



CAOS Y COMPLEJIDAD



—
— ||

||
—
—

—
— ||

||
—
—



CAOS Y COMPLEJIDAD

El mundo es un caleidoscopio

SERGIO DE RÉGULES

Shackleton
— b o o k s —



Caos y complejidad

© 2019, Sergio de Régules

© 2019, de esta edición, Shackleton Books, S.L.

Realización editorial: Bonal letra Alcompas, S.L.

Diseño de cubierta: Pau Taverna

Diseño de tripa y maquetación: Kira Riera

© Fotografías: Todas las imágenes de este volumen son de dominio público excepto las de las páginas: 26 (Georgios Kollidas/ Shutterstock), 29 (Solipsist (Andrew Dunn) [CC BY-SA 2.0]/Wikimedia Commons), 35 (Augustin Challamel, Desire Lacroix [DP]/Wikimedia Commons), 55 (TravelMediaProductions/ Shutterstock), 73 (Stephen Cresswell para americaninsects), 84 (Jordan Pierce (Trabajo propio) [CC0]/ Wikimedia Commons), 88 (Creado y subido por Wolfgang Beyer, [CC BY-SA 3.0]/Wikimedia Commons), 90 (a: Wxs [CC BY-SA 3.0]/ Wikimedia Commons, b: AVM (Trabajo propio [CC BY-SA 3.0 o GFDL/Wikimedia Commons, c: Schnobby (Trabajo propio) [CC BY-SA 3.0]/Wikimedia Commons), 95 (Ilya Voyager (Trabajo propio) [CC0]/Wikimedia Commons), 97 (Wikimol, User:Dschwen [GFDL, CC-BY-SA-3.0 o CC BY-SA 2.5-2.0-1.0]/Wikimedia Commons), 105 (THOR [CC BY 2.0]/Wikimedia Commons), 109, 156 (a y b) y 157 (NASA/Wikimedia Commons), 111 (X4or (Trabajo propio) [CC BY SA 3.0 o GFDL]/Wikimedia Commons), 113 (Leo Sutic/sarcasticresonance.wordpress), 125 (Adrian Michael (Trabajo propio) [GFDL o CC BY-SA 3.0]/Wikimedia Commons), 128 (FaceMePLS [Attribution 2.0 Generic (CC BY 2.0)]/Flickr), 136-137 (Ilustración de un gráfico de Google Books Ngram Viewer), 151 (Andrey Burmakin/Shutterstock), 165 (a: George Grantham Bain Collection (Library of Congress) [DP]/Wikimedia Commons y b: Copyrighted free use/Wikimedia Commons).

ISBN: 978-84-17822-36-1

D. L. B-3159-2019

Impreso por GPS Group (Eslovenia).

Reservados todos los derechos. Queda rigurosamente prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento y su distribución mediante alquiler o préstamo públicos.



CONTENIDO

Prólogo	7
Introducción. Menos es más	11
Físicos en el paraíso	21
La Cabaña del Tío Chueco	21
Newton al volante	25
Mecánica celeste	31
Donde viven los monstruos	39
Tres es multitud	39
Números monstruosos	44
«0.0.0.0.0.0.0.»	47
La fábrica de pronósticos	51
Mundo de juguete	59
Pandemónium: el caos determinista	67
Esto es el caos	67
Sorpresas de un bichólogo	70
El evangelio según May	77
El jardín de los senderos que se bifurcan	78
Picos por doquier	85
Extraños en el espacio	91
Los años caóticos	101
Empresarios caóticos	101
Preguntas para la deidad	104
Enfermos dinámicos	114





Ebrios de caos	118
Cariño, me he comido a los niños	121
Especies al borde de un ataque de caos	126
Donde las vacas esféricas no se aventuran: del caos a la complejidad	135
Experimentos en la Biblioteca de Babel	135
Las manos de Escher	139
<i>Antz</i>	144
Ricitos de Oro en el bosque de la complejidad	149
La importancia de ser crítico	151
«Solo se puede vivir en Lutecia»	154
Epílogo. Más es diferente	163
Apéndices	167





Prólogo

Imaginen un libro que empieza como una buena novela: les sitúa en un escenario imponente, pongamos una catedral, y les presenta a un joven artista, músico para ser exactos, intrigado por un candil que se mueve. Pronto es revelada su curiosidad, sus habilidades para la observación metódica, su pericia como fabricante e intérprete de instrumentos y su capacidad de interrogarse y razonar (¿será detective?). Enseguida se manifiestan el amor y la pasión del protagonista que, por si fuera poco, es un tipo creativo, con una imaginación desbordante. Esto se pone interesante.

Figúrense que, de repente, se produce un cambio de época y de contexto: un escritor y una marquesa dialogan con aire trascendental (¿qué relación tendrán con el individuo del principio?) y surge así una nueva historia dentro de la historia principal (¡vaya, el argumento se complica!). Y supongan que, un poco más adelante, el autor se aventura a escribir nada menos que sobre el universo y el asombro (¡bravo!, sin miedo a la inmensidad), y reflexiona sobre la



ilusión de comprender y la aspiración de anticipar, sobre la honestidad de reconocer los errores y el coraje de seguir intentándolo (quizá sea una novela psicológica que sondea las profundidades de la mente de sus personajes).

¿No sentirían un deseo incontenible de seguir leyendo?

