

INTRODUCCIÓN

¡AQUÍ LLEGAN!

En agosto de 2000, un científico japonés llamado Toshiyuki Nakagaki anunció que había entrenado a un organismo ameboideo llamado moho de fango (*slime mold*) para encontrar el camino de salida más corto de un laberinto. Nakagaki puso el moho en un pequeño laberinto que tenía cuatro posibles salidas, y colocó alimento en dos de ellas. A pesar de ser un organismo increíblemente primitivo (un pariente cercano de los hongos comunes), sin sistema cerebral central, el moho de fango se las arregló para recorrer el camino más eficaz hacia el alimento, adelgazando su cuerpo a través del laberinto de modo que podía interconectar directamente las dos fuentes de alimento. Sin recursos cognitivos aparentes, el moho de fango “resolvió” el enigma del laberinto.¹

Para ser un organismo tan simple, el moho de fango posee un nivel intelectual asombroso. El anuncio de Nakagaki fue el último de una larga cadena de investigaciones sobre las sutilezas de la conducta de este organismo. Según los científicos que intentan comprender los sistemas que usan componentes relativamente simples para construir inteligencia superior, el moho de fango llegará a ser considerado el equivalente de los pinzones y las tortugas que Darwin observó en las islas Galápagos.

¿Cómo pudo un organismo tan inferior desempeñar un papel tan importante para la ciencia? La historia comienza a finales de la década de 1960 en la ciudad de Nueva York con una científica llamada Evelyn Fox Keller. Doctorada en Física por Harvard, Keller escribió su tesis sobre biología molecular y pasó largo tiempo investigando el incipiente campo de la “termodinámica del no-equilibrio” que años más tarde se vincularía con la teoría de la complejidad. Hacia 1968 trabajaba como asociada para Sloan-Kettering, en Manhattan, estudiando la aplicación de la matemática a los problemas de la biología. Keller pensaba que si la matemática había desempeñado un papel tan sumamente importante en la expan-

sión de nuestros conocimientos de la física, quizá también fuera útil para comprender los sistemas vivos.

En la primavera de 1968 Keller conoció a un académico visitante, Lee Segel, que provenía de la matemática aplicada y compartía sus intereses. Fue Segel el primero en introducirla en el estudio de la peculiar conducta del moho de fango, y juntos emprendieron un conjunto de investigaciones que ayudarían a transformar no sólo nuestra comprensión del desarrollo biológico sino también mundos tan dispares como la neurociencia, el diseño de *software* y los estudios urbanísticos.

Si leen estas palabras durante el verano en algún confín rural o suburbano del mundo, es probable que el moho de fango esté creciendo a su alrededor. Caminen por la parte húmeda y por lo general fresca de un bosque en un día seco y soleado, observen el abono de las plantas del jardín y encontrarán tal vez una sustancia viscosa que recubre la superficie de un trozo de corteza en descomposición. A primera vista, la masa de color anaranjado rojizo sugiere que el perro del vecino ha comido algo en mal estado, pero si se observa el moho de fango durante varios días —o, mejor aún, si se lo fotografía en un plano secuencia—, se descubrirá que se desplaza muy lentamente por el suelo. Si las condiciones climáticas cambian y el tiempo se vuelve más húmedo y frío, puede ocurrir que regresen al mismo sitio y comprueben que ha desaparecido por completo. ¿Se ha marchado hacia alguna otra parte del bosque? ¿Se ha desvanecido en el aire como se evapora un charco?

Resulta que el moho de fango (*Dictyostelium discoideum*) hace algo mucho más misterioso; es una trampa de la biología que durante siglos, antes de que Keller y Segel comenzaran su trabajo conjunto, ha desconcertado a los científicos. En verdad, el comportamiento del moho de fango es tan extraño que para comprenderlo fue necesario pensar más allá de los límites de las disciplinas tradicionales; de ahí el por qué se necesitaron los instintos de una doctora en Biología Molecular y de un doctor en Física para desvelar el enigma del moho de fango. Porque no hay tal desaparición en el suelo del jardín. El moho de fango pasa buena parte de su vida como miles de organismos unicelulares distintos; cada uno se mueve independientemente de sus otros compañeros. Bajo las condiciones adecuadas se producirá la coalescencia de esas miríadas de células en un solo organismo mayor que comienza a reptar pausadamente por el suelo del jardín consumiendo a su paso hojas y cortezas en des-

composición. Cuando el entorno es menos favorable, el moho de fango se comporta como un organismo aislado; cuando el tiempo es más frío y el moho dispone de una cantidad de alimento mayor, “él” se transforma en “ellos”. El moho de fango oscila entre ser una única criatura y una colonia.

