

Enrico Coen



De las células a las civilizaciones

Los principios de cambio
que conforman la vida



Si hay historias que nos atraen, que desearíamos conocer en todos sus detalles, una, seguramente la más importante y atractiva, es la de cómo se ha ido transformando la vida en la Tierra, cómo pudieron surgir los primeros organismos unicelulares y luego asociarse formando estructuras pluricelulares complejas que dieron lugar a procesos en los que un huevo termina convirtiéndose en un ser capaz de aprender a andar, hablar e integrarse en una sociedad. «De las células a las civilizaciones», un libro profusamente ilustrado, ofrece una explicación unificada, basada en unos pocos principios, de cómo la vida se fue transformando hasta producir civilizaciones complejas. Trata, por consiguiente, no sólo de los procesos biológicos y evolutivos que dieron lugar a la variedad de organismos que existen, sino también de aprendizajes y culturas. Para ello, su autor, Enrico Coen, examina historias tan fascinantes como el desarrollo de la cebra, cómo hacen predicciones los perros, las pinturas rupestres de la cueva de Lascaux o la forma en que distingue nuestro cerebro una pintura de Modigliani de una de Rembrandt.

Introducción:

Una receta para los cambios

La vida tiene un poder transformante muy notable: a lo largo de miles de millones de años de evolución, las formas elementales se han transformado en las criaturas complejas de hoy en día. Durante nueve meses, un cigoto indefinido se convierte en un ser humano. Durante unos pocos años, un bebé de movimientos imprecisos se convierte en un adulto que camina, habla y razona. Y durante diez mil años, las sociedades humanas han pasado de las pequeñas comunidades tribales a las ciudades y civilizaciones complejas de hoy en día.

Resulta tentador pensar que tras esta propiedad transformadora de la vida existe un solo mecanismo, pero cuando la estudiamos vemos en funcionamiento cuatro mecanismos muy diferentes. Se cree que todas las criaturas de nuestro planeta tuvieron su origen en la competencia entre individuos por la supervivencia y la reproducción durante muchas generaciones, mediante la selección darwiniana. En el desarrollo de un cigoto interviene un mecanismo realmente diferente ya que, una vez fecundado, pasa por varios ciclos de división en los que se van formando patrones en el embrión mediante señales celulares y las diferentes maneras de responderlos. El desarrollo tiene que ver más con la formación de patrones dentro de un embrión en crecimiento que con la competencia por el éxito reproductor. El aprendizaje depende de otro mecanismo: a medida que un animal interacciona con su entorno, las conexiones neuronales se modifican en el cerebro. Algunas conexiones se pierden o se debilitan, mientras que otras se forman o se

refuerzan, lo que permite la captura de nuevas relaciones con el entorno, de manera que el aprendizaje no es más que la modificación de las interacciones y conexiones neurales. Finalmente llegamos al cambio cultural: los humanos interactúan dentro de los grupos sociales, lo que conduce a avances relacionados con herramientas, utensilios y conocimiento. La cultura es un fenómeno social que depende de la forma en la que nos comportamos y en la que interactuamos con los demás.

No existe ningún punto en común obvio entre el funcionamiento de estos diferentes procesos, pues todos parecen transcurrir por caminos completamente diferentes: la evolución mediante diferencias en el éxito reproductor; el desarrollo mediante la proliferación, el crecimiento y formación de patrones celulares; el aprendizaje mediante cambios en las conexiones neuronales; y el cambio cultural a través de las interacciones humanas.

Parece extraño que en la naturaleza hayan adquirido importancia cuatro mecanismos de transformación totalmente diferentes. Así como los físicos se afanan por elaborar una «teoría de todo» que reúna sus teorías fundamentales, se espera que los biólogos busquen una teoría unificada para las transformaciones que afectan a los seres vivos, una teoría que englobe evolución, desarrollo, aprendizaje y cambio cultural. En el pasado ya se había intentado dicha unificación: Ernest Haeckel, un seguidor entusiasta de Darwin en el siglo XIX, propuso una relación directa entre la evolución y el desarrollo. Pensaba que a medida que se desarrolla un embrión, se recrea su historia evolutiva. Así pues, los embriones humanos pasarían por una etapa pisciforme, otra reptiliana, y así sucesivamente, a medida que crecen en el vientre. Sin embargo, más tarde se demostró que esta idea estaba desencaminada^[1]. Más recientemente, Gerald Edelman ha intentado integrar la evolución y el aprendizaje en su teoría del «darwinismo neural»^[2]. En la década de los