¿Y si el autor fuera un mago de los títulos y un malabarista del humor que, además, salpica sus textos con alusiones al cine, la literatura y la pintura, siempre con excelente puntería? Se toparán con secciones llamadas «Donde viven los monstruos», «El jardín de los senderos que se bifurcan», «Cariño, me he comido a los niños», «Especies al borde de un ataque de caos» o «Solo se puede vivir en Lutecia». ¿Y si también fuera un poco poeta? Podrían leer frases tan hermosas como «el ritmo del corazón en un individuo sano no era una recta horizontal y rígida de una sola frecuencia, sino un plácido revolotear, como si el corazón y sus sistemas de control patrullasen el territorio de sus posibilidades, por si acaso», o «enjambres de algunas especies de luciérnaga que protagonizan un espectáculo de belleza espectral cuando destellan al unísono en temporada de apareamiento, como si la oscuridad del bosque respirase en silencio».

Como habrán sospechado, lo que les he contado es real y lo encontrarán en este libro.

Ahora, por favor, les pido que lean des-pa-ci-to, degustándolas, algunas palabras clave que antes he citado textual o indirectamente: curiosidad, arte, observación, medida, pregunta, pasión, creatividad, imaginación, asombro, tensión, realidad, humor, poesía, honestidad, humildad.

Quiero completarlas con algo extraído de los siguientes capítulos, pero no teman, no pienso desvelar la trama: solo les adelanto que, con el mismo estilo novelesco, se hablará de «la precisión de las medidas», «el valor de las soluciones aproximadas», «los modelos» y «las publicaciones», de «inventar frente a descubrir», de «la desmitificación del científico», «la colectividad», «la interdisciplinariedad», «el uso del conocimiento anterior» y «el trabajo en equipo».

Si esta larga lista de conceptos, emociones y recursos no describe las señas de identidad de la ciencia y de su divulgación, que venga Carl Sagan y lo vea. Porque Sergio de Régules es, a partes iguales, un escritor delicioso, un científico muy serio (en absoluto aburrido) que sabe de lo que habla y un deslumbrante divulgador. Su estilo es ágil, bello, comprensible y atractivo desde el primer párrafo. Usa con maestría el humor, las anécdotas, la provocación y el cotilleo; es decir, humaniza todo lo que cuenta. Combina un amplio abanico de referencias culturales, lo que facilita la lectura y acerca los contenidos científicos al público no especializado. Y, al mismo tiempo, transmite con precisión y claridad los conceptos más difíciles (en este libro, los de las ciencias del caos y la complejidad) y es riguroso sin pretender ser exhaustivo ni profundizar al máximo. En definitiva, logra entretener, interesar, informar, enseñar, seducir y emocionar. ¿No vuelven a sentir ese incontenible deseo de seguir leyendo?

Con solo hojear este libro, estaba claro que era «comilfó», con su título preciso y su subtítulo poético, su índice (al principio, como a mí me gusta), su introducción, sus

capítulos de cómoda extensión y divididos en secciones, sus destacados, sus citas siempre justificadas y su epílogo. Al parecer, el autor pensó que solo le faltaba el prólogo y se le ocurrió encargármelo a mí. Espero no haber conseguido que se arrepienta para siempre, y en cuanto a ustedes, confío en no haber desviado su atención de lo realmente interesante, que empieza a continuación.

P. S. Por cierto, aunque parezca increíble, Sergio puede escribir con todo el arte y la gracia antes expuestos sobre «teorías del caos y la complejidad». ¡Ahí es nada!

Enero de 2019

INÉS RODRÍGUEZ HIDALGO

Doctora en Astrofísica

Directora del Museo de la Ciencia de Valladolid



Introducción

Menos es más

De una cadena larguísima en la catedral de Pisa cuelga una pesada lámpara de araña. Hace muchos años, su imponente vaivén le llamó la atención a un chico de dieciocho años que estaba estudiando medicina en la Universidad de Pisa. Se cuenta que la lámpara se mecía en la brisa, pero hoy, cuando uno la mira, cuesta imaginarse que se pueda mover con el viento, así que el vaivén que cautivó al chico debió de tener otra causa. Hay quien sugiere que en 1582, cuando el joven Galileo Galilei se quedó embelesado con sus oscilaciones, había un mecanismo de poleas que permitía bajarla para encender o apagar las velas. Al volver a izarla, la lámpara debía de mecerse durante unos minutos hasta que la resistencia del aire amortiguaba el movimiento.

Galileo era hijo de músico y poseía él mismo habilidades musicales. Quizá por eso se interesó en el ritmo, o el período, del péndulo: ¿cuánto tiempo tardaba en completar un vaivén? En esa época no había relojes de pulsera, pero



Galileo se las apañó con su propio pulso. La lámpara iba hacia un lado, se detenía y partía en sentido inverso, primero más rápido y luego más despacio, hasta detenerse del otro lado. Y venga otra vez a desplazarse, ida y vuelta, ida y vuelta. Eso sí: con cada vaivén, la separación entre los dos extremos de la oscilación se iba reduciendo. ¿También se reducía el período del péndulo? ¿Tardaba menos en ir y volver cuando el vaivén se amortiguaba? Galileo observó con asombro que no: el período se mantenía constante aunque la amplitud del movimiento disminuyese. Fue una revelación. Ese día el mundo renacentista perdió un médico pero ganó un físico extraordinario. Galileo se enamoró de la regularidad oculta en la complejidad del mundo y dedicó su vida a reducir la naturaleza a principios matemáticos simples. Su último discípulo y primer biógrafo, Vincenzo Viviani, tras narrar esta anécdota en su *Vida de Galileo*, añadió: «A partir de esto se dio cuenta de que el filósofo no debe menospreciar jamás los efectos de la naturaleza, por más que parezcan mínimos e inobservables, sino valorarlos todos igualmente».

El péndulo y sus vaivenes regulares y predecibles le sugirieron a Galileo una buena manera de cuantificar el paso del tiempo: primero, para tomar el pulso de sus futuros pacientes; luego, cuando ya estaba claro que no sería médico, para aplicarlo a sus observaciones celestes, lo que habría de ser de gran provecho para la astronomía y la geografía.

