

MARCUS DU SAUTOY

PROGRAMADOS  
PARA CREAR

CÓMO ESTÁ APRENDIENDO  
A ESCRIBIR, PINTAR Y PENSAR  
LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

TRADUCCIÓN DEL INGLÉS  
DE EUGENIO JESÚS GÓMEZ AYALA

BARCELONA 2020



A C A N T I L A D O

TÍTULO ORIGINAL *The Creativity Code*

Publicado por  
A C A N T I L A D O  
Quaderns Crema, S. A.

Muntaner, 462 - 08006 Barcelona  
Tel. 934 144 906 - Fax. 934 636 956  
correo@acantilado.es  
www.acantilado.es

© 2019 by Marcus du Sautoy  
© de la traducción, 2020 by Eugenio Jesús Gómez Ayala  
© de las ilustraciones del interior, by Martin Brown  
© de esta edición, 2020 by Quaderns Crema, S. A.

Derechos exclusivos de edición en lengua castellana:  
Quaderns Crema, S. A.

En la cubierta, *El próximo Rembrandt*, un magnífico ejemplo de lo que ocurre cuando el arte y la inteligencia artificial se dan la mano. Para ING y la agencia de publicidad holandesa J. Walter Thompson Amsterdam, el proyecto brindó la oportunidad de redefinir el concepto de campaña publicitaria y poner a prueba sus límites

ISBN: 978-84-17902-37-7

DEPÓSITO LEGAL: B. 13 243-2020

AIGUADEVIDRE *Gráfica*  
QUADERNS CREMA *Composició*  
ROMANYÀ-VALLS *Impresió y encuadernación*

PRIMERA EDICIÓN *septiembre de 2020*

Bajo las sanciones establecidas por las leyes,  
quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización  
por escrito de los titulares del copyright, la reproducción total  
o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento mecánico o  
electrónico, actual o futuro—incluyendo las fotocopias y la difusión  
a través de Internet—, y la distribución de ejemplares de esta  
edición mediante alquiler o préstamo públicos.

## CONTENIDO

1. La prueba de Lovelace	7
2. Cómo surge la creatividad	16
3. Vamos a jugar al go	27
4. Los algoritmos, el secreto de la vida moderna	59
5. De arriba abajo y de abajo arriba	85
6. La evolución de los algoritmos	103
7. Pintura por números	125
8. Aprender de los maestros	154
9. El arte de las matemáticas	186
10. El telescopio del matemático	209
11. La música o el proceso de hacer que suenen las matemáticas	229
12. La fórmula para escribir canciones	261
13. <i>DeepMathematics</i>	285
14. Juegos lingüísticos	310
15. Escuchemos a la inteligencia artificial contar una historia	336
16. Por qué creamos: encuentro de mentes	363
<i>Ilustraciones</i>	374
<i>Lecturas complementarias</i>	376
<i>Agradecimientos</i>	387
<i>Índice</i>	388

*Para Shani, por su amor y apoyo,  
por su creatividad e inteligencia.*

[Acantilado no se responsabiliza del contenido de ninguno de los portales de la red mencionados en el libro].

## LA PRUEBA DE LOVELACE

Las obras de arte producen reglas, pero  
las reglas no producen obras de arte.

CLAUDE DEBUSSY

La máquina tenía mucho de objeto precioso, con sus torres de engranajes de ruedas dentadas repletas de números y sujetas a ejes que se ponían en marcha al accionar una manivela. Ada Byron, a los diecisiete años, se quedó arrobada viendo cómo la máquina de Charles Babbage producía números según hacía girar la manivela, calculando cuadrados y cubos, e incluso raíces cuadradas. Byron había sentido siempre fascinación por las máquinas, avivada por los tutores que su madre le había procurado.

Años más tarde, Ada, ahora casada con el conde de Lovelace, al estudiar los planos que había elaborado Babbage para su máquina analítica, supo que ésta era algo más que una mera expendedora de números. Y dejó constancia de su potencial. «La máquina analítica no es otra simple “máquina calculadora”. Ocupa un lugar preeminente, y las consideraciones que sugiere son de naturaleza mucho más interesante».

