven⁶⁶.

El problema es que cuando los diminutos y ágiles electrones se unen al juego, no siempre se mantiene el equilibrio. En el momento en que dos materiales distintos se tocan, los electrones tienden a saltar de uno al otro. Pasa constantemente, pero por regla general no tiene importancia porque los electrones de más suelen encontrar el camino de vuelta con bastante rapidez. Andar por casa en calcetines no era un problema, ya que algunos electrones saltaban de la moqueta de nailon a mis pies en cada paso, pero enseguida encontraban el camino de vuelta. Pero cuando me puse las botas

con forro de lana y suela de goma, las cosas cambiaron un poco. Los errantes electrones saltaban de la moqueta a las suelas de goma, igual que habían hecho hasta entonces. Pero, por muy ágiles que sean los electrones, hay algunos materiales que les cuesta atravesar. A estos materiales se les llama aislantes eléctricos, y la goma es uno de ellos. La goma tiene muchos electrones propios, pero no le resulta fácil absorber electrones nuevos. Mientras preparaba mi bolsa, cogía el abrigo y recogía las cosas del desayuno, iba acumulando electrones a medida que ellos saltaban hacia mí sin que me diera cuenta. Esto hizo que hubiera electrones extras dispersándose por la superficie de mi cuerpo. Cuando salí de casa, me había convertido en el vehículo de miles de millones de electrones adicionales, lo que es una cifra astronómica, pero no deja de ser una fracción minúscula del séquito de electrones de mi cuerpo.

¿Por qué no escapaban? Cada uno de esos electrones adicionales estaba siendo repelido por los otros, de manera que cualquier forma de escape habría sido mejor que quedarse donde estaban. Pero mis botas no les permitían escaparse a través del suelo. Hay otra vía de escape común: el aire húmedo, pues este contiene muchas moléculas de agua, todas con una parte positiva capaz de acoger a un electrón extra durante un rato. Normalmente, mi rebaño de electrones añadidos se habría escapado sin remisión, viajando en autoestop en el agua que flotaba en el aire. Pero los días fríos después de una copiosa nevada suelen ser secos. Hay muy poca agua en el aire, por lo que aquella no era una salida posible.

Así pues, cada día seco y nevoso bajaba por el camino que unía mi casa con mi coche totalmente inconsciente de que llevaba conmigo miles de millones de polizones de carga negativa, al menos hasta que llegaba su oportunidad. El coche estaba aparcado en el suelo, sobre un enorme lago de electrones en equilibrio con los núcleos. Ese instante en el que mis dedos desnudos entraban en contacto con el metal del coche era como si un túnel se abriera para la gran escapada. El metal es un conductor eléctrico, así que los electrones pueden fluir con mucha facilidad. Mis electrones polizones salieron en tropel a través de la piel de la yema de mi dedo, libres al fin en cuanto entraron en contacto con el coche. Las terminaciones nerviosas de la piel tintinearón cuando la muchedumbre pasó zumbando, directamente estimuladas por la circulación de los electrones, es decir, por la corriente eléctrica. Y entonces yo soltaba algún taco, olvidándome temporalmente de la magia de la nieve.

Hoy en día, la forma más directa de experimentar la electricidad que tenemos la mayoría de nosotros son los choques eléctricos. Pero lo cierto es que estamos rodeados de electricidad. Las paredes de los edificios, los dispositivos electrónicos, los coches y las lámparas, los relojes y los ventiladores, todos están repletos de ella. Pero la electricidad no está solo relacionada con los enchufes y los cables, con los circuitos y los fusibles. Estos no son más que simples trofeos que nos muestran la manipulación humana del fenómeno, pero nuestro planeta bulle de electricidad en muchos lugares sorprendentes. Incluso los abejorros participan de este proceso.

Imagina un día caluroso, tranquilo y apacible en un jardín inglés con un pinzón que pica minuciosamente el borde del césped. Tras él vemos varias hileras de alegres flores enzarzadas en una batalla lenta pero feroz por conseguir agua, nutrientes, luz solar y la atención de los polinizadores. El aroma del jazmín y de los guisantes viaja por la hierba, pregonando sus mercaderías. Una abeja zumba por el parterre, inspeccionando lo que se ofrece. A nuestros ojos, puede que la escena parezca exenta de estrés, pero la abeja está trabajando de firme y debe ser eficiente. Mantenerse en el aire le está costando muchísimo. Tiene que batir sus pequeñas alas doscientas veces por segundo, y los golpes del aire son tan fuertes que emiten unas vibraciones que podemos oír: el zumbido del insecto. Cuando se tiene el tamaño de una abeja, la resistencia al aire es mucho mayor de lo que lo es para nosotros, así que a ellas les resulta mucho más difícil abrirse camino entre todas esas moléculas de aire. Abrirse paso a golpetazos por el aire no es una forma elegante de volar, pero es eficaz, de modo que la abeja planea un segundo junto a una petunia de color rosa antes de decidir que esta será su próxima parada. Cuando está adentrándose en ella, pero sin llegar a tocarla, ocurre algo muy extraño. Los granos de polen que estaban en el centro de la flor de pronto salvan la distancia y se pegan al cuerpo de la abeja. Y cuando se posa en la flor, se le pega todavía más polen. Aún no ha dado un solo trago de néctar y ya lleva puesto un abrigo del ADN de la planta, y es como si este se le estuviera pegando deliberadamente.

Resulta que volar hace que la abeja sea, literalmente, muy atractiva. Pero eso no tiene nada que ver con su apariencia o su comportamiento; es porque tiene carga eléctrica, aunque sea muy leve. Al igual que mi choque eléctrico, ella tiene carga eléctrica porque algunos electrones han cambiado de sitio. Pero, en esta ocasión, nadie se hace daño.

Los electrones de la abeja merodean por los bordes de cada molécula de sus alas. Si algo se mueve muy rápido alrededor de la abeja —por ejemplo, el aire— y algo ha de perderse, será un electrón. Y eso es justamente lo que ocurre. Sucede lo mismo que cuando se frota un globo contra un jersey de lana: la electricidad estática aumenta, lo que significa que algo tiene más o menos electrones de los que debería. A medida que esas alas frenéticas apartan las moléculas de aire, los electrones se les van desprendiendo y quedan flotando en el aire. Así que la abeja voladora se queda con una cierta carga positiva porque ya no tiene los electrones necesarios para neutralizar la carga positiva de todos los protones de sus átomos. Pero esto ocurre a muy pequeña escala, por lo que no causará nunca un choque eléctrico a un humano.

Cuando la abeja se acerca a la flor, atrae a los electrones de carga negativa a la superficie y repele las cargas positivas. Igual que el polo norte de un imán tira de su opuesto —el polo magnético sur— para acercárselo, la abeja con carga positiva tira de los electrones de carga negativa. Cuando ya se encuentra muy cerca pero todavía no está tocando la flor, la carga positiva de la abeja tira de la superficie del polen con la fuerza suficiente para arrancar algunos granos y

salvar el espacio que queda entre ella y la flor. Entonces el polen se pega al cuerpo de la abeja de la misma forma que un globo con carga electrostática se pegaría a una pared. Cuando la abeja vuela hacia la siguiente flor, el polen viaja con ella. La polinización de las abejas no necesita de la electricidad estática para funcionar, ya que las setas o pelos de la abeja tocan el polen cuando esta se posa en la flor, y el polen se le adhiere porque es pegajoso. Pero no hay duda de que esos electrones sueltos que cambian de sitio y hacen que el polen pueda saltar hacia la abeja son una ayuda⁶⁷.

Los electrones son diminutos y móviles, así que cuando una carga eléctrica se mueve, son ellos los que suelen proporcionar el transporte. Se mueven mucho de aquí para allá, pero normalmente no nos damos cuenta. Los electrones se repelen los unos a los otros por tener todos carga negativa, así que si una gran cantidad de ellos se acumulan en el mismo sitio, se apartarán mutuamente y flotarán hacia otra parte. Nunca se llega a acumular una carga importante. Pero hay dos posibles situaciones que pueden detener esa flotación y atrapar la carga: cuando los electrones no tienen dónde ir o no se pueden mover. Cuando la abeja está volando, su carga positiva no tiene ningún lugar adonde ir, así que se va acumulando en el exterior del cuerpo de la abeja.

Pero es la otra situación —aquella en la que los electrones no pueden moverse— la que nos permite tener un increíble control sobre la electricidad. Si la abeja se posa en una planta de plástico, la carga positiva no se puede transferir porque el plástico es un aislante eléctrico. Esto significa que, aunque el plástico tenga

muchos electrones propios, están totalmente pegados a sus moléculas y no se pueden mover. Es difícil añadir o sustraer algunos electrones a la mezcla, porque no se pueden escabullir entre todos los demás. Esto es lo que define a un aislante eléctrico, ya que no tiene la capacidad de guardar o dejar ir algunos de sus electrones extra. Así que cuando una abeja aterriza en una planta de plástico, la carga positiva se queda en la abeja. Un rastrillo metálico de jardín robaría la carga de la abeja al instante, dado que los metales conducen la electricidad y los electrones se pueden mover en su interior sin ningún problema. La razón por la que el metal se comporta de esta manera es que todos sus átomos comparten sus electrones externos en un gran enjambre situado a su alrededor. Como esos electrones se están moviendo constantemente y ninguno de ellos pertenece a ningún átomo en concreto, es fácil añadir o sustraer algunos de ellos.

Si nuestra sociedad puede tener y controlar una red eléctrica es porque disponemos de ambos tipos de materiales, conductores y aislantes. Eso es todo lo que se necesita: un mosaico de materiales que no es otra cosa que un laberinto para electrones en el que algunos caminos resultan más fáciles que otros, y una forma de controlar algunas de las secciones de ese patrón. Una vez que has conseguido estos dos componentes básicos, tienes un control increíble sobre el mundo.

* * * *

La electricidad estática es un comienzo, pero la verdadera energía aparece cuando empiezas a mover los electrones y las cargas eléctricas de una forma más sistemática. Nuestra red eléctrica, la red que usamos para transportar la energía de un punto a otro, es un recurso asombroso. Para depositar la energía allá donde se necesite, lo que hacemos es empujar la carga eléctrica a lo largo de los cables y controlarla con la ayuda de unos pequeños interruptores y amplificadores. Un circuito eléctrico no es más que una forma de redistribuir la energía eléctrica. Lo más importante de un circuito es que se trata justamente de eso, de un circuito. Debe tener una trayectoria en bucle para que los electrones puedan ir moviéndose sin acumularse todos en el extremo más alejado. Todos los circuitos tienen que empezar y terminar en una fuente de alimentación, algo que fuerce a los electrones a seguir moviéndose, que los tome en un lado, los empuje y los vuelva a meter de nuevo en el circuito por el otro lado. La fuente de alimentación es como un ascensor que sube a la gente hasta el punto más alto de un tobogán larguísimo. Las personas pueden deslizarse por el tobogán y volver a subir, dando vueltas todo el día, siempre que haya un ascensor que les proporcione la energía que necesitan para volver al punto de salida. La regla que gobierna todos los circuitos es que tienes que perder toda esa energía de la fuente de alimentación antes de que los electrones puedan volver al punto en el que empezaron.

Está muy bien que los electrones se muevan a lo largo de los cables, pero ¿qué los empuja por el circuito? Hemos dicho que lo primero que se necesita es un conductor eléctrico, algo que proporcione el

camino por donde el electrón pueda moverse. Pero la otra cosa que necesitamos es una fuerza que lo empuje.

Si un imán de nevera y un globo cargado de energía estática resultan extraños es por una misma y única razón: nos demuestran que es posible tener un campo de fuerza invisible. O, dicho de otro modo, que un objeto inmóvil empuje o tire de otro objeto cercano, pero sin que tú veas qué es lo que ejerce ese impulso. Esta similitud no es casual, pero la verdadera conexión solo se hace evidente cuando empiezas a mover el campo magnético o eléctrico. Pero antes de nada, volvamos al principio del campo de fuerza, porque los humanos no son los únicos que lo usan.

El lecho de un arroyo es un turbio laberinto de color marrón formado por rocas, plantas y raíces. Está anocheciendo y el agua lodosa fluye perezosamente sobre el circuito de obstáculos, atravesándolo. Un metro por debajo de la superficie, dos pequeñas antenas sobresalen en la parte inferior de un guijarro y se mueven nerviosamente mientras prueban el agua. Algo se mueve no lejos de allí, y entonces las antenas desaparecen. Esta gamba de agua dulce es carroñera y en ese momento está hambrienta, pero es vulnerable. Río arriba, un cazador se desliza en el interior del agua. Avanza por la superficie hacia el centro del arroyo batiendo las patas palmeadas delanteras, cierra los ojos, bloquea la nariz, sella las orejas y se sumerge. El ornitorrinco tiene ganas de cenar.

Si la gamba permanece completamente inmóvil, estará a salvo. El ornitorrinco nada rápidamente, decidiendo sin ninguna duda qué camino ha de seguir en el laberinto, a pesar de que en ese instante

es ciego, sordo e incapaz de oler nada. Mueve su plano hocico de un lado a otro mientras escanea el lodo. Otra gamba que busca comida siente el movimiento del agua cuando el ornitorrinco se acerca y chasquea la cola, volviendo a hundirse en la grava. El cazador vira en dirección a la gamba. La señal que ha obligado al músculo de la gamba a contraerse era una señal eléctrica. Esta ha creado un campo eléctrico temporal cuyo centro era la gamba. Esa perturbación eléctrica ha destellado en el agua de alrededor y ha ejercido unos empujes y tirones muy leves que han afectado a los electrones cercanos. No ha durado más de una fracción de segundo, pero es suficiente para el ornitorrinco, ya que las caras superior e inferior de su pico tienen cuarenta mil electro-sensores. El movimiento del agua y el pulso eléctrico simultáneo le han bastado para detectar la dirección y alcance de su presa. El pico penetra violentamente la arena en el lugar adecuado, y la gamba desaparece de la faz de la Tierra.

El movimiento de la gamba la ha condenado porque al moverse ha cambiado su campo eléctrico. Toda carga eléctrica empuja o tira de las cargas eléctricas que la rodean. Un campo eléctrico no es más que una forma de describir la fuerza que ese empuje o tirón alcanza en distintos lugares, mientras que cuando hablamos de las señales eléctricas nos referimos a que una carga eléctrica se ha movido y ha cambiado de sitio, y algo que andaba cerca ha percibido el cambio porque el empujón o el tirón que siente ha crecido o se ha reducido. Como los movimientos musculares conllevan el traslado de cargas eléctricas por el interior de los músculos, todos ellos tienen campos

eléctricos. Esto convierte la electro localización en una técnica de caza fiable debajo del agua, siempre que estés lo suficientemente cerca de tu presa, porque por muy colorido que sea el camuflaje, nada puede disfrazar una señal eléctrica. Todo animal tendrá que moverse en un momento u otro, y el movimiento más leve generará una señal eléctrica que podrá dejarlo al descubierto.

Si esto es así, ¿por qué no somos más conscientes de los campos eléctricos que nosotros mismos generamos? En parte, porque esos campos no son muy potentes, pero sobre todo porque los campos eléctricos se deterioran rápidamente en el aire, ya que este no conduce la electricidad. El agua de los ríos —y especialmente el agua salada del océano— es un excelente conductor de la electricidad, así que las señales eléctricas se pueden detectar desde mucho más lejos. Casi todas las especies que usan electro-sensores son acuáticas, y entre las excepciones más conocidas se encuentran las abejas, los equidnas y las cucarachas.

En un circuito eléctrico, los electrones se mueven porque en el interior del cable hay un campo eléctrico. Este empuja a cada uno de los electrones, impulsándolo hacia delante. Pero ¿de dónde proviene ese campo eléctrico? Un buen sitio para empezar a entenderlo es una batería. Existen baterías de todas las formas y tamaños, pero hay un tipo concreto que jamás olvidaré. Se trata de las grandes baterías marinas que tan preocupada me tenían porque se quedaron flotando durante una fuerte tormenta, y eran las encargadas de proporcionar la energía a mi única oportunidad de realizar un experimento importante.

Para estudiar la física de la superficie oceánica durante las tormentas, lo que hay que hacer es observar dicha superficie. El océano es un entorno sumamente complicado, y la utilidad de teorizar desde un despacho calentito es limitada, a menos que estés seguro de que tu materia de estudio está totalmente basada en la realidad. Pero incluso cuando llegas allí y estás en un barco a muchas millas de la costa en un mar picado, sigue siendo difícil alcanzar la zona que a mí me interesa, es decir, el agua que se encuentra unos cuantos metros por debajo de la superficie. Saber lo que ocurre ahí abajo mejorará nuestro entendimiento de cómo respiran los océanos y nos permitirá hacer mejores previsiones meteorológicas y modelos climáticos más precisos. Pero para ver los detalles, tienes que estar dentro, y resulta que es un lugar violento, caótico y peligroso. Yo no puedo nadar en esas aguas, pero mis experimentos tienen que hacerlo. Los experimentos necesitan energía, una toma de electricidad, y la necesitan mientras están balanceándose en las olas, fuera del barco. No se pueden enchufar a ningún sitio, así que no me queda otra que confiar en las baterías. Y, afortunadamente para mí, los circuitos eléctricos funcionan igual de bien cuando están balanceándose de aquí para allá que cuando se encuentran en tierra firme.

* * * *

El contramaestre frunció el ceño mientras escudriñaba el horizonte, metió las manos en los bolsillos de su sudadera manchada de

pintura y se bamboleó mientras caminaba hacia mí por la cubierta del barco. Era noviembre, estábamos en el Atlántico Norte y hacía cuatro semanas que no veía tierra firme. Todo se movía, bien hacia arriba, bien hacia abajo, mientras nosotros flotábamos sobre un agitado mar gris que se mezclaba con el cielo gris en todas las direcciones. El rollo de cinta aislante que acababa de dejar en el suelo se aprovechó de mi momentánea distracción y patinó por la cubierta hasta que llegó a los pies del contramaestre. En ese momento, su marcado y alegre acento de Boston me resultó gracioso, ya que parecía estar fuera de lugar en aquel entorno tan inhóspito.

— ¿Cuánto vas a tardar?

Para mí, la peor parte de los experimentos en el mar son siempre estas últimas comprobaciones antes de dejar que mis experimentos floten a sus anchas. Estaba nerviosa, y la responsabilidad de esta parte recaía solo en mí. Para medir las burbujas que había justo debajo de las olas al romperse, iba a usar una gran boya amarilla a la que había pegado varios dispositivos de medición. El contramaestre era el responsable de guiar a esa bestia hacia fuera del barco y dejarla en el mar ondeante, pero yo tenía que asegurarme de que todo estaba listo. La tormenta que se acercaba iba a ser de las fuertes, y yo estaba ansiosa por recoger datos.

—Estoy a punto de conectar las baterías, es lo único que falta — dije.

La monstruosa boya amarilla de once metros de longitud que llevaban mis experimentos estaba atada a la cubierta,

perfectamente engrilletada hasta que fuera seguro soltarla. Empecé con la cámara fotográfica acorazada que había cerca de la parte superior y llevé la mano hacia el conector de la corriente, siguiendo el cable hasta la parte inferior de la boya, donde se encontraban las enormes baterías, y lo conecté. Volví de nuevo hacia arriba para ocuparme de los resonadores acústicos. Puse la mano en el cable de corriente, seguí el cable hasta las baterías y lo conecté. Comprobé entonces que la conexión fuera segura. Lo comprobé de nuevo y luego seguí con la otra cámara. Estos experimentos podían manejar de un modo increíblemente delicado y sofisticado el mundo físico, pero solo si disponían de energía eléctrica. Y sus fuentes de energía eran cuatro engorrosas baterías marinas de ácido y plomo de cuarenta kilos de peso cada una, cuyo diseño básico no ha cambiado demasiado desde que se inventaron en 1859. Pero funcionan.

Cuando llegó el momento, los científicos, ataviados con chubasqueros, nos apiñamos en uno de los extremos de la cubierta, y la tripulación y la grúa tomaron el control para poder elevar aquel monstruo bamboleante por encima del lateral del barco e introducirlo en el oscuro océano. Cuando la última cuerda se soltó, la perspectiva cambió y la enorme bestia amarilla se convirtió en una vulnerable pieza de los restos flotantes de un naufragio, diminuta en comparación con el enorme océano y a menudo escondida entre las olas. Todos los que estaban mirando por encima de la barandilla empezaron a hablar sobre la posición de la boya y la

velocidad a la que se estaba alejando del barco. Pero yo no pensaba en nada de eso: pensaba en electrones.

Bajo la línea de flotación, los electrones habían empezado su danza particular: salían a rastras de la batería, se movían por los circuitos de la boya y volvían a entrar por el otro lado de la batería. Había una cantidad fija de electrones en el interior de cada circuito, y todos seguían la misma trayectoria cerrada. Los electrones no se gastan; simplemente dan vueltas y más vueltas. La trampa está en que se necesita energía para empujarlos, y a medida que avanzan van perdiendo esa energía. La fuente de tal energía es la batería, que es un aparato de lo más ingenioso.

Lo que hace a las baterías geniales es que forman una cadena de acontecimientos. Cada eslabón de la cadena proporciona los electrones que necesita el próximo eslabón, así que, cuando la batería se encuentre conectada a un circuito, todo está preparado para que los electrones puedan fluir alrededor del bucle. Aquellas baterías marinas tenían dos terminales que sobresalían para poder conectarlos con el mundo exterior. En el interior, cada terminal estaba conectado a una de sus dos placas de plomo, pero esas placas no se tocaban entre sí. El espacio entre ellas estaba lleno de ácido, y de ahí el nombre de baterías de plomo y ácido. El plomo puede reaccionar con el ácido de dos formas: en una necesita recibir algunos electrones adicionales, y en la otra proporciona esos electrones suplementarios. Una batería de ácido y plomo se carga cuando esas dos reacciones se han llevado al máximo posible.