ochenta del siglo XX, Edelman propuso que las estructuras neuronales del cerebro se seleccionan durante el aprendizaje, en claro paralelismo con la selección natural, aunque recibió críticas demoledoras. Parece que la explicación unificada de diferentes transformaciones que afectan a los seres vivos está plagada de dificultades.

Quizá la naturaleza tenga realmente cuatro maneras completamente diferentes de transformarse a sí misma, sin que debamos preocuparnos más, pero creo que se trata de una perspectiva errónea. En este libro quiero mostrar que los últimos avances de nuestro conocimiento científico nos han dado acceso a una imagen unificada de cómo los sistemas vivientes se transforman a sí mismos, desde el origen de las bacterias hasta la creación de una obra maestra artística. Por primera vez comenzamos a ver el conjunto común de ingredientes y mecanismos que son responsables de las transformaciones que afectan a los seres vivos.

¿Por qué debe importarnos el hallazgo de los ingredientes comunes? Después de todo, los estudios sobre la evolución, el desarrollo, el aprendizaje y la cultura hasta la fecha parecen haber progresado muy alegremente sin preocuparse por las similitudes que comparten. ¿Qué ganamos con verlos de forma colectiva? Supongamos que comparamos el modo en que el hielo se funde con la manera en que el agua hierve. Ambos procesos difieren en muchos aspectos: el primero se refiere a un sólido que se vuelve líquido en torno a los 0 °C, mientras que el segundo afecta a un líquido que se convierte en gas a 100 °C. Se puede ver que ambas transiciones tienen muchas características en común, puesto que en ambas interviene un cambio de la fuerza y de la energía de las interacciones entre las moléculas de agua. Se trata de manifestaciones diferentes del mismo proceso subyacente. Esta perspectiva unificadora nos ayuda a comprender mejor lo que está ocurriendo que si nos limitáramos a estudiar simplemente cada transición por separado. Del mismo modo, el contemplar los elementos co-

munes que subyacen en las diferentes transformaciones de lo viviente nos ayuda a conocer la esencia de cada proceso, a la vez que nos amplía la visión de conjunto de los sucesos.

Esta estrategia quizá sea razonable para la evolución, para el desarrollo y para el aprendizaje al ser todos ellos objeto de continuas investigaciones científicas, pero no parece probable que deba extenderse al cambio cultural. Tendemos a pensar que la creatividad y la cultura humanas nos resultan tan complicadas y especiales que la ciencia tiene poco que decir sobre ellas. Pero cuando nos ponemos a ver las transformaciones de lo viviente en conjunto, comprobamos que la ciencia desempeña dos funciones. Por una parte, la ciencia proporciona una fuente de conocimiento sobre el mundo y nuestro lugar en él, y así enmarca nuestra cultura. Por otra parte, la ciencia es un producto de la cultura, el resultado de la colaboración entre los humanos durante muchos años para dar sentido al mundo que nos rodea. Solo cuando estudiemos a la vez todos los tipos de transformaciones de lo viviente seremos capaces de obtener una perspectiva clara de este doble aspecto de nuestro punto de vista, de cómo la ciencia enmarca a nuestra cultura y es enmarcada por ella. Entonces no solo comprenderemos mejor cómo se produjo el cambio cultural, sino también cómo se relaciona con nuestro pasado biológico.

¿Por qué ha costado tanto llegar a este punto de vista colectivo?