Hoy las notas de Ada Lovelace se consideran la primera incursión en el mundo de la creación de programas informáticos, la semilla original de una idea que ha florecido y está dando sus frutos con la revolución de la inteligencia artificial, revolución que está transformando radicalmente el mundo actual, impulsada por el trabajo de pioneros como Alan Turing, Marvin Minsky y Donald Michie. Sin embargo, Ada Lovelace fue cautelosa a la hora de evaluar

hasta dónde podría llegar una máquina: «Convendría ser cauto ante la eventualidad de que surjan ideas descaminadas sobre los poderes de la máquina analítica. Ésta no abriga pretensiones que apunten a la posibilidad de asumir iniciativa alguna. Puede hacer exactamente lo que le ordenemos hacer». En suma, Ada pensaba que la máquina tenía sus limitaciones: de ella sólo se podía obtener lo que en ella se había puesto.

Esta idea ha sido un mantra de las ciencias de la computación durante muchos años. Es el escudo que nos protege del temor de haber puesto en marcha algo que no podemos controlar. Algunos han sugerido que, para poder programar una máquina a fin de que sea artificialmente inteligente, antes deberíamos entender la inteligencia humana.

Lo que ocurre dentro de nuestros cerebros sigue siendo un misterio, pero en los últimos años ha surgido un modo nuevo de entender la programación: se ha producido un cambio de actitud, y la programación concebida como un proceso *top-down*, que va de arriba abajo, ha pasado a ser planteada como un esfuerzo que hay que asumir para enseñar al ordenador a trazar su propio camino, un proceso *bottom-up*, de abajo arriba. Resulta que no hay que resolver antes el enigma de la inteligencia humana. Podemos dejar que los algoritmos recorran el paisaje digital y que aprendan como lo hace un niño. Los programas elaborados hoy mediante aprendizaje automático están dando pasos sorprendentemente perspicaces, detectando características nunca antes descubiertas en imágenes médicas y realizando inversiones inteligentes en el mercado financiero. Esta generación de programadores está convencida de que finalmente se podrá enmendar la plana a Ada Lovelace: se puede obtener más de lo que se había programado.

Sin embargo, todavía hay un ámbito en el conjunto de las capacidades humanas, o eso creemos, que las máquinas

nunca podrán alcanzar: hablamos de la creatividad. Poseemos una extraordinaria habilidad para imaginar, innovar y crear obras de arte que elevan, expanden y transforman lo que significa ser humano, y que es como un desbordamiento de lo que yo llamo la programación humana, nuestro código fuente.

Se trata de una programación que creemos específicamente humana porque es un reflejo de lo que significa ser humano. El *Réquiem* de Mozart nos permite contemplar nuestra propia mortalidad. Acudir a una representación de *Otelo* nos ofrece la oportunidad de confrontar nuestra respuesta emocional ante el amor y los celos con lo que ocurre en el escenario. Un retrato de Rembrandt parece captar mucho más de la persona retratada que su mero aspecto físico. ¿Cómo podría una máquina aspirar a reemplazar a Mozart, Shakespeare o Rembrandt, o incluso a competir con ellos?

Debo aclarar desde el principio que la mayoría de mis referencias artísticas está vinculada a la tradición artística occidental. A ella pertenece el tipo de arte figurativo que conozco, la música en la que he sido educado y la literatura que preferentemente frecuento. Sería fascinante saber si el arte de otras culturas podría ser más fácilmente remediado por los productos elaborados por una máquina, pero sospecho que estamos ante un desafío universal que supera las fronteras culturales. Vayan por delante mis excusas por el enfoque occidental, aunque creo que éste proporcionará un punto de referencia adecuado para medir la creatividad de nuestros rivales digitales.

Evidentemente, la creatividad humana va más allá de las bellas artes, como demuestran la gastronomía molecular del chef Heston Blumenthal, estrella Michelin; los regateos futbolísticos del delantero holandés Johan Cruyff; los edificios curvilíneos de Zaha Hadid, o la invención del cubo de

Rubik por el húngaro Ernő Rubik; incluso la creación del programa informático de un juego como *Minecraft* debe figurar entre los grandes actos de la creatividad humana.

Más inesperado resulta saber que la creatividad es también un componente importante en mi propio mundo de las matemáticas. Una de las cosas que me impulsa a pasarme horas sentado ante el escritorio, ideando ecuaciones y esbozando demostraciones, es la ilusión de crear algo nuevo. Mi mejor momento de creatividad, que rememoro una y otra vez, fue la ocasión en que concebí un nuevo objeto simétrico. Nadie sabía que este objeto podría existir. Pero después de años de duro trabajo y un destello instantáneo de brillante inspiración, pude esbozar en mi libreta de notas amarilla aquella nueva forma. Ese zumbido puro de emoción es el encanto de la creatividad.