Galileo se volvió un hábil fabricante de instrumentos para la ciencia. Diseñó un «compás militar» (una regla de cálculo) que vendía para complementar su salario. En 1609

construyó varios «anteojos» que consistían en tubos con lentes en los extremos ingeniosamente dispuestas para amplificar imágenes de objetos lejanos. En enero de 1610, con uno de estos anteojos, Galileo encontró en el cielo otro reloj natural: cuatro lucecitas que se veían en la vecindad de Júpiter. Tras observarlas durante varias semanas y convencerse de que no eran estrellas fijas, sino que giraban alrededor del planeta, Galileo las llamó «planetas medíceos» en honor a su mecenas Cósimo de Medici, gran duque de Toscana. Los movimientos de los planetas medíceos (hoy llamados «satélites galileanos») eran tan regulares y predecibles, que Galileo ideó una manera de usarlos para saber la hora en altamar y, a partir de esta medida, deducir la posición geográfica de un navío.

La regularidad metronómica del péndulo, de los satélites de Júpiter y de otros astros dio lugar, tiempo después, a una concepción del universo que se expresa en uno de los primeros libros de divulgación de la ciencia de la Época Moderna: *Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos*, una especie de *best seller* publicado en 1686 por el escritor francés Bernard Le Bovier de Fontenelle. En el libro se narran las conversaciones que durante varias noches sostuvieron el narrador y la marquesa de G***, amiga suya, en cuya residencia campestre el narrador se dispone a pasar una temporada. Una noche, en el parque de la residencia, el narrador consigue interesar a la noble dama en la astronomía, y, particularmente, en una idea muy reciente: que los planetas son otros mundos y podrían estar habitados. Pero, para empezar, el narrador le explica a su

amiga la nueva forma de proceder de los filósofos naturales, que ya no buscan entender el mundo en términos de cualidades metafísicas, sino de causas y efectos cuantificables.

El narrador lo ilustra con el ejemplo de una representación teatral, aprovechando que por aquella época la nueva ópera *Faetón*, de Jean-Baptiste Lully, causaba furor en París por sus efectos especiales. En el momento culminante del drama, Faetón coge sin permiso el coche volador de su padre, Apolo, y se eleva hacia los cielos para demostrar su linaje divino. El público de la representación se maravilla con el vuelo de Faetón sin preguntarse sus causas, explica el narrador, pero un verdadero filósofo, impulsado por la curiosidad, irá a mirar detrás de bastidores, donde descubrirá que el personaje sube «porque es tirado por cuerdas, y porque baja una masa más pesada que él. Y así ya no se cree que un cuerpo se remueva si no es tirado, o más bien arrojado, por otro cuerpo. Ya no se cree tampoco que suba o baje, si no le obliga un contrapeso, o un resorte».

«Según eso», dice la marquesa, «¿la filosofía ha llegado ya a ser muy mecánica?». A lo que el narrador contesta: «Tan mecánica, que es de temer no se avergüencen de ello los hombres. Ya quieren que el Universo sea en grande, lo que es un reloj en pequeño; conduciéndose todo en él por movimientos arreglados que dependen de la disposición de las partes».

«Confesad la verdad», añade el narrador, «¿no teníais una idea más sublime del Universo, haciéndole más honor que el que se merece? Yo he visto gentes que le estimaban

menos después que le conocieron». La respuesta de la marquesa es un preanuncio de la opinión que cundió durante el Siglo de las Luces: «Pues yo lo estimo más desde que sé que se parece a un reloj. Es de maravillarse que siendo tan admirable el orden de la naturaleza, estribe en unos fundamentos tan simples».

El universo-reloj, que se conduce por movimientos arreglados que dependen de la disposición de las partes, es el universo de Galileo y de su sucesor Isaac Newton, contemporáneo de Fontenelle. Es un universo en el que todo lo que pasa sigue pautas matemáticas que podemos conocer y en el que se puede predecir el comportamiento de las cosas (o de los «sistemas», como llaman los científicos a cualquier trozo del universo en el que hayan decidido fijarse: desde un péndulo y su entorno inmediato hasta una ciudad, e incluso una galaxia), porque lo que haga el sistema en este instante es consecuencia inevitable de lo que hizo en el instante anterior, y esto, a su vez, de lo que hizo en el instante anterior: un universo determinista y determinado, sin caprichos ni veleidades.

Este universo conserva la capacidad de asombrarnos y tomarnos por sorpresa porque hay fenómenos que dependen de un número de variables tan grande que resulta engorroso, como, por ejemplo, el estado del tiempo, o bien de causas incontrolables, como los saltos de la bolita de la ruleta que decidirán si ganamos una fortuna en el casino. Estos fenómenos requieren las técnicas de las probabilidades, una manera de pasar por encima de los detalles y hacerse una idea general de las cosas, pero en el fondo incluso

ellos podrían ser tan predecibles como los movimientos de la lámpara de la catedral de Pisa y de los satélites de Júpiter.

Esta visión tranquilizadora del cosmos y de nuestra capacidad de reducirlo a reglas simples habría de reinar durante tres siglos. La ciencia y la tecnología modernas son sus hijas, o más bien su encarnación: cada ordenador, cada teléfono inteligente, cada avión y cada satélite artificial predica la doctrina de los ciclos, las repeticiones, los patrones; una doctrina de leyes de la naturaleza que toman la forma más simple, y, sobre todo, de causas y efectos que se corresponden en magnitud: los grandes efectos vienen de grandes causas y, recíprocamente, las causas más pequeñas tienen efectos pequeños. Este libro trata sobre el ocaso de esta ilusión.

