

VIDA

Life as it could be,

CHRISTOPHER LANGTON

Si la Torre Eiffel representara la edad del mundo, la capa de pintura en el botón del remache de su cúspide representaría la parte que al hombre le corresponde de tal edad; y cualquiera se daría cuenta que la capa de pintura del remache es la razón por la cual se construyó la Torre,

MARK TWAIN

Y llegamos al tema de referencia del título, a base de ir ganando complejidad.

Definir la vida es una tarea fútil y lleva a agrias discusiones (por ejemplo, decidir si los virus están vivos o no, o si las sociedades humanas o todo el planeta son un ser vivo). Lo que se suele hacer es establecer una serie de propiedades que suelen cumplir los seres vivos, pero incluso así, para cada una de ellas hay excepciones. Las que habitualmente mencionan los biólogos son:

- Los seres vivos nacen. Pero hay excepciones como el ácaro *Acarophenax tribolii*. Sus huevos eclosionan en el interior del cuerpo vivo de la madre. Siempre aparecen un macho y varias hembras, que se van alimentando del propio cuerpo de la madre. Al alcanzar su madurez el macho se aparea con todas sus hermanas. Las hembras salen a la luz (nacen), mientras que el macho, habiendo cumplido ya su misión, muere dentro de la madre. Es decir, el macho no llega a nacer (Vélez, 1998, p. 88).
- Los seres vivos crecen. Pero hay excepciones como los virus, que no crecen. Las bacterias prácticamente tampoco. Y también hay contrae-

jemplos como los cristales que nacen y crecen aunque no los consideramos seres vivos.

- Los seres vivos tienen metabolismo. Todos los seres vivos capturan materia y energía del entorno, los procesan para automantenerse, y expulsan lo que no les sirve. Pero el fuego también lo hace y nadie piensa que esté vivo.
- Los seres vivos se reproducen. Esta es sin duda la característica fundamental de la vida. Sin embargo, algunos biólogos no se ponen de acuerdo en ciertos detalles. Por ejemplo, dicen que los virus no están vivos porque no se reproducen por sí mismos; no tienen aparato reproductor, y lo que hacen es manipular los mecanismos celulares de otro organismo para lograr que les reproduzca a ellos. Pero se olvida que los animales superiores ni siquiera pueden sobrevivir por sí mismos sino que necesitan otra serie de animales y plantas que les proporcionen los nutrientes básicos. Los seres vivos no lo están de manera aislada. Están vivos gracias a que pertenecen a una red de seres vivos, con muchas interdependencias entre ellos. Que los virus dependan de otros organismos para reproducirse solo es un caso más de dependencia. Y también hay contraejemplos, como ciertas arcillas que se depositan en lagunas de aguas muy quietas. Las arcillas están formadas por iones de modo que, después de depositarse en el suelo de la laguna, la primera capa que se forme atraerá a los iones complementarios para formar una segunda capa, que a su vez atraerá iones complementarios para formar una tercera capa, y así sucesivamente. Lo interesante es que a veces se desprende la capa de arriba, que cae al suelo de la laguna sirviendo como semilla para hacer crecer otro pequeño montículo de arcilla, que va a tener una distribución iónica similar al “montículo padre” de donde se desprendió. Podemos decir que se ha reproducido, sin estar vivo. El concepto lo leí en Stewart (1998) y tuve la suerte de encontrarlo y fotografiarlo (Figura 158).
- Los seres vivos mueren. La mayoría de los seres superiores sí, con algunas notables excepciones como cierto tipo de medusas (*Turritopsis Nutricula* que, una vez alcanzada su madurez sexual, es capaz de rejuvenecer y puede repetir este ciclo indefinidamente); y algunos peces planos (como el rodaballo de la figura 59), moluscos, crustáceos, reptiles y anfibios, que disminuyen su tasa de mortalidad y aumenta su fecundidad conforme aumenta su edad (Klarsfeld, 2002). Pero además, las células procariotas no suelen morir. Cuando una ameba se reproduce, se parte en dos: la original se convierte en dos amebas hijas, pero eso no quiere decir que nadie haya muerto, pues en el proceso no

queda ningún cadáver. Definitivamente la muerte no es algo obligatorio y responde más a un proceso de optimización (ver el problema 11 de ingenio). Y, por supuesto, que también hay contraejemplos, pues hasta las estrellas mueren, aunque nadie las considera vivas.