Historia y forma

A primera vista, la guerra y el ajedrez son muy diferentes: en la guerra hay personas que luchan y se matan entre sí, mientras que en el ajedrez hay dos personas sentadas pacíficamente frente a un tablero y que empujan algunas piezas

de madera por él. Aun así, a pesar de tan obvias diferencias, las dos están muy relacionadas. Primero, están conectadas en la historia: el origen del ajedrez se puede rastrear hasta el juego del *shatranj* jugado en Persia entre los siglos V y VI, que a su vez podría proceder del juego indio *chaturanga*^[3]. Al igual que el ajedrez moderno, el *shatranj* era un juego para dos jugadores con 32 piezas en un tablero de 64 escaques (casillas). Cada jugador tenía un ejército compuesto por dos elefantes, dos caballos, dos carros de combate y ocho soldados a pie. Se basaban en las principales unidades de lucha de la época y eran los predecesores de los alfiles, caballos, torres y peones del ajedrez moderno. También había un rey y un ministro (equivalente a la reina moderna). El objetivo era capturar o atrapar al rey del oponente. El juego ilustraba cómo un ejército podría vencer y flanquear a otro a base de estrategia y sagacidad. En su época, el *shatranj* era tan juego de guerra como hoy en día lo son los de ordenador.

Hay otras maneras de relacionar el ajedrez con la guerra que no dependen del conocimiento de sus conexiones históricas. Ambos se pueden considerar muy competitivos, donde un adversario intenta derrotar a otro. Ambos son territoriales, y cada adversario intenta ocupar o controlar regiones. En ambos se intenta eliminar o capturar los elementos de la oposición. Y hay una fuerte componente estratégica de cooperación lateral, con unidades que se apoyan unas a otras cuando montan un ataque o mantienen una defensa. La guerra y el ajedrez tienen formas parecidas además de estar conectados por la historia.

Estos dos modos de relacionar el ajedrez con la guerra (por la historia o por la forma) están a su vez interrelacionados. Las similitudes de forma, como la competición y la territorialidad, se deben a los orígenes del ajedrez como juego que simula la guerra. Sin embargo, en el ajedrez no aparecen todas las peculiaridades de la guerra: no aparecen

elementos como la muerte física de humanos, ni se varía el trazado del terreno ni las condiciones ambientales. El ajedrez siempre se juega con la misma distribución de escaques y las condiciones iniciales están perfectamente controladas, sin que participe en el juego nada que tenga que ver con el tiempo ni con la visibilidad. El ajedrez no es simplemente una simulación de la guerra, sino que es una abstracción de ella que captura un conjunto determinado de elementos. Estas características esenciales son las que proporcionan las similitudes de forma.

Las diferentes transformaciones de lo viviente también pueden estar relacionadas a través de la historia o de la forma. Se cree que la vida en la Tierra surgió hace unos 3800 millones de años, y que hace unos 3500 millones de años nuestro planeta estaba poblado por una colección heterogénea de organismos unicelulares^[4]. En este punto de la evolución no había organismos pluricelulares complejos, que evolucionaron más tarde, durante los últimos mil millones de años más o menos, mediante el desarrollo a partir de huevos fecundados. El desarrollo (la transformación de los cigotos en organismos pluricelulares) apareció mucho después de que comenzara la evolución, del mismo modo que el ajedrez surge muchos años después de que se comenzasen a librar batallas.

De igual forma, el aprendizaje surgió después del desarrollo. Los primeros organismos pluricelulares que se desarrollaron en nuestro planeta apenas eran capaces de aprender: no tenían cerebros que pudieran capturar relaciones nuevas en su entorno. Los sistemas nerviosos complejos comenzaron a evolucionar más tarde gracias a la aparición de cambios en la manera de desarrollarse de los embriones. Parte del desarrollo de algunos organismos se dedicó a la formación de cerebros con vías nerviosas de conexión, con lo que los seres vivos adquirieron la capacidad de aprender de su entorno, una capacidad que en la actualidad comparten muchos de nuestros primos, desde las babosas y los

perros hasta los chimpancés. El aprendizaje vino después del desarrollo, al igual que el desarrollo vino después de la evolución.