Nuestra idea de la ciencia se basa en la posibilidad de anticipar. Esta depende de que consigamos identificar patrones en el funcionamiento de la naturaleza, ya sea que encontremos empíricamente repeticiones en los fenómenos que nos interesan, o que infiramos leyes generales que se aplican a una amplia variedad de fenómenos. Una vez que tenemos leyes de la naturaleza como las de la física, para predecir el comportamiento de un pedazo del universo por lo general necesitamos determinar, por medición, unas condiciones iniciales. La bala de cañón tiene una trayectoria fatídicamente determinada por su velocidad inicial y la inclinación del cañón. Durante mucho tiempo dimos por sentado que una pequeña diferencia en las condiciones iniciales engendra una pequeña diferencia en el comportamiento resul-

tante: la bala de cañón ligeramente más rápida o más lenta, o aquella que sale de un cañón un poco menos inclinado, termina por caer cerca de donde cayó la bala original. Así pues, no se requería una gran precisión al medir las condiciones iniciales para poder predecir el comportamiento del sistema.

En el siglo XIX aparecieron fenómenos gobernados por ecuaciones simples que, sin embargo, no son predecibles a largo plazo porque su comportamiento depende muy sensiblemente de las condiciones iniciales: una diferencia muy pequeña conduce en poco tiempo a diferencias de comportamiento tan grandes que, a menos que conozcamos las condiciones iniciales con cientos de cifras decimales de precisión, no podremos predecir el comportamiento más allá de unos cuantos ciclos. A finales del siglo XX se le dio el nombre de «caos determinista» a esta complejidad irreducible que acechaba detrás de las ecuaciones simples.

La ciencia del caos nos ha revelado que los fenómenos regulares y predecibles son un puñado entre una infinidad de problemas que se resisten a un análisis cabal. Uno podría pensar que ya lo sabíamos, que todos esos fenómenos que, por complejos, nos obligan a recurrir a las probabilidades son ejemplos de lo anterior, en cuyo caso la ciencia del caos no habría aportado mucho a nuestra visión del mundo. La mala noticia (¿o será buena?) es que no: hemos encontrado comportamientos impredecibles incluso en fenómenos en principio muy simples, como tres cuerpos que se mueven en el espacio bajo la influencia de sus mutuas atracciones gravitacionales. Si en la vida cotidiana dos es compañía y

tres es multitud, en la física la diferencia entre dos y tres es mucho más profunda: dos es orden y predictibilidad, y tres es el derrumbe de nuestras ilusiones de controlar y entender a fondo el universo.

Descubrirlo fue como toparse con la serpiente en el paraíso, pero estamos aprendiendo a vivir en esta época postedénica en la que ya no podemos suponer que menos es más. Y, contra lo que cabía esperar, no se está tan mal. Hemos encontrado el caos oculto en una gran variedad de circunstancias: en la atmósfera y en los fenómenos meteorológicos, en el ascenso y caída de poblaciones animales y de civilizaciones, en la economía mundial, en los huracanes y en los ritmos fisiológicos. El caos asoma la nariz en las palpitations del corazón y la respuesta del sistema inmunitario a los patógenos que nos asedian. Pero el caos, en el sentido científico, no es el pandemónium total: oculta patrones, regularidades de un orden superior que se pueden entender. Incluso hemos hallado reglas universales, las mismas exactamente para la atmósfera, las poblaciones, la economía, las tormentas, el corazón o los anticuerpos, gracias a lo cual la ciencia del caos ha sido fructífera.

La sorpresa del caos determinista ha perdido algo del impacto inicial que hizo que algunos clamaran, en los años ochenta, que nos encontrábamos ante la tercera gran revolución de la ciencia del siglo xx (después de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica). El caos no desencadenó la revolución que se esperaba; más bien se ha integrado al arsenal intelectual del científico del siglo xxi. En los últimos treinta años los caminos que abrió han confluído

en una gran avenida. Más que una nueva teoría (o, quizá, menos que una nueva teoría), es un nuevo movimiento cultural científico, que se llama «ciencia de la complejidad».

Este libro no es una cronología del caos y la complejidad. Más bien es un catálogo comentado de los sucesos más importantes y los conceptos que han ido emergiendo de ellos, con muchos ejemplos que me parecen interesantes. Considérenlo una guía para encauzar la curiosidad. En el capítulo «Físicos en el paraíso» surge la doctrina del universo-reloj, determinista y predecible. Con esta visión de la ciencia incluso se descubre un nuevo planeta. El capítulo «Donde viven los monstruos» narra la historia de dos problemas caóticos clásicos y explica su relación con los límites de nuestra capacidad de calcular y predecir, incluso con ordenadores. En el capítulo «Pandemónium: el caos determinista» cunde el caos, o al menos la popularidad de la palabreja. Se describen los métodos matemáticos que se emplean para domesticar el caos y hacen su aparición los fractales, inquietantes figuras geométricas que van de la mano de lo caótico. Durante un par de décadas la visión caótica sirvió para hincarles el diente a montones de problemas que se resistían al tratamiento reduccionista habitual. De eso trata el capítulo «Los años caóticos». El capítulo «Donde las vacas esféricas no se aventuran: del caos a la complejidad» culmina en una manera menos reduccionista y más mutidisciplinaria de hacer ciencia. Si todo sale como yo desearía, este libro les dará una buena idea del panorama general de la teoría del caos y su fruto más succulento, las ciencias de la complejidad.

—
— ||

||
—
—

—
— ||

||
—
—



Físicos en el paraíso

La Cabaña del Tío Chueco

La primera vez que entré en la Cabaña del Tío Chueco tenía diecisiete años. La cabaña está en un parque de atracciones de la Ciudad de México y a lo largo de los años la he visitado un par de veces más (la última, con mi hija), pero la primera visita fue la más memorable.