Cuando enchufé el equipo a cada una de las baterías, lo que hice fue proporcionar un camino que unía una placa de plomo con la otra a través de mi aparato. Y entonces apareció la pieza final del puzle, la más importante: gracias a la química que había en las placas de plomo, se había creado un campo eléctrico en el interior del cable. Los electrones estaban siendo empujados a lo largo del cable, alejándose de una de las placas de plomo en dirección a la otra. No podían llegar a ella debido a la intervención del ácido, así que su única opción era tomar el camino más largo e ir por fuera del circuito. Cuando los electrones disponen de un camino en el que un campo eléctrico los empuja hacia delante, se pueden deshacer las reacciones porque la cadena ya ha terminado. Un conjunto de placas de plomo proporciona electrones al ácido, y entonces el ácido transmite esta carga al plomo de la otra placa. El plomo de esta segunda placa toma los electrones en cuanto reacciona, y todo ello sigue funcionando porque los electrones pueden moverse por el circuito y regresar al primer conjunto de placas. El hecho fundamental es que, en su viaje a través de la parte posterior de la cámara, los electrones tienen energía adicional de la que tienen que desprenderse. Eso es la electricidad. Y si lo dispones todo para que tengan que pasar por un sofisticado circuito eléctrico, ¡tachán!, puedes utilizar esa energía y tener una útil batería.

Cuando me asomé por encima de la barandilla para observar aquella boya amarilla que flotaba en el mar, me estaba imaginando esa danza. La cámara se encendería, abriendo así un camino para los electrones de la batería, estos irían rebotando hacia el eje de la

boya y penetrarían el armazón de la cámara. Se puede controlar la trayectoria de los electrones porque sabemos que siempre tomarán el camino más fácil. Así que lo que hacemos es abrir un camino por el laberinto que esté hecho de un material conductor. El cable de la corriente es metálico, lo que hace que los electrones puedan moverse por ahí con mucha más facilidad que por el revestimiento exterior de plástico, así que sabemos que la electricidad fluirá por dentro del cable y no se escapará hacia el material que lo rodea. A partir de ahí, el elemento de control más básico es un interruptor. Un interruptor cerrado es un punto del circuito en el que dos partes del cable eléctrico entran en contacto. No están unidas con pegamento, pero, cuando se tocan, los electrones pueden pasar por ellas. Para detener el flujo, solo hay que apartar uno de los extremos del cable del otro, y el flujo eléctrico se detendrá porque ya no encuentra una ruta por donde sea fácil pasar.

En el interior de la cámara, el camino de los electrones se separa, y, así, algunos entran en el ordenador y otros en la propia cámara. Pero, en los circuitos eléctricos, al final, todos los caminos llevan a Roma o, en este caso, de vuelta a la batería. La gigantesca boya amarilla no era más que el esqueleto que albergaba este flujo ramificado de electrones, y los propios electrones estaban generando campos eléctricos y magnéticos que tiraban y empujaban los obturadores de la cámara, que actuaban como temporizadores, generaban estallidos de luz y registraban datos en una enorme e intrincada secuencia sincronizada, antes de regresar a la batería.

Todo esto ocurría mientras las enormes olas de una tormenta atlántica —algunas de las cuales llegaban a medir entre ocho y diez metros de altura— empujaban la boya de un lado para el otro. Nosotros nos balanceábamos en el barco de investigación y esperábamos, viviendo una vida en la que la gravedad era una amiga traicionera y en la que solo podíamos mantener el orden bajo control si asegurábamos todos los objetos con velcro o con cuerdas o sogas elásticas. Al cabo de tres o cuatro días, la reacción química de la batería había terminado y esta volvió a su estado de descarga original. Ya no quedaba energía almacenada, los electrones no podían ser empujados por los circuitos, y el baile había terminado. La boya volvió a convertirse en una cáscara inanimada hecha de metal, plástico y semiconductores. Pero los datos se habían almacenado en una unidad de memoria sólida y estaban a salvo.

Unos días más tarde, cuando la tormenta hubo amainado, localizamos la boya y la subimos a bordo. Siempre me asombra la destreza de las tripulaciones de los barcos de investigación cuando pescan objetos en el agua. Los barcos no se mueven de lado, y se tarda mucho en virar o cambiar el rumbo. Para poder recuperar la boya, el capitán tuvo que colocar su embarcación de 75 metros de eslora justo al lado de ella, y no solo logró evitar pasarle por encima, sino que además se acercó a la distancia suficiente para que el conremaestre pudiera asomarse por la barandilla y atraparla con un bichero. Y normalmente lo consiguen a la primera.

Luego volvió a ser el turno de los científicos. Enchufamos las baterías a la corriente del barco para proporcionarles energía y

conseguir así que las reacciones químicas volvieran a su estado anterior, listas para su próximo despliegue. Despegamos nuestros experimentos y nos los llevamos dentro, a excepción de la cámara. Esta se quedó afuera, donde hacía un frío helador, porque el baile de los electrones tiene una desventaja, y mi pobre estudiante de doctorado estaba a punto de pagar su precio.

Puede que sea la ley de la física más fundamental que conocemos, y su precisión se ha demostrado una y otra vez y jamás ha sido cuestionada: se trata de la conservación de la energía. Esta ley dice que la energía ni se crea ni se destruye, solo cambia de forma. La batería tenía energía química, y las reacciones químicas convirtieron dicha energía en energía eléctrica, y luego, en algún punto entre un terminal de la batería y el otro, la energía siguió su camino. Pero ¿adónde fue? Ocurrieron algunas cosas: la cámara hizo fotografías, se ejecutaron los programas informáticos y se registraron los datos. Pero nada de eso almacenó la energía eléctrica en un lugar nuevo. La energía simplemente se lixivió, sin que nadie se diera cuenta. Si hay que pagar un precio por el movimiento de los electrones, ese es la generación de calor. Toda resistencia eléctrica aplica un impuesto energético a la energía eléctrica que se mueve por ella. Aunque los electrones escojan el camino cuya resistencia es menor, no consiguen evitar el pago de sus impuestos⁶⁸.

La cámara estaba protegida por una carcasa de plástico grueso, un material que no transmite el calor nada bien. Cuando estaba encendida, toda la energía de los electrones se terminó convirtiendo en calor a medida que fluían por el sistema. Esto no tenía

importancia en el agua, porque el océano en el que estábamos rondaba los 8 °C de temperatura y se quedaba con el calor, lo que resultaba muy eficaz para enfriar la carcasa. Pero el aire no tiene esa capacidad, así que cuando nos encontrábamos en el laboratorio y el ordenador estaba descargando los datos, la cámara no dejaba de sobrecalentarse. Hicimos lo que pudimos, pero la única solución que encontramos fue dejarla en el exterior dentro de un cubo con agua helada —el barco disponía de una máquina de hielo, lo cual nos fue muy útil—, y mi estudiante de doctorado tuvo que pasarse nueve o diez horas iniciando y deteniendo las descargas para que los datos siguieran fluyendo, pero evitando que la cámara se achicharrara. Así de glamuroso es el trabajo científico de campo.

Este es el motivo por el que los portátiles, las aspiradoras y los secadores de pelo se calientan con el uso. La energía eléctrica tiene que ir a parar a algún sitio, y si no se transforma en otro tipo de energía, su destino final es convertirse en calor. Los secadores de pelo se aprovechan de esto para calentar el aire: sus circuitos están dispuestos de modo que puedan soltar energía en forma de un calor muy concentrado. Pero los fabricantes de portátiles odian el calor, porque los circuitos funcionan de manera mucho menos eficiente cuando se calientan. Y no se puede usar la energía eléctrica sin pagar el impuesto del calor⁶⁹.

Hemos dicho que los electrones fluyen porque un campo eléctrico los empuja. Una batería no fabrica electrones, ya que el mundo está repleto de ellos. Lo que hace es proporcionar el campo eléctrico para que los electrones se muevan. Y si el circuito está completo, este

campo eléctrico empujará a los electrones para que avancen por ese bucle. Hasta aquí, es sencillo. Pero ¿qué son esos pequeños números que vemos inscritos en las advertencias de seguridad de los enchufes? Puede que para resolver esta cuestión, lo mejor sea adoptar el enfoque con el que los ingleses afrontamos todos los problemas: coger la caja de las galletas y poner a hervir agua para el té.

Lo más importante de hacer una pausa para tomarse un té es que implica hacer un descanso y tomar té. Algunos de mis colegas norteamericanos nunca llegaron a comprenderlo, y solían llevarse el trabajo consigo para seguir hablando de ello mientras tomábamos el té. Pero para los británicos, el hecho de «poner agua a hervir» significa un cambio de ritmo. Voy a hacerlo ahora mismo y, como mi hervidor es eléctrico, lo único que tengo que hacer es llenarlo de agua y enchufarlo a la corriente. Doy permiso a mi mente para que deje de trabajar durante un rato mientras el hervidor hace su trabajo.

Cuando bajo el interruptor se produce algo muy sencillo: se mueve una pieza de metal y, de esta forma, queda colocado en su sitio el último segmento del circuito. Ahora hay una ruta en el laberinto del hervidor, un camino compuesto únicamente por conductores eléctricos a través de los cuales los electrones pueden viajar con facilidad. No hay nada que interrumpa este camino, que discurre desde una de las clavijas del enchufe, atravesando el hervidor, y de vuelta luego a la segunda clavija. En este caso, el campo eléctrico no proviene de una batería, sino de la toma de corriente.

En un enchufe estándar de tres clavijas⁷⁰, la clavija superior es más larga que las demás y recibe el nombre de toma de tierra. Está completamente separada del resto del circuito. En términos prácticos, lleva a cabo la misma tarea que mi coche en esas frías mañanas sembradas de nieve, ya que está ahí para proporcionar una vía de escape en caso de que algunos de esos electrones empiecen a acumularse en el lugar equivocado, por ejemplo, en el exterior del hervidor. Así que esta clavija no forma parte del camino que va a proporcionar energía al hervidor.

Las otras dos clavijas, las más pequeñas, son las encargadas de empujar los electrones. Una de ellas se comporta como una carga positiva fija, y la otra como una carga negativa fija. Cuando presiono el interruptor, conecto un camino por el que ahora discurre un campo eléctrico. Los electrones que viajan por ese camino reciben un empuje que los aleja del extremo negativo y una atracción que los acerca al extremo positivo. Así que mientras cojo la tetera y saco algunas bolsitas de té, los electrones están empezando a moverse. De todas formas, ya se estaban revolviendo como locos, pero en estos momentos tienen una leve tendencia a moverse por el cable. Y eso significa que, en general, existe un movimiento de carga eléctrica que empieza en una clavija del enchufe, atraviesa el hervidor y sale por la otra clavija.

En el fondo de mi hervidor hay una etiqueta que me dice que ha sido diseñado para funcionar a 230 voltios (230 V). El voltaje tiene que ver con la fuerza del campo eléctrico que empuja a los electrones por el circuito. Cuanto más fuerte sea el campo eléctrico,

más energía tendrá que liberar el electrón a medida que avanza. Eso es lo que nos dice el alto voltaje: indica la cantidad de energía que está disponible para ser usada a lo largo del circuito. Si lo relacionamos con la analogía del tobogán de antes, el voltaje sería la altura del tobogán por el que los electrones tendrán que bajar a toda prisa antes de regresar a la otra clavija del enchufe. Cuanto mayor sea el voltaje, mayor será la energía que cada electrón tendrá que desprender por el camino.

He lavado la tetera antes de meter las bolsitas de té, y ya tengo preparadas la leche y la taza. Ahora estoy esperando a que se caliente el agua. Solo tarda un par de minutos, pero cuando tengo sed me vuelvo muy impaciente. ¡Espabila! Sé cuál es el voltaje de la toma eléctrica, pero esa es solo una parte de la historia. Cuanto más alto sea el voltaje, más energía podrá desprender cada electrón, pero eso no nos dice cuántos electrones están viajando por el circuito. La forma más sencilla de soltar grandes cantidades de energía en el agua es asegurándonos de que haya muchos electrones fluyendo por el circuito. A esto se le llama corriente eléctrica y se mide en amperios. Cuanto mayor sea la corriente, más electrones por segundo pasarán por un punto del cable. Cuando multiplicas el voltaje de la toma por la corriente que fluye por el circuito (expresada en amperios), obtienes la cantidad total de energía depositada por segundo. Mi hervidor funciona con una toma de 230 V y soporta una corriente de 13 amperios, de forma que: $230 \times 13 = 3000$ (aproximadamente). La base del hervidor coincide con esto, ya que dice que la potencia del hervidor es de 3000 vatios

(3000 W), lo que equivale a 3000 julios de energía liberada por segundo. Eso basta para llevar mi agua a ebullición en algo menos de dos minutos, pero desprenderá algo de calor a su alrededor, así que, en la práctica, tarda más bien unos dos minutos y medio.

No tengo ninguna intención de probarlo en mi piel mientras espero a que se haga el té, pero se suele decir que «los voltios sacuden, la corriente mata». Probablemente, la diferencia de voltaje entre mi coche y yo ese día en Rhode Island rondaba los 20 000 voltios. Pero solo una pequeña cantidad de carga eléctrica llegó a otro sitio, así que no me hizo demasiado daño. La corriente era ínfima y se transfirió muy poca energía. Si conectara con los dedos el camino que une los dos terminales de un enchufe, haciendo que mi cuerpo ocupara el lugar del hervidor, sería otra historia. Que una corriente sea elevada significa que hay muchos electrones y que cada uno transporta la misma cantidad de energía. La cantidad total de energía es enorme, porque hay muchos electrones correteando. Sería mucho más peligroso que la descarga del coche, aunque la diferencia de voltaje entre las clavijas y el hervidor sea solo una centésima parte de la diferencia de voltaje entre mi coche y yo. Cuando se trata del daño potencial que puedes sufrir, lo que más hay que tener en cuenta es la corriente.

Mientras los electrones se mueven por el metal del elemento calorífico, están siendo empujados por el campo eléctrico. Eso hace que ganen algo de velocidad, pero el conductor está compuesto de muchos átomos, así que, inevitablemente, estos electrones acelerados van a ir chocando contra lo que encuentran en su

camino. Cuando chocan pierden algo de energía, calentando así aquello contra lo que han chocado. Así pues, forzar que mucha carga se mueva implica que habrá multitud de choques y un elevado calentamiento. El hervidor funciona de la manera siguiente: acelera a los electrones para que choquen contra todo lo que se cruce en su camino y transfieran su energía en forma de calor. Los electrones no llegan demasiado lejos, ya que se mueven a un milímetro por segundo, aproximadamente. Pero, con eso, basta.

El agua hirviendo tiene mucha energía extra, y es asombroso que la obtenga de unos minúsculos electrones que corretean y se chocan por ahí. Es asombroso y, sin embargo, innegable: mi té está listo, bien caliente gracias a los campos eléctricos que han empujado a los electrones por un conductor. Este es el uso más sencillo posible que se puede dar a la energía eléctrica: convertirla directamente en calor. Pero cuando las personas aprendieron a construir circuitos y fuentes de alimentación y baterías, las cosas se volvieron mucho más sofisticadas en muy poco tiempo.

Existe una diferencia fundamental entre el baile de los electrones generado por las baterías —cualquier tipo de batería— y lo que ocurre cuando enchufas un aparato a la corriente. En cualquier aparato que funcione con batería, los electrones siempre fluyen en una única dirección. A esto se lo llama corriente continua o⁷¹ Si se trabaja con este tipo de suministro eléctrico, se gana eficiencia.

Se puede cambiar de ⁷² Así que, por el momento, no nos queda otra que seguir cargando con los adaptadores.

Hoy en día, la electrónica se da por sentado, pero en sus inicios, era una bestia caprichosa e incierta. Mi propio abuelo se metió en ese mundo justo cuando la sofisticación que la electrónica traía consigo estaba empezando a colarse en nuestros hogares.

Mi abuelo Jack fue uno de los primeros ingenieros de televisión. En sus tiempos, la electrónica podía ser ruidosa y caliente y no cabía duda de lo mucho que podía llegar a apestar, tal como mi abuela recuerda vivamente. Su descripción de los tipos de averías que mi abuelo tenía que arreglar me hacía recordar algunas de las cualidades físicas de la electrónica primitiva que tan fácilmente se olvidan hoy, en nuestra época de *smartphones* y wifi discrecional, y también me sorprendía lo bien que conocía todos los componentes y procesos. Nunca la había oído hablar sobre nada técnico, pero cuando se trataba de esos televisores antiguos, dominaba a la perfección términos especializados que a mí me eran completamente desconocidos. —Bueno —me dijo un día—, uno de los componentes esenciales era el transformador de líneas, y cuando se conectaba al televisor, a veces provocaba un pequeño estallido y una sensación de quemazón, además de despedir un fuerte olor. Su acento del norte me hace pensar que lo más probable es que se quedara corta con sus eufemismos. Los electrones siempre han sido invisibles, pero entre las décadas de 1940 y 1970 era muy fácil ver que andaban tramando algo. Siempre había el riesgo de un estallido o un silbido, de la súbita aparición de un pedazo quemado y ennegrecido o un destello de luz que te decía que un montón de energía había sido transportada al lugar equivocado. Jack se

encontró inmerso en los inicios del nuevo mundo de la televisión y formó parte de la única generación que sintió el mundo eléctrico en sus propias carnes. Hacia el final de su carrera, los transistores y los chips de los ordenadores ya lo habían escondido todo. La pequeña apariencia externa de estos componentes esconde un interior grande y sofisticado, imposible de imaginar a partir de su apariencia externa. Pero antes de que aparecieran, hubo algunas décadas en las que casi podías ver cómo funcionaba la magia.

En 1935, Jack estaba, a sus dieciséis años, trabajando de aprendiz en Metropolitan Vickers, que popularmente se conocía como MetroVick. Este gigante del mundo de la ingeniería electrónica a gran escala estaba situado en Trafford Park, cerca de Mánchester, donde se fabricaban generadores, turbinas de vapor y otros aparatos electrónicos de gran tamaño, todos ellos de primera categoría. Cuando terminó su formación en ingeniería eléctrica a los veintiún años, se consideró que desempeñaba un «servicio esencial», es decir, que era demasiado útil para enviarlo al frente, así que se pasó cinco años probando la electrónica de las armas de los aviones en MetroVick. La primera prueba que se hacía a estos sistemas se llamaba «flasheo»: se le metían 2000 voltios y si no explotaba, pasaba la prueba. Era una forma extrema de amansar a los electrones, una de las primeras fases en la lucha para someterlos.

Después de la guerra, EMI buscaba a trabajadores con experiencia en electrónica, porque los primeros televisores eran bestias complejas y caprichosas que necesitaban de un experto que las configurara y que debían ser constantemente ajustadas durante su

vida útil. Así que EMI mandó a Jack a Londres para que se formara como ingeniero de televisores. Las herramientas de su oficio eran válvulas, resistencias, cables e imanes, todos ellos componentes capaces de persuadir a los electrones de que siguieran las órdenes que se les daban. Se podía obligar a esta mezcla de cristal, cerámica y metal que tan atractiva resultaba a la vista a hacer algo que parece muy fácil, algo que era fundamental en todo televisor desde aquella época hasta la década de 1990. Podía crear un rayo de electrones y luego doblarlo, lo cual consigue, si se hace correctamente, dar movimiento a las imágenes.

Jack lo aprendió todo de los televisores «TRC», un nombre que me encanta porque nos conecta con el mundo que existía antes de que los electrones se hubieran descubierto siquiera. TRC significa «tubo de rayos catódicos», y, ciertamente, los rayos catódicos despertaron mucha extrañeza cuando se descubrieron. Imagina al joven físico alemán Johann Hittorf en 1867, observando su última creación. En su sombrío laboratorio hay un tubo de cristal con una pieza de metal metida en cada extremo, y todo el aire de su interior ha sido extraído. Hasta aquí, no parece nada del otro mundo; pero imagina lo extraño que tuvo que ser descubrir que si se conectaba una batería grande a las dos piezas de metal, una materia misteriosa e invisible fluía de un extremo del tubo al otro. Él sabía que esa materia estaba ahí porque hizo que uno de los extremos del tubo brillara, y podía crear sombras si le ponía obstáculos. Aunque nadie sabía qué era lo que fluía, había que darle un nombre, y así es como llegó a llamarse rayos catódicos. El cátodo es el terminal que se

conecta al extremo negativo de una batería, y de ahí es de donde provenía esa extraña materia.

Tuvieron que pasar treinta años para que J. J. Thomson descubriera que lo que fluía no eran rayos ni mucho menos, sino una sucesión de partículas con carga negativa, las partículas que hoy conocemos como electrones. Pero entonces ya era demasiado tarde para cambiar el nombre del aparato, así que siguió llamándose tubo de rayos catódicos. Hoy sabemos que, si se aplica un voltaje al tubo, se genera un campo eléctrico que se extiende desde un extremo al otro, de forma que los electrones se soltarán del extremo negativo y zumbarán hacia el extremo positivo. Cualquier partícula que tenga carga eléctrica será acelerada por el campo eléctrico, lo que significa que será constantemente empujada hacia delante. Así que los electrones no se limitan a moverse hacia el extremo positivo porque este les atrae, sino que también se van acelerando a medida que avanzan. Cuanto mayor sea la diferencia de voltaje entre ambos extremos, mayor será su velocidad en el momento que lleguen al otro lado. En un televisor TRC, los electrones puede haber alcanzado una velocidad de varios kilómetros por segundo cuando llegan a la pantalla. Esa es una fracción importante de la velocidad de la luz, la mayor velocidad a la que cualquier cosa en el universo puede moverse.