El último tipo de transformación de lo viviente que surgió fue el cambio cultural. A medida que los humanos se diseminaban por la Tierra en grupos sociales, aprendiendo a domesticar y explotar a otras especies para su propio beneficio, generaban un excedente de comida que, junto con la capacidad humana para aprender e innovar, permitió que las sociedades mantuvieran y desarrollaran un abanico de especializaciones humanas, como por ejemplo constructores, soldados, artistas, instructores y administradores, lo que condujo a la formación de sistemas culturales elaborados. Las civilizaciones comenzaron a surgir tan solo en los últimos diez mil años, mucho después de que apareciera la capacidad para aprender. Por lo tanto, el cambio cultural es mucho más reciente que los otros procesos.

Las relaciones históricas parecen claras: primero vino la evolución, luego el desarrollo, después el aprendizaje y al final el cambio cultural. Esta secuencia temporal es la consecuencia de que cada proceso dependa de su predecesor. La capacidad de que los cigotos acaben produciendo organismos pluricelulares apareció gracias a la evolución. La capacidad de aprender depende del desarrollo previo de un sistema nervioso complejo dentro de un embrión. Y el cambio cultural solo resulta posible gracias a la capacidad de aprendizaje de los humanos. La cadena histórica no es más que el reflejo de una secuencia de dependencia.

Mientras que las relaciones históricas no parecen complicadas, las cosas son mucho más espinosas cuando acudimos a las relaciones de forma. ¿Existen similitudes fundamentales entre las distintas transformaciones, o cada proceso funciona de acuerdo con principios totalmente diferentes? En el pasado se han intentado identificar con regularidad las similitudes de forma sin ningún éxito, en gran parte debido a dos tipos principales de confusiones.

Uno de los errores tiene que ver con confundir lo familiar con lo fundamental. Como humanos, estamos familiarizados con la idea de diseñar y fabricar cosas, como ropa, muebles y casas. Por lo tanto, no parece natural utilizar la idea de *fabricar* como modelo general de cómo ocurren las transformaciones de lo viviente. Un árbol o una rana se podrían construir del mismo modo que un relojero fabrica un reloj, pero en vez de un humano, necesitaríamos que un hacedor divino más poderoso realizara el trabajo, aunque el principio de que un agente externo sea responsable del diseño y de la construcción sería el mismo. Esta idea de un agente externo o hacedor divino tiene una larga tradición y forma parte intrínseca de muchas religiones. Gracias a la capacidad retrospectiva de la ciencia podemos ver dónde radica el problema de esta explicación: la capacidad para diseñar y crear cosas que tenemos los humanos es un rasgo complejo que apareció mucho más tarde que la evolución. Utilizar la idea de fabricar como principio explicativo global no es más que intentar que un resultado complejo se explique a sí mismo. Caemos en esta trampa porque, como humanos, estamos muy familiarizados con la fabricación y no nos damos cuenta de que su complejidad descansa en toda una serie de transformaciones.

A los científicos les costó muchas generaciones derrotar esta equivocación. En ello resultó clave que Darwin identificara un mecanismo sencillo (la selección natural) capaz de explicar la diversidad de seres vivos de nuestro planeta. En vez de requerir un hacedor divino, la evolución de la vida avanza inexorablemente en respuesta al modo en el que los organismos se reproducen e interaccionan con su entorno. Su empeño por establecer este punto de vista dejó un legado duradero. Estableció una importante separación entre nuestros conceptos sobre las actividades humanas (diseño y creatividad) y el modo en el que reflexionamos sobre los procesos biológicos como la evolución. Son cosas

muy diferentes que comparamos por nuestra cuenta y riesgo.

Regresemos al ajedrez para ilustrar otro tipo de error en la búsqueda de similitudes de forma. Fijémonos en la siguiente conversación entre un maestro de ajedrez y su pupilo principiante:

AESTRO: Esta pieza se llama «caballo» porque puede saltar por encima de otras piezas.

PILO: Entonces lo hará saltar el jinete, ¿no?

AESTRO: No lo hace saltar el jinete, sino el jugador.

PILO: ¿Cómo lo consigue?

AESTRO: Cogiendo el caballo y elevándolo por encima de las otras piezas.

PILO: Pero si el jugador lo hace saltar, ¿para qué le hace falta el jinete?