Las células del moho de fango son relativamente simples pero han atraído una atención desproporcionada por parte de varias y variadas disciplinas —embriología, matemática, ciencias informáticas—, ya que ofrecen un ejemplo fascinante del comportamiento de un grupo coordinado. Cualquiera que haya contemplado alguna vez el gran misterio de la fisiología humana —¿cómo consiguen funcionar tan bien todas mis células juntas?— encontrará alguna referencia en la colonia del moho de fango.² Si lográramos descifrar cómo se las arregla el *Dictyostelium*, quizás encontraríamos también las claves de nuestra desconcertante unidad.³

“Yo estaba en el departamento de Biomatemática de Sloan-Kettering, un departamento muy pequeño por cierto”,⁴ cuenta Evelyn Fox Keller riendo. Aunque, a finales de la década de 1970, el campo de la biología matemática era relativamente nuevo, tenía un precedente fascinante y enigmático en el entonces poco conocido ensayo de Alan Turing, el brillante decodificador durante la Segunda Guerra Mundial que también contribuyó a inventar la computadora.⁵ Uno de los últimos trabajos que Turing publicó antes de su muerte, en 1954, trataba de la “morfogénesis”, la capacidad de todas las formas de vida de desarrollar cuerpos cada vez más complejos a partir de orígenes increíblemente simples. El trabajo de Turing se centraba en la recurrencia de los patrones numéricos de las flores,⁶ pero usando herramientas matemáticas demostraba cómo un organismo complejo podía desarrollarse sin ninguna dirección o plan maestro.

“Yo pensaba en la agregación del moho de fango como modelo para pensar el desarrollo, y di con el trabajo de Turing: ‘¡Bingo!’”, explica Keller en su oficina del MIT.

Hace algún tiempo, los investigadores pensaban que las células del moho de fango segregaban una sustancia común llamada acrasina (también conocida como monofosfato de adenosina cíclico, AMPC), que estaba vinculada al proceso de agregación. Sin embargo, hasta que Keller comenzó sus investigaciones se creyó que las colonias de moho de fango se formaban al mando de células “marcapasos” que ordenaban a las

otras células comenzar dicho proceso de agregación. En 1962, B. M. Shafer, de Harvard, describió cómo los marcapasos usaban AMPC a modo de alerta para alistar a las tropas; los generales del moho de fango liberaban compuestos en los momentos adecuados, disparando oleadas de AMPC que bañaban a toda la comunidad, mientras que cada célula aislada pasaba la señal a sus vecinas. La agregación del moho de fango era una gran cadena telefónica, pero sólo unas pocas células de elite hacían la llamada original.

Parecía una explicación perfectamente sensata. Estamos naturalmente predispuestos a pensar en términos de “marcapasos”, tanto si hablamos de hongos como de sistemas políticos o de nuestro propio cuerpo. La mayoría de nuestros actos parecen gobernados por las células “marcapasos” del cerebro, y durante milenios hemos construido células “marcapasos” para nuestras organizaciones sociales, tanto si toman la forma de reyes como de dictadores o alcaldes. Buena parte del mundo que nos rodea puede explicarse en términos de sistemas de mando y jerarquías; ¿por qué habría de ser diferente para el moho de fango?

Sin embargo, la teoría de Shafer tenía un pequeño problema: nadie lograba encontrar a los marcapasos. Aunque todos los observadores coincidían en la evidencia de que en la comunidad del moho de fango circulaban olas de AMPC antes de la agregación, todas las células de la comunidad eran efectivamente intercambiables. Ninguna poseía características distintivas que pudieran elevarla a la categoría de marcapasos. La teoría de Shafer presuponía la existencia de una monarquía celular que gobernaba a las masas, pero resultó ser que todas las células del moho de fango eran iguales.