Así que el mismo proceso básico que llevó al descubrimiento del electrón por primera vez estaba usándose en el interior de todos los televisores del mundo hasta hace un par de décadas. Todo televisor TRC tiene un dispositivo en la parte trasera que produce electrones.

La parte central del televisor es una cámara completamente vacía, un vacío sin aire en su interior, para que no haya ningún tipo de obstáculo y los electrones que el «cañón» «dispara» a raudales crucen ese espacio hasta alcanzar la pantalla. Esta es la forma más pura de la corriente eléctrica: partículas cargadas viajando en línea recta.

* * * *

Mi tía abre una caja llena de piezas que rescató del taller de Jack cuando murió. Hay tubos de cristal que parecen bombillas cilíndricas, en cuyo interior hay una extraña estructura metálica que tiene la forma de un insecto. Estas son las válvulas que se usaban para controlar el flujo de los electrones en los circuitos. Al principio, parecía que la mayor parte del trabajo de Jack consistía en descubrir cuál de ellas había fallado para sustituirla por otra. Se nota que mi madre, mi tía y mi abuela les tienen mucho cariño, porque en el pasado estuvieron rodeadas de infinidad de ellas. En un rincón de la caja encuentro un imán circular de gran tamaño partido por la mitad.

Aquí reside la gran conexión entre la electricidad y el magnetismo, y representa el momento en el que los físicos de finales del siglo XIX cayeron en la cuenta de que para controlar la electricidad, necesitarás imanes; y para controlar los imanes, necesitarás electricidad. La electricidad y el magnetismo forman parte del mismo fenómeno. Tanto un campo eléctrico como uno magnético

podrán empujar a un electrón en movimiento, pero el resultado del empujón es distinto. Un campo eléctrico empujará al electrón en la dirección del campo; en cambio, un campo magnético empujará lateralmente al electrón en movimiento.

Crear un rayo de electrones está muy bien, pero lo más inteligente de estos televisores antiguos era que controlaban en qué dirección apuntaba ese rayo. Y, aquí, la conexión profunda entre la electricidad y el magnetismo es fundamental. A medida que un electrón atraviesa zumbando un campo magnético, es empujado hacia un lado. Cuanto más fuerte sea el campo magnético, mayor será el empuje. Así que al cambiar los campos magnéticos en el interior de un televisor antiguo, el rayo de electrones podía ser empujado y atraído hacia el punto en que se lo necesitara. El gran imán permanente que me enseñó mi tía estaba colocado muy cerca del cañón de electrones para que se encargara del enfoque básico. Pero los electroimanes de dirección que estaban posicionados un poco más cerca de la pantalla eran directamente controlados por la señal de la antena. Empujaban al rayo de electrones de forma que escaneara la pantalla en horizontal línea tras línea. El rayo se apagaba y se encendía mientras permanecía en cada línea, y en los lugares de la pantalla que alcanzaba se creaba un punto brillante. El «transformador de líneas» que mi abuela había mencionado formaba la parte del equipo que controlaba ese escaneo. Para producir una imagen uniforme, se escaneaban 405 líneas 50 veces por segundo, con el rayo de electrones encendiéndose y apagándose rápidamente en el momento adecuado para cada píxel.

Este es un baile electrónico increíblemente complicado. Llegar a ver una imagen a partir de esa danza requiere un montón de componentes complejos que estén llevando a cabo la acción adecuada en el momento adecuado. Por eso los primeros televisores tenían muchas ruedecitas y botones para realizar ajustes, y parece que la tentación de jugar con ellos era demasiado grande para muchos de sus dueños. Jack se sabía todos los trucos para poder reajustarlos. En aquel momento, debió de parecer que hacía magia. Durante siglos se respetó a los artesanos por lo que eran capaces de elaborar, y los demás podían apreciar sus creaciones aunque ellos no fueran capaces de hacerlo. Ahora, el mundo había cambiado. Los ingenieros electrónicos podían hacer que un dispositivo funcionara, pero era imposible ver lo que habían hecho exactamente o por qué había funcionado.

Resulta muy curioso que los electrones, partículas silenciosas e invisibles y encerradas en el vacío, fueran la pieza fundamental de la enorme riqueza de la proyección de imágenes con todos sus sonidos y espectáculos. Y durante cincuenta años, los televisores estuvieron basados en el mismo principio básico. Mete un electrón en un campo eléctrico y conseguirás que se acelere o se ralentice. Pon ese electrón en movimiento en un campo magnético y su camino se curvará. Déjalo ahí el tiempo suficiente y empezará a viajar en círculos.

El gigantesco experimento físico realizado en Ginebra por el ⁷³ funciona con los mismos principios que un tubo de rayos catódicos, aunque es capaz de mover otras partículas además de electrones.

Cualquier partícula con carga puede ser acelerada por medio de un campo eléctrico, y su trayectoria puede ser curvada con un campo magnético. El Gran Colisionador de Hadrones, el experimento que finalmente confirmó la existencia del bosón de Higgs, tenía protones zumbando en su interior. En este caso, las velocidades que se alcanzaron se acercaron asombrosamente a la velocidad de la luz: eran tan rápidas que incluso usando imanes extremadamente potentes para dirigir a las veloces partículas, el círculo tenía que medir 27 kilómetros de circunferencia.

Resulta que el mismo ardid básico que se usó para descubrir el propio electrón y para poner en funcionamiento el Gran Colisionador de Hadrones en el CERN —una oleada controlada de partículas cargadas en un espacio de vacío— estuvo, hasta hace muy poco, guardado en un cajón de muchos hogares. Hoy en día, las pantallas planas han sustituido a casi todos los aparatosos televisores TRC. En 2008, la venta de pantallas planas superó la de las pantallas TRC en todo el mundo, y el mundo nunca ha mirado atrás. El cambio facilitó la aparición de los ordenadores portátiles y de los *smartphones* porque los hizo portátiles. Estas nuevas pantallas también son controladas por electrones, pero de una forma mucho más sofisticada. La pantalla está dividida en muchas cajas diminutas llamadas píxeles, y el control electrónico de cada píxel determina si debe emitir luz o no. Si la resolución de tu pantalla es de 1280×800 píxeles, eso significa que estás mirando una cuadrícula hecha de algo más de un millón de puntos de color; todos ellos se encienden y se apagan por separado gracias a voltajes

muy pequeños, y cada uno de esos píxeles se actualiza al menos sesenta veces por segundo. Es una asombrosa demostración de coordinación, pero sigue siendo trivial en comparación con todo lo que hace tu portátil.

Volvamos a los imanes. Un campo magnético puede empujar los electrones, lo que le permite controlar las corrientes eléctricas. Pero la interrelación entre la electricidad y el magnetismo todavía va más allá. Las corrientes eléctricas también crean sus propios campos magnéticos.

* * * *

Como vimos en el capítulo 5, las tostadoras son muy eficientes a la hora de calentar tostadas gracias a la luz infrarroja. Pero lo más astuto de la tostadora no es que proporcione montones de calor, ya que el horno también lo hace; lo que la hace tan ingeniosa es que sabe cuándo debe parar. La regla universal de las tostadoras es que el pan solo desaparece en el interior del aparato cuando le das a la palanca que hay en un lateral. Si no la empujas hacia abajo, volverá hacia arriba de un saltito. Pero si la empujas hasta abajo del todo, hará clic y se quedará ahí hasta que llegue el momento de que la tostada salga de su horno en miniatura. No hace falta ir mirando desde arriba para comprobar lo tostado que está el pan. Cuando el pan se ha convertido en una tostada, habrá otro clic mecánico y la tostada saldrá por sí misma. Así que mientras doy vueltas por la

cocina buscando la mermelada y la mantequilla, hay algo ahí que está manteniendo al pan en el sitio que le corresponde.

El funcionamiento de la tostadora es de una hermosa sencillez. Cuando colocas el pan, se queda en una bandeja accionada por unos muelles. Los muelles que hay debajo empujan el pan hacia arriba y lo dejan en su posición de salto, por encima de los elementos caloríficos. Pero tenemos la fuerza suficiente para empujar el pan hacia abajo, a pesar de los muelles. Y cuando la bandeja llega al fondo de la tostadora, una pieza de metal que sobresale llena el hueco de dos circuitos. Uno de esos circuitos se ocupa del calor, de modo que la electricidad empieza a fluir por la tostadora para calentar el pan.

Pero el otro circuito es mucho más interesante. Los electrones que hay en él revolotean en una sección del cable que está enrollado alrededor de una pequeña protuberancia de hierro. Para los electrones es como una especie de tobogán en espiral, ya que primero dan vueltas alrededor del hierro para luego continuar su camino por el resto del circuito hasta que regresan a la toma de tierra. Y eso es todo. Pero como el magnetismo y la electricidad están tan íntimamente relacionados, cuando una corriente eléctrica discurre por un cable, crea un campo magnético alrededor del cable. Mandar a los electrones a dar vueltas alrededor de una bobina de cable significa que cada vez que los electrones dan una vuelta completa, están fortaleciendo el mismo campo magnético. El núcleo de hierro del centro de la bobina refuerza el campo magnético y lo fortalece todavía más. Esto es un electroimán. Cuando la corriente

se detiene, el campo magnético desaparece. Así que cuando bajas la palanca de la tostadora, estás conectando un campo magnético en la base del aparato que antes no estaba. Y como el fondo de la bandeja del pan está hecho de hierro, se pega al imán. En otras palabras, mientras yo rebusco en la nevera, un campo magnético temporal está manteniendo la bandeja del pan en su sitio. La tostadora tiene un temporizador en un lateral, y el reloj empieza a correr cuando se conectan los circuitos. Cuando se acaba el tiempo, el temporizador corta la energía en todo el aparato. Como el electroimán no tiene energía, deja de ser un imán. Ya no hay nada que retenga al pan ahí abajo, así que los muelles lo hacen saltar.

A veces olvido que he desenchufado la tostadora, pero me doy cuenta enseguida. Si intento bajar la palanca, sube inmediatamente, aunque la baje del todo. Eso ocurre porque no hay energía en el electroimán, lo que hace que no pueda retener la bandeja del pan ahí abajo. Es un sistema muy sencillo, impresionantemente elegante. Cada vez que tuestas pan, sacas partido a esta conexión fundamental entre la electricidad y el magnetismo.

Los electroimanes están muy extendidos porque resulta muy útil poder encender y apagar los imanes. Los encontramos en los altavoces, en los cierres electrónicos de las puertas y en los discos duros de los ordenadores. Tienen que recibir energía constantemente; de lo contrario, su campo magnético se desvanece. El tipo de imanes que pegamos en la nevera se llaman imanes permanentes, ya que no se pueden encender ni apagar y tampoco se

puede alterar su magnetismo, pero no necesitan ningún tipo de energía. Cuando están encendidos, los electroimanes cumplen la misma función que los imanes de nevera, pero se pueden apagar a conveniencia simplemente deteniendo la corriente.

Estamos rodeados de campos magnéticos pequeños y locales, algunos de los cuales son permanentes mientras que otros son temporales. Los humanos han creado la inmensa mayoría de ellos, ya sea para que lleven a cabo una acción útil o como consecuencia de algo que está realizando una acción útil. Los campos magnéticos no llegan demasiado lejos, así que solo se pueden detectar si se encuentran muy cerca del imán. Pero no son más que pequeños fallos técnicos locales dentro de un campo magnético mucho mayor que se extiende por todo el planeta, y este es totalmente natural. No lo notamos, pero lo usamos sin parar.

* * * *

Es fácil dar las brújulas por hecho, especialmente si eres de los que les gusta caminar, ya que resulta sumamente útil ir acompañado de una aguja que siempre marca el norte. Pero imagina que coges diez brújulas, o veinte, o doscientas. Si las extiendes en el suelo, todas apuntarán al norte, y de pronto te das cuenta de que esto no ocurre únicamente cuando te sacas la brújula del bolsillo. Es siempre así, y es coherente. Puedes llevar tu colección de brújulas a cualquier sitio del planeta, abrirlas una a una y colocarlas sobre el suelo, y entonces verás como todas ellas se ponen de acuerdo sobre dónde

está el norte con un simple giro de la aguja. El campo magnético terrestre siempre está ahí, atravesando ciudades, desiertos, bosques y cordilleras. Vivimos en él, y a pesar de que nunca lo notamos, las brújulas siempre se encargan de recordarnos su existencia.

Una brújula es un dispositivo de medición maravillosamente sencillo. La aguja es un imán, y por eso cada uno de los extremos se comporta de forma diferente. No es muy útil que los extremos del imán se llamen polo norte y polo sur, pero es solo una forma de decir que uno se comporta como el polo magnético terrestre situado en el sur y el otro como el polo norte magnético. Si coges dos imanes, los acercas y mueves el uno alrededor del otro, enseguida verás que es muy difícil acercar los dos polos norte, pero que la atracción entre el polo norte y el polo sur es muy fuerte. Por eso es fácil detectar la dirección de un campo magnético: si metes un pequeño imán móvil dentro de un campo magnético, girará sobre sí mismo hasta que sus extremos norte y sur estén alineados con el campo. Y una brújula no es más que eso: un imán móvil que revela la dirección de cualquier campo magnético en el que se encuentre. No vemos el enorme campo magnético de la Tierra, pero sí vemos cómo la aguja de la brújula responde ante él. Y, además, las brújulas no se limitan a sentir únicamente el campo terrestre. Muévete por casa con una brújula en la mano, y podrás detectar los campos magnéticos que hay alrededor de las tomas de corriente, de las sartenes de acero, de los aparatos electrónicos, de los imanes de nevera e, incluso, de cualquier pieza de hierro que haya estado cerca de un imán no hace mucho.

Naturalmente, las brújulas se usan sobre todo para navegar. Siempre es complicado encontrar el camino correcto por la superficie de una esfera, pero durante siglos, el campo magnético de la Tierra ha proporcionado a los exploradores una herramienta fantástica en la que pueden confiar. La Tierra tiene un polo norte magnético y un polo sur magnético, y cualquier persona que tenga una brújula podrá orientarse hacia uno u otro. Como herramienta de navegación, el magnetismo es sencillo, fácil y nunca se acaba. Sin embargo, hay que tener en cuenta algunas advertencias. La primera de ellas se nos presenta como algo inesperadamente grave: los polos magnéticos no están fijos en un único lugar. Deambulan por doquier, y pueden moverse en largas distancias.

El día que escribo esto, el polo norte magnético está en el extremo norte de Canadá, a unos 435 kilómetros de distancia del «verdadero norte», que es el Polo Norte real definido por el eje de rotación de la Tierra. Desde el año pasado a estas alturas, el polo norte magnético se ha movido unos 42 kilómetros en su camino a través del océano Atlántico hacia Rusia. Se podría pensar que esto supone una gran confusión para los navegadores, pero el mundo es un lugar muy grande, así que se trata de un mal menor. El campo magnético se mueve precisamente a causa de su origen, y nos recuerda que las entrañas de nuestro planeta son mucho más que una simple bola de piedra estática.

A mucha profundidad bajo nuestros pies, el núcleo externo de la Tierra, rico en hierro, se va revolviendo lentamente. Está moviendo el calor del centro hacia la superficie, y la rotación del planeta hace

que el magma también rote. Gracias a su contenido en hierro, el perezoso núcleo externo conduce la electricidad, lo que significa que puede comportarse como el electroimán de la tostadora. Se cree que las corrientes que corren por el núcleo externo de la Tierra mientras esta gira son las que generan el campo magnético del planeta. Este proceso se basa en el movimiento lento del magma; y como las características de los movimientos de este magma cambian con el tiempo, los polos magnéticos deambulan. Se alinean aproximadamente con el eje de rotación de la Tierra porque lo que causa la rotación del magma rico en hierro es la rotación del planeta entero, pero ese alineamiento es simplemente aproximado.

Si te preocupa mucho poder navegar con toda precisión, lo que tienes que hacer es tener en cuenta que la posición actual del polo magnético no es la misma que el verdadero Polo Norte, y corregir la diferencia. Los mapas actuales muestran la dirección de ambos polos. Acabo de revisar la costa oeste del Reino Unido en un mapa de la agencia cartográfica, y tanto el norte magnético como el norte rotacional están señalados en la parte superior. Veo que si vas en la dirección norte que marca una brújula durante 65 kilómetros, te encontrarías a 1,6 kilómetros al oeste de la línea que conduce hacia el norte verdadero. Los mapas se consideran registros permanentes, y resulta que el campo magnético que podrías usar para orientarte con el mapa es voluble. La tecnología moderna nos ayuda a ti y a mí a no perdernos constantemente por culpa de este hecho. Pero la industria de la aviación, que dispone de uno de los sistemas de navegación modernos más sofisticados, siempre está muy atenta a

todo esto. Para empezar, las señalizaciones de las pistas de aterrizaje tienen que ir cambiándose constantemente.

La próxima vez que estés en un aeropuerto o te encuentres cerca de uno, fijate en las enormes señales que hay al principio de cada pista. Todas las pistas están señalizadas con un número, que es su dirección en grados desde el norte dividida entre diez. Por ejemplo, a la pista del aeropuerto de Glasgow Prestwick se le dio el número 12, porque los aviones que aterricen en ella lo harán con un «rumbo» de 120 grados. Todas las pistas tienen su propia designación específica, que siempre es un número entre 01 y 36⁷⁴. Pero este rumbo toma como referencia el norte magnético, porque es el que marca la brújula. Así que en 2013, la pista 12 del aeropuerto de Glasgow se convirtió en la número 13 para que coincidiera con el movimiento del polo magnético. La pista no se había movido de sitio, pero el campo magnético de la Tierra, sí. Las autoridades de la aviación siempre están atentas y corrigen las designaciones de las pistas cuando es necesario. Puesto que los polos se mueven con relativa lentitud, los cambios son asumibles.

Pero esta deambulación de los polos no es más que el principio. El voluble campo magnético de la Tierra tiene mucho más que ofrecer que una simple ayuda a los navegantes. Y las pistas que va dejando han permitido confirmar una de las ideas más controvertidas, sencillas y profundas que los geólogos han tenido jamás. Los continentes, esas inmensas masas de roca que dominan la superficie terrestre, están en movimiento.

* * * *

En la década de 1950, la civilización humana se estaba adentrando a toda velocidad en una nueva era tecnológica y científica. Se estaban estableciendo las bases de la sociedad moderna: aparecieron los hornos microondas, el Lego, el velcro y el biquini, y se estaban convirtiendo en elementos de uso popular. La humanidad estaba aceptando la llegada de la era atómica, las reglas sociales se estaban reescribiendo por completo y se acababan de inventar las tarjetas de crédito. Y, a pesar de esta modernidad galopante, no éramos capaces de comprender el planeta en el que vivíamos. Los geólogos habían hecho una labor fantástica catalogando las rocas de la Tierra, pero no eran capaces de explicar la propia Tierra. ¿De dónde provenían todas esas montañas? ¿Por qué está ahí ese volcán? ¿Por qué algunas rocas son tan antiguas y otras tan recientes? ¿Por qué las rocas cambian según donde mires? Una de las muchas observaciones que pedía a gritos una explicación satisfactoria era que, a juzgar por el aspecto que presentan la costa este de Sudamérica y la costa oeste del continente africano, parecía que mucho tiempo atrás hubieran encajado como las piezas de un puzle. Las rocas coincidían, las formas coincidían y hasta los fósiles coincidían. ¿Cómo podía tratarse de una mera coincidencia? Pero la mayor parte de los científicos lo consideraba una curiosidad sin importancia, ya que era prácticamente impensable que algo de ese tamaño pudiera desplazarse. A principios del siglo XX, un investigador alemán

llamado Alfred Wegener había logrado reunir todas las evidencias y propuso la idea de la «deriva continental». Wegener sugería que Sudamérica y África habían estado conectados en el pasado, y que una de estas enormes masas de tierra se había desprendido de la otra y se había desplazado por la superficie del planeta. Hubo muy pocos científicos que se plantearan seriamente esta idea, porque la noción de que algo tan gigantesco como un continente se hubiera desplazado casi cinco mil kilómetros hacia el oeste parecía ridícula. Si era cierto, ¿qué lo había empujado? Wegener sugirió que los continentes se habían abierto paso con dificultad por la roca oceánica, pero no pudo proporcionar ninguna prueba. No se había formulado un «cómo» ni un «porqué», y rápidamente se dio carpetazo al tema. A nadie se le ocurrió una idea mejor, y la cuestión fue abandonada.

En la década de 1950, todavía no había aparecido una idea mejor, pero sí existían nuevas mediciones. Los volcanes escupían lava, cuyos compuestos eran ricos en hierro, y se descubrió que cada mota de esos compuestos podía actuar como la aguja de una brújula, girándose para alinearse con el campo magnético del lugar en el que se encontrara. La parte verdaderamente útil era que, cuando la lava se enfriaba y formaba una roca sólida, los diminutos minerales de hierro ya no podían moverse y quedaban fijados en su posición. Estas diminutas brújulas congeladas nos decían que el campo magnético de la Tierra había quedado registrado en la roca en el momento de su formación. Cuando los geólogos usaron este registro para observar los cambios en el campo magnético a lo largo

de las diversas etapas de la Tierra, se descubrió algo todavía más curioso. La dirección del campo magnético de la Tierra parecía invertirse en intervalos de cientos de miles de años. Había cambiado por completo, así que el sur se había convertido en el norte y el norte se había convertido en el sur. No parecía tener demasiada importancia, pero resultaba muy extraño.