La cabaña está construida para confundir el sentido de verticalidad: las paredes y los muebles sugieren a la vista una dirección vertical que no coincide con la que detecta el sentido del equilibrio. Cuando uno entra, siente que la fuerza de gravedad se ha desquiciado: la gente que está de pie se ve inclinada, parece que vayan a caerse de espaldas o de bruces, y los objetos resbalan hacia arriba por superficies inclinadas.

Uno de los puntos culminantes de la visita a la Cabaña del Tío Chueco era el comportamiento de una bola de billar que el anfitrión ponía en lo que parecía la parte baja de una rampa ascendente. Cuando el anfitrión la soltaba, la bola echaba a rodar «hacia arriba», tomando velocidad, y al



terminarse la rampa, se lanzaba al espacio, describía una hermosa parábola e iba a encajarse limpiamente en una cesta con un agujero apenas más ancho que la bola.

El truco nunca fallaba. Mientras no se le diese a la bola un impulso inicial imposible de controlar, caía en la cesta. Dicho de otro modo, si la bola parte del mismo sitio, va a dar al mismo sitio, indefectiblemente. Dado el estado inicial, el estado final es impepinable. Pero no solo eso: dada una pequeña variación del estado inicial (el anfitrión es humano y puede errar por unos milímetros al colocar la bola al pie de la rampa), la diferencia en el estado final también es pequeña. Los constructores de la Cabaña del Tío Chueco tenían una confianza suprema en esto.

No se puede construir la Cabaña del Tío Chueco sin confiar en el determinismo de las leyes del movimiento de Isaac Newton. En el siglo xvii, Newton ideó una maquinaria matemática para describir todos los movimientos posibles. Con la mecánica newtoniana es fácil calcular la trayectoria de la bola de la Cabaña del Tío Chueco: basta saber la inclinación de la rampa y la velocidad inicial, que en este caso debe ser igual a cero. Establecidas estas condiciones iniciales, y sabiendo que la bola está sujeta únicamente a la fuerza de gravedad, su comportamiento viene determinado sin remedio. En general, el aparato newtoniano señala el destino inamovible de proyectiles, planetas y péndulos, y en principio también el de dados, ruletas, nubes o lo que sea. Es una especie de bola de cristal para ver el futuro.

Los constructores de la Cabaña del Tío Chueco sabían que no importaba demasiado si el anfitrión hacía variar un

poquito la posición inicial de la bola, por ejemplo, poniéndola uno o dos milímetros más adelante o más atrás. Una variación pequeña en las condiciones iniciales conlleva una variación pequeña en la trayectoria. Jamás sucederá que la bola no llegue a la parte alta de la rampa (que en realidad era la parte baja, pero en la cabaña se trastocaban los sentidos), ni que salga disparada y se ponga en órbita alrededor de la Luna. Siempre caerá en el agujero de la cesta.

Y qué suerte, porque las mismas ecuaciones que guían a la bola de la Cabaña del Tío Chueco gobiernan el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Si estos llevan miles de millones de años girando fielmente en la misma órbita (o en una órbita que cambia muy poco a poco), se lo debemos al determinismo y a la regularidad de las leyes de la mecánica de Newton. La Cabaña del Tío Chueco era para mí una metáfora de la estabilidad del mundo newtoniano: la bola cae en la cesta y la Tierra se mantiene estable en su órbita. Podemos dormir tranquilos.

Unos ciento treinta años después de Newton, el matemático francés Pierre-Simon de Laplace, en un raptó de euforia newtoniana y determinista, se imaginó un ser maravilloso, de memoria y capacidad de cálculo infinitas, una especie de demonio matemático con más paciencia que el santo Job. Si ese ser conociese las posiciones y las velocidades de todas las cosas del universo en un instante dado, en principio podría calcular el futuro. El porvenir del cosmos, desde los movimientos de los grandes planetas hasta el del más diminuto grano de arena, se extendería como un libro abierto ante esta inteligencia newtoniana infinita.

Suena maravilloso... hasta que uno cambia ligeramente de punto de vista. Para el demonio de Laplace, ni nuestros pensamientos ni nuestras decisiones serían un secreto. Es más, podría calcular todas nuestras acciones antes de que las llevásemos a cabo, o peor aún, incluso antes de que naciésemos, porque en este mundo mecánico todo está determinado por las condiciones iniciales, como la trayectoria de la bola de la Cabaña del Tío Chueco. El presente es una consecuencia necesaria e inevitable del pasado. ¿Dónde quedaba, entonces, el libre albedrío, esa sensación que tiene uno de que conduce su vida como le place? El asunto es importante, porque sin libre albedrío no puede hablarse de responsabilidad, de culpa, de mérito ni de pecado. En efecto, si mis acciones y decisiones están rígidamente determinadas por el pasado del universo, yo no soy responsable y, por lo tanto, no se me puede ni condenar ni enviar al infierno (tampoco alabar ni premiar).

A Laplace quizá no le preocupara mucho este concepto más bien teológico, y hay una anécdota bien conocida que demuestra por qué: se cuenta que cuando Napoleón hojeó un volumen de la obra maestra de Laplace sobre los movimientos del sistema solar (el *Tratado de mecánica celeste*) y le preguntó por qué no había mencionado a Dios ni una sola vez en su libro, Laplace contestó: «Sire, no tuve necesidad de esa hipótesis».

Newton al volante

El astronauta Bill Anders iba camino de la Luna en el *Apolo 8* cuando, en una comunicación por radio, su hijo pequeño le preguntó quién conducía la nave. «Isaac Newton», replicó Anders, con lo que quiso decir que no hay necesidad de conducir una nave espacial como se conduce un coche, continuamente, sin quitar la vista del camino, corrigiendo el rumbo con ligeros golpes de volante, de acelerador y de freno. Tras el lanzamiento, una vez fuera de la atmósfera, la nave queda a merced de la fuerza de gravedad, como cualquier objeto en el espacio. Si las cosas están bien calculadas (si se han sabido ajustar las condiciones iniciales), sucede lo que dice el capitán Haddock cuando el profesor Tornasol le pregunta retóricamente qué cree que ocurrirá si el cohete en el que viajan sigue avanzando en dirección a la Luna: «Acabaríamos por llegar, supongo».