Figura 58. Formación de arcillas en una laguna actualmente seca, en una cueva de Bahía, Brasil



Figura 59. Rodaballo en una pescadería (garantizo que no murió de muerte natural)

Obviamente, hay otras características más técnicas, que podrían definirla mejor:

- Disminución local de la entropía.
- Autoorganización.
- Es compleja y crea complejidad.
- Emergen nuevas propiedades.
- Evoluciona.
- Hay impredecibilidad en lo que va a hacer, es decir, goza de cierta libertad.
- Independencia respecto al entorno.

Problema 11: Lo que Henry decidió

En el libro Genoma de Matt Ridley (2000) se explica que Henry Ford envió a sus ingenieros para que buscaran todos los coches vendidos en USA y que hicieran un reporte de su estado. Como resultado de ello se dio cuenta de que había muchos en funcionamiento y otros dañados, pero algo común a todos ellos es que el timón estaba perfecto, impecable, como nuevo. Si usted es ingeniero, conteste la siguiente pregunta: ¿qué conclusión sacó Henry Ford de ello? La evolución es un proceso de optimización y hace exactamente lo mismo.

Estas características son más abstractas. Surge la pregunta de si todos los sistemas que las cumplan se pueden considerar vivos. Por ejemplo, si se pudieran diseñar sistemas electrónicos, mecánicos o de *software* que cumplieran con todo ello, ¿se les consideraría vivos? Hay quienes piensan que no, porque la vida está basada en la química del carbono. Estas personas muestran antropocentrismo, que no es nuevo en la historia de la humanidad (somos los únicos, somos los únicos seres pensantes, somos el centro del universo y nuestra química del carbono es la única válida). Se les llama jocosamente *carbonocéntricos*. Por el contrario, hay otras personas que pensamos que sí, pues si la definición de vida es abstracta, la vida como tal también lo es. Y de ahí se ha acuñado el término de vida artificial, que consiste en el estudio de las propiedades de la vida, independientemente del soporte físico empleado. La mejor forma de hacer este estudio es basado en *software* porque es una de las cosas más inmateriales que conocemos.

Problema 12: Campeón en reproducción

Como decíamos, una propiedad de los seres vivos es que se reproducen. ¿Has pensado alguna vez quién es el que se reproduce más rápido en estos tiempos que vivimos?.

VIDA ES INTELIGENCIA

Decimos que un sistema está vivo si muestra cierta independencia respecto al entorno, si puede sobrevivir ante sus cambios y si busca las mejores condiciones para sobrevivir, como más comida, más energía y más posibilidades de reproducción. Un sistema es inteligente si ahonda más en ello, creando herramientas e incluso modificando el entorno para facilitar todavía más su supervivencia, es decir, hacen referencia al mismo conjunto de características. El concepto es idéntico, y la diferencia es solo una cuestión de grado. Nadie negará que para estar vivo se requiere cierta inteligencia.

De modo que si queremos estudiar la inteligencia artificial deberíamos preguntarnos primero por algo más básico, pero que en el fondo es lo mismo: la vida artificial.

Las estructuras que crea un ingeniero son jerárquicas, como los diagramas *UML* en *software* o los de *VHDL* en electrónica: a partir de los elementos básicos disponibles se crean sistemas sencillos que a su vez se usan como ladrillos de sistemas más complejos, y estos a su vez son los ladrillos de otros sistemas todavía más complejos, de forma similar a cómo con ladrillos se construyen paredes, con ellas, casas y a partir de ellas, ciudades. La separación entre niveles es estricta, con lo que se logra disminuir la complejidad del sistema: quien diseña una ciudad no se preocupa por el material y resistencia del ladrillo, porque eso ya fue resuelto por el que diseña una pared. No se preocupa por el amarre con vigas de las paredes, porque eso ya fue resuelto por el que diseña casas. Solo se preocupa por tomar las casas ya terminadas y acoplarlas de manera que se cumplan ciertos requisitos como el acceso por medio de vías (calles, tuberías, cables...) a todas las casas, distancias máximas y detalles similares. De otra manera, el problema sería demasiado complejo para ser abordado. Por ejemplo, si al acercarse dos casas hubiera que cambiar el tipo de ladrillo, o si al seleccionar el material de las vigas hubiera que preguntarse para qué tamaño de ciudad. Romper un problema en partes jerárquicas es la manera ingenieril de evitar la combinatoria de posibilidades, imposibles de analizar una a una en la práctica.