Entonces, los geólogos llegaron al fondo marino. Uno de los muchos fenómenos sin explicar de la estructura de la Tierra era que en algunos océanos se encontraron dorsales de montañas submarinas que formaban largas líneas a través de las planicies del fondo oceánico. Nadie sabía por qué estaban ahí. La más famosa es la dorsal Mesoatlántica, una hilera de volcanes que empieza en la superficie —el país al que llamamos Islandia es el extremo que sobresale de esta dorsal— y luego desaparece bajo el agua, donde se extiende en zigzag hasta el mismo centro del océano Atlántico, casi llegando a la Antártida. Entonces, en 1960, las mediciones magnéticas demostraron que el magnetismo de las rocas que había alrededor de esa dorsal era, en efecto, muy extraño. Estaban estriadas, y estas estrías eran paralelas a la dorsal. A medida que nos alejábamos del centro de la dorsal, el magnetismo de las rocas del fondo marino apuntaba primero al norte, luego al sur, y después al norte de nuevo, y estas estrías se extendían a lo largo de toda la longitud de la cordillera. Pero el asunto aún se volvió más extraño, si cabe, y es que, en el otro lado de la dorsal, las estrías magnéticas eran exactamente como su imagen reflejada en un espejo.

En 1962, dos científicos británicos, Drummond Hoyle Matthews y Fred Vine, establecieron la conexión⁷⁵. Visto desde nuestra perspectiva, casi se puede oír el ruido de todas aquellas extrañas piezas de la geología en el momento en que encajan. ¿Y si, dijeron ellos, los volcanes del fondo marino configuran un nuevo fondo marino a medida que los continentes se separan? El magnetismo de las dorsales está alineado con el campo magnético actual, pero a medida que los continentes se separan, la roca de las dorsales se mueve hacia ambos lados de los volcanes y se forma roca nueva. Cuando el campo magnético de la Tierra se invierte, el magnetismo de la nueva lava también se invertirá, formando así una nueva estría que apuntará en la dirección opuesta. La razón por la que las estrías tienen su propia imagen en espejo es que cada estría representa un período de un alineamiento magnético antes de apuntar en la dirección opuesta. Hubo otros hallazgos en la misma época merced a los cuales se encontraron los lugares en que el antiguo fondo marino se estaba destruyendo, lo cual era importante porque el tamaño del planeta no varía. Al otro lado de Sudamérica se alza la cordillera de los Andes exactamente en ese emplazamiento porque ahí es donde el antiguo fondo marino del Pacífico está siendo empujado por debajo del continente, hacia el interior del manto terrestre. Cuando se sabe que los continentes pueden ser empujados de aquí para allá, que chocan y se separan, y que con su movimiento crean y destruyen relieve oceánico, los patrones de la geología cobran sentido. El descubrimiento de las placas tectónicas fue un momento trascendental en el campo de la geología. Hoy en

día, las placas tectónicas son la columna vertebral de nuestros conocimientos sobre la apariencia de la Tierra.

Es cierto que los continentes se mueven, pero no se abren paso por el fondo marino. Flotan sobre lo que tienen debajo, y son empujados por las corrientes de convección que se encuentran bajo la superficie de la Tierra. Y este proceso no es algo que ocurriera en el pasado. El océano Atlántico sigue ensanchándose en la actualidad a un ritmo de unos dos centímetros y medio al año⁷⁶. La banda magnética del momento actual todavía está en construcción. Para convencer a los científicos de que la Tierra podía ser tan móvil hubo que presentar muchísimas pruebas, pero los patrones del magnetismo del fondo marino hacen que este hecho sea irrefutable. Hoy en día podemos medir el movimiento de los continentes usando datos de GPS de gran precisión, y podemos ver su motor en marcha. Pero la llave que abrió la puerta al lejano pasado de la Tierra y a su forma actual se halló en el magnetismo que permanece fijo en las rocas del planeta durante milenios.

El equipo formado por la electricidad y el magnetismo es de suma importancia para nosotros. Nuestro sistema nervioso usa la electricidad para mandar señales por todo nuestro cuerpo; la civilización humana funciona gracias a la energía eléctrica, y el magnetismo nos permite almacenar información y dirigir a los diminutos electrones para que cumplan nuestras órdenes. Es asombroso que a nuestra civilización se le haya dado tan bien mantener oculto el mundo del electromagnetismo. Raramente experimentamos choques eléctricos o cortes de electricidad, y se nos

da tan bien protegernos de los campos magnéticos y eléctricos que podríamos seguir con nuestra vida sin apenas ser conscientes de su existencia. Podemos sentirnos orgullosos de nuestro gran control del electromagnetismo, pero a la vez también resulta descorazonador que nos estemos ocultando esta parte tan extraordinaria del mundo. Pero quizás en el futuro aparezcan nuevos recordatorios y no nos olvidemos del todo. Ahora que nuestra civilización está plantando cara a nuestra adicción a los combustibles fósiles, una vía alternativa está ganando solidez. La generación de energía no se producirá únicamente en centrales eléctricas situadas en ubicaciones remotas; la energía renovable se puede generar mucho más cerca de casa, y tal vez en el futuro tengamos mayor visión sobre de dónde proviene la energía eléctrica. La esfera de mi reloj es un panel solar, y no se ha detenido ni un segundo en sus siete años de vida. Ya existen las tecnologías que recogerán energía solar desde las ventanas, energía cinética de nuestros pasos y energía undimotriz de los estuarios. Y los principios en los que se basan no son otros que los principios del electromagnetismo.

* * * *

Aún nos queda por ver la última pieza del patrón del electromagnetismo. Hemos visto cómo una corriente eléctrica es capaz de generar un campo magnético en la tostadora, pero ese proceso también funciona al revés. Cuando mueves un imán cerca

de un cable, el imán ejerce un empuje sobre toda partícula cargada, como pueden ser los electrones, lo que significa que podemos crear una corriente eléctrica que antes no estaba ahí. Esto no es solo importante para el futuro, sino que también es lo que hace posibles las redes eléctricas de nuestros días. La única forma que tenemos de introducir energía en la red eléctrica es moviendo imanes, ya sea mediante turbinas en las centrales nucleares o en las centrales de gas, o girando la manivela de una radio de cuerda. Uno de los ejemplos más hermosos y sencillos de cómo usar la electricidad y los imanes para proporcionar energía a nuestro mundo es la turbina eólica.

Desde el suelo, las turbinas eólicas parecen serenas, altísimos puntales blancos que sujetan unas aspas que giran con elegancia. Pero la paz se ve interrumpida en cuanto entras en el interior de la base de la torre. En sus entrañas se oye un zumbido profundo y sonoro, y entonces te das cuenta de que acabas de adentrarte en la panza de un enorme instrumento musical. La turbina en la que yo entré, situada en Swaffham, en el este de Inglaterra, es una de las pocas en las que se ofrecen visitas guiadas, y está en medio de la nada, pero merece la pena acercarse hasta allí.

Cuando subes por las escaleras de caracol del interior de la torre, lo haces a través de las subidas y bajadas de intensidad del zumbido. Puedes sentir cómo el viento golpea la estructura. Sabes que estás llegando arriba cuando la luz empieza a parpadear a causa de las aspas, ya que bloquean la luz natural a medida que giran. Y entonces apareces en un mirador cerrado con vistas de 360° a una

altura de 67 metros, justo debajo del eje de la turbina. Todo sentimiento de serenidad queda totalmente desterrado. Las tres aspas gigantes, de 30 metros de longitud cada una, giran con un brío considerable, y no hay duda de que aquí, en las alturas, se puede almacenar energía. A medida que el viento sube y baja, el chirrido y la velocidad de las aspas responden de forma casi instantánea. En sí mismo, esto ya resulta bastante asombroso.

Pero el quid de la cuestión se encuentra escondido en el hocico blanco, en la parte del mecanismo que se halla justo detrás de las aspas. Si pego la nariz al cristal y miro hacia arriba, puedo ver girar todo el rotor. Justo por encima de mi cabeza, el borde del *hub* que queda más cerca de la torre gira suavemente alrededor de un anillo interior inmóvil. Este borde está alineado con imanes permanentes de gran potencia, así que los imanes están rotando en el interior del *hub*. Y el anillo interior está repleto de bobinas de cobre, todas ellas conectadas al circuito que tienen detrás. Cuando los imanes rebasan zumbando cada bobina, generan corrientes a través del cable. Esto mueve a los electrones a través de la bobina, y luego cada uno de los imanes que pasan por su lado los atraen de vuelta. Sin que los imanes y los cables se toquen, la energía de la rotación se transfiere para convertirse en los cables en energía eléctrica. Las aspas impulsan a los imanes para que pasen por delante de las bobinas, y las reglas de la inducción electromagnética crean una corriente en cada una de esas bobinas. Y así es como se origina la electricidad.

El mismo principio opera en todas nuestras centrales, ya sean nucleares, undimotrices, de gas o de carbón. Los imanes son empujados para que rebasen los cables, y de esta manera la energía cinética se transfiere en la corriente eléctrica. La belleza de una turbina eólica reside en que no podría ser más pura: es el viento el que hace girar los imanes, los cuales a su vez generan la corriente. En una central de carbón, se calienta agua para hacer girar una turbina de vapor, que a su vez hace girar los imanes. El resultado es el mismo, pero requiere algunos pasos más. Cada vez que enchufas algo a la corriente, estás usando una energía que ha fluido hacia el interior de la red gracias a que un imán empujó a los electrones en un cable que contiene una bobina de cobre. La electricidad y los imanes son inseparables. Nuestra civilización depende de la energía que se genera y distribuye gracias al baile de estos dos gemelos. Se nos ha dado estupendamente bien esconder ese baile, atrapándolo en cables protegidos, en cables enterrados y detrás de las paredes; lo hemos ocultado tan bien que puede que un niño nacido en nuestra época no llegue nunca a ver o sentir la electricidad o el magnetismo. Cuando la capa invisible del progreso lo termine de cubrir todo, las generaciones futuras podrían estar privadas de cualquier tipo de contacto con la elegancia e importancia del electromagnetismo. Pero todo esto tiene importancia, porque, hoy en día, el tejido de nuestra civilización se cose con hilos electromagnéticos.

Capítulo 9

Cuestión de perspectiva

Contenido:

§. *Los humanos*

§. *La tierra*

§. *La civilización*

Todos nosotros nos apoyamos en tres sistemas de soporte vital: el cuerpo humano, el planeta Tierra y la civilización. Los paralelismos entre ellos son muy potentes, porque todos existen dentro del mismo marco físico. Mejorar nuestra comprensión de los tres puede que sea lo mejor que podemos hacer para mantenernos con vida y hacer que nuestra sociedad siga prosperando. Nada podría ser más pragmático y más fascinante a la vez. Por eso, la parte final del libro está dedicada a proporcionar perspectiva desde cada uno de nuestros sistemas de soporte vital.

§. Los humanos

Ahora mismo estoy respirando, igual que tú. Nuestros cuerpos necesitan extraer del aire moléculas de oxígeno y luego expulsar dióxido de carbono. Cada persona se mueve en su propio sistema de soporte vital: un cuerpo con su interior y su exterior. Nuestro interior es capaz de hacer todo tipo de cosas, pero solo si se le suministran ciertos elementos del exterior: energía, agua y los ladrillos moleculares adecuados. Respirar es solo una de las vías de

abastecimiento. Es algo muy ingenioso: expande la caja torácica, aumenta el volumen de los pulmones, y verás como la muchedumbre de diminutas e inquietas moléculas de aire que merodea cerca de tu boca será empujada tráquea abajo por el aire que se encuentra más allá. Respira hondo y tu pecho se expandirá todavía más, proporcionando más espacio para que una parte mayor de la atmósfera se introduzca a toda velocidad y entre en contacto con las estructuras más pequeñas de tus pulmones. Entonces, cuando relajas los músculos que rodean tu caja torácica, la Tierra está tirando de tus costillas hacia abajo, juntando las moléculas de aire que hay en tus pulmones hasta que se empujan lo suficiente entre ellas y regresan al exterior. El oxígeno no es la única molécula atraída hacia el interior de los pulmones que puede usar tu cuerpo. A medida que el aire pasa por el lado de los sensores que hay en el interior de la parte superior de tu nariz, ocurrirá que algunos de los miles de millones de moléculas que chocan contra las paredes colisionarán con una molécula de mayor tamaño que está pegada en una de las paredes, una molécula con la que encajarán a la perfección temporalmente como una llave en una cerradura. La célula subyacente percibe ese clic molecular en cuanto se produce el encaje. Así es como se despierta el sentido del olfato, cuando unas cuantas moléculas flotantes de la clase adecuada chocan contra el lugar adecuado. En ese momento, el interior posee más información sobre lo que hay en el exterior.

Un cuerpo humano es una enorme colección de células coordinadas —la última vez que alguien intentó contarlas, estimó que hay unos

37 billones de células—, y cada una de ellas es una fábrica en miniatura. Todas las células necesitan suministros, pero también necesitan un entorno seguro en el que haya la temperatura, el pH y el nivel de humedad adecuados. Cuando caminas por el mundo, tu cuerpo se está ajustando constantemente para adaptarse a las condiciones en las que se encuentra. Si pasas demasiado tiempo en una habitación en la que hace calor, las moléculas que estén cerca de la superficie de tu piel vibrarán más rápidamente, porque tienen más energía. Si esas vibraciones penetraran en tu cuerpo, podrían empezar a perturbar el funcionamiento de tus células. De modo que, cuando estás en una habitación en la que hace calor, tienes que desprender algo de esa energía. Parece fácil, ya que las moléculas de agua se evaporan con facilidad en los ambientes calurosos y se llevan energía consigo. Tu cuerpo contiene un montón de agua que podría evaporarse. Pero esa agua queda atrapada en tu interior, porque eres impermeable; así que hay que sudar.

En tu piel hay una capa muy fina de moléculas que yace justo debajo de las células cutáneas más externas, una barrera que evita que cualquier líquido se mueva entre el interior y el exterior. Pero cuando estás en esa habitación tan caldeada, tu piel abre túneles a través de esa barrera: son los poros. El sudor se filtra por los poros, penetrando la capa impermeable, y llega al exterior. Las moléculas de agua chocan entre ellas y con la superficie caliente de la piel hasta que llega un momento en que las que tienen más energía viajan lo bastante rápido para poder escapar. Una tras otra se

alejan flotando de tu piel, que ya no está tan caliente. Cuando la temperatura ha bajado lo suficiente, los poros se cierran, haciéndote impermeable de nuevo. Pero tu piel no es impermeable con el único propósito de que el agua no la penetre; también lo es para que el agua del interior no se escape, porque las reservas internas de agua son limitadas. El agua es transportada a través de todo tu cuerpo por la sangre, el sistema de abastecimiento interno que permite a tu cuerpo compartir los recursos. Este sistema de abastecimiento debe estar siempre en funcionamiento para mantener las células vivas, y podemos comprobar que funciona, ya que todos tenemos pulso.

El pulso es un alboroto tridimensional, una ola de presión en movimiento que proporciona pistas sobre el flujo sanguíneo. Nuestros corazones están constantemente exprimiendo la sangre desde sus cavidades, elevando la presión del fluido y forzando así a la sangre a moverse por las arterias. Es un empuje muy potente y, cuando termina, la presión del fluido en las cavidades cardíacas disminuye. Ahora, las fuerzas que afectan a la sangre se han invertido, y, si no fuera por las válvulas de un solo sentido que guardan la salida, la sangre que se ha expulsado hace poco volvería al punto de inicio. La repentina ráfaga de fluido que vuelve hacia atrás cierra las válvulas y, al detenerse, el líquido golpea los tejidos de la válvula. Este golpe es tan fuerte que empuja hacia fuera los tejidos que lo rodean, los cuales a su vez empujan otros tejidos, y una ola de presión se desplaza por el cuerpo, comprimiendo levemente los músculos y los huesos que encuentra a su paso a medida que avanza. Esta ola de presión tarda unos seis

milisegundos en llegar al exterior del cuerpo, y si pones un estetoscopio o la oreja sobre el cuerpo de alguien, podrás oírla. Es el latido. Si las olas no viajaran a través de los tejidos, no seríamos capaces de oír nuestros corazones. De hecho, el latido es doble y tiene dos pulsos —bum, bum—, porque en el corazón hay cuatro válvulas que se cierran por parejas, una justo después de la otra. Esta combinación accidental de la física y la fisiología emite la señal más significativa de vida a través de nuestros cuerpos.

Después de sudar, la sangre transporta menos moléculas de agua que antes. Entonces, tu cuerpo necesita reponer esa agua desde el exterior. Para que puedas beber un simple vaso de agua, tus células deben coordinar sus acciones. Las decisiones y las acciones que se requieren para coordinar las partes necesarias del cuerpo que permiten llevarlas a cabo se toman en el cerebro, primero de forma inconsciente y, luego, consciente.

Una célula cerebral no sirve de nada por sí sola. Solo funciona porque está conectada a otras células, y la red de estas conexiones parece ser tan importante como las propias células del cerebro. Cuando la decisión de beber algo surge de las conexiones, las células cerebrales tienen que conectarse con otras que se encuentran en otros lugares. El vehículo de esta comunicación interna es la fibra nerviosa, una fina cadena de células que actúa como si fuera el cable eléctrico del cuerpo. Al empujar partículas con carga eléctrica por la membrana que se halla en un extremo de la fibra nerviosa, las células cerebrales emiten una señal eléctrica que se expande por la fibra nerviosa como si fuera un dominó

eléctrico. Al final de la primera fibra nerviosa se encuentra otra. Con su baile, las partículas con carga eléctrica hacen que el mensaje salve el hueco, y a partir de ahí, habrá más piezas de dominó eléctrico que se encargan de seguir transportando el mensaje. Este se transmite de célula a célula en la fracción de segundo que tarda en llegar a uno de los músculos de tu pierna. Más o menos al mismo tiempo llegan los mensajes de otras fibras nerviosas que transportan señales coordinadas hasta otros músculos de la pierna, y estos se contraen para levantarte del sofá. La sensación del suelo bajo tus pies y el cambio de temperatura de tu piel a medida que el movimiento genera una suave brisa son transmitidos al cerebro a través de señales eléctricas nuevas.

Hay una enorme cantidad de información que está siendo empujada en nuestro interior, transportada por señales eléctricas nerviosas o por mensajeros químicos como las hormonas. Los diversos órganos y estructuras que forman un cuerpo humano constituyen un único organismo porque no estamos únicamente conectados por nuestros recursos, sino también por una gran cantidad de información coordinada, grandes ráfagas de información superpuesta. Mucho antes de que llegara la «era de la información», nosotros mismos éramos máquinas de producir información.

Dicha información se clasifica en dos categorías. La primera es la información que viaja: señales nerviosas y químicas que se están moviendo en este preciso instante, filtrándose y destellando y fluyendo por nuestro cuerpo. Pero también transportamos enormes cantidades de información almacenada, la biblioteca molecular que

está archivada en nuestro ADN. En el mundo que nos rodea, millones de átomos similares se agrupan para formar grandes aglomeraciones de cristal, azúcar o agua. Pero en la enorme molécula que es una cadena de ADN, cada diminuto átomo permanece en el lugar que tiene asignado, y el orden preciso de los diversos átomos de distintos tipos proporciona a nuestro cuerpo un abecedario. Una pieza de la maquinaria molecular de una célula puede moverse por la cadena, leer el alfabeto genético —A, T, C y G—, y usar esa información para fabricar proteínas o regular la actividad de una célula. Nuestro tamaño es enorme en comparación con el de los átomos, porque el contenido de cada célula fábrica es enorme.

Nuestros cuerpos son máquinas gigantes; una única célula podría llegar a contener mil millones de moléculas, y en nuestro cuerpo hay alrededor de 10 billones de células (10^{13}). Necesitamos unos sistemas de señalización y transporte asombrosos para coordinar todas las partes que nos componen, y esta coordinación requiere tiempo. Ningún humano es capaz de reaccionar a la velocidad del rayo, ya que el precio que tenemos que pagar por nuestra asombrosa complejidad es la gran cantidad de tiempo que nos lleva hacer cualquier cosa. El tiempo más corto que somos capaces de apreciar es más o menos el de un pestañeo —que viene a ser una tercera parte de un segundo—, pero, en ese tiempo, millones de proteínas se han creado en nuestro interior y miles de millones de iones se han diseminado por nuestras sinapsis nerviosas, cuando el mundo que se encuentra en el exterior de

nuestros cuerpos, bastante más sencillo, lo único que ha tenido tiempo de hacer es seguir a lo suyo.

Nuestro motor de información interno no deja de funcionar mientras caminamos de una habitación a otra. Pero este ingente sistema necesita información sobre lo que tiene a su alrededor. En este preciso momento, necesitamos agua. Tenemos sensores integrados en nuestro cuerpo, partes del cuerpo que cambian como respuesta al ambiente que los rodea y que comparten esa información con el cerebro. El sentido del que somos más conscientes es, seguramente, la vista.