Durante los veinte años que siguieron a la publicación del ensayo original de Shafer, los micólogos creyeron que la ausencia de células marcapasos se debía a una insuficiencia en los datos o bien a experimentos defectuosos: los generales estaban escondidos en alguna parte, sólo era cuestión de dar con sus uniformes. Pero Keller y Segel hicieron una aproximación radicalmente distinta. El trabajo de Turing sobre morfogénesis había esbozado un modelo matemático donde agentes simples, de acuerdo con reglas simples, generaban estructuras extraordinariamente complejas; tal vez la agregación de las células del moho de fango era un ejemplo real de esa conducta. En principio Turing se había centrado en la interacción entre células de un mismo organismo, pero era perfec-

tamente razonable suponer que la hipótesis podía ser aplicable a la agregación de células libres. Keller comenzó a pensar que Shafer podría estar equivocado, que tal vez la comunidad de células del moho de fango se organizase sin marcapasos...⁷

La corazonada de Keller y Segel rindió sus frutos con creces. Aunque carecían de las avanzadas herramientas de visualización que suponen las computadoras actuales, garrapatearon una serie de ecuaciones con lápiz y papel, ecuaciones que demostraron que las células del moho podían disparar la agregación sin seguir a un líder, alterando simplemente la cantidad de AMPC que liberaban individualmente y rastreando la feromona que encontraban en su vagabundeo por los alrededores. Si las células del moho de fango bombeaban suficiente AMPC comenzarían a formar racimos. Las células empezaría siguiendo el rastro de otras células, creando un circuito de retroalimentación positiva que estimularía más células a arracimarse. En un trabajo publicado en 1969, Keller y Segel afirmaban que si cada célula aislada segregaba AMPC, basándose simplemente en su percepción local de las condiciones generales, la comunidad del moho de fango sería capaz de agregarse sobre la base de los cambios globales en el entorno sin un marcapasos al mando.

“La respuesta fue muy interesante”, dice Keller, “porque para cualquiera que entendiera de matemática aplicada o que tuviera alguna experiencia en dinámica de fluidos esto era moneda corriente. Pero para los biólogos no tenía sentido. Hice seminarios con biólogos y decían: ‘¿Y entonces? ¿Cuál es la célula fundadora? ¿Dónde está el marcapasos?’ No los satisfacía en absoluto”. En efecto, la hipótesis del marcapasos⁸ continuaría como modelo dominante⁹ durante la década siguiente, hasta que una serie de experimentos probaron que las células del moho de fango se organizaban desde abajo. “Me asombra lo difícil que es para las personas pensar en términos de fenómeno colectivo”, afirma Keller.

Treinta años después de que los dos investigadores pergeñaran su teoría sobre papel, la agregación del moho de fango es reconocida como un caso clásico para el estudio de la conducta ascendente o *bottom-up*. Mitch Resnick, colega de Keller en el MIT, ha desarrollado una simulación computarizada del proceso de agregación de las células del moho de fango, lo que permite a los estudiantes explorar la mano fantasmal e invisible de la autoorganización por la alteración del número de células en el ambiente y por los niveles de AMPC distribuidos. Las imágenes en pantalla

de la simulación de Resnick –brillantes racimos de células rojas y rastros verdes de feromonas– hacen pensar invariablemente en los videojuegos a quienes la usan por primera vez. La comparación revela un linaje secreto. Algunos de los más populares videojuegos de nuestros días se parecen a células del moho de fango porque están basados en las ecuaciones que Keller y Segel formularon a mano alzada a finales de la década de 1970. Si la vida en la tierra evolucionó a partir de la quiniela primigenia, podríamos decir que la vida digital más interesante de nuestras pantallas evolucionó a partir del moho de fango.