La equivocación tiene su origen en que el pupilo está tomando demasiado al pie de la letra la similitud entre la pieza de ajedrez y un caballo. Los caballos (con o sin jinete) tienen una relación meramente abstracta o simbólica. De hecho, se pueden aprender las reglas del ajedrez sin mencionar nunca los caballos, simplemente basta con aprender la manera en que se mueve. El juego no se vería afectado en absoluto si los caballos fueran teteras, ya que lo que realmente importa es la naturaleza de los movimientos que realiza. Las comparaciones entre los caballos con sus jinetes, si se toma de forma demasiado literal, acabará distrayendo, llevando a una analogía errónea que confundirá más de lo que ayuda.

Este tipo de confusión aparece continuamente al comparar diferentes tipos de transformaciones de lo viviente. Un ejemplo sería la idea de Ernest Haeckel de que un huevo fecundado recrea su historia evolutiva a medida que se desarrolla. No hay duda de que la forma en que un huevo se desarrolla está vinculada con la evolución, pues gracias a

esta surgió el desarrollo biológico. Pero al tratar de llevar esta relación demasiado lejos, esto es, que el desarrollo repita literalmente las etapas de la evolución, Haeckel acabó errando el tiro: no alcanzó el nivel de abstracción correcto y se lió haciendo comparaciones falsas y estériles. Las ideas de Edelman de que el cerebro funciona de acuerdo con los principios de Darwin han sufrido críticas similares por intentar aproximar demasiado dos procesos que están muy distantes.

Para determinar los principios comunes necesitamos trabajar en el nivel de abstracción correcto, que solo se alcanzará si se tiene un conocimiento razonable de lo que se quiere comparar. La comparación entre la guerra y el ajedrez solo dará algo con sentido después de que comprendamos lo que entraña cada uno. No hace falta que seamos expertos ajedrecistas ni que sepamos comandar un ejército, sino que debemos tener una idea global del funcionamiento de los juegos de mesa y de las batallas. Así podremos conocer tanto sus similitudes como sus diferencias. La guerra y el ajedrez son territoriales, si bien hay que saber que existen numerosas diferencias en el significado de territorio para cada caso: en la guerra es el terreno, mientras que en el ajedrez se refiere a una región del tablero.

De igual modo, para extraer los principios comunes que subyacen en las transformaciones que afectan a lo viviente necesitamos un conocimiento amplio de cómo funcionan. Esto se conoce desde hace muy poco gracias a los avances del conocimiento científico, en particular en los campos del desarrollo y del aprendizaje. Las comparaciones anteriores se habían visto obstaculizadas por la falta de conocimientos sobre cada proceso, lo que conducía a confundir lo familiar con lo fundamental, o a realizar abstracciones equivocadas. ¿Cómo deberíamos abordar ahora este problema?

Receta creativa para la vida

El crítico de arte chino del siglo VI Xie He sacó a relucir los seis ingredientes que pensaba que eran importantes para definir la calidad de una pintura^[5]. Traducidos *grosso modo*, se trata de vitalidad, pinceladas, forma natural, colores, composición y copia. Los seis aspectos (que no son completamente independientes entre sí), con la excepción del color, se ilustran en *Caquis* (figura 1), un cuadro del monje del siglo XIII Mu Qi. La vitalidad de esta pintura procede en parte de la pincelada viva. De igual forma, la composición depende de la disposición de las frutas que se copiaron. En lugar de proporcionar un conjunto de características independientes, Xie He resaltó la interacción de algunos ingredientes clave que pensaba que ayudarían a apreciar el cuadro. Otros seguramente propondrán una lista de ingredientes diferente, por lo que las elecciones de Xie He nos gustarán o no en función de lo que nos ayuden a organizar nuestro conocimiento.

Lo mismo ocurre con la manera en que organizamos nuestras ideas. Existen muchas formas de presentar nuestro conocimiento de procesos como la evolución, el desarrollo, el aprendizaje y el cambio cultural. En este libro presentaré un punto de vista muy particular que pone el énfasis en algunas características predominantes. Resaltaré siete principios fundamentales que subyacen a los procesos desde la evolución de las bacterias hasta el funcionamiento de nuestro cerebro. No piense que hay algo misterioso con el número siete, simplemente que los principios se han agrupado de forma natural en siete categorías, igual que Xie He encontró seis categorías para definir la pintura.