Sin embargo, la vida no trata de minimizar la complejidad de forma tan estricta. Incluso cuando en seres vivos se forman subsistemas (átomos, macromoléculas, células, órganos...), puede haber fuertes interacciones entre niveles distantes: la propagación de un impulso nervioso de extremo a extremo de un ser vivo va a depender de condiciones que se dan a nivel atómico o molecular (concentraciones de Na, K, Mg...). El estado de buen o mal humor de una persona puede depender de concentraciones de macromoléculas neurotransmisoras en su cerebro. Y la reacción adecuada o inadecuada

del sistema inmune de una persona frente a un virus puede depender de su estado de ánimo. Hay interdependencias no jerárquicas.

Esto se debe a que la evolución trabaja como un *bricoleur*⁴⁸ (Francois, 1977) que aprovecha ingenua e ingeniosamente las oportunidades que se presenten, aun cuando ello resulte en diseños complicados. Un ingeniero tiene mucho cuidado en evitar esos diseños porque:

- Es muy difícil analizar matemáticamente el resultado.
- Es muy difícil realizar verificaciones y pruebas sobre sistemas altamente acoplados. Un sistema de dos estados con N partes internas requiere 2^N verificaciones. Mientras que si las N partes podemos separarlas en N/M grupos independientes de M elementos cada uno, entonces solo se requieren $2^{MN/M}$ verificaciones, lo cual es bastante menor. Por ejemplo, para $N=1000$ y $M=10$, entonces $2^N \approx 10^{300}$ mientras que $2^{MN/M} \approx 10^5$.
- Puede llevar a callejones sin salida, donde el diseño no pueda ser modificado buscando mejoras, sin destruir por completo otras características vitales del sistema. Por ejemplo, en biología, el nervio laríngeo apareció en los peces uniendo el nervio vago, que sale del tallo cerebral, con lo que luego sería la laringe. Podría haberlo hecho de dos formas distintas, por encima o por debajo de la vena aorta y, para aquellos peces daba igual. Por azar, lo hizo por debajo. Esa “decisión equivocada” la arrastramos los mamíferos, pues conforme el cuello se estiró, el nervio laríngeo tuvo que hacerlo también, bajando hasta el pecho, pasando por debajo de la aorta y volviendo a subir hacia el cuello. En el caso de los humanos son 15 centímetros de más, mientras que, en el caso de la jirafa, el tonto recorrido del nervio es de 5 metros. Llega un momento donde no se puede estirar más, pues las señales llegarían con mucho retraso.

La vida no sabe nada de esto y, efectivamente, puede meterse en callejones sin salida. Además, la vida no necesita analizar para diseñar, y las pruebas no siguen ningún procedimiento formal sino práctico: simplemente prueba masivamente los nuevos diseños y selecciona evolutivamente a los mejores.

Por cierto: un automóvil antiguo es uno de los peores sistemas diseñados por un ingeniero. La interacción entre las partes es muy alta, lo cual con-

48 Un *bricoleur* es una persona que resuelve problemas con muy poca planeación pero con mucho ingenio, usando de forma oportunista cualquier pieza o herramienta que tenga a mano, así sea de manera distinta para la que fue diseñada. Actualmente son muy populares los almacenes para este tipo de personas, donde venden herramientas y materiales, bajo el lema “hágalo usted mismo”.

lleva a un ahorro en materiales pero a la vez se hace muy difícil predecir la consecuencia de problemas aparentemente triviales, o de poder averiguar que pieza falló, dado un conjunto de síntomas. Por ejemplo, si el motor se apaga, ello también produce un fallo en los frenos, dado que la compresión del motor es la fuerza que actúa sobre ellos. Esto no ocurriría si la fuerza de frenado procediera de un sistema aparte al motor de tracción. Sin embargo, esto a su vez sería más caro. Si dejamos la radio conectada toda la noche, a la mañana siguiente las luces no funcionan y el carro no arranca, debido a que los tres subsistemas comparten la misma batería descargada. Un amortiguador malo no solo produce más vibraciones, sino que también afecta la estabilidad en las curvas e incluso el tiempo de vida de las llantas. Y si se enciende el aire acondicionado se merma la potencia del motor. Etcétera. Es un sistema altamente acoplado, diseñado así para reducir costos. En los automóviles modernos esos problemas tienden a desaparecer porque se hace una mejor ingeniería, desacoplando subsistemas.