Vivimos sumergidos en la luz, pero nuestro cuerpo la bloquea en gran medida. Ese mar de luz transporta información sobre el mundo, porque la naturaleza de la luz nos ofrece pistas sobre sus orígenes, pero la mayor parte de esa información pasa totalmente desapercibida para nosotros. Una diminuta fracción de esa abundancia luminosa nos llega a las pupilas, dos círculos de unos pocos milímetros de diámetro. Los ojos dejan que un pequeño subconjunto de lo que llega a las pupilas —los rayos de luz visibles— penetren. Y toda la riqueza que damos por sentada proviene de esta diminuta muestra. Cuando cruzan el umbral, estas ondas luminosas deben ser dirigidas para que se pueda recoger la información que traen consigo. Nuestras ventanas al mundo están protegidas por unas lentes suaves y transparentes que ralentizan la luz hasta el 60% de su velocidad en el aire. A medida que estos rayos de luz reducen su velocidad, cambian de dirección y unos pequeños músculos se encargan de modificar la forma de la lente

para garantizar que todos los rayos de un único objeto que se encuentra fuera del cuerpo se reúnan de nuevo en la parte posterior del ojo. Este proceso de selección es fascinante. Damos por sentado que vemos todo lo que se nos presenta, pero en realidad solo obtenemos una fracción diminuta de lo que hay ahí fuera para construirnos una imagen.

Los rayos de luz que inciden en nuestra retina pueden haber viajado desde la luna hasta nuestros dedos, pero su efecto es el mismo. Un único fotón es absorbido por una sola molécula de opsina, haciendo que la molécula gire para iniciar la cadena de dominó que envía a nuestros sistemas de control una señal electrónica. Cuando nuestro cuerpo sediento entra en la cocina, los fotones que han rebotado en el fregadero, el grifo y el hervidor entran a raudales en nuestros ojos, y nuestro cerebro procesa esa información en el tiempo que tardamos en pestañear, para decirnos qué debemos coger primero. Si la cocina está a oscuras, encendemos una bombilla, lo cual libera una fuente de ondas luminosas. Estas ondas se propagan hacia fuera y, en cuanto emprenden su viaje, son modificadas por el mundo, reflejadas, refractadas y absorbidas hasta que, tal vez, nuestros ojos recojan lo que quede de ellas. Y la luz no es lo único que fluye a nuestro alrededor.

Los humanos somos animales sociables. Nuestras redes sociales funcionan gracias a la comunicación, al hecho de que enviemos y recibamos señales hacia y de otras personas. La voz es una de nuestras características más particulares, un instrumento musical flexible que es capaz de producir y moldear las ondas sonoras que

luego son emitidas a través de lo que nos rodea. A ningún inglés se le ocurriría prepararse un té sin preguntar a quienes le acompañan si quieren compartir la experiencia, y, para preguntar, usamos el sonido. Los interpelados recogen la señal a través de sus oídos, y oír la pregunta desencadenará en el interior de sus cuerpos un nuevo flujo de información, que se separará, se volverá a unir y extraerá significado hasta que sus fibras nerviosas den la instrucción a los músculos vocales para que proporcionen una respuesta apropiada. Una vez que hemos recibido el mensaje, alteramos el mundo de una forma u otra, reorganizando la cerámica y los metales que nos rodean.

Nuestros cuerpos están formados por muchos átomos distintos, y por muy impresionante que sea su variedad, existen ciertas limitaciones en cuanto a lo que podemos hacer debido a la forma en que esos átomos se hallan organizados. Pero los humanos somos expertos en manipular el mundo para producir herramientas que sean capaces de hacer lo que nosotros no podemos. No podemos tener agua hirviendo en las manos, pero sí un hervidor de acero. No podemos convertir una parte de nosotros en un recipiente resistente al aire para guardar hojas secas, pero un tarro de metal se ocupará de ello. No tenemos zarpas ni concha ni colmillos, pero podemos fabricar cuchillos, ropa y abrelatas. Un recipiente de cerámica puede contener una bebida caliente sin transmitir la energía calorífica a nuestros vulnerables y sensibles dedos. Los metales, los plásticos, el cristal y la cerámica son nuestros apoderados en el

mundo y cuentan con la ayuda de materiales de origen biológico: la madera, el papel y el cuero.

El hervidor ha alojado las moléculas de agua mientras les daba energía en forma de vibraciones minúsculas. Ahora se mueven a mucha más velocidad que antes, y las transferimos a su nuevo hogar de cerámica. Resulta frustrante que solo podamos ver el rastro de la salpicadura de la leche que rebota justo después de añadirla al té. Está justo ahí, delante de tus ojos, pero es virtualmente invisible porque, simplemente, no somos capaces de procesar las señales lo bastante rápido. Ya no alcanzas a ver el fondo de la taza: el líquido que había sido parcialmente transparente es ahora opaco porque la luz está rebotando sobre millones de diminutas gotas de grasa.

Mientras manejamos el mundo que nos rodea, damos por sentado que lo que nos mantiene pegados al suelo es una fuerza maleable porque nuestros cuerpos han evolucionado para poder lidiar con ella. Si la gravedad de la Tierra fuera mayor, seguramente necesitaríamos piernas más robustas y el estilo de vida bípedo podría resultarnos difícil de llevar. Si fuera menor, podríamos haber evolucionado en seres más altos, pero la vida sería más lenta porque todo tardaría más en caer. Cuando levantamos una pierna para dar un paso, confiamos en que la atracción de la gravedad nos hará caer hacia delante. Giramos alrededor de nuestro pie inmóvil y, cuando detenemos la caída con el pie que está dando el paso, nuestro cuerpo entero se ha movido hacia delante. No se puede caminar sin gravedad, y nuestros cuerpos han evolucionado para

adaptarse a la gravedad de la Tierra. Tenemos el tamaño y la forma adecuados para que nos sea posible caminar sobre dos piernas. Cuando cogemos el té y nos desplazamos hacia la puerta, estamos usando nuestro propio cuerpo como un péndulo invertido, balanceando una pierna hacia delante mientras giramos alrededor del otro pie y de la cadera. El ritmo que ese movimiento de balanceo causa en nuestro caminar afecta al líquido que hay en la taza, forzándolo a chapotear al mismo ritmo.

Mientras caminamos, usamos el fluido del interior del cráneo para que nos ayude a mantener el equilibrio. El fluido que va chapoteando en las profundidades de la pequeña cavidad que es el oído interno sigue moviéndose aun después de habernos detenido, y se retrasa cuando nos ponemos en marcha. Los sensores que hay en las paredes de esa cavidad proporcionan información a la gigantesca red conectada que es nuestro cerebro, ayudándole a decidir qué músculo tiene que mover a continuación.

En este caso, llegamos a la puerta, la empujamos con la mano que nos queda libre, y salimos.

§. La tierra

En el exterior, podemos observar el mundo entero de un lado a otro a través de la atmósfera invisible. Nuestro planeta es un sistema compuesto de cinco elementos que interactúan entre ellos: las rocas, la atmósfera, los océanos, el hielo y la vida. Cada uno de ellos tiene su propio ritmo y dinámica, pero la suntuosa variedad que encontramos en la Tierra es el resultado del baile eterno que los

une. Las mismas fuerzas los mueven a todos, y hallamos similitudes en los lugares más inesperados. Mientras alzamos la vista y miramos a través de las moléculas invisibles que llenan el cielo, hay bolsas de aire que se mueven según su flotabilidad. El aire que se ha calentado en el edificio del que acabamos de salir sube porque es menos denso que el aire del exterior. Las columnas de aire que suben desde el cálido suelo pueden alcanzar varios kilómetros de altitud, y tardan unos cinco minutos en trepar cada kilómetro. Por debajo, un aire más frío y denso fluye para ocupar su lugar, atraído hacia abajo por la gravedad de la Tierra. Estos patrones de convección se extienden por todo el paisaje que observamos. El aire no se queda nunca totalmente quieto.

Si miráramos a un lado a través de la superficie del profundo océano, nuestro ojo podría englobar varios flujos de flotabilidad similares, también invisibles. El agua fría y salada del Atlántico Norte se hunde hacia el centro de la Tierra, igual que el aire más frío y denso. Cuando alcanza el fondo del océano, fluye hacia los lados por el suelo hasta que se calienta o se mezcla con aguas menos saladas, y entonces flota de nuevo hacia la superficie. En el cielo, un ciclo de subida y bajada puede durar varias horas. En el océano, un ciclo puede durar cuatro mil años, y el agua recorrerá en el proceso medio planeta.

Y, por otro lado, debajo de nuestros pies, las rocas también se están moviendo en este preciso instante. El manto terrestre constituye la mayor parte del planeta, ya que es una capa gruesa que se halla entre el núcleo externo y la fina corteza que flota en la parte

superior. Es líquido pero viscoso, lento y moroso. Esta masa fundida es calentada por el núcleo caliente de la Tierra y por el lento deterioro de los elementos radioactivos que se encuentran enterrados en sus profundidades. Es un movimiento de energía que está teniendo lugar ahora mismo entre las profundas rocas, por debajo de nosotros. A medida que el mantel rocoso y caliente se hace flotante, fluye hacia arriba y la roca que está más fría se hunde para ocupar su lugar. Pero la roca fundida tarda en moverse a estas temperaturas y presiones. Muy por debajo de nosotros, una pluma mantélica puede tardar un año en flotar unos dos centímetros hacia la superficie. Un ciclo completo desde el fondo hasta la superficie y de vuelta hacia abajo puede tardar cincuenta millones de años. Pero el centro de la Tierra obedece a las mismas leyes de la física que la atmósfera y el océano, moviendo el calor sin parar desde dentro hacia fuera.

Una gran cantidad de energía se mueve sin cesar hacia el exterior desde el centro de la Tierra, pero es totalmente insignificante en comparación con la cantidad de energía luminosa que el Sol irradia sobre nuestro planeta. Y en casi cualquier ambiente de la Tierra, ya sea escondido en los rincones o dominando el paisaje, hay materia verde. Puede que se trate de una capa furtiva de musgo en una pared de ladrillos o de la majestuosa arquitectura biológica de un bosque tropical, pero las plantas están por todas partes. Cada hoja es una estructura de apoyo para las capas de células llenas de clorofila, las cuales son como fábricas moleculares diminutas que convierten la luz del sol y el dióxido de carbono en azúcar y oxígeno.

Una fracción de la energía procedente del aluvión de luz que baña cada hoja es capturada y reservada como azúcar: combustible para el futuro. Incluso en los días soleados más tranquilos, en un campo en el que todo parece inmóvil e invariable, las plantas están ocupadas. Molécula a molécula, están produciendo el oxígeno que respiramos, el suficiente para mantener a los demás seres vivos de la Tierra con vida, el suficiente para mantener una atmósfera que está compuesta por un 21% de este gas. Estas diminutas máquinas moleculares no dejan nunca de rehacer una quinta parte de la totalidad de la atmósfera de nuestro planeta. Al mirar a un lado a través del aire, estamos mirando a través de las moléculas en movimiento fabricadas por millones de helechos, árboles, algas, hierbas y otras muchas plantas producidas durante miles de años: la munificencia de un ejército verde.

Desde nuestra posición en el suelo, solo alcanzamos a ver una pequeña fracción del planeta cuando salimos de casa. Imagina que pudiéramos levitar, entonces veríamos mucho más. A medida que nos eleváramos por la atmósfera, las moléculas de aire se dispersarían. La gravedad las estaría atrayendo hacia abajo, pero solo es capaz de mantener una fina capa pegada a la superficie de la Tierra. A medida que nos elevamos por encima de la mayor tormenta, aproximadamente a unos 20 kilómetros de altitud, dejamos atrás al 90% de las moléculas de la atmósfera. El punto más profundo del océano está a 11 kilómetros por debajo del nivel del mar, y todavía más abajo, la roca se extiende unos 6360 kilómetros antes de llegar al centro. Sin cohetes, los humanos nos

vemos limitados a un mísero alcance vertical de unos 30 kilómetros, jugando en el borde de un enorme planeta al que llamamos hogar. La capa de pintura que cubre una pelota de pimpón tiene el mismo grosor con relación a la esfera que recubre.

A una altura de 100 kilómetros, nos encontramos formalmente en la frontera entre la Tierra y el espacio exterior, y podemos ver el globo terráqueo rotando debajo de nosotros, con sus colores verde, marrón, blanco y azul girando en la oscuridad del espacio. Desde aquí arriba, la escala del océano resulta chocante: una cáscara del tamaño de un planeta hecha de una simple molécula que se repite una y otra vez. El agua es el lienzo en que la vida se crea, pero solo dentro del rango de la «zona Ricitos de Oro»⁷⁷, el espectro energético en el que las moléculas pueden moverse en estado líquido. Si das a esas moléculas energía extra, sus vibraciones romperán cualquier molécula compleja que haya. Si les das todavía más energía, se alejarán flotando en forma de gas, totalmente incapaces de proteger una vida frágil. En el extremo más bajo de la zona Ricitos de Oro, a medida que se reduce la energía, las vibraciones se ralentizan hasta que llega un punto en el que las moléculas deben fijarse en un entramado helado. La inmovilidad de este tipo es la enemiga de la vida. Incluso el proceso de fabricar estos cristales rígidos de hielo puede hacer estallar cualquier célula viva que los contenga. Nuestro planeta es especial, no solo porque tiene agua, sino porque el agua es principalmente líquida. Desde nuestro mirador, aquí en el borde del espacio, el activo más valioso de la Tierra domina el paisaje.

Puede que, ahí abajo, mientras el océano Pacífico se desliza, una ballena azul esté emitiendo ondas sonoras, lanzando su llamada en la oscuridad. Si pudiéramos observar el viaje de ese sonido por debajo de la superficie del océano, lo veríamos propagarse como si fueran ondulaciones en un estanque, y tardaría una hora en llegar desde Hawái a California. Pero el sonido se halla escondido en el agua, y desde aquí no hay ninguna prueba visible de su existencia. Los océanos están llenos de sonidos, oscilaciones de presión que se solapan y pulsan hacia el exterior partiendo de olas rompientes, barcos y delfines. Los graves retumbos del hielo antártico pueden viajar miles de kilómetros por debajo del agua. Desde nuestro punto de observación en el borde del espacio, nadie podría adivinar nada de lo que está ocurriendo.

Todo lo que hay en el planeta gira: rota una vez al día alrededor del eje de la Tierra. En su avance por la superficie giratoria, los vientos suelen mantenerse en línea recta, aunque la fricción con el suelo y el confinamiento del aire que los rodea constriñe su camino. Desde aquí arriba se puede observar que los vientos del hemisferio norte tienden a girar a la derecha —con relación al suelo— mientras avanzan aun con la rotación de la Tierra. Así que el clima, especialmente el más alejado del ecuador, da vueltas. Los huracanes rotan, y también lo hacen las tormentas más pequeñas que vemos rodar por la superficie de los océanos. El ojo de la tormenta es el eje de la rueda, y las ruedas tienen que girar porque la Tierra lo hace.

Por encima de la Antártida se están formando densas nubes de nieve. En el interior de cada una de ellas, hay miles de millones de moléculas de agua en forma de gas, sacudiéndose entre el oxígeno y el nitrógeno. Pero a medida que la nube se enfría, las moléculas van liberando su energía y se van ralentizando. Cuando las moléculas más perezosas chocan contra un cristal de hielo que acaba de surgir, se fijan en él y toman su posición fija en el entramado de hielo. A medida que el copo de nieve es sacudido de un lado a otro en el interior de la nube, las moléculas de los seis lados del cristal original se encuentran en las mismas condiciones y se quedan pegadas de la misma forma. Molécula a molécula, se va formando un cristal de nieve simétrico. Tras horas de lento crecimiento, el cristal ya tiene el tamaño suficiente para que la gravedad pueda ganar la batalla, y cae desde el fondo de la nube. Más abajo se encuentra el manto helado de la Antártida, la mayor aglomeración de hielo de la Tierra, con una longitud de miles de kilómetros y un grosor de hasta 4,8 kilómetros. El peso que alcanza es tanto que el propio continente ha acabado prensado hacia abajo a causa de ello. Pero cada molécula de esa extensión blanca cayó en forma de nieve, y la acumulación de copos lleva creciendo largo tiempo. Parte del agua que aquí se encuentra está congelada desde hace millones de años. Durante ese tiempo, las moléculas han seguido vibrando en su posición en el entramado de cristal sin parar ni un momento, pero sin llegar nunca a alcanzar la velocidad necesaria para volverse a convertir en líquido. En contraste, las moléculas que son expulsadas por los volcanes de Hawái en forma de lava se

encuentran por debajo de los 600 °C de temperatura por primera vez desde la formación de la Tierra, hace 4500 millones de años.

La principal fuente de energía del motor externo de la Tierra es el Sol. A medida que calienta las rocas, los océanos o la atmósfera, o que proporciona el combustible necesario para que las plantas produzcan azúcar, va alejando el motor del equilibrio. Mientras exista un desequilibrio en la distribución de la energía, las cosas siempre tendrán el potencial de cambiar. La energía cinética de la lluvia puede erosionar montañas al salpicar las gotas la roca desnuda. El enorme exceso de energía calorífica que se encuentra en el ecuador causa las tormentas tropicales, las cuales zarandean las palmeras, redistribuyen el agua desde el nivel del mar hasta las altas montañas, y forman olas que rompen en las playas. La energía que una planta almacena será invertida en fabricar ramas, hojas, frutos y semillas, y finalmente perderá su utilidad, ya que su calor será demasiado débil. Solo quedará la semilla, un paquete de información genética destinado a reiniciar el ciclo con nueva energía obtenida de la fuente de luz que es el Sol. Nuestro planeta vive gracias a la constante inyección de energía que recibe desde ahí arriba y que alimenta el motor y evita que la Tierra se apacigüe y alcance un equilibrio estable e invariable. Desde aquí, desde el borde del espacio, no vemos los pequeños detalles, pero sí el conjunto: la energía fluye desde el Sol hacia la Tierra, se filtra a través de los océanos, de la atmósfera y de la vida, y, por último, regresa al espacio a través del calor que irradia el planeta. Entra la misma cantidad de energía que sale. Pero en este flujo de energía, la

Tierra actúa como una presa gigantesca, almacenando y usando este recurso tan valioso en infinidad de formas distintas antes de liberarla hacia el universo.

Al volver a flotar hacia el nivel del suelo, la playa parece un proceso más que un lugar; un conjunto de retales de escalas temporales y de tamaño. Las olas del mar transportan energía que proviene de las tormentas que ocurren en alta mar. Al romper en la playa, agitan la arena y las rocas, pulverizándolas. Mota a mota, la piedra se va astillando y millones de colisiones aleatorias van moldeando los guijarros. Solo se tarda un milisegundo en romper una astilla minúscula, pero se necesitan años de lento desgaste para alisar la superficie del guijarro. En la escala temporal geológica, las playas son temporales. Solo perduran si la cantidad de guijarros y arena nuevos supera los que se pierden arrastrados por el mar. A lo largo de los años, la arena se irá moviendo del agua a la playa y de vuelta al agua a causa del océano. Precisamente nos encanta ver las mareas en las playas porque vemos cómo el flujo y el reflujo moldean la arena dos veces al día; es como si se borrara una pizarra. La simplicidad de la arena recién alisada nos produce satisfacción. Pero esta remodelación diaria oculta los cambios operados en décadas a medida que nuestra costa crece y se encoge delante de nuestros ojos. La vida en las piscinas naturales de las rocas prospera gracias a los cambios, adaptándose a períodos en los que se secan por completo y alternándose con otros de inmersión total. Si contemplamos distraídamente una piscina natural, podemos tener la sensación de estar observando tras el cristal una

exposición de cuadros, pero en esos lugares se está librando una feroz batalla por los recursos disponibles, que en definitiva son los más sencillos: acceso a las gotas de energía que rezuman del sistema de la Tierra o la oportunidad de reunir los ladrillos moleculares necesarios para crear vida. La playa, más que ningún otro sitio, ejemplifica la brevedad de la vida. Si la energía y los nutrientes necesarios para desarrollar la vida convergen, las piscinas naturales florecen. Durante los períodos yermos, la vida estará en otros lugares. Las especies evolucionan gracias a que alteran la forma en que usan la caja de herramientas físicas que tienen a su disposición, mutación tras mutación. Ya sea para reunir energía, moverse, comunicarse o reproducirse, todos ellos usan los mismos principios de maneras distintas.

La energía está de paso, pero la Tierra siempre se está reciclando. Casi todo el aluminio, el carbón y el oro que configuran nuestro planeta llevan aquí miles de millones de años, cambiando de una forma a otra. Podría pensarse que, después de todo este tiempo, estas sustancias se hallarían desordenadas, mezcladas en una inmensa sopa planetaria. Pero los procesos físicos y químicos que nos rodean están ordenándolas continuamente para que los átomos similares puedan agruparse en forma de paquetes. La gravedad hace posible que los líquidos se filtren por los sólidos porosos, así que el agua puede penetrar el suelo y agruparse en enormes acuíferos subterráneos mientras el suelo permanece en su sitio. Cuando las enormes floraciones de diminutas criaturas marinas radicadas en el calcio viven y mueren en la superficie del océano, es

la gravedad la que las obliga a caer hacia el fondo oceánico. Los grandes cementerios marinos que a veces se forman en los mares poco profundos se condensan, cambian y se convierten en su característica piedra caliza. Los depósitos de sal se forman porque las moléculas de agua se evaporan con mucha facilidad para convertirse en gas cuando obtienen la energía necesaria, pero las sales no lo hacen. La lava que se produce en las crestas volcánicas medio oceánicas es mucho más densa que el agua, así que se queda en el fondo del océano y forma nueva corteza. Y la propia vida está constantemente arrancando materiales del mundo que la rodea, moldeándolo y reorganizándolo en el proceso, y dejando al morir sus restos para que sean reutilizados.