Pero ¿a qué nos referimos realmente con este término tan camaleónico? Por lo general las definiciones de la *creatividad* giran alrededor de tres ideas: la creatividad es el impulso que nos lleva a crear algo que sea nuevo, sorprendente y valioso.

Resulta que es fácil crear algo nuevo. Puedo conseguir que el ordenador produzca una serie interminable de propuestas para nuevos objetos simétricos. La sorpresa y el valor son más difíciles de obtener. En el caso de mi creación simétrica, no sólo yo me sentí legítimamente sorprendido por lo que había elaborado, sino también otros matemáticos. Nadie esperaba esa conexión, novedosa y extraña, que yo había descubierto entre este objeto simétrico y la teoría de los números, una materia que en principio no guardaba relación con él. Y el hecho de que este objeto sugiriera una nueva forma de entender un área de las matemáticas que está llena de problemas sin resolver es lo que lo hizo valioso.

Todos acabamos anclados en ciertos patrones de pensamiento. Creemos intuir cómo evolucionarán las cosas y de



repente nos vemos arrastrados en una nueva dirección. Este elemento sorpresa nos hace recapitular y tomar conciencia. Probablemente por eso nos entusiasmos cuando nos topamos con un acto creativo, ya sea nuestro o de otros.

Pero ¿qué es lo que otorga a algo su valor? ¿Se trata simplemente de una cuestión de precio? ¿Tiene que ser reconocido por los demás? Podría valorar mucho un poema o una pintura que he creado yo mismo, pero es poco probable que mi alto concepto de su valor sea compartido por otros. Una novela sorprendente, con una trama llena de giros imprevistos, podría sin embargo ser algo de escaso valor. Pero un enfoque nuevo y sorprendente del arte narrativo, la arquitectura o la música que empiece a ser adoptado por otros y que cambie nuestra forma de ver o experimentar las cosas será generalmente reconocido como valioso. Esto es lo que Kant denomina «originalidad ejemplar», un acto original que se convierte en una inspiración para los demás. Durante mucho tiempo se ha creído que esta forma de creatividad es específicamente humana.

Sin embargo, todas estas expresiones de creatividad son, en cierto nivel, productos de la actividad neuronal y química. Se trata de la programación humana, de nuestro código fuente, que durante millones de años de evolución se ha ido perfeccionando en nuestros cerebros. A medida que se empiezan a desentrañar los brotes creativos de la especie humana, se comienza también a ver que hay reglas en el corazón del proceso creativo. ¿Podría ser nuestra creatividad algo más algorítmico y basado en reglas de lo que estaríamos dispuestos a reconocer?

El desafío de este libro es llevar a la nueva inteligencia artificial hasta sus límites para ver si puede igualar o incluso superar las maravillas de la programación humana. ¿Puede una máquina pintar, componer música o escribir una novela? Quizá no pueda competir con Mozart, Shakespeare

o Picasso, pero ¿podría ser tan creativa como nuestros hijos cuando escriben un cuento o hacen un dibujo? Al interactuar con el arte que nos conmueve y comprender lo que lo distingue de lo trillado y repetitivo, ¿podría una máquina aprender a ser creativa? Y no sólo eso, ¿podría ampliar nuestra propia creatividad y ayudarnos a expresar nuestras capacidades?

La *creatividad* es un término escurridizo que se puede interpretar de muchas maneras en diferentes circunstancias. Me centraré principalmente en el desafío de la creatividad en las bellas artes, pero eso no significa que éste sea el único tipo de creatividad posible. Mis hijas son creativas cuando construyen castillos con piezas de Lego y a mi hijo lo celebran como un centrocampista creativo cuando lleva a su equipo de fútbol a la victoria. Podemos resolver problemas cotidianos de manera creativa y dirigir empresas o instituciones creativamente. Y, como espero ilustrar, las matemáticas son una disciplina creativa, bastante más que lo que muchos admiten, y su creatividad en realidad tiene mucho en común con la de las llamadas artes creativas.