VIDA ES REPRODUCCIÓN

A la reproducción también se le puede llamar replicación o autocopiado. Dado que este es el proceso más complejo que interviene en la evolución, vamos a estudiarlo con más detalle. En el capítulo sobre autómatas celulares del libro anterior ya se ha mostrado que se necesitan 2×10^5 bits de complejidad (Figura 60) para lograr la reproducción. Esta es una cota superior, como todas las medidas de complejidad, y es de esperar que se logre reducir usando mejores modelos, pues es un número demasiado alto para alcanzarse en poco tiempo con procesos al azar. Hay que tener en cuenta que von Neumann construyó su modelo de replicación usando un autómata celular de 2 dimensiones y sin utilizar computación completa. El espacio bidimensional tiene demasiadas restricciones que desaparecen en 3 dimensiones (ver el problema 13). Y es muy probable que emerja computación completa, lo que nos da una potencia de trabajo extra. De modo que aunando estas dos cosas, espacios tridimensionales y computación completa, es casi seguro que se logre rebajar esa cota sustancialmente. Sin embargo, conseguir reproducción es realmente difícil y prueba de ello es que en nuestro planeta parece que solo ha ocurrido dos veces: con el ADN y con las arcillas.

Otra forma de explorar la autocopia es partiendo de un sistema suficientemente complejo, como un computador tradicional con lenguaje ensamblador, o una máquina virtual con un lenguaje con menos instrucciones, pero orientadas a la labor de copiado. Dado que la computación completa requiere pocos bits de complejidad, parece razonable esperar que la repro-

ducción sea solo un poco más compleja. Pero no hay estudios sistemáticos sobre el tema. Sí hay algunos particulares como es el caso de *Tierra* (que veremos enseguida) y de *Core Wars*, que sigue la misma idea pero como juego de competición entre programadores. Aquí se trabajaba en ambientes computacionales virtuales, completamente controlados, para evitar que estos programas se propagasen a otros computadores. Pero siguiendo estas ideas surgieron los famosos e infames virus de computador actuales, donde lo principal es que pueden reproducirse saltando de un computador a otro por medio de Internet, memorias extraíbles o similares.

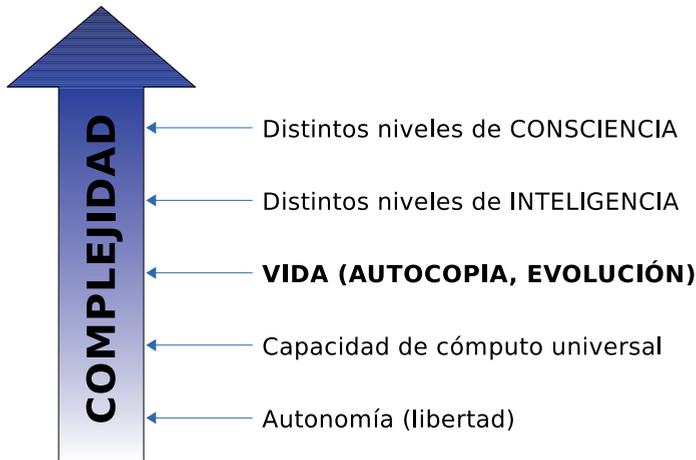


Figura 60. Se requiere 2×10^5 bits de complejidad para lograr la autocopía

Un ejemplo muy interesante de reproducción lo vemos en el robot de 4 cubos iguales (Steele, 2005), del profesor Hod Lipson, que es capaz de sacar una copia de sí mismo. En el video (Skitterbot, 2009) podemos ver cómo lo hace. Mis estudiantes siempre me reclaman que hay trampa, pues parte de piezas complejas ya construidas que se le colocan al lado para que las use. Pero no es tanta trampa si pensamos que nosotros comemos proteínas fabricadas por otros seres vivos. Nadie se alimenta de tierra. Es solo una cuestión de definir cuál es el nivel de partida.

La utilidad de poder hacer copias nadie la pone en duda: los electrones son copia unos de otros⁴⁹. Los ingenieros usan continuamente “copiar y pe-

⁴⁹ John Wheeler se preguntaba por qué los electrones son todos idénticos y ofreció como posible explicación que se trataba de un solo electrón, yendo y viniendo en el tiempo. Esta explicación fue divulgada por su alumno Richard Feynmann durante la aceptación del Premio Nobel de Física de 1965. La idea es que cuando un electrón choca con un positrón se aniquilan ambos y generan

gar”, no solo los informáticos⁵⁰. Es la operación básica más potente que hay. A diario hay que sacar copias de documentos, de planos, el destornillador que tengo en mi casa existe también en millones de otros hogares y lo mismo se puede decir de cualquier herramienta, *gadget*, libro o película. La humanidad en general prospera gracias a que copiamos⁵¹ e incluso mejoramos (en cierto modo esos son los errores de copia) las ideas e inventos de otros. Podríamos decir que es la humanidad quién es inteligente, y no tanto los humanos individualmente considerados, y de ello se hablará en el capítulo de inteligencia colectiva.