Si alzamos la vista al cielo en una noche oscura, veremos ondas que han viajado por el sistema solar o por toda nuestra galaxia o por todo nuestro universo antes de llegar a nuestros ojos. Durante milenios, las ondas luminosas eran nuestra única conexión con el resto del universo, la única razón por la que sabíamos que existía algo ahí fuera. Hace unas décadas empezamos a observar las débiles corrientes de materia que nos llegan: los neutrinos y los rayos cósmicos. Y entonces llegaron las ondas gravitacionales, la tercera forma que tenemos de tocar el resto del universo. En febrero de 2016, se confirmó definitivamente que catástrofes astronómicas como la fusión de los agujeros negros también irradian ondas, pequeñas olas que se propagan por el espacio. Las ondas gravitacionales llevan pasando a través de nuestros cuerpos desde tiempos inmemoriales, y por fin estamos a punto de descubrir qué

nos hemos estado perdiendo. Las ondas luminosas y gravitacionales que pasan por nuestro planeta tejen un intrincado tapiz que nos permite dibujar el mapa de nuestro universo y poner una flechita que diga «Estamos aquí».

Pero en un día cualquiera en la Tierra, hay consideraciones más inmediatas. Salir a la puerta de casa y observar el mundo pasar es una forma de recordarnos el gigantesco sistema del que formamos parte. Todos somos una pequeña mota de la vida que hace que este sistema funcione y mantenga su configuración actual. Cuando surgieron los primeros *Homo sapiens*, los humanos solo tenían dos sistemas de soporte vital: el cuerpo y el planeta. Pero ahora tenemos un tercero.

Han sido muchas las especies que han alterado este planeta, pero solo hace unos cuantos miles de años que una sola especie ha reconstruido el entorno en el que vive con el propósito de adaptarlo a sus necesidades. Ahora ya casi se trata de un solo organismo, de una creciente red de interconexiones entre conciencias individuales. En este sistema, todas las personas dependen casi totalmente de las demás para su supervivencia, pero, a su vez, todas contribuyen a él. La comprensión de las leyes de la física es uno de los pilares que sostienen nuestra sociedad, y no seríamos capaces de gestionar el transporte, los recursos, la comunicación o la toma de decisiones sin ese conocimiento. La ciencia y la tecnología hacen posible el mayor logro colectivo de los humanos: la civilización.

§. La civilización

Una vela y un libro. Energía portátil e información portátil, disponibles a demanda pero con el potencial de durar siglos. Estos son los hilos que entretrejen las vidas humanas para construir algo mucho más grande: una sociedad cooperativa que siempre construye sobre la base del trabajo de la generación anterior. La energía debe seguir fluyendo a través de nuestra generación para que la vela pueda seguir guardada casi indefinidamente, pero solo pueda ser usada una vez. El conocimiento se acumula, así que un solo libro puede estimular a muchas mentes. Las velas y los libros existían hace ya dos mil años, y hoy seguimos teniendo velas y libros. Son tecnologías sencillas, pero funcionan. Hemos construido el mundo moderno a fuerza de guardar energía y compartir información sobre lo que puede hacerse con ella.

Asociamos las civilizaciones con ciudades, pero siempre fueron fundadas en el campo. Se necesita energía para construir, explorar, intentar y fallar, y volver a intentarlo, así que los humanos tuvieron que poner las plantas a sus órdenes para cosechar energía solar y proporcionar así combustible a sus esfuerzos. Los humanos podemos remover la tierra, el agua y las semillas, pero necesitamos de las plantas para que conviertan en azúcar las ondas luminosas. Aprendimos a implementar nuestra propia presa verde para desviar una pequeña parte del torrente de energía solar e hicimos que los frutos maduraran. Mientras se filtraba por el sistema de la Tierra, esa energía desviada temporalmente nos alimentó a nosotros y a nuestros animales y nos dio la capacidad de alterar el mundo.

Creemos que vivimos en una sociedad moderna, pero eso es solo una verdad a medias. Dependemos de las infraestructuras construidas por generaciones anteriores, hace décadas, siglos y, a veces, hasta milenios. Esas carreteras, edificios y canales siguen siendo útiles porque son los conductos que conectan las partes más alejadas y diferentes de nuestra sociedad. La cooperación y el comercio nos traen enormes beneficios, y estas redes nos proporcionan mucho más de lo que nuestra propia fuerza e inteligencia aisladas podrían darnos.

Una ciudad es un bosque de edificios, y cada uno tiene una función y un diseño distintos. Pero debajo de ellos se extiende una enorme red de gruesos cables de cobre que se ramifican cuando entran en los edificios y, una vez dentro, todavía se ramifican más, ocultos tras las paredes y bajo los suelos hasta que las cabezas de esos tallos se hacen visibles por fin en cada enchufe. En cuanto algo se enchufa, se completa el ciclo y los electrones son libres para corretear, uniendo así la estructura ramificada del exterior con la estructura de retorno a la que se han unido. Si solo viéramos los cables y no la ciudad, veríamos las arterias de la vida moderna que nos proporcionan energía desde enormes centrales eléctricas remotas. La red se extiende por todos los países; es una red metálica de rutas entrecruzadas que interconecta el enorme abanico de energías que, juntas, son capaces de alimentar al monstruo. Estamos rodeados por electrones que flotan a la deriva cumpliendo nuestras órdenes.

Sobre esta red de energía se superponen otras redes que también trepan por los edificios y entran en nuestras vidas. La Tierra tiene un ciclo hídrico hecho a su medida que conecta a los océanos con la lluvia y con los ríos y los acuíferos. El Sol proporciona la energía necesaria para que el agua se evapore, se mueva por la atmósfera y se deposite en otros lugares. Los humanos construimos canalizaciones locales para desviar el agua de su ciclo natural e inyectarla en nuestra civilización antes de devolvérsela de nuevo al mundo. Almacenamos la lluvia acumulada en un pantano para evitar que responda a la llamada de la gravedad y fluya hacia los ríos en su camino hacia el océano. Con su movimiento, los electrones proporcionan energía a las bombas que llenan unas tuberías de casi un metro de diámetro para sacar el agua del pantano, y estas tuberías se van ramificando a medida que se extienden por nuestras calles, hacia el interior de nuestros edificios, y, finalmente, llegan a nuestros grifos. Una vez usada, esa agua viaja a través de desagües y alcantarillas, discurriendo por tuberías cada vez más grandes hasta que todas ellas se unen para seguir su camino hacia una planta de tratamiento de aguas o un río. Cuando abrimos el grifo, vemos solo el final de esa red, un pequeño eslabón en un ciclo gigantesco. Entonces el agua se escurre y desaparece de nuestra vista para adentrarse en los túneles ocultos una vez más. La gravedad la mantiene a raya: mientras nosotros nos encargamos del trabajo inicial para hacer que suba y proporcionemos la energía necesaria para apartar el agua de su equilibrio, la gravedad siempre nos tomará el relevo para guiar el

flujo de nuevo hacia abajo. El desagüe no es más que el lugar en el que la resistencia contra la gravedad desaparece temporalmente.

La ciudad es un lugar donde estas y otras redes se hallan comprimidas porque los humanos también lo están, y tienen que apoyarse en las redes para vivir. Sobre la imagen que tan interiorizada tenemos de las ciudades, se superponen otras redes: sistemas de distribución alimentaria, transporte de personas y el comercio para compartir los recursos disponibles. Y estas son solo las que se hacen visibles si sabes dónde mirar.

El fuego fue el inicio de la aventura humana con la luz artificial. En lugar de depender de las ondas luminosas emitidas por el Sol, aprendimos a crearlas nosotros mismos. Las velas hicieron que pudiéramos ver incluso cuando nuestro lado de la Tierra había rotado y daba la espalda al Sol. Hace ciento cincuenta años, las ciudades se iluminaban de noche mediante las ondas luminosas que emitían las velas, la madera, el carbón y el aceite al quemarse. Hoy en día, el cielo está repleto de luz que no vemos y que brilla día y noche. Si fuéramos capaces de ver las ondas de radio, veríamos que estas longitudes de onda nunca han dejado a nuestro planeta privado de su luz. Pero estas nuevas ondas son mucho más que iluminación. Las ondas de radio, las emisiones de televisión, el wifi y las señales telefónicas forman una red de información perfectamente coordinada que está constantemente propagándose a través de lo que nos rodea y de nosotros mismos. Cualquier persona que se encuentre en nuestra civilización y tenga un dispositivo electrónico capaz de sintonizar con la clase de onda adecuada

tendrá acceso instantáneo a emisiones visuales de la información, pronósticos marítimos, programas de televisión, control aéreo, radio-afición e, incluso, las voces de familiares y amigos. Las ondas fluyen a nuestro alrededor todo el tiempo, y lo maravilloso del mundo moderno es que escuchar y cooperar nunca había sido tan fácil. El flujo de la información mantiene al mundo unido. Los agricultores pueden organizar sus cosechas en función de lo que los supermercados vayan a querer esa semana; las noticias sobre los desastres naturales llegan al resto del planeta en tiempo real; los aviones pueden modificar sus rutas para evitar el mal tiempo que les espera más adelante; podemos decidir si queremos hacer la compra más tarde porque va empezar a llover dentro de unos minutos. Este sistema funciona porque esas ondas las coordinan los seres humanos cooperando entre ellos, porque nuestra especie se puso de acuerdo para establecer unas reglas globales para ciertas ondas y unas reglas nacionales para otras. Durante la mayor parte de la historia de la humanidad, había ondas pero no redes. En las últimas cinco generaciones, hemos construido una red de información basada en las ondas que hoy en día nos parece indispensable.

En el pasado, los humanos estaban limitados geográficamente por el calor, el frío o la falta de recursos. Si las moléculas que nos rodean tienen demasiada energía calorífica o demasiado poca, las moléculas que componen nuestro cuerpo las imitarán. Si el delicado equilibrio entre la actividad molecular y la estasis de nuestro cuerpo se rompe, sufrimos. Pero estos límites geográficos han desaparecido

casi por completo. Construimos edificios, pasarelas, vehículos y barreras que alteran el interior de cada estructura para que tenga el nivel de energía adecuado que nos permita sentirnos cómodos. El aire acondicionado en Dubái y la calefacción central en Alaska nos proporcionan burbujas habitables donde antes no las había. Nos olvidamos de las inclemencias del mundo real y damos por sentadas nuestras burbujas protectoras. Todavía estamos muy lejos de poder habitar otros planetas, pero los humanos hemos desarrollado algunas de las tecnologías necesarias para que nuestro propio mundo sea más habitable. El principio es el mismo: se trata de manipular un ambiente hasta que encaje con las estrictas condiciones que requiere nuestra supervivencia. El suministro de agua, los ladrillos moleculares y la energía tienen que ser los adecuados. Cuando hemos construido una burbuja, construimos otra, avanzando lentamente por todo el planeta y extendiendo nuestras redes de supervivencia allá donde vamos.

El crecimiento de la civilización trae consigo desafíos. A medida que crece la población, necesitamos más recursos y espacio para poder vivir. Hemos descubierto que el uso de los combustibles que empleamos para que los motores de la revolución industrial funcionaran y el crecimiento exponencial del mundo desarrollado tienen consecuencias. Mientras los humanos cultivaban plantas para cosechar la energía del Sol y construían una reserva de energía verde que podía ser manipulada a placer, la mayoría de nuestra energía provenía de otra fuente. La Tierra ya tenía una reserva de energía compuesta por el torrente de energía solar, una reserva que

se había ido acumulando durante cientos de millones de años, y tiramos de ella. Durante eones, una pequeña fracción de las plantas que han atrapado la energía del Sol se encontraron también atrapadas, enterradas y comprimidas a mucha profundidad del suelo. La lenta acumulación de la energía solar capturada formó una enorme reserva subterránea, en un refugio seguro, mientras la energía solar seguía fluyendo en la superficie desde y hacia el planeta. A estas antiguas reservas de energía las llamamos combustibles fósiles, y su energía es muy fácil de extraer y de activar. El uso de la energía en sí misma no supone un problema, ya que no es más que energía solar almacenada que está siendo finalmente devuelta al universo, pero saber qué hacer con el envoltorio es una auténtica pesadilla. Las plantas absorben dióxido de carbono para crecer, y cuando la energía de su combustible se libera, se vuelve a formar dióxido de carbono y se devuelve a la atmósfera. Estas moléculas de gas flotan en el aire, alterando el viaje de las ondas por la atmósfera. La consecuencia es que el planeta entero se convierte en una reserva de energía solar algo más grande. Al quemar las reservas de energía acumuladas durante millones de años, los humanos hemos subido un poco la temperatura del planeta. Y aprender a lidiar con el nuevo estado de equilibrio de nuestro planeta requiere un ingenio considerable.

Pero los humanos somos ingeniosos por naturaleza. Nuestra comprensión de la ciencia, de la medicina, de la ingeniería y de nuestra propia cultura, todo ello está ahora listo para ser tomado de la red de ondas invisibles que nos rodean. Siempre que usamos algo

perteneciente a esa red de información, nos estamos beneficiando del esfuerzo de muchas generaciones de humanos.

Uno de los mayores avances proviene del descubrimiento de la enorme cantidad de espacio con el que se puede trabajar si juegas en escalas de tamaños distintos al tuyo. El cuerpo humano y las estructuras que caben en él no cambian de tamaño: estamos hechos de un sistema increíblemente complejo, y este es el espacio que necesitamos para contenerlo. El tamaño de las camas, de las mesas, de las sillas y de los alimentos no va a cambiar, porque todos y cada uno de nosotros vivimos en un cuerpo concreto. Pero a medida que aprendemos a manipular el mundo de lo pequeño y encogemos nuestro punto de vista en consonancia con ello, también estamos aprendiendo a construir enormes fábricas que son demasiado pequeñas para que nuestros cuerpos las vean. El tiempo que se necesita para hacer las cosas se encoge a medida que decrece el tamaño, así que hay miles de millones de procesos que pueden ser completados en un solo segundo. La electricidad se mueve muy cómodamente en esta escala. Un ordenador es una máquina electrónica de hacer cuentas hecha con componentes construidos a nano escala. Los ordenadores nos parecen pequeños, pero comparados con los átomos que los componen, son maravillas arquitectónicas con diversas funcionalidades integradas en ellas. Si nos asombra la supuesta magia de un ordenador es, en realidad, por el choque que nos produce aceptar que las cosas pueden suceder a otras escalas temporales y de tamaño. Incluso hoy en día, estas enormes y a la vez diminutas fábricas de hacer cuentas se

están convirtiendo en herramientas esenciales para controlar el mundo, y, a medida que pase el tiempo, estarán cada vez más integradas en nuestra civilización. Una civilización con más habitantes requiere que las decisiones que se tomen sean más eficientes y rápidas, y que la información necesaria para coordinar los delicados engranajes del sistema fluya más rápidamente. Y usar escalas de tamaño distintas a las nuestras hace que esto sea posible.

Actualmente, nuestra especie está confinada en este planeta y en sus entornos cercanos, pero llevamos generaciones mirando a las estrellas. Ahora, por primera vez en la historia de la civilización, también nos estamos observando a nosotros mismos. Los satélites de observación terrestre y los satélites de comunicaciones revolotean alrededor de nuestro planeta, conectándonos los unos a los otros y permitiéndonos observar cómo el mundo gira por debajo de ellos. Desde ahí arriba, la huella de nuestra civilización es visible: las brillantes luces de las ciudades por la noche, el aire caliente alrededor de las urbes en zonas frías, el color de los terrenos que la agricultura ha cambiado... Solo uno de esos objetos que orbitan es una burbuja apta para los humanos: la Estación Espacial Internacional. Esto demuestra que nuestra civilización sí se extiende por el espacio, aunque sea solo hasta esta estación. No puede acoger más que diez personas cada vez, un grupo de individuos que representa ahí arriba a la humanidad entera, y que cada noventa y dos minutos completará una órbita alrededor de la Tierra. Los hombres y mujeres que han visto su planeta desde ahí

entienden que comparten una perspectiva de la civilización que nunca podrán llegar a transmitir completamente al resto de la humanidad. Pero lo intentan, y eso dice mucho a su favor.

Por encima de los satélites, muy lejos del escudo magnético que protege a nuestro planeta de los rayos cósmicos, los signos de nuestra civilización menguan. En el espacio exterior, abajo y arriba no existen. Un reloj de péndulo no se moverá porque no hay atracción gravitacional que tire del péndulo. La simplicidad de lo que hay por ahí nos indica que todo ocurre, bien excepcionalmente rápido según los parámetros humanos, bien con excepcional lentitud. El Sol obtiene su energía de reacciones nucleares rápidas, pero los cambios que en él se dan tardan miles de millones de años en producirse. Cuando sus diminutos átomos interactúan, sus reacciones son del tamaño de un planeta, de una luna o de todo un sistema solar. Esta civilización nuestra tan compleja y caótica que habita este mundo nuestro tan complejo y caótico se halla en el centro de las escalas de tamaño y tiempo.

Somos una excepción en el universo conocido.

Los humanos observamos el espacio, y puede que haya algo ahí fuera que nos observe también a nosotros. La luz sigue siendo nuestra conexión principal con todo lo que no sea nuestro planeta, y los cambios moleculares que tienen lugar cuando la luz de las estrellas llega a nuestra retina nos unen con el resto del universo. Y aquí estamos: somos una capa hermosa, complicada, sensible; la fina pátina de un pequeño planeta rocoso que vive en la frontera entre el cosmos y la Tierra. Aquí estamos: somos el producto de

nuestros tres sistemas de soporte vital entrelazados, moldeados por la física del universo.

Y aquí estoy yo, fuera de mi casa, observando el cielo mientras las nubes se agrupan y me ocultan el resto del universo. Aquí estoy, una humana moderna que sostiene una taza hecha a partir de los componentes de la Tierra y que piensa en las complejidades del universo porque es capaz de hacerlo. Los patrones me rodean, y los puedo tocar con mis propios dedos. Bajo la mirada hacia mi taza y veo el remolino de líquido. Y entonces vuelvo a mirar y lo que veo es completamente distinto. En la superficie líquida se refleja un patrón igual de brillante, hermoso y fascinante que el remolino, una imagen que muestra el cielo que tengo sobre la cabeza. Justo ahí, en mi taza, veo la tormenta.

Referencias bibliográficas

Capítulo 1: Palomitas y Cohetes

- Inkster, Ian, *History of Technology*, vol. 25, Londres, Bloomsbury, 2010, pág. 143.
- «[Elephant anatomy: respiratory system](#)», Elephants Forever.
- «[Elephant anatomy](#)», Animal Corner.
- «[The trunk](#)», *Elephant Information Repository*.
- Lienhard, John H., *How Invention Begins: Echoes of Old Voices in the Rice of New Machines*, Nueva York, Oxford University Press, 2006.
- «[Magdeburger Halbkugeln mit Luftpumpe von Otto von Guericke](#)», Deutsches Museum.
- «[Bluebell Railway: preserved steam trains running through the heart of Sussex](#)».
- «[Rocket post: that's one small step for mail...](#)», *Post & Parcel*.
- «[Rocket post reality](#)», página web de la isla de Harris.
- Turner, Christopher, «Letter bombs», *Cabinet Magazine*, vol. 23, 2006.
- «A sketch diagram of Zucker's rocket as used on Scarp, July 1934 (POST 33/5130)», Museo Postal y Archivo de Bristol.

Capítulo 2: Todo lo que sube, baja

- Driss-Ecole, D., A. Lefranc y G. Perbal, «A polarized cell: the root-statocyte», *Physiologia Plantarum*, vol. 118, N° 3, julio de 2003, págs. 305-312.

- Smith, George, «Newton's "[Philosophiae Naturalis Principia Mathematica](#)"», en Edward N. Zalta (comp.), *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, invierno de 2008.
- Churchill, Celia K., Diarmaid Ó Foighil, Ellen E. Strong y Adriaan Gittenberger, «[Females floated first in bubble-rafting snails](#)», *Current Biology*, vol. 21, N° 19, octubre de 2011, págs. R802-R803.
- Su, Zixue, Wuzong Zhou y Yang Zhang, «[New insight into the soot nanoparticles in a candle flame](#)», *Chemical Communications*, vol. 47, n.º 16, marzo de 2011, págs. 4700-4702.

Capítulo 3: La belleza de lo pequeño

- Yunker, Peter J., Tim Still, Matthew A. Lohr y A. G. Yodh, «[Suppression of the coffee-ring effect by shape-dependent capillary interactions](#)», *Nature*, vol. 476, 18 de agosto de 2011, págs. 308-311.
- Deegan, Robert D., Olgica Bakajin, Todd F. Dupont, Greb Huber, Sidney R. Nagel y Thomas A. Witten, «[Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops](#)», *Nature*, vol. 389, 23 de octubre de 1997, págs. 827-829.
- El libro completo de [Micrographia](#) está disponible en internet.
- «[Homogenization of milk and milk products](#)», University of Guelph Food Academy.
- «[Blue tits and milk bottle tops](#)», *British Bird Lovers*.

- Jost, Rolf, «[Milk and dairy products](#)», en *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Nueva York y Chichester, Wiley, 2007.
- Fernstrom, Aaron y Michael Goldblatt, «[Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases](#)», *Journal of Pathogens*, 2013, artículo N° 493 960.
- «[Ebola in the air: what science says about how the virus spreads](#)».
- Loria, Kevin, «[Why Ebola probably won't go airborne](#)», *Business Insider*, 6 de octubre de 2014 .
- Stilianakis, N. I. y Y. Drossinos, «[Dynamics of infectious disease transmission by inhalable respiratory droplets](#)», *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, N.º 50, 2010, págs. 1355-1366.
- Eames, I., J. W. Tang, Y. Li y P. Wilson, «[Airborne transmission of disease in hospitals](#)», *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 6, octubre de 2009, págs. S697-S702.
- «[TB rises in UK and London](#)», *NHS Choices*.
- [Organización Mundial de la Salud, nota descriptiva sobre la tuberculosis N° 104, 2016.](#)
- Sakula, A., «[Robert Koch: centenary of the discovery of the tubercle bacillus, 1882](#)», *Thorax*, vol. 37, N° 4, 1982, págs. 246-251.
- [Página de los Premios Nobel sobre Robert Koch.](#)
- Bourouiba, Lydia, Eline Dehandschoewercker y John W. M. Bush, «Violent expiratory events: on coughing and sneezing», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 745, 2014, págs. 537-563.