Varios decenios antes de Newton, el astrónomo Johannes Kepler realizó las mejores observaciones astronómicas de su época (las del astrónomo danés Tycho Brahe) y, con mucho trabajo, extrajo de ellas tres regularidades del movimiento de los planetas. La primera dice que las órbitas de los planetas tienen forma de elipse, con el Sol en uno de los focos; la segunda describe cómo cambia la velocidad de un planeta al acercarse y alejarse del Sol en su órbita elíptica, y la tercera relaciona la distancia al Sol con el tiempo que tarda el planeta en completar una órbita. Pero Kepler no explicó de dónde salen estas regularidades. Eso lo hizo Isaac Newton durante la epidemia de peste que asoló la ciudad

Caos y complejidad



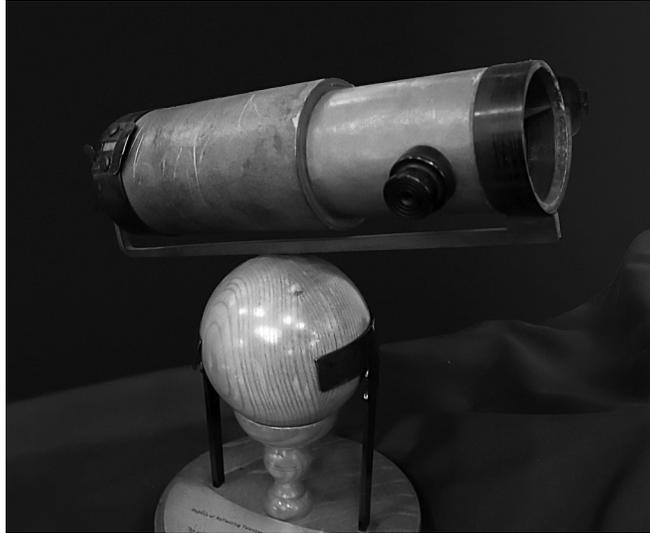
Newton (1642-1727) inventó las matemáticas del cambio y el movimiento, y con este descubrimiento se dispuso a elaborar una teoría matemática general del movimiento.

de Cambridge entre 1665 y 1667. Con la universidad cerrada, el joven Isaac no tuvo más remedio que volver a la granja de su madre y dedicarse a pensar (nadie en su sano juicio le hubiese pedido que echase una mano en las labores de la granja: pese a su considerable habilidad manual, era distraído y un completo inútil para aquellas actividades que no le interesaban). En ese período de vacaciones forzadas, Isaac Newton inventó las matemáticas del cambio y el movimiento, que él llamaba «fluxiones» y hoy conocemos como «cálculo». Con su juguete nuevo, tomó las leyes de Kepler y descubrió un gran secreto.

Otras personas, cuando resuelven enigmas de la naturaleza que han estado ocultos desde el origen del mundo, lo anuncian a los cuatro vientos, como Galileo y Kepler, pero Isaac Newton guardó sus cálculos en una gaveta y no dijo ni pío. Quién sabe qué habría sido de la física si en 1684 no se le hubiese ocurrido a sir Christopher Wren, astrónomo y arquitecto (su obra más conocida es la catedral de San Pablo, en Londres), proponerles una apuesta a sus amigos Robert Hooke y Edmond Halley. Durante una tertulia en una taberna londinense, los amigos abordaron el tema del movimiento de los planetas (vamos, como le ocurre a cualquiera...). Kepler demostró que las órbitas son elipses pero no supo por qué. Halley y Hooke habían llegado a la misma conclusión independientemente: era posible explicar la forma de las órbitas si se suponía que la fuerza de gravitación entre el Sol y los planetas disminuye en razón inversa al cuadrado de la distancia, o dicho de otro modo, si al doble de distancia corresponde la cuarta parte de la fuerza, al

triple la novena, etcétera. Halley confesó que había tratado de demostrarlo matemáticamente, pero en vano. Hooke se hizo el interesante cuando afirmó que él sí lo había demostrado pero que prefería no revelar la demostración por el momento. ¿Se lo creyeron sus amigos? Posiblemente no. En cualquier caso, Wren ofreció un premio al que encontrase la demostración en el lapso de dos meses. El premio quedó desierto, porque ni Hooke ni Halley pudieron demostrar lo que sospechaban.

Halley, no obstante, siguió pensando en el asunto y un día se fue a visitar a Isaac Newton, que para entonces era titular de la cátedra lucasiana de matemáticas en la Universidad de Cambridge. Newton no tenía amigos porque era una persona muy difícil, pero unos años antes Halley se había encontrado con él y la interacción no había sido demasiado desagradable para ninguno de los dos; de modo que Halley, quizá considerándose como una especie de amigo del recluso y huraño profesor lucasiano, se presentó en casa de Newton y a quemarropa le preguntó qué forma tendría la órbita de los planetas si la fuerza de gravedad decreciese como el cuadrado de la distancia, a lo que Newton contestó sin chistar que sería una elipse. Encantado, Halley inquirió cómo lo sabía. «Porque lo he calculado», dijo Newton. En efecto, lo había calculado cinco años antes; sin embargo, cuando Halley le pidió ver los cálculos, Newton no los pudo encontrar, pero se ofreció a repetirlos y enviárselos al astrónomo. Tres meses después, Edmond Halley recibió un legajo en el que, partiendo de una fuerza de gravedad que decrece como el cuadrado de la distancia, Newton deducía



Réplica de un telescopio construido por Newton.
Él mismo lo presentó a la Royal Society en 1672.

no solo la forma elíptica de las órbitas, sino también las tres leyes que Johannes Kepler había enunciado a partir de datos empíricos. Kepler había encontrado tres regularidades matemáticas del movimiento planetario; Newton descubrió el principio oculto, una armonía matemática más profunda que las unifica. Edmond Halley quedó tan impresionado, que de inmediato se fue a Cambridge a suplicarle a Newton que escribiera un libro sobre la gravitación y el movimiento del sistema solar.