El descubrimiento de Segel y Keller¹⁰ puede compararse con una de las primeras piedras que provocan una avalancha. Otras piedras rodaron con las suyas –de algunas seguiremos la trayectoria más adelante–, pero ese movimiento inicial no fue nada comparado con el alud que se produjo a lo largo de las dos décadas siguientes, durante las cuales aquella avalancha dio lugar a un puñado de disciplinas científicas plenamente aceptadas, a una red mundial de laboratorios de investigación y *think tanks*, y a una jerga propia. Treinta años después de que Keller desafiará la hipótesis del marcapasos, los estudiantes reciben cursos de “estudios de autoorganización”, y el *software* ascendente organiza las comunidades virtuales más dinámicas de la Web. Pero el desafío de Keller fue más allá de la conformación de una serie de tendencias intelectuales. Desenterró una historia secreta¹¹ de pensamiento descentralizado, una historia que había quedado sepultada durante muchos años bajo el peso de la hipótesis del marcapasos y de los compartimentos tradicionales de la investigación científica. Durante siglos, si no milenios, se había pensado en la conducta emergente en todas sus variantes; sin embargo, aquel pensamiento fue ignorado sistemáticamente como *corpus* unificado de trabajo, porque no había nada unificado en su cuerpo. Había células aisladas en busca de los misterios de la emergencia, pero no había agregación.

Sin duda, algunas de las grandes mentes de los últimos siglos –Adam Smith, Friedrich Engels, Charles Darwin, Alan Turing– contribuyeron a la desconocida ciencia de la autoorganización, pero como aún no era un campo de estudio reconocido, sus obras fueron archivadas de acuerdo a las materias convencionales. Desde cierto punto de vista, aquellas taxonomías tenían sentido puesto que ni siquiera las figuras destacadas de esta nueva disciplina advertían que estaban intentando comprender

las leyes de la emergencia. Se limitaban a tratar aspectos específicos de campos claramente definidos: cómo aprenden las colonias de hormigas a aprovisionarse y a construir sus hormigueros; por qué los barrios industriales se forman de acuerdo con las clases sociales; cómo aprende nuestro cerebro a reconocer los rostros. Estas cuestiones pueden responderse sin apelar a las ciencias de la complejidad y la autoorganización, pero todas las respuestas comparten un mismo patrón, tan claro como los surcos de una huella digital. Sin embargo, para considerarlo un patrón era necesario encontrarlo en diversos contextos. Sólo cuando fue detectado el modelo se comenzó a pensar en estudiar los sistemas de autoorganización en sí mismos. Keller y Segel lo observaron en la formación de colonias del mohó de fango; Jane Jacobs en la formación de los barrios urbanos; Marvin Minsky en las diferentes redes del cerebro humano.¹²

¿Qué características comparten estos sistemas? En términos sencillos, resuelven problemas recurriendo a masas de elementos relativamente no inteligentes en lugar de hacerlo recurriendo a un solo “brazo ejecutor” inteligente. Son sistemas ascendentes, no descendentes. Extraen su inteligencia de la base. En un lenguaje más técnico, son sistemas complejos de adaptación que despliegan comportamientos emergentes.¹³ En estos sistemas, los agentes que residen en una escala comienzan a producir comportamientos que yacen en una escala superior a la suya: las hormigas crean colonias, los habitantes de una ciudad crean barrios, un *software* de reconocimiento de patrón simple aprende a recomendar libros. La evolución de reglas simples a complejas es lo que llamamos “emergencia”.

Imagínense una mesa de billar cubierta de bolas semiinteligentes impulsadas a motor, programadas para explorar el espacio de la mesa y alterar sus patrones de movimiento sobre la base de interacciones específicas con otras bolas. En general, la mesa está en movimiento permanentemente, con bolas en constante colisión que cambian de dirección y velocidad a cada instante. Puesto que tienen un motor, no disminuyen la velocidad a menos que haya reglas que se lo ordenen, y su programación les permite dar giros imprevistos cuando encuentran otras bolas. Ese sistema define la forma más elemental de comportamiento *complejo*: un sistema con agentes múltiples que interactúan en forma dinámica de múltiples maneras, siguiendo reglas locales e independientes de cualquier instrucción de un nivel superior. Sin embargo, este sistema no sería considerado *emergente* si las interacciones locales no fueran, en alguna forma,

de macroconducta observable. Digamos que las reglas de comportamiento local de las bolas de billar terminan dividiendo la mesa en dos grupos de bolas: uno de números pares, otro de números impares. Eso indicaría el comienzo de la emergencia, un patrón de un nivel superior que surge de interacciones complejas paralelas entre agentes locales. Las bolas no están programadas de forma explícita para reunirse en dos grupos; están programadas para seguir reglas mucho más aleatorias: girar a la derecha cuando chocan con una de color; acelerar después del contacto con la bola tres; detenerse en su trayectoria cuando tocan la bola ocho, y así sucesivamente. Sin embargo, a partir de esas rutinas simples emerge una forma coherente.