El impulso creativo es un componente clave de lo que distingue a los seres humanos del resto de animales y, sin embargo, a menudo dejamos que se atrofie y caemos en la trampa de convertirnos en esclavos de una vida previsible y de la rutina. Para ser creativos necesitamos una sacudida que nos saque de los caminos trillados. Aquí es donde una máquina podría ayudarnos: tal vez podría darnos esa sacudida, lanzarnos una nueva sugerencia e impedirnos repetir sin más el mismo algoritmo cada día. Las máquinas podrían, en última instancia, ayudarnos a actuar menos como máquinas y más como seres humanos.

«¿Y por qué es un matemático el que se ofrece como guía para este viaje?», se preguntará el lector. La respuesta es sencilla. En el fondo, la inteligencia artificial, el aprendi-

zaje automático, los algoritmos y la programación son matemáticas. Si queremos entender cómo funcionan los algoritmos que controlan la vida moderna, necesitamos comprender las reglas matemáticas que los sustentan. En caso contrario, quedaremos a merced de las máquinas y acabaremos vapuleados por ellas.

La inteligencia artificial supone un desafío fenomenal, pues está dejando claro que muchas de las tareas que realizan los seres humanos las pueden realizar igual de bien, si no mejor, las máquinas. Pero en lugar de centrarse en un futuro de vehículos autónomos y medicina computarizada, este libro se propone explorar si estos algoritmos pueden competir significativamente con el poder de la programación humana. ¿Pueden los ordenadores ser creativos? ¿Qué significa ser creativo? ¿Cuánto de nuestra respuesta emocional al arte es producto de una simple reacción del cerebro ante ciertos patrones o estructuras? Éstas son algunas de las cosas que vamos a explorar.

Sin embargo, todo esto no es sólo un desafío intelectual interesante. De la misma manera que la producción artística de los humanos nos permite hacernos una idea de la compleja programación humana que rige nuestros cerebros, veremos cómo el arte generado por los ordenadores proporciona una herramienta sorprendentemente poderosa para entender cómo funciona la programación que los dirige. Uno de los retos de los programas que surgen como consecuencia de esta nueva forma de operar de abajo arriba es que los programadores a menudo no entienden cómo funciona el programa final. ¿Por qué toma tal decisión? El arte que crea puede proporcionar una poderosa lente con la cual acceder a las decisiones subconscientes del nuevo programa. Y también puede revelar limitaciones y peligros que son inherentes a la creación de un programa que no entendemos del todo.

Hay otra razón, más personal, para querer emprender este viaje. Estoy pasando por una crisis existencial. Ante la avalancha de nuevos avances en inteligencia artificial, me he llegado a preguntar si el trabajo de matemático tiene futuro. Las matemáticas son una cuestión de números y lógica. ¿Y acaso no es eso lo que mejor hace un ordenador?

Parte de mi defensa contra los ordenadores que ya están llamando a la puerta del departamento, reclamando una parte del pastel, se basa en que las matemáticas, en la misma medida en que tratan de números y lógica, son también un asunto intensamente creativo, que involucra belleza y estética. Quiero defender en este libro que las matemáticas que compartimos en nuestros seminarios y revistas no son sólo el resultado obtenido cuando los humanos accionamos mecánicamente una manivela. La intuición y la sensibilidad artística son cualidades importantes para conformar un buen matemático. Nunca podremos programar a una máquina con estas cualidades. ¿O sí?

Ésta es la razón por la que, como matemático, estoy muy pendiente del posible éxito de la nueva inteligencia artificial en el mundo de los museos y galerías de arte, de las salas de conciertos y las editoriales. El gran matemático alemán Karl Weierstrass escribió en una ocasión: «Un matemático que no tenga algo de poeta nunca será un verdadero matemático». Como muestra a la perfección el caso de Ada Lovelace, se necesita tanto un poco de Byron como un poco de Babbage. Aunque pensaba que tenía sus limitaciones, Lovelace fue consciente del potencial de aquella máquina repleta de engranajes y ruedas dentadas a la hora de expresar algunos aspectos más artísticos:

Podría actuar sobre otras cosas que no sean números... Suponiendo, por ejemplo, que las relaciones fundamentales entre los distintos tonos de la ciencia de la armonía y de la composición

musical fueran susceptibles de una tal expresión y adaptación, la máquina podría componer elaboradas piezas científicas de música de cualquier grado de complejidad o extensión.