Isaac Newton se puso a trabajar. Por espacio de dieciocho meses batalló con el encargo de Halley. Su amanuense,

en sus notas sobre este período de la vida del patrón, relata que Newton no dormía y a menudo olvidaba incluso comer. Se paseaba por los jardines trazando figuras geométricas con una vara en la grava, y cuando lo asaltaba una idea repentina, corría hasta su escritorio y, sin darse el tiempo siquiera para sentarse, se ponía a garabatear furiosamente. En abril de 1686, Edmond Halley recibió el manuscrito de *Principios matemáticos de la filosofía natural*, que iba a ser el libro más influyente de la historia de la ciencia. En él Isaac Newton va más allá de la dinámica del sistema solar que le había solicitado Halley y elabora una teoría matemática general del movimiento (cualquier movimiento, no solo el de los planetas sujetos a la fuerza de gravedad).

Newton siempre fue un tacaño. Halley, en cambio, pecaba de generoso. Cuando la Real Sociedad británica retiró su ofrecimiento de publicar el libro de Newton por falta de fondos, Halley se hizo cargo de los gastos de edición e impresión.

Los beneficios no se hicieron esperar (beneficios para la ciencia, se entiende, no para Halley). Además de los detalles de los movimientos planetarios, con su nuevo aparato matemático Newton pudo explicar el origen de las mareas (debidas a la atracción gravitacional de la Luna). También demostró que la Tierra no podía ser una esfera perfecta. Su movimiento de rotación la ensanchaba por el ecuador, como habrían de demostrar empíricamente los exploradores franceses del siglo siguiente. De paso, las leyes de Newton también determinaban el movimiento de los proyectiles, lo que era muy útil para la guerra. Newton se puso

de moda. La doctrina mecánica que intuyó la marquesa de G*** en el libro de Bernard Le Bovier de Fontenelle se discutía hasta en las fiestas de sociedad de París, y la primera y única traducción francesa del libro de Newton la llevó a cabo una dama de sociedad: la marquesa Émilie du Châtelet, cuyo amante, Voltaire, era otro fanático newtoniano. Tres siglos después, Newton condujo a los astronautas a la Luna y de regreso a la Tierra. Hoy en día sigue siendo el capitán de las misiones espaciales que han puesto robots en Marte, aparcado sondas en un cometa y visitado Plutón.

Pese a todo, el propio Newton intuyó las limitaciones de su teoría: «La órbita de un planeta cualquiera depende de la combinación de los movimientos de todos los planetas, por no hablar de la acción de todos en cada uno», escribió. «Pero tomar en cuenta al mismo tiempo todas estas causas de movimiento y definir estos movimientos por medio de leyes exactas que permitan un cálculo convencional supera, si no me equivoco, la fuerza total del intelecto humano.» Y no se equivocaba, en efecto, pero el verdadero significado de esta observación no se manifestó hasta finales del siglo XIX.

Mecánica celeste

Entre tanto, Pierre-Simon de Laplace no se amilanó cuando acometió el cálculo de los movimientos de todos los cuerpos del sistema solar pese al recelo de Newton cien años antes. Los cinco volúmenes de su *Tratado de mecánica*

celeste se publicaron entre 1799 y 1825. Hoy uno puede hacerse con sus libros con solo dos o tres clics del ordenador. Me consta.

Hojear la *Mecánica celeste* de Laplace es como andar descalzo sobre vidrios rotos. No hay casi página que no esté erizada de ecuaciones y demostraciones; los remansos de texto continuo son escasos y rara vez rebasan unas cuantas líneas. Los ojos no tienen dónde posarse para descansar. Me pregunto qué pudo haber entendido Napoleón de esta obra superespecializada y cómo supo que Laplace no mencionaba para nada a Dios. ¿A qué hora se dio tiempo para buscar el nombre del Creador entre tantas matemáticas?

A pesar de sus pantanos de ecuaciones interminables, el procedimiento de Laplace tiene un trasfondo simple. El marqués recurrió a un método muy socorrido entre los físicos ya desde entonces llamado «teoría de perturbaciones», que consiste en reducir el problema a uno más sencillo que se puede resolver y luego introducir las complejidades poco a poco, por pasos, como a hurtadillas para no alterar el equilibrio y la estabilidad de la solución. Es lo que se hace en los cursos de física elemental con el péndulo. Un péndulo en general es una cosa compleja: su longitud puede cambiar por muchos motivos (por ejemplo, por cambios de temperatura), la fricción va reduciendo la amplitud y cualquier sacudida a medio camino altera todo. Por eso en los cursos elementales se empieza así: «Sea un péndulo sin fricción sujeto a una varilla de masa igual a cero y longitud invariable...». Este problema es muy fácil de resolver. Lo malo es que el péndulo que describe no existe, como tampoco existen

entes geométricos ideales como rectas, planos, círculos y esferas. Para estudiar el movimiento de los planetas y los cometas en el sistema solar, Laplace no se complicó la vida y supuso que en el universo solo existen dos cuerpos: el planeta y el Sol (o el planeta y el satélite que lo ronda), de modo que solo hay que tomar en cuenta la atracción gravitacional principal que mantiene al cuerpo en su órbita. Los posibles efectos de los otros planetas que tanto inquietaban a Newton no se tomaron en consideración en el primer tratamiento. A continuación, Laplace desarrolló métodos para introducir la temible influencia de los otros cuerpos, pero suponiendo que esta influencia es muy pequeña y que sus efectos también lo son.