FIGURA 1. *Caquis*, Mu Qi (activo en 1269). Daitokuji, Kioto.

Mis siete principios, o ingredientes, y la manera en que funcionan en conjunto definen lo que denomino la *receta creativa para la vida*, una receta con la que la vida se transforma a sí misma. La evolución de los distintos organismos, el desarrollo de un huevo en un adulto, el aprendizaje por un animal de nuevas relaciones en su entorno, y los logros de la cultura humana no son más que diferentes manifestaciones de la receta creativa para la vida. Todos dependen de la manera de mezclar el conjunto común de ingredientes básicos. Al igual que los criterios de Xie He para la pintura, los ingredientes de la receta creativa para la vida no son independientes y veremos cómo interaccionan y se alimentan entre sí. En lugar de consistir en aspectos completamente independientes, proporcionan una serie de perspectivas relacionadas que, juntas, nos permitirán percibir una forma común detrás de las transformaciones vivientes. También veremos cómo comparten partes de su historia. Al igual que con la guerra y el ajedrez, el relato de la vida implica la interrelación entre historia y forma.

Me ha costado varios años llegar a este punto de vista. Comencé a pensar en estos temas cuando escribía un libro anterior, *El arte de los genes*^[6], que se centraba en el desarrollo, pero que también daba unas pinceladas sobre otros procesos, como la evolución y el arte. Relacioné estos procesos con el desarrollo a través de la historia o de la analogía. Pero había tantas similitudes que me hizo pensar en la posibilidad de que existieran unas conexiones más fundamentales. Estas ideas comenzaron a cristalizar en cuanto acabé de escribir el libro y me familiaricé con el pensamiento informático guiado por mis investigaciones científicas. Cayó en mis manos un ensayo revelador escrito en 1990 por el informático Christoph von der Malsburg, en el que identificaba tres principios básicos que eran comunes para todos los sistemas autoorganizados^[7]. Hacía mucho hincapié en el funcionamiento del cerebro y su desarrollo, pero

también se daba cuenta de la importancia que tenían estos principios para la evolución. La lectura de sus ideas me hizo mirar de otra forma los fundamentos del pensamiento biológico, en particular a la luz de lo que se había descubierto en los últimos años.

Me puse a reducir al mínimo las teorías de cada campo de la biología hasta dejar al descubierto los principios esenciales y entonces volví a examinarlos con aires renovados, buscando lo que podrían tener en común. Por supuesto, cuando uno busca con suficiente ahínco siempre acaba encontrando trivialidades comunes entre cualquier conjunto de procesos. Lo sorprendente del resultado fue, sin embargo, que los puntos de encuentro que aparecieron no eran superficiales, sino que iban a la esencia de cada proceso. Me sirvieron para definir las interacciones principales que en cada caso llevan a las transformaciones. Conseguí ver las transformaciones vivientes de una manera más profunda y más unificada, como diferentes manifestaciones de una receta creativa común.

Para dar a conocer el significado de la receta creativa para la vida necesitamos conocer cómo se aplica a cada tipo de transformación de lo vivo. Comenzaremos con la evolución (capítulos 1 y 2), que es la madre de todas las otras transformaciones y nos proporciona nuestra primera visión libre de obstáculos de cómo funciona la receta creativa para la vida. Entonces echaremos un vistazo al desarrollo, a cómo un cigoto microscópico se acaba convirtiendo en un árbol o un niño (capítulos 3 a 5). Hasta los años ochenta del siglo XX no empezamos a conocer bien cómo ocurría. Al recurrir a este conocimiento, veremos que a pesar de las muchas diferencias existentes, los principios del desarrollo muestran algunas similitudes sorprendentes con la evolución: se trata de la misma receta creativa, pero vestida con otro traje. Entonces pasaremos al aprendizaje, primero contemplando cómo organismos como las babosas y las hierbas responden a los cambios de su entorno (capítulo