Sin embargo, creía que cualquier acto de creatividad habría que achacarlo al programador, no a la máquina. ¿Es posible traspasar la originalidad del programador al propio programa? La actual generación de programadores cree que sí.

En los albores de la inteligencia artificial, Alan Turing propuso una prueba para medir la inteligencia de un ordenador. Ahora me gustaría proponer una nueva prueba: la prueba de Lovelace. Para pasar la prueba de Lovelace, un programa debe producir una obra de arte creativa de modo que el proceso seguido sea reproducible (o sea, que no sea consecuencia de un error de hardware) y aun así el programador sea incapaz de explicar cómo llega al resultado. Esto es lo que pretendemos que consigan las máquinas: que elaboren algo nuevo, sorprendente y valioso. Y para que una máquina pueda ser considerada verdaderamente creativa, se precisa un requisito adicional: su contribución debe ser algo más que un mero reflejo de la creatividad del programador o de la persona que introdujo los datos. Éste es el reto que Ada Lovelace consideraba imposible.

## CÓMO SURGE LA CREATIVIDAD

El peor enemigo de la creatividad es el sentido común.

PABLO PICASSO

El aprecio e interés hacia la creatividad en los tiempos modernos ha llevado a una serie de escritores y pensadores a tratar de articular en qué consiste, en cómo estimularla y en dilucidar por qué es tan importante. Conocí las teorías de la científica cognitiva Margaret Boden mientras participaba en un comité de la Royal Society que se ocupaba de evaluar el posible impacto que podría tener el aprendizaje automático en la sociedad en las próximas décadas. Sus ideas sobre la creatividad me parecieron de lo más relevante a la hora de abordar o evaluar la creatividad en las máquinas.

Boden es una pensadora original que, tras décadas de trabajo, ha logrado fusionar en sí muchas disciplinas diferentes: ha sido y es filósofa, psicóloga, médico, experta en inteligencia artificial y científica cognitiva. A sus ochenta años, el pelo blanco revoloteando chispeante sobre ella y un cerebro siempre activo, disfruta involucrándose con entusiasmo en el examen de las perspectivas que se abren ante lo que estas «latas», como le gusta llamar a los ordenadores, podrían ser capaces de hacer. Para ello, ha identificado tres tipos diferentes de creatividad humana.

La creatividad *exploratoria* consiste en considerar lo que ya está ahí y explorar sus fronteras exteriores, ampliando los límites de lo que es posible pero permaneciendo a la vez sujeta a las reglas. La música de Bach es la culminación de un viaje en el que se embarcaron los compositores barrocos para explorar la tonalidad entrelazando diferentes voces.

Sus preludios y fugas trascienden los límites de lo posible, rompiendo los clichés y dejando el camino expedito para la llegada de la era clásica con Mozart y Beethoven. Renoir y Pissarro replantearon cómo podríamos visualizar la naturaleza y el mundo que nos rodea, pero fue Claude Monet el que realmente rebasó los límites, pintando sus nenúfares una y otra vez hasta que sus manchas de color se acabaron convirtiendo en una nueva forma de abstracción.

Las matemáticas se regodean en este tipo de creatividad. La clasificación de los grupos finitos simples es un *tour de force* de creatividad exploratoria. A partir de la definición simple de lo que es un grupo de simetrías—una estructura definida por cuatro axiomas muy sencillos—los matemáticos se han pasado un siglo y medio elaborando una lista con todos los elementos concebibles de la simetría, para llegar al descubrimiento del grupo de simetrías llamado el Monstruo, que tiene más simetrías que átomos hay en la Tierra y que sin embargo no encajan en el patrón de ningún otro grupo. Esta forma de creatividad matemática implica forzar los límites, respetando a la vez las reglas del juego. Algo así como el explorador que se interna en lo desconocido, pero que sigue constreñido por los límites de nuestro planeta.

Boden cree que la exploración representa el 97 % de la creatividad humana. Éste es el tipo de creatividad en el que sobresalen los ordenadores: forzar un patrón o un conjunto de reglas hasta el extremo resulta una tarea perfecta para un mecanismo computacional que puede realizar muchos más cálculos que el cerebro humano. Pero ¿es esto suficiente? Cuando pensamos en actos creativos verdaderamente originales, generalmente imaginamos algo más inesperado.