Entre físicos se cuenta una anécdota que hace mofa de esta actitud reduccionista tan común en el gremio desde los tiempos de Laplace. Un agricultor llamó a un agrónomo y a un físico para que le ayudaran a aumentar la producción de sus vacas lecheras. El agrónomo fue a ver de inmediato a los animales; los pesó, los midió, estudió su dieta y observó sus costumbres durante cierto tiempo. El físico, en cambio, sacó lápiz y papel y se puso a garabatear. Al cabo del tiempo, el agrónomo presentó gráficas, proyecciones, datos y sugerencias. Cuando le llegó el turno al físico, este se puso en pie y dijo: «Consideremos, en primer lugar, una vaca esférica de densidad homogénea...».

Con todo, el reduccionismo de la vaca esférica ha funcionado muy bien. Newton expresó la sospecha de que para estabilizar un sistema tan complicado como la familia planetaria del Sol, con tantos cuerpos dándose tirones

gravitacionales al mismo tiempo, hacía falta la intervención de Dios. Al marqués de Laplace le bastó la física, para disgusto de Napoleón. Era un triunfo de la ciencia y la razón sobre el misterio, y del reduccionismo sobre la complejidad del mundo.

No mucho después de que saliera a la luz el último volumen del *Tratado de mecánica celeste*, el astrónomo francés Urbain Jean Joseph Le Verrier salvó a la física newtoniana de lo que pudo haber sido su primera crisis. El problema era el movimiento del planeta Urano, el primer planeta descubierto desde la Antigüedad. Lo había encontrado en 1781 el astrónomo y músico alemán radicado en Inglaterra William Herschel con su telescopio gigante, el más grande del mundo, que él mismo había construido. Unos años después del descubrimiento, los astrónomos se dieron cuenta de que en realidad Urano había sido avistado muchas veces antes, posiblemente desde 1690; es lo que hoy se conoce como «predescubrimiento». Y he ahí el problema: los cálculos del movimiento del planeta con los métodos de Laplace y las posiciones observadas tanto antes como después del descubrimiento oficial discordaban. A veces Urano se adelantaba un poco, a veces se atrasaba. Era la primera disonancia en la armonía newtoniana, y como ha ocurrido a partir de entonces cada vez que surge una anomalía en la física, se consideraron dos posibilidades: 1) que la teoría requiriese una modificación, o 2) que existiesen nuevas entidades físicas que no se habían tomado en cuenta. En el caso de Urano, las posibilidades también eran dos: 1) que a la enorme distancia a la que se encontraba el planeta la



Pierre-Simon Laplace (1749-1827), uno de los impulsores de la hipótesis de la reducción frente a la complejidad del mundo.

ley de la gravitación universal ya no funcionase como decía Newton, o bien 2) que la ley de la gravitación funcionase perfectamente y la anomalía del movimiento de Urano se debiera a los tirones gravitacionales de un planeta desconocido. A principios del siglo XIX, la confianza en Newton y

su universo mecánico y predecible era casi total, así que la primera alternativa nunca fue muy popular.

Para explorar la segunda había que aplicar el método de perturbaciones que usó Laplace, pero al revés: en lugar de usar las posiciones y movimientos de los otros cuerpos del sistema solar para calcular las pequeñas perturbaciones que estos causan en el movimiento de un planeta, había que tomar las perturbaciones observadas en el movimiento de Urano y deducir la posición y el movimiento del posible intruso furtivo. Era un problema más difícil, pero Le Verrier lo resolvió y en 1846 publicó un artículo en el que daba la posible posición del planeta misterioso. En Inglaterra, el joven astrónomo John Couch Adams, una especie de autista matemático, hizo los cálculos antes que Le Verrier, pero por razones complejas los astrónomos ingleses no acometieron la búsqueda del planeta hasta que fue demasiado tarde. El 23 de septiembre de 1846, los astrónomos alemanes Johann Gottfried Galle y Heinrich Louis d'Arrest, del Observatorio de Berlín, encontraron el planeta Neptuno muy cerca de donde lo había situado Le Verrier y los ingleses se quedaron con un palmo de narices (esto causó una retahíla de recriminaciones y animadversión que habría de durar hasta bien entrado el siglo xx).

Para finales del xix parecía que Fontenelle y su marquesa ficticia habían estado en lo cierto: el mundo es mecánico y funciona como un reloj. «Dadme las condiciones iniciales y os diré vuestra trayectoria», dijo Newton. Laplace, Le Verrier (y el pobre de John Adams) lo confirmaron. Si el método newtoniano, mejorado por los matemáticos del siglo xviii,

permitía incluso encontrar nuevos planetas, ni siquiera el cielo era el límite.

En otros ámbitos de la actividad humana, la ciencia de inspiración newtoniana había transformado la industria y la economía (para bien y para mal). La máquina de vapor, ejemplo del imperio de la técnica sobre la naturaleza desbocada, aceleró la producción, hizo desaparecer unos oficios y creó otros y encauzó migraciones del campo a las ciudades. La navegación se benefició de los nuevos cronómetros marinos, relojes tan precisos como el movimiento de los planetas, que permitían determinar la posición de un barco en el mar con más exactitud y rapidez que los satélites de Júpiter, y que en poco tiempo empezaron a fabricarse en serie. Cada reloj suponía una encarnación de la ciencia y la tecnología del determinismo y la predicción.

—
— ||

||
—
—

—
— ||

||
—
—