- Organización Mundial de la Salud, «[Improved data reveals higher global burden of tuberculosis](#)», 22 de octubre de 2014.
- McCarthy, Stephen, «[Agnes Pockels](#)», *175 faces of chemistry*, noviembre de 2014.
- «[Agnes Pockels](#)».
- Pockels, Agnes, «Surface tension», *Nature*, vol. 43, 12 de marzo de 1891, págs. 437-439.
- Schaffer, Simon, «A science whose business is bursting: soap bubbles as commodities in classical physics», en Lorraine Daston (comp.), *Things that Talk: Object Lessons from Art and Science*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2004.
- Gabbatt, Adam, «[Dripless teapots](#)», *Guardian*, Food and drink news blog, 29 de octubre de 2009.
- Chaplin, Martin, «[Cellulose](#)».
- Klemm, D., B. Heublein, H-P. Fink y A. Bohn, «[Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material](#)», *Angewandte Chemie*, ed. internacional, vol. 44, 2005, págs. 3358-3393.
- Myburg, Alexander A., Simcha Lev-Yadun y Ronald R. Sederoff, «[Xylem structure and function](#)», *eLS*, octubre de 2013.
- Tennesen, Michael, «Clearing and present danger? Fog that nourishes California redwoods is declining», *Scientific American*, 9 de diciembre de 2010.
- Johnstone, James A. y Todd E. Dawson, «Climatic context and ecological implications of summer fog decline in the coast red-

wood region», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, N°10, 2010, págs. 4533-4538.

- Ewing, Holly A. *et al.*, «Fog water and ecosystem function: heterogeneity in a California redwood forest», *Ecosystems*, vol. 12, n.º 3, abril de 2009, págs. 417-433.
- Burgess, S. S. O., J. Pittermann y T. E. Dawson, «[Hydraulic efficiency and safety of branch xylem increases with height in “Sequoia sempervirens” \(D. Don\) crowns](#)», *Plant, Cell and Environment*, vol. 29, 2006, págs. 229-239.
- Koch, George W., Stephen C. Sillett, Gregory M. Jennings y Stephen D. Davis, «[The limits to tree height](#)», *Nature*, vol. 428, 22 de abril de 2004, págs. 851-854.
- Canny, Martin, «[Transporting water in plants](#)», *American Scientist*, vol. 86, n.º 2, 1998, pág. 152.
- Kosowatz, John, «[Using microfluidics to diagnose HIV](#)», marzo de 2012.
- Taylor, Phil, «[Go with the flow: lab on a chip devices](#)», 10 de octubre de 2014.
- Sackmann, Eric K., Anna L. Fulton y David J. Beebe, «The present and future role of microfluidics in biomedical research», *Nature*, N° 507.7491, 2014, págs. 181-189.
- Grupo de investigación Whitesides, «[Low-cost diagnostics and tools for global health](#)».

Capítulo 4: Un momento en el tiempo

- Lauga, Eric y A. E. Hosoi, «Tuning gastropod locomotion: modeling the influence of mucus rheology on the cost of crawling», *Physics of Fluids (1994-present)*, vol. 18, N° 11, 2006, pág. 113.
- Lai, Janice H. *et al.*, «The mechanics of the adhesive locomotion of terrestrial gastropods», *Journal of Experimental Biology*, vol. 213, N° 22, 2010, págs. 3920-3933.
- Denny, Mark W., «Mechanical properties of pedal mucus and their consequences for gastropod structure and performance», *American Zoologist*, vol. 24, n.º 1, 1984, págs. 23-36.
- Shirtcliffe, Neil J., Glen McHale y Michael I. Newton, «Wet adhesion and adhesive locomotion of snails on anti-adhesive non-wetting surfaces», *PloS one*, vol. 7, N° 5, 2012, pág. e36983.
- Mayer, H. C. y R. Krechetnikov, «Walking with coffee: why does it spill?», *Physical Review E*, vol. 85, N° 4, 2012, pág. 046117.
- Reisner, Marc, *Cadillac Desert: The American West and its Disappearing Water*, ed. revisada, Nueva York, Penguin, 1993.
- Frost, B. J., «The optokinetic basis of head-bobbing in the pigeon», *Journal of Experimental Biology*, vol. 74, 1978, págs. 187-195.
- «[Engineering aspects of the September 19, 1985 Mexico City earthquake](#)», serie de la NBS *Building Science*, vol. 165, mayo de 1987.
- Hernández, Daniel, «[The 1985 Mexico City earthquake remembered](#)», *Los Angeles Times*, 20 de septiembre de 2010.

- Martin, William F., Filipa L. Sousa y Nick Lane, «Energy at life's origin», *Science*, vol. 344, N° 6188, 2014, págs. 1092-1093.
- Seager, S., «[The future of spectroscopic life detection on exoplanets](#)», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 111, N° 35, 2014, págs. 12 634-12 640.

Capítulo 5: Creando olas

- Michelson, A. A. y E. W. Morley, «[On the relative motion of the Earth and of the luminiferous ether](#)», *Sidereal Messenger*, vol. 6, 1887, págs. 306-310.
- Bhanoo, Sindya N., «[Silvery fish elude predators with light-bending](#)», *New York Times*, 22 de octubre de 2012.
- Madrigal, Alexis C., «[You're eye-to-eye with a whale in the ocean: what does it see?](#)», *The Atlantic*, 28 de marzo de 2013.
- Peichl, Leo, Günther Behrmann y Ronald H. H. Kröger, «For whales and seals the ocean is not blue: a visual pigment loss in marine mammals», *European Journal of Neuroscience*, vol. 13, N° 8, 2001, págs. 1520-1528.
- Fasick, Jeffrey I. *et al.*, «Estimated absorbance spectra of the visual pigments of the North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*)», *Marine Mammal Science*, vol. 27, n.º 4, 2011, págs. E321-E331.
- [Dosier de prensa para la exposición sobre Marconi](#), Universidad de Oxford.

- Kovarik, Bill, «[Radio and the “Titanic”](#)», *Revolutions in Communication*.
- [Página de radio del RMS Titanic](#).
- Gueguen, Yannick *et al.*, «Yes, it turns: experimental evidence of pearl rotation during its formation», *Royal Society Open Science*, vol. 2, N° 7, 2015, pág. 150 144.

Capítulo 6: ¿Por qué a los patos no se les enfrían los pies?

- «[Molecular dynamics: real-life applications](#)».
- «[Einstein and Brownian motion](#)», *American Physical Society News*, vol. 14, n.º 2, febrero de 2005.
- «[Back to basics: the science of frying](#)».
- «[1000 days in the ice](#)», *National Geographic*, 2009.
- Zhao, Jing, Sindee L. Simon y Gregory B. McKenna, «Using 20-million-year-old amber to test the super-Arrhenius behaviour of glass-forming systems», *Nature Communications*, vol. 4, 2013, pág. 1783.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*, informe GICC 2007, FAQ 5.1, «[Is sea level rising?](#)».
- Milman, Oliver, «[World’s oceans warming at increasingly faster rate, new study finds](#)».
- «[The coldest place in the world](#)», *NASA Science News*, 10 de diciembre de 2013.

- «[Webbed wonders: waterfowl use their feet for much more than just standing and swimming](#)».
- «[Temperature regulation and behavior](#)».
- Krasner-Khait, Barbara, «[The impact of refrigeration](#)».
- Jol, Simon, Alex Kassianenko, Kaz Wszol y Jan Oggel, «[Issues in time and temperature abuse of refrigerated foods](#)», Food Safety Magazine, diciembre de 2005-enero de 2006.
- Madrigal, Alexis C., «[A journey into our food system's refrigerated-warehouse archipelago](#)», *The Atlantic*, 15 de julio de 2003.

Capítulo 7: Cucharas, espirales y Sputnik

- Gladstone, Hugh, «[Making tracks: building the Olympic velodrome](#)», *Cycling Weekly*, 21 de febrero de 2011.
- Thomas, Rachel, «[How the velodrome found its form](#)», *Plus Magazine*, 22 de julio de 2011.
- «[Determination of the hematocrit value by centrifugation](#)».
- «[Astronaut training: centrifuge](#)», RUS Adventures.
- «[Centrifuge](#)», Centro de Investigación y Entrenamiento para Cosmonautas Yu. A. Gagarin.
- «[High-G training](#)».
- Zyga, Lisa, «[The physics of pizza-tossing](#)», *Phys.org*, 9 de abril de 2009.
- Spiegel, Alison, «[Why tossing pizza dough isn't just for show](#)», *Huff Post Taste*, 2 de marzo de 2015.

- Liu, K.-C., J. Friend y L. Yeo, «The behavior of bouncing disks and pizza tossing», *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 85, N° 6, 26 de marzo de 2009.
- «[Estación Espacial Internacional](#)».
- Imster, Eleanor y Deborah Bird, «[This date in science: launch of Sputnik](#)», 4 de octubre de 2014.
- Launius, Roger D., «[Sputnik and the origins of the Space Age](#)».
- Chevedden, Paul E., «[The invention of the counterweight trebuchet: A study in cultural diffusion](#)», *Dumbarton Oaks Papers*, vol. 54, 2000.
- Borghi, Riccardo, «On the tumbling toast problema», *European Journal of Physics*, vol. 33, N° 5, 1 de agosto de 2012.
- Matthews, R. A. J., «[Tumbling toast, Murphy's Law and the fundamental constants](#)», *European Journal of Physics*, vol. 16, N° 4, 1995, págs. 172-176.
- «[Dizziness and vertigo](#)».
- Novella, Steven, «[Why isn't the spinning dancer dizzy?](#)», *Neurologica*, 30 de septiembre de 2013.

Capítulo 8: Cuando los opuestos se atraen

- «[One penny coin](#)».
- «[The chaffinch](#)».
- Clarke, Dominic, Heather Whitney, Gregory Sutton y Daniel Robert, «[Detection and learning of floral electric fields by bumble-bees](#)», *Science*, vol. 340, n.º 6128, 5 de abril de 2013, págs. 66-69.

- Corbet, Sarah A., James Beament y D. Eisikowitch, «Are electrostatic forces involved in pollen transfer?», *Plant, Cell and Environment*, vol. 5, N° 2, 1982, págs. 125-129.
- Yong, Ed, «[Bees can sense the electric fields of flowers](#)», *National Geographic*, blog «Phenomena», 21 de febrero de 2013.
- Pettigrew, John D., «Electroreception in monotremes», *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, N° 10, 1999, págs. 1447-1454.
- Proske, U., J. E. Gregory y A. Iggo, «Sensory receptors in monotremes», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 353, n.º 1372, 1998, págs. 1187-1198.
- «[Cathode ray tube](#)», Departamento de Física de la Universidad de Oxford.
- «[Non-European compasses](#)», Royal Museums Greenwich.
- Parry, Wynne, «[Earth's magnetic field shifts, forcing airport runway change](#)», *Live Science*, 7 de enero de 2011.
- «[Wandering of the geomagnetic poles](#)», National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- «[Swarm reveals Earth's changing magnetism](#)», Agencia Espacial Europea, 19 de junio de 2014.
- Stern, David P., «[The Great Magnet, the Earth](#)», 20 de noviembre de 2003.
- «[Drummond Hoyle Matthews](#)».

- Vine, F. J. y D. H. Matthews, «Magnetic anomalies over oceanic ridges», *Nature*, vol. 199, 1963, págs. 947-949.
- Chang, Kenneth, «How plate tectonics became accepted science», *New York Times*, 15 de enero de 2011.

Agradecimientos

Lo más bonito de escribir esta parte es que mis agradecimientos se clasifican en dos categorías distintas que, en buena medida, se solapan. Por un lado están todas aquellas personas que me ayudaron con el libro en algún aspecto concreto, y luego están las que formaron parte de las anécdotas que he contado y que enriquecen mi vida compartiendo mis aventuras y me animan a emprender otras nuevas. Estoy inmensamente agradecida de poder contar con todas ellas.

Mis compañeros de exploraciones fueron Dallas Campbell, Nicki Czerska, Irena Czerski, Lewis Dartnell, Tamsin Edwards, Campbell Storey y la perrita *Inca*. Los amables trabajadores del Green Britain Centre (cuya turbina eólica visité) fueron inmensamente hospitalarios y mostraron una paciencia extraordinaria en todas mis preguntas. El doctor Geoff Willmott y la profesora Cath Noakes me ayudaron muchísimo con los temas relativos a los aparatos microfluídicos y las enfermedades transmitidas por el aire. Helle Nicholson, Phil Hector y Phil Read tuvieron la amabilidad de leer algunos fragmentos del libro y de proporcionarme comentarios muy valiosos. La ayuda de Matt Kelly tiene mucho mérito, ya que me proporcionó observaciones de lo más atentas sobre la propuesta del libro y sobre algunos de sus capítulos, y además me he beneficiado enormemente de su experiencia como escritor, que ha compartido conmigo. La amistad de Matt y su apoyo incansable han significado mucho para mí a lo largo de este proyecto. Tom Wells me animó a

ponerme manos a la obra, y me ha proporcionado sabios consejos a la vez que me ha dejado utilizarlo como cobaya durante todo el proceso. Jem Stansfield, Alom Shaha, Gaia Vince, Alok Jha, Adam Rutherford y los otros muchos amigos que he conocido gracias a la ciencia han estado ahí para apoyarme y hacerme reír de principio a fin.

El Churchill College de Cambridge fue mi hogar intelectual durante muchos años, y en mi corazón sigo considerándolo un hogar. En el Churchill College y en el Laboratorio Cavendish es donde pude adquirir una sólida base en el campo de la física. El doctor Dave Green, mi director de estudios, se merece una mención especial; espero que este libro cumpla con sus requisitos de precisión, y especialmente, que el número de PALABRAS que lo integran compensen la falta de DIAGRAMAS. Mis amigos del Churchill College son una parte importantísima de mi vida, y es maravilloso poder contar con unos compañeros tan fantásticos y constantes en la aventura de la vida.

Aterricé en el mundo de la física de burbujas prácticamente por accidente, cuando el doctor Grant Deane, del Instituto Oceanográfico Scripps, decidió darle una oportunidad a alguien a quien no había visto nunca y aceptó que me uniera a su equipo como pos doctorada. Grant es, a la vez, un ser humano increíble y un académico riguroso y apasionado, y me siento muy afortunada de haber tenido la oportunidad de trabajar con él. Me mostró lo mejor que el mundo académico puede ofrecer, y fue para mí un ejemplo extraordinario de cómo trabajar siguiendo los valores más

estrictos. Nunca podré agradecerle lo suficiente que me diera esa oportunidad, y que me prestara apoyo en todos los proyectos que he emprendido a partir de entonces.

La University College de Londres es mi morada académica en la actualidad, y me siento muy afortunada de trabajar allí. Estoy en el Departamento de Ingeniería Mecánica, y agradezco mucho a mi director de departamento, el profesor Yiannis Ventikos, el entusiasmo que mostró cuando le dije que iba a emprender este proyecto. El profesor Mark Miodownik es una fuente inagotable de energía y calidez, de buenos consejos y amistad, y me siento inmensamente en deuda con él por haberme ayudado a encontrar un hogar académico tan fantástico como este.

Mi agente literario, Will Francis, me animó a escribir este libro, tuvo una paciencia inquebrantable hasta que llegó el momento adecuado, y me ha apoyado y aconsejado muchísimo durante el proceso. Susanna Wadeson de Transworld ha sabido llevar el timón del proyecto con suma destreza, y le estoy muy agradecida por su perspicacia y su sinceridad.

Mi familia es extraordinaria; todos sienten una curiosidad incansable por el mundo, son un apoyo incondicional, siempre están dispuestos a probar cosas nuevas, y están locos en el mejor de los sentidos. Todo lo que he hecho se levanta sobre las bases de lo que ellos me han dado. Mi hermana Irena es increíble, y ella y Malcolm son seguramente las personas más hospitalarias y amables que jamás he conocido. Escuchar a mi abuela y a Pat Jolly, a mi tía Kath y a mi madre, contar historias sobre los primeros televisores y

los misterios de los transformadores de líneas es algo que debería haber hecho muchos años antes. Mi mayor agradecimiento es para mis padres, Jan y Susan. Ellos nos enseñaron a explorar el mundo y solo nos pidieron que lo hiciéramos lo mejor que pudiéramos. Los quiero, y nunca podré agradecerles lo suficiente.

Sobre el autor

HELEN CZERSKI (n. 01-11-1978 Mánchester, Reino Unido) es física, oceanógrafa y presentadora. Actualmente trabaja en UCL (University College London) en Londres, y es presentadora de ciencia en la BBC. Graduada en Cambridge, ha trabajado en la Universidad de Toronto, Canadá, y en Los Álamos National Laboratory en Estados Unidos.



¹ Abordaremos el significado de la temperatura absoluta en el capítulo 6.

² En la actualidad, esta sustitución no es la forma recomendada de hacer ciencia.

³ No sabemos cuánto aire logró extraer Otto con su bomba de vacío. Desde luego, no pudo haberlo sacado todo, pero debió de ser una parte significativa.

⁴ Y al respirar. Cada vez que respiramos, el aire entra en los pulmones porque la atmósfera lo empuja en esa dirección.

⁵ Si alguna vez te has preguntado cómo funciona la locomotora de los dibujos animados *Thomas y sus amigos*, la respuesta es que funciona gracias al agua. El agua puede almacenarse en un vagón aparte junto con el carbón (es lo que se llama «tênder») o se puede guardar en un depósito cerca del motor. Thomas almacena el agua alrededor del motor (de ahí que sea rectangular), y eso lo convierte en una locomotora-tênder.

⁶ La Indian Airmail Society también experimentó con el correo por cohete durante la misma época. Se llevaron a cabo 270 vuelos, en los que se enviaron tanto paquetes como cartas, pero este nuevo sistema de envío nunca llegó a ser un éxito duradero. Estaba claro que, en cuanto a fiabilidad y costes, el correo por cohete nunca iba a poder competir con los sistemas regulares de distribución de correo por vía terrestre.

⁷ Casualmente, la distancia a la que cayó el *Titanic* al hundirse es, en proporción a su tamaño (catorce veces su longitud), prácticamente la misma que la distancia a la que se hunden las pasas en una botella de dos litros (una pasa grande es de unos dos centímetros de longitud, y la botella tiene una profundidad de unos treinta centímetros). El *Titanic* tenía 269 metros de eslora y se hundió en unas aguas cuya profundidad era de 3784 metros.

⁸ Normalmente se escribe: fuerza = masa × aceleración, o $F = ma$.

⁹ Si alguna vez te has preguntado qué es exactamente la relatividad general, el quid de la cuestión reside justamente en entender este punto. Si estás en un ascensor cerrado, ya sea de pie, jugando con una pelota o haciendo abdominales, no puedes distinguir qué fuerzas provienen de la «gravedad» y cuáles proceden de la aceleración del ascensor. Einstein comprendió que existe una forma de observar lo que la materia provoca en el espacio que nos muestra que estas fuerzas son indistinguibles porque, en realidad, son idénticas.

¹⁰ Sí, soy consciente de que la historia es apócrifa, pero no por eso es menos cierta.

¹¹ O «momento angular», para los puristas.

¹² Más adelante también cruzó esposada de pies y manos, e incluso con los ojos vendados.

¹³ Cuando estas vejigas natatorias evolucionaron, proporcionaron una enorme ventaja evolutiva a los peces, al reducir la energía necesaria para mantenerse a la misma profundidad. Pero en los últimos años se han convertido en una gran desventaja, porque estas vejigas natatorias son muy fáciles de detectar mediante la acústica. Una de las tecnologías más importantes que ha permitido la sobrepesca en nuestros mares es el «buscador de peces», un aparato acústico que se sintoniza para encontrar burbujas de aire y, por consiguiente, peces. Este aparato permite perseguir y liquidar bancos enteros de peces, únicamente porque sus burbujas de aire los delatan.

¹⁴ En 1826, Michael Faraday, el famoso experimentalista del siglo XIX al que se atribuyen muchos descubrimientos científicos prácticos, empezó a impartir en la Royal Institution de Londres (RI) un ciclo de conferencias dirigidas a niños que se siguen organizando en la actualidad: son las conferencias de Navidad de la RI. Entre sus contribuciones destaca una serie de seis charlas llamada «La historia química de una vela», en la cual explicaba la ciencia de las velas e ilustraba muchos principios científicos importantes que tenían otras aplicaciones en el mundo. Estoy convencida de que, si hubiera conocido la existencia de los nano diamantes, le habría causado un gran asombro, y seguramente se habría sentido feliz al ver que una simple vela sigue albergando sorpresas.

¹⁵ La altitud de crucero de un avión comercial es de unos 10.000 metros, y el abismo Challenger, el punto más profundo de la fosa de las Marianas, está a 10.994 metros de profundidad.

¹⁶ Y también cerca de la costa de la Antártida.

¹⁷ Lo siento mucho, de verdad. Si sirve de algo, lo que voy a contar ahora es igual de cierto en el café instantáneo, así que no hace falta desperdiciar ni un poco de buen café en aras de la ciencia.