El segundo tipo de creatividad implica la *combinación*. Pensemos en cómo un artista puede partir de dos configuraciones completamente diferentes e intentar combinarlas.

A menudo las reglas que gobiernan un mundo pueden sugerir un nuevo marco interesante para otro. La combinación es una herramienta muy poderosa en el ámbito de la creatividad matemática. La solución final de la conjetura de Poincaré, que describe las posibles formas de nuestro universo, llegó al aplicar herramientas muy diferentes para entender el flujo sobre las superficies. Fue el genio creativo de Grigori Perelman el que se dio cuenta de que la forma en que un líquido fluye sobre una superficie podría ayudar, de manera inesperada, a clasificar las posibles superficies existentes.

Mis propias investigaciones toman herramientas de la teoría de los números que sirven para comprender los números primos y las aplican a la clasificación de posibles simetrías. Las simetrías de los objetos geométricos a primera vista no se parecen en nada a los números. Pero al aplicar el lenguaje que nos ha ayudado a navegar por los misterios de los números primos y reemplazar los números primos por objetos simétricos han surgido ideas nuevas y sorprendentes en la teoría de la simetría.

Las artes también se han beneficiado enormemente de esta forma de fertilización cruzada. El músico Philip Glass tomó ideas que aprendió al trabajar con Ravi Shankar y las utilizó para crear el proceso aditivo que constituye la base de su música minimalista. Zaha Hadid combinó su conocimiento de la arquitectura con su devoción por las formas puras del pintor ruso Kazimir Malévich para crear un estilo único de edificios curvilíneos. También en el arte culinario ha habido grandes chefs muy creativos que han fusionado cocinas de extremos opuestos del planeta.

Hay indicios interesantes que apuntan a que este tipo de creatividad podría también ser perfecto para el campo de la inteligencia artificial. Si tomamos un algoritmo capaz de tocar blues y lo combinamos con la música de Boulez, quizá obtendríamos un extraño lenguaje híbrido que



podría crear un nuevo mundo sonoro. Por supuesto, también podría salir de ahí una lamentable cacofonía. El programador tiene que encontrar dos géneros que puedan fusionarse algorítmicamente de una manera interesante.

La tercera forma de creatividad identificada por Boden es la más misteriosa y esquiva. Se trata de la creatividad *transformadora*, que describe esos raros momentos en los que cambian por completo las reglas del juego. Todas las formas del arte tienen estos cambios de marcha. Pensemos en Picasso y el cubismo, en Schönberg y la atonalidad, en Joyce y el modernismo. Son como cambios de estado, como cuando el agua pasa de repente de líquido a gas. Ésta fue la imagen que Goethe alumbró cuando intentó describir la lucha que libró durante dos años para decidir cómo escribir *Las penas del joven Werther*, culminada a la postre por un evento fortuito que actuó como un catalizador repentino: «En ese instante, vi claro el plan para Werther; las piezas, procedentes de todas partes, encajaron entre sí y se convirtieron en una masa sólida, como el agua en un jarrón, cuando está justo en el punto de congelación, se convierte en hielo ante la más leve conmoción».

Muy a menudo estos momentos de transformación se basan en un cambio de las reglas del juego, o en dejar de lado los supuestos bajo los cuales han venido trabajando las generaciones anteriores. El cuadrado de un número siempre es positivo. Todas las moléculas forman largas filas pero no cadenas. La música debe estar escrita dentro de una estructura de escalas armónicas. Las caras tienen los ojos a un lado y otro de la nariz. A primera vista parece difícil programar una ruptura tan tajante, y sin embargo, hay una metarregla para este tipo de creatividad: se trata de olvidarse de las restricciones y ver qué surge. El arte, el acto creativo, consiste en elegir qué dejar de lado o qué nueva regla introducir para obtener algo nuevo de valor.

Si me pidieran identificar uno de esos momentos de ruptura en las matemáticas, un buen candidato sería la creación de la raíz cuadrada de  $-1$  a mediados del siglo XVI. Muchos matemáticos creían que este número no existía. Se referían a él calificándolo de número imaginario (un término despectivo que Descartes acuñó para dejar claro que, por supuesto, no existía tal cosa). Sin embargo, su creación no contradecía las matemáticas existentes. Resultó que había sido un error nuestro excluirlo. ¿Cómo podría un ordenador proponer el concepto de la raíz cuadrada de  $-1$  cuando los datos de los que se alimenta le dicen que no hay ningún número cuyo cuadrado sea negativo? Un acto verdaderamente creativo exige a veces salirse del sistema y crear una nueva realidad. ¿Puede hacer eso un algoritmo complejo?