¿Nuestra mesa de billar es por ello *adaptadora*? En realidad no, porque una mesa dividida en dos grupos de bolas no es demasiado útil ni para las bolas de billar ni para nadie en el salón. Pero, como los proverbiales monos escribas *Hamlet*,* si tuviéramos un número infinito de mesas de billar en el salón, y si cada una siguiera un conjunto diferente de reglas, una de las mesas podría dar con un conjunto de reglas al azar que dispusiera todas las bolas en un triángulo perfecto y dejara una bola preparada para abrir el juego. Eso sería un comportamiento adaptador en el ecosistema mayor del salón, si entendemos que a nuestro sistema de billar le interesa atraer a los jugadores. El sistema estaría usando reglas locales entre sus agentes interactivos para crear un comportamiento de nivel superior adecuado a su entorno.

La complejidad emergente sin adaptación es como los intrincados cristales que forman un copo de nieve: un bello diseño que no tiene ninguna función. Las formas de comportamiento emergente que examinaremos en este libro exhiben la cualidad peculiar de hacerse más inteligentes con el tiempo y de responder a necesidades cambiantes y específicas de su entorno. En este sentido, la mayoría de los sistemas que veremos son más dinámicos que nuestra mesa de billar adaptadora: rara vez se establecen en una forma única y fija; forman patrones en el tiempo y en el espacio. Un mejor ejemplo sería una mesa que se autoorganiza en fun-

* Si se colocan mil monos frente a mil máquinas de escribir, y se les da tiempo suficiente, lograrán en algún momento producir todo lo que ha sido escrito, incluida toda la obra de Shakespeare. Dicho de otro modo, si se generaran trescientas páginas en la computadora de texto aleatorio con la frecuencia suficiente, se obtendría cualquier texto escrito de trescientas páginas o menos, y mucho más texto sin sentido. Agradezco la aclaración a David Sternlight, Ph. D., Los Ángeles, California. [*N. de la T.*]

ción de un dispositivo temporal basado en el billar: la bola de arranque golpea la bola ocho sesenta veces por minuto, y las bolas restantes cambian de lado a lado de la mesa una vez por hora. Puede parecer difícil que emerja un sistema como éste a partir de interacciones locales entre bolas individuales, pero nuestro cuerpo contiene numerosos relojes orgánicos diseñados a partir de células simples que funcionan de maneras notablemente parecidas. Un número infinito de configuraciones celulares o de bolas de billar no producirá un mecanismo de precisión; sólo un pequeño número de ellos lo hará. Entonces es pertinente la pregunta: ¿cómo orientar un sistema emergente hacia comportamientos cronometrados, si ése es el objetivo? ¿Cómo dotar de más capacidad de adaptación a un sistema de autoorganización?

La pregunta es crucial porque en los últimos años la historia de la emergencia ha entrado en una nueva fase que será más revolucionaria que las dos fases precedentes. En la primera fase hubo mentes agudas que intentaron entender la autoorganización sin darse cuenta de qué era a lo que se enfrentaban. En la segunda, ciertos sectores de la comunidad científica comenzaron a ver la autoorganización como un problema que trascendía las disciplinas establecidas y que intentaron resolver parcialmente comparando el comportamiento en distintas áreas. A través de la observación de las células del moho de fango, cotejada con las colonias de hormigas,¹⁴ pudo verse el comportamiento compartido, algo imposible si se las observaba en forma aislada. La autoorganización se transformó en un objeto¹⁵ de estudio por derecho propio, y dio lugar a la aparición de célebres estudios de investigación acerca de la complejidad en todas sus diversas formas.