¹⁸ Una «trampa 22» es una situación paradójica de la cual no se puede escapar a causa de reglas contradictorias. El término (en inglés, *catch-22*) procede de la novela homónima de Joseph Heller, publicada en 1961, en la que se narra la historia de un piloto estadounidense que durante la segunda guerra mundial trata de evitar entrar en combate haciéndose pasar por loco. Paradójicamente, el artículo 22 del reglamento establecía que nadie en su sano juicio querría pilotar un bombardero en semejantes circunstancias, de modo que su alegación demuestra en realidad que está cuerdo y que debe seguir pilotando. (*N. de la T.*)

¹⁹ Podemos adentrarnos bastante en el mundo de lo pequeño sin tener que preocuparnos por las rarezas de la mecánica cuántica. Es algo que puede percibirse cuando exploramos lo que les pasa a los átomos y a las moléculas individuales, pues entonces vemos que hay un montón de cosas más grandes que esas y que siguen siendo demasiado pequeñas para que podamos verlas. Este punto intermedio es interesante porque podemos entenderlo de forma intuitiva — algo que, por definición, es imposible cuando se trata de las reglas del mundo cuántico—, aunque no podamos verlo con claridad.

²⁰ Como soy de las que piensa que en la variedad está el gusto, siempre me entristece un poco ver esta palabra. Homogeneizar las cosas tiene sus ventajas, desde luego, pero a veces parece que le estuviéramos quitando la sal a la vida. Especialmente si eres un herrero.

²¹ Su ascensión se ve ralentizada todavía más por la capa de proteína adicional que rodea a cada uno de los nuevos glóbulos más pequeños; esto los hace un poco más pesados, así que flotan todavía menos que antes. Este es un factor que se ha medido con bastante detalle. Te sorprendería ver cuánta ciencia hay invertida en una botella de leche.

²² Si te interesa leer más sobre este asunto, el biólogo J. B. S. Haldane escribió un breve ensayo muy famoso en la década de 1920 titulado «Sobre el tamaño correcto». Puedes encontrarlo en la web <[http:// irl.cs.ucla.edu/papers/right-size.html](http://irl.cs.ucla.edu/papers/right-size.html)> [la versión en español puede consultarse en <[https:// dialnet.uni rioja.es/descarga/ articulo/ 2897114.pdf](https://dialnet.uni rioja.es/descarga/ articulo/ 2897114.pdf)>]. La cita más conocida de su escrito es brutalmente cierta: «Para el ratón y para cualquier animal más pequeño, [la gravedad] prácticamente no representa ningún peligro. Si arrojamos un ratón a un pozo de mil metros, al llegar al fondo sufrirá una pequeña conmoción pero se alejará caminando. Una rata

morirá; un hombre se fracturará los huesos; un caballo salpicará». Por lo que sé, nadie ha llevado a cabo este experimento. No seas el primero. Y, si lo haces, desde luego no me culpes a mí.

²³ Si no dejas de remover la leche, la nata no subirá a la superficie porque no paras de mezclarla. En este otro caso se aplica el mismo principio: las partículas no se hunden hasta el fondo porque las corrientes de aire, que se mueven más rápido de lo que tardan las partículas en caer, no dejan de mezclarlas con el aire que hay a su alrededor.

²⁴ Y a mí más que a nadie. Después de todo, mi campo es la física de burbujas.

²⁵ Puedes comprobar este efecto por ti mismo si metes una gotita de agua en algo que sea bastante hidrofóbico, por ejemplo, un tomate. La gotita se mantendrá erguida y permanecerá casi totalmente separada de la superficie. Entonces, tócala con una varilla de mezclar cócteles con un poquito de detergente en la punta y verás cómo la gota se aparta inmediatamente hacia un lado. Conviene lavar el tomate y quitar todo el detergente antes de comerlo.

²⁶ Este equilibrio —lo fuerte que es la atracción de una superficie sólida hacia el agua, comparada con la atracción que siente hacia sí misma— arroja luz sobre todo tipo de problemas. El más importante para cualquier británico es la cuestión de por qué algunas teteras gotean por la boca cuando terminas de servir, abriendo un reguero de té por el lateral de la tetera que acaba en la mesa en lugar de en la taza. La respuesta es que la tetera resulta demasiado atractiva para el agua. A medida que el flujo se ralentiza, las fuerzas que mantienen el agua pegada a la boca vencen al momento que lleva al agua hacia delante. Esto se puede solucionar comprando una tetera hidrofóbica, que no atraiga al té en absoluto. Por desgracia, en el momento en que escribo estas líneas, todavía no hay nadie que las haya comercializado.

²⁷ En realidad, se trataba de una disculpa. En un viaje a Cracovia, les había prometido una magnífica cena en el barrio judío de la ciudad, pero por aquel entonces no había *smartphones*, así que me perdí. Guie a doce personas hambrientas en un alegre revoloteo por infinidad de calles oscuras y vacías, sin encontrar ningún lugar donde comer, y mucho menos los restaurantes de calidad que andaba buscando. Terminamos cenando en McDonald's. Por eso pensé que esa tarta de manzana era lo mínimo que podía hacer para compensarlos.

²⁸ Naturalmente, la grasa, la proteína y el azúcar de la leche no se evaporan, sino que permanecen, y de ahí que la toalla necesite un buen lavado.

²⁹ La torre del reloj de Westminster, en la que se encuentra el Big Ben, tiene 96 metros de altura. No hay duda de que estos árboles son unos auténticos gigantes

³⁰ Un nanómetro es diminuto: se necesita un millón de ellos para hacer un milímetro.

³¹ Pero hay un límite: para aumentar la tensión en el agua a fin de atraerla más arriba, el estoma debe reducir su tamaño. Y cuanto más pequeño sea el estoma, menos dióxido de carbono dejará entrar, por lo que el árbol dispondrá de menos materia prima para la fotosíntesis. La teoría sugiere que la altitud máxima a la que podría llegar un árbol está entre 122 y 130 metros, porque a partir de ahí ya no podría asimilar el dióxido de carbono necesario para seguir creciendo.

³² También hay indicios que sugieren que puede que la niebla también haga el recorrido al revés, entrando en los estomas para mantenerlos siempre llenos de agua, y no limitándose únicamente a evitar la evaporación.

³³ Estos dispositivos reciben el pegadizo nombre de «dispositivos microfluidicos de papel de detección electroquímica». Se ha fundado una organización sin ánimo de lucro llamada Diagnostics For All (Diagnósticos para todos) para trasladar esta idea al mundo real.

³⁴ Este comportamiento recibe el nombre de «pseudo plasticidad» y, como enseguida veremos, también resulta muy útil en el caso de los caracoles.

³⁵ Naturalmente, hay una tercera opción: que el caracol hubiese sido un huevo o una cría escondida en el abono. Pero era bastante grande y no creí que hubiese crecido tanto en tan poco tiempo.

³⁶ Hay un trozo realmente divertido en el artículo de Frost en el que describe lo que pasó cuando sin querer programaron la cinta para que fuera muy lenta. No suelo citar un artículo científico con fines cómicos, pero en este caso está más que justificado: «Después de grabar a

un pájaro concreto, sin querer se programó la cinta para que se moviera a una velocidad sumamente lenta en lugar de detenerla del todo, tal como se pretendía. Al poco rato nos dimos cuenta de que la cabeza del pájaro se movía lenta y progresivamente hasta que el animal terminó cayéndose. Observaciones posteriores indicaron que las caídas o los cambios extremos en la postura también podía provocarlos un movimiento hacia delante de la cinta extremadamente lento (en la dirección opuesta a la del paso ordinario). Se vio que la velocidad extremadamente lenta de la cinta (imperceptible para nosotros) no era suficiente para inducir el paso en el pájaro, pero bastaba para estabilizar su cabeza, aunque esto a veces ocasionara pérdida de equilibrio».

³⁷ Cuando me mudé al suroeste de Norteamérica, no conseguía librarme de mi irritante curiosidad sobre el origen del agua en ese ambiente tan seco. El libro que respondió a muchas de mis preguntas —y que explica la fascinante historia sobre las luchas por el suministro de agua en la zona— fue *Cadillac Desert* de Marc Reisner, y lo recomiendo encarecidamente. En el momento en que escribo esto, California está sufriendo una sequía muy severa, y las difíciles decisiones sobre la forma de afrontarla no pueden retrasarse más.

³⁸ En realidad hay otra solución: empezar a beber capuchinos. La capa de espuma que los cubre disminuye mucho las oscilaciones, por lo que las bebidas cubiertas de espuma no chapotean tan fácilmente. Esto también sirve de ayuda en el pub. A los sibaritas de la cerveza puede que no les guste demasiado la espuma, pero al menos es útil para no derramar la bebida.

³⁹ Justo debajo del amortiguador principal hay otros dos péndulos más pequeños que ayudan en esta función.

⁴⁰ Una de las cosas que descubrí por pura casualidad en mis tiempos en el mar es que la mejor manera de sacar de quicio a un fanático de las aves es preguntarle, como quien no quiere la cosa, por qué a las gaviotas se las llama seagulls en inglés (literalmente, gaviotas de mar). Existen muchos tipos de gaviotas, y algunas de ellas viven en el mar, sobre su superficie o cerca de él. Pero no hay ninguna que sea «de mar». Te encontrarás con dos tipos de reacciones: o bien el fanático en cuestión se pasará horas explicándotelo, o bien se marchará, hecho una furia.

⁴¹ Si tienes la oportunidad de observarlas desde un lado, verás que en realidad están moviéndose en pequeños círculos. La cuestión es que no avanzan junto con la ola.

⁴² Otros isleños del Pacífico, especialmente los tahitianos, también tenían tablas de surf. Sin embargo, parece que solo las usaban para sentarse o para tumbarse en ellas. Los hawaianos fueron los primeros en ponerse de pie en la tabla y, por lo tanto, fueron los pioneros del surf tal como lo conocemos hoy en día.

⁴³ Los experimentos que demostraron que la luz actúa como una onda eran relativamente fáciles. Se necesitó un experimento extremadamente inteligente del tamaño de la órbita de la Tierra alrededor del Sol para revelar el aspecto menos intuitivo de la luz: que no hay nada que provoque las ondas. Lo que ocurre es que las ondas viajan en forma de alteraciones de los campos eléctricos y magnéticos. La prueba pasó a conocerse como el experimento de Michelson y Morley, y es una de mis favoritas porque es fácil de entender, extremadamente elegante y sus descubridores utilizaron todo nuestro planeta como vehículo para probar su hipótesis.

⁴⁴ Como muchos materiales, los diamantes ralentizan los distintos colores de la luz —sus distintas longitudes de onda— en grados distintos. Así, parte del brillo surge de la separación de colores que hace el diamante y del rebote de estos hacia ti.

⁴⁵ Sería interesante ver el color que escogen los niños para dibujar el agua en una cultura cuyos hábitos sean distintos. Creo que identificamos el agua con el azul porque conocemos los océanos, tenemos fotografías aéreas y piscinas muy limpias. Pero hasta hace poco, pocas culturas tenían todo esto. ¿Hay pistas suficientes como para demostrar que la pintaron de azul de forma inconsciente? ¿O se trata de un hábito totalmente adquirido?

⁴⁶ Aunque los astrónomos no siempre han creído que lo que observaban era la magnificencia del cosmos. En 1964, Robert Wilson y Arno Penzias detectaron unas ondas que provenían del cielo cuyas longitudes se correspondían con las microondas y que no deberían estar ahí.

Pasaron mucho tiempo intentando descubrir qué parte del cielo o del telescopio estaba echando a perder sus mediciones, pues estaban convencidos de que algo estaba generando luz de microondas adicional. Además limpiaron el telescopio de nidos de paloma y de sus excrementos (descritos eufemísticamente en su artículo como «material blanco dieléctrico»), pero la luz de fondo no deseada siguió presentándose. Al final resultó que era la firma del Big Bang, un poco de la luz más antigua del universo. Hay algo de especial en un experimento que debe prestar especial atención a la distinción entre los efectos secundarios de las deposiciones de paloma y los de la formación del universo.

⁴⁷ Que, por cierto, tiene muy poco que ver con cómo funciona un invernadero de verdad.

⁴⁸ Por eso a veces llamamos «celulares» a los teléfonos móviles, porque la red es celular.

⁴⁹ Un ion es un átomo que ha perdido o ganado electrones. En este caso, el átomo de sodio ha dado un electrón al átomo de cloro, así que el sodio se ha convertido en un ion positivo y el cloruro se convierte en un ion negativo. Suena perverso, pero ahora que sus cargas son opuestas, se atraen el uno al otro.

⁵⁰ Lo que hace que el espacio que ocupa la parte sumergida del cubito de hielo sea exactamente el mismo que el que se necesita para alojar el hielo derretido está relacionado con lo que provoca que las cosas floten. El resto del agua tiene que soportar el peso de lo que haya en ese hueco. Al resto del vaso no le importa lo que haya ahí, siempre que ocupe ese mismo espacio. Cuando el cubito de hielo haya llenado ese espacio, tiene un volumen extra que le sobra, y esa es la parte que sobresale por encima de la superficie del agua.

⁵¹ Este es el vidrio *crown*, por si alguna vez te habías preguntado de dónde venía el nombre. La parte rugosa del centro de las ventanas viejas de un pub es donde se fijaba la vara de hierro. Esta era la sección más barata del vidrio, porque el grosor era muy desigual. Por supuesto, este tipo de «características» hoy en día se considera un rasgo valioso. Como diría mi familia noroesteña: «En un restaurante pijo pagarías un suplemento por ello». O, en este caso, en un pub pijo.

⁵² Esto funciona gracias a las leyes del gas que explicamos en el primer capítulo, las que controlan cómo el hecho de dejar que los gases se expandan y se contraigan afecta a su temperatura. Las neveras tienen un motor que bombea un fluido llamado refrigerante por un circuito que va desde el exterior hacia el interior de la nevera, y vuelta a empezar. Primero, el fluido se expande y, por lo tanto, se enfría. Este fluido frío pasa a través de la parte trasera de la nevera hacia el interior, donde la energía térmica pasa del aire al refrigerante, enfriando así el aire. Entonces el fluido vuelve al exterior de la nevera, donde un motor lo comprime y, por lo tanto, lo calienta. Ese calor extra se pierde en el aire, luego el fluido puede expandirse, y el ciclo empieza de nuevo.

⁵³ Me gustaría recalcar que, en general, me lo pasé muy bien, y que recomiendo la experiencia encarecidamente. Si tienes confianza como ciclista, es una forma fantástica de interiorizar la física rotacional de una manera muy visceral.

⁵⁴ Estoy segura de que los amantes de la pizza que estén leyendo esto tendrán sus propias opiniones sobre las características de la masa perfecta. Puedo afirmar, basándome en mi experiencia personal, que la pizza de este restaurante era espectacular. ¡Pero no me escribáis para quejaros si no estáis de acuerdo con las conclusiones del cocinero!

⁵⁵ A menos que se trate de una gota de líquido tan pequeña que la tensión superficial pueda hacer que eso ocurra. Pero la gota tendrá que ser realmente minúscula.

⁵⁶ ¿Yo, todavía enfadada, diez años después? En absoluto. ¿Qué te hace pensar eso?

⁵⁷ La órbita del Sputnik era elíptica, de manera que su altitud sobre la superficie terrestre variaba de 223 a 950 kilómetros. Eso nos proporciona una atracción gravitacional de entre el 93 y el 76% del valor que tiene en la superficie de la Tierra.

⁵⁸ Por el bien de la armonía doméstica, seguramente lo mejor será que no uses mantequilla para este experimento. Si insistes en recrear la situación real, pon al menos papel de periódico en el suelo para que caiga sobre él, o cualquier cosa que cumpla el mismo cometido en esta sociedad sin diarios. Proteger las superficies es una función del periódico que una moderna tableta jamás podrá cumplir.

⁵⁹ Puede que te preguntes por qué la bota del trabuquete si dejaba de rotar y salía disparada en línea recta cuando se la soltaba, pero, en cambio, la tostada sigue girando. La diferencia es que la tostada se mantiene de una pieza, como un solo objeto, a causa de sus fuerzas internas y, mientras siga siendo un solo objeto, tendrá una cantidad fija de momento angular que debe conservarse. Si alguna de sus partes se soltara del resto (por ejemplo, una miga que se separe de uno de los lados), esa parte avanzaría en línea recta.

⁶⁰ Es decir, hay una forma de actuar en este caso que no tiene nada que ver con hacer tostadas del tamaño de una caja de cerillas o servir el desayuno en una mesa muy baja.

⁶¹ Lo bonito de hacer girar una moneda es que nos muestra que el movimiento general del objeto y su rotación pueden ser independientes. La moneda seguiría el mismo arco tanto si está girando como si no; pero si le das el golpecito adecuado, harás que gire y también le darás velocidad hacia arriba. El giro y el movimiento del centro de masas no interfieren el uno en el otro.

⁶² El esquema gravitacional completo es algo más complicado, pero la idea básica es correcta. Si quieres saber más, busca información sobre los ciclos de Milankovich.

⁶³ Aunque la Tierra ha estado girando sin cesar desde su formación, se ha ralentizado muy ligeramente porque el tirón de la Luna apenas la frena. Se trata de un cambio ínfimo, pero cada cien años, un día en la Tierra se alarga en 1,4 milisegundos. Al cabo de unos cuantos años, se añade un salto de un segundo al año en curso para tener este hecho en cuenta.

⁶⁴ Los peniques más nuevos son un poco más gruesos porque se han fabricado de manera que pesen exactamente lo mismo que los antiguos (la misma masa de acero ocupa un poco más de espacio que el cobre). Por eso hay que cambiar las máquinas expendedoras cuando la Casa de la Moneda altera el material de las piezas de curso legal, ya que los distintos metales ocupan un espacio distinto para la misma cantidad de masa. Las máquinas expendedoras también verifican que las propiedades magnéticas sean las correctas según el tipo de moneda.

⁶⁵ No es broma. Están muy orgullosos de ella. La señorita vegetariana —una servidora— no llegó a probarla, pero, por lo que vi, los ingredientes principales son unos grandes moluscos marinos y ajo.

⁶⁶ Las moléculas se forman cuando los electrones se mueven de un lado a otro y así resulta que son compartidos por varios núcleos; esto obliga a los núcleos a permanecer muy juntos, formando una única molécula constituida por diversos átomos. Lo único que mantiene a los átomos y a las moléculas juntas es que las cargas positivas atraen a las negativas. A veces, los electrones se mueven de un lado a otro entre las moléculas, cambiando el núcleo al que están unidos y, por tanto, los patrones que configuran dichos núcleos. A esto lo llamamos reacción química. La química es el estudio de esta danza electrónica y de la fantástica complejidad que produce.

⁶⁷ Todavía hay otro giro en la historia de la abeja. Un grupo de investigadores de la Universidad de Bristol descubrieron en 2013 que todas las flores tienen una carga ligeramente negativa que se neutraliza en cuanto llega la abeja. Demostraron que las abejas son capaces de distinguir una flor de carga neutra de una con carga negativa sin tener que posarse en ella. Sugirieron que las abejas podrían evitar las flores neutralizadas, porque esto podría indicar que otra abeja ya se ha posado en ella y se ha llevado la mayor parte del néctar. Si quieres indagar más en este tema, puedes leer los artículos de Clarke et al. y Corbet et al. que encontrarás en la lista de referencias bibliográficas del final del libro.

⁶⁸ Así es como funcionan los calefactores eléctricos de las casas. Se obliga a los electrones a pasar por una resistencia enorme, de manera que su energía eléctrica se convierte en calor. Cualquier otro proceso de conversión de energía resulta ineficaz, porque siempre se pierde algo de energía en forma de calor. Pero si lo que quieres es calor, puedes lograr un ciento por ciento de eficiencia. ¡Perfecto!

⁶⁹ Por si acaso hay algún pedante por ahí, sí, ya sé que existen los superconductores. Pero enfriar algo hasta cerca del cero absoluto consume grandes cantidades de energía y produce enormes cantidades de calor. Así que no resultan muy útiles si lo que queremos es eficiencia energética.

⁷⁰ A diferencia de España, donde los enchufes tienen dos clavijas, en el Reino Unido, los enchufes tienen tres. (*N. de la T.*)

⁷¹ De forma que vuelve a su punto de inicio unas cincuenta veces por segundo, que es lo que se entiende cuando se dice que la corriente del Reino Unido funciona a 50 hercios.

⁷² Para los amantes de los detalles, digamos que los adaptadores funcionan en tres pasos. Cambian el voltaje de 230 a 20 V o a lo que necesite el portátil. Y entonces tienen que bloquear la mitad de cada ciclo para obtener corriente solamente cuando esté viajando en una dirección, pero no cuando regresa. Después, facilitan un poco su paso, para que recibamos el mismo tipo de corriente estable que proporcionan las baterías.

⁷³ Este descubrimiento causó gran excitación. Los físicos habían detectado un patrón en las partículas que forman el universo, un patrón que consideran el «modelo estándar» de la física de partículas. Pero el patrón solo podía ser correcto si existía una partícula muy concreta: el bosón de Higgs. Se tardó décadas en encontrarlo, y cuando su existencia se demostró, fue una inyección de confianza tremenda para nuestra comprensión del mundo.

⁷⁴ O, a veces, dos números entre los que hay 18 de diferencia (09-27, por ejemplo). Esto es así porque se puede despegar y aterrizar en ambas direcciones de la pista, pero, naturalmente, el rumbo cambiará en 180 grados.

⁷⁵ El canadiense Lawrence Morley propuso la misma idea a la vez que los británicos, pero su artículo fue rechazado por la revista porque lo consideraron ridículo.

⁷⁶ Suele decirse que crece al mismo ritmo que las uñas de las manos.

⁷⁷ Ni muy caliente ni muy fría, solo a la temperatura correcta.