La irrupción del movimiento romántico en la música supone, de muchas maneras, la presentación de un catálogo de ruptura de reglas. En lugar de moverse entre tonalidades cercanas, como lo habían hecho los compositores clásicos, algunos recién llegados como Schubert optaron por cambios de clave que rompían deliberadamente todas las expectativas. Schumann dejaba los acordes sin resolver, acordes que Haydn o Mozart se hubieran sentido obligados a completar. Chopin a su vez compuso densos desarrollos cromáticos y desafió todas las expectativas rítmicas con sus pasajes de acento inusual y su flexión de los tiempos. El paso de un movimiento musical a otro, del medieval al barroco, al clásico, al romántico, al impresionista, al expresionista y más allá, es siempre una historia en la que se rompen las reglas. Cada movimiento depende del anterior si queremos evaluar su creatividad. No hace falta decir que el contexto histórico desempeña un papel importante a la hora de definir lo que es o deja de ser nuevo. La creatividad no es un absoluto sino una actividad relativa. Somos creativos dentro de nuestra cultura y marco de referencia.

¿Puede un ordenador iniciar este tipo de cambio de estado y llevarnos a un nuevo ámbito musical o matemático? Parece todo un reto. Los algoritmos aprenden a actuar en función de los datos con los que interactúan. ¿No implicará esto que siempre se verán condenados a producir más de lo mismo?

Como dijo Picasso una vez: «El peor enemigo de la creatividad es el sentido común». Eso suena en gran medida como algo bastante opuesto al espíritu de las máquinas. Sin embargo, se puede programar un sistema para que se comporte irracionalmente. Se puede crear una metarregla que le indique un cambio de rumbo. Como veremos, éste es, de hecho, un rasgo en el que sobresale especialmente el aprendizaje automático.

### ¿PUEDE ENSEÑARSE LA CREATIVIDAD?

A muchos artistas les gusta alimentar su propio mito creativo, atribuyendo a fuerzas externas el origen de su creatividad. En la Antigua Grecia se decía que los poetas estaban poseídos por las musas, que insuflaban la inspiración en la mente de los hombres, a veces volviéndolos locos. Para Platón «el poeta es un ser alado, ligero y sagrado, incapaz de producir mientras el entusiasmo no le arrastra y le hace salir de sí mismo y nunca puede componer hasta que se ha inspirado, y está fuera de sí y la razón ya no está en él [...] los poetas no componen merced al arte sino por inspiración divina». Asimismo, el gran matemático indio Rāmānujan atribuyó sus brillantes ocurrencias a la inspiración que recibió en sueños de su diosa familiar Namagiri. ¿Es la creatividad una forma de locura o un don divino?

Uno de mis héroes matemáticos, Carl Friedrich Gauss, fue también uno de los más hábiles a la hora de ocultar sus

huellas creativas. Se le atribuye a Gauss la creación de la teoría de números moderna con la publicación, en 1798, de *Disquisitiones arithmeticae*, una de las grandes obras matemáticas de todos los tiempos. Cuando los interesados leyeron el libro y trataron de descubrir de dónde había sacado sus ideas, quedaron desconcertados. La obra ha sido descrita como el libro de los siete sellos. Gauss parece que saca las ideas como conejos de una chistera, sin darnos nunca realmente ni un indicio de cómo logró esa magia. Apremiado más tarde, replicó que un arquitecto retira los andamios cuando la casa está terminada. Gauss, como Rāmānujan, atribuyó una de sus revelaciones a «la gracia de Dios», añadiendo que era «incapaz de identificar la naturaleza del hilo que conectaba lo que sabía anteriormente con lo que hizo posible mi éxito».