Sin embargo, en la tercera fase,¹⁶ que comenzó en la década de 1990 —y que es la razón de ser de este libro—, dejamos de analizar la emergencia y comenzamos a generarla. Empezamos a construir sistemas autoorganizados en nuestras aplicaciones de *software*, en los videojuegos, en el arte y la música. Hemos construido sistemas emergentes para recomendar nuevos libros, reconocer voces, encontrar amigos. Desde el comienzo de su existencia, los organismos complejos han vivido bajo las leyes de la autoorganización, pero en años recientes nuestra vida cotidiana se ha visto invadida por la emergencia artificial: hay sistemas construidos conscientemente sobre la base de la emergencia, sistemas diseñados para aprovechar esas leyes del mismo modo que los reactores nucleares

aprovechan las leyes de la física atómica. Hasta hoy, los filósofos de la emergencia habían luchado por interpretar el mundo. Ahora comienzan a cambiarlo.

Lo que sigue a continuación es un recorrido por campos que normalmente no están reunidos en un mismo libro. Veremos juegos informáticos que simulan sistemas ecológicos vivos; el sistema de gremios en la Florencia del siglo XII; la división celular inicial que marca el principio de la vida; y el *software* que permite ver los patrones del cerebro humano. Lo que une a estos distintos fenómenos es una misma forma y patrón: una red de autoorganización, de agentes dispares que crean un orden de un nivel superior sin proponérselo. En cada instancia, puede verse converger la impronta de aquellas células del moho de fango; en cada instancia se sustentan las leyes de la emergencia.

Este libro sigue aproximadamente la cronología de las tres fases históricas. La primera parte¹⁷ introduce uno de los logros que coronaron el mundo emergente –el comportamiento social en colonias de insectos como las hormigas y termitas– y más adelante recorre parte de la historia de los hábitos descentralizadores, desde la descripción de Engels de las calles de Manchester a las nuevas formas de *software* emergente que se están desarrollando en la actualidad. La segunda parte es un panorama de la emergencia tal como la entendemos hoy; cada uno de los cuatro capítulos explora uno de los principios centrales de la disciplina: interacción de vecinos, reconocimiento de patrones, retroalimentación y control indirecto. La última parte apunta al futuro de la emergencia artificial y especula sobre lo que ocurrirá cuando nuestras experiencias mediáticas y movimientos políticos se formen en su mayoría a través de fuerzas ascendentes y no descendentes.

Algunas formas y patrones pasan por distintos momentos, acechando e inspirando a los seres vivos a lo largo de esos períodos determinados. El enfrentamiento dialéctico fue el patrón dominante del pensamiento científico de la primera mitad del siglo XIX; los movimientos darwinistas y de prorroforma social sembraron de redes o mallas la imaginería de la segunda mitad del siglo XX. Las primeras décadas del siglo XX encontraron su máxima expresión en la anarquía exuberante de la explosión, mientras que las décadas siguientes se perdieron en el régimen anóni-

mo de la retícula. Los últimos diez años pueden verse como un retorno a esas mallas victorianas, aunque sospecho que la imagen que se imprimió en nuestras retinas a lo largo de la última década es más prosaica: ventanas superpuestas en una pantalla, o quizá un ratón haciendo clic sobre un icono.

Estas formas son el resumen de un momento en el tiempo, una forma de evocar una era y sus obsesiones peculiares. Para quienes vivieron en estos períodos, las formas son bloques de construcción cognitiva, herramientas de pensamiento: Charles Darwin y George Eliot usaron la red como forma de entender la evolución biológica y las luchas sociales; medio siglo después, los futuristas celebraron las explosiones de la ametralladora, mientras Picasso las usaba para recrear los horrores de la guerra en el *Guernica*. Las formas son un modo de interpretar el mundo, y aunque ninguna forma representa a su época por completo, son un componente innegable de la historia del pensamiento.¹⁸

Cuando imagino qué forma dominará la primera mitad del siglo XXI, lo que me viene a la mente no es ni el abrazo en espiral del genoma ni las líneas entrecruzadas grabadas en un chip de silicio. Son, en cambio, los palpitantes píxeles rojos y verdes de la simulación del moho de fango de Mitch Resnick, al principio errando aislados por la pantalla y luego agrupándose en formas mayores. La forma de esos racimos —con su irregularidad propia de la vida y su ausencia de “marcapasos”— es lo que definirá las décadas venideras. Los veo crecer y dividirse en la pantalla y pienso: ése es el futuro.