Sin embargo, el hecho de que un artista sea incapaz de decir de dónde proceden sus ideas no significa que no siguieron ninguna regla. El arte es una expresión consciente de la miríada de puertas lógicas que constituyen nuestros procesos de pensamiento inconsciente. Había por supuesto un hilo lógico que conectaba los pensamientos de Gauss: sencillamente, le resultaba difícil expresar lo que estaba haciendo, o tal vez quería preservar el misterio, para alimentar su imagen de genio creativo. La afirmación de Coleridge de que la visión que tuvo de Kubla Khan inducida por las drogas llegó a él completa oculta todo el material preparatorio en el que vemos al poeta trabajando en las ideas del poema antes de ese fatídico día en que, mientras estaba trasladándolo al papel, fue interrumpido por la persona que venía de Porlock. Claro, de lo que no hay duda es de que es una historia bonita. También mi propio recuento de creaciones se centrará más en los destellos de la inspiración que en los años de preparación que necesité para llegar a ellas.

Tenemos la terrible costumbre de interpretar de mane-

ra romántica el genio creativo. El artista solitario que trabaja aislado es francamente un mito. En la mayoría de los casos lo que parece un cambio de estado es en realidad un crecimiento continuo. Brian Eno acuñó el término de *scenius*, en contraposición a genio, para reconocer a la comunidad dentro de la cual suele surgir la inteligencia creativa. La escritora estadounidense Joyce Carol Oates está de acuerdo con este punto de vista: «El trabajo creativo, como el trabajo científico, debe ser interpretado como un esfuerzo comunitario, como un intento de un solo individuo por dar voz a muchas voces, un intento de sintetizar, explorar y analizar».

¿Qué se necesita para estimular la creatividad? ¿Sería posible programarla en una máquina? ¿Hay reglas que puedan llevarnos a ser creativos? En otras palabras, ¿podría la creatividad ser una habilidad que es posible aprender? Algunos dirían que enseñar o programar es mostrar cómo imitar lo que ya existe, y que la imitación y el seguimiento de ciertas reglas son incompatibles con la creatividad. Pero tenemos ejemplos de individuos creativos no lejos de nosotros que han estudiado, aprendido y mejorado sus habilidades. Si estudiamos lo que hacen, ¿podríamos imitarlos y finalmente ser también creativos nosotros?

Éstas son preguntas a las que me enfrento semestre tras semestre. Para conseguir el doctorado en matemáticas, los estudiantes tienen que construir una teoría matemática nueva. Deben elaborar algo que nunca se haya hecho antes. Mi tarea es enseñarles cómo. Está claro que, de algún modo, se han estado entrenando para hacerlo hasta cierto punto. La resolución de problemas implica creatividad personal, aunque la respuesta a los mismos sea ya conocida.

Ese entrenamiento es un prerrequisito indispensable para dar el salto a lo desconocido. Tanteando cómo otros han conseguido sus avances, uno espera conseguir un ambiente

favorable que fomente la propia creatividad. Sin embargo, ese salto no está ni mucho menos garantizado. No puedo elegir a alguien al azar por la calle y enseñarle a ser matemático. Tal vez podría conseguirlo después de diez años de entrenamiento, pero no todos los cerebros parecen ser capaces de alcanzar cierta creatividad matemática. Algunas personas parecen capaces de lograr la creatividad en un ámbito pero no en otros; no obstante, es difícil entender lo que hace que un cerebro produzca un campeón de ajedrez y otro un novelista ganador del Premio Nobel.

Margaret Boden reconoce que la creatividad no consiste sólo en ser Shakespeare o Einstein. Ella distingue entre lo que llama «creatividad psicológica» y «creatividad histórica». Muchos logramos actos de creatividad personal que pueden ser novedosos para nosotros, pero que históricamente son antiguos. Esto es lo que Boden llama momentos de creatividad psicológica. La única esperanza de producir algo que sea reconocido por otros como nuevo y valioso es perseverar en la repetición de actos de creatividad personal. Aunque la creatividad histórica es rara, surge del fomento de la creatividad psicológica.

Mi receta para promover la creatividad de los estudiantes sigue las tres formas de creatividad que identifiqué Boden. La exploración es quizá el camino más obvio. Entendamos primero cómo hemos llegado al punto en el que estamos y tratemos luego de ensanchar un poquito el campo de nuestros conocimientos. Esto implica una profunda inmersión en lo que hemos creado hasta la fecha. De esa comprensión profunda podría surgir algo nunca antes visto. Suele ser importante inculcar en los estudiantes la idea de que normalmente no se produce una gran explosión que acompaña al acto de creación. Es algo gradual. Como escribió Van Gogh: «Las grandes cosas no se hacen de golpe, sino reuniendo cosas pequeñas».