Problema 13: Comunicaciones en 2D

Tenemos 3 emisores de datos {A, B, C} que deben conectarse a 3 receptores de datos {A', B', C'} sin que se haya cortocircuitos entre cables (Figura 61-a). La solución la podemos ver en la figura 61-b. Ahora tenemos el mismo problema pero hemos movido de sitio dos receptores (Figura 61-c). Encontrar la nueva solución no es trivial. ¿Quieres intentarlo?

(a)
(b)
(c)

Figura 61. Cables en 2D

un fotón. Ello también puede interpretarse como un electrón, de carga negativa, que avanza en el tiempo, interactúa con un fotón y rebota hacia atrás en el tiempo con carga contraria (a lo que llamamos positrón). Luego ese positrón interactúa con otro fotón y vuelve a saltar hacia adelante en el tiempo, con carga negativa. Ver figura 62.

- 50 A mis estudiantes siempre les digo que si hay algo ya hecho y que funcione, ¡úsenlo!, dando el debido crédito a los autores. Y que el único ambiente donde no es razonable usar “copiar y pegar” es en el educativo, porque si los profesores lo permitiéramos, no habría forma de saber si los estudiantes han aprendido algo o no.
- 51 Hay un nuevo movimiento de opinión, que suscribo completamente, acerca de lo perjudicial que comienzan a ser las patentes y las protecciones de los derechos de autor. En el siglo XIX eran mecanismos importantes para conseguir financiación y acelerar el progreso de la humanidad. En el siglo XXI están frenando ese progreso; y la financiación puede conseguirse por otras vías, como demuestran los movimientos “open” y “free”: *freeware*, *freehardware*, *open robotics*, etc. Copiar un diseño, una idea, una película, un libro, no para beneficio económico personal, sino para usarlo, aprender, mejorarlo, etc. (dando los debidos créditos al autor) no debe considerarse una actividad delictiva sino la forma natural de funcionamiento de los colectivos.

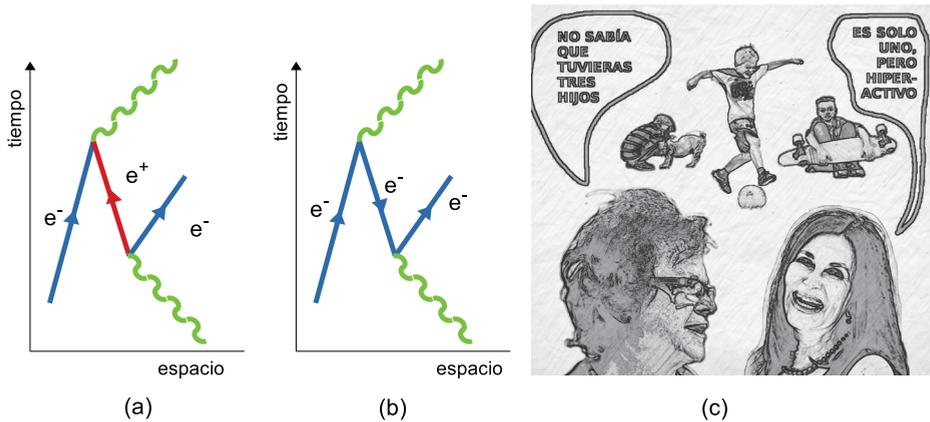


Figura 62. a) Dos electrones y un positrón moviéndose hacia adelante en el tiempo; b) un solo electrón moviéndose hacia adelante y hacia atrás en el tiempo; c) un solo niño

En abstracto la reproducción puede ocurrir principalmente de tres formas:

- El organismo desarrolla una parte de él dedicada a la reproducción. Esa parte especializada es capaz de regenerar todo el organismo. Ejemplos:
 - Una célula eucariota se reproduce dividiéndose en dos, pero el proceso está gobernado principalmente por el núcleo.
 - Un hormiguero saca copias de sus hormigas y eventualmente llegará a dividirse en dos colonias, siendo que el proceso reproductivo está centralizado en la hormiga reina.
 - Un animal o una planta tiene hijos, y el proceso de reproducción ocurre gracias a sus órganos sexuales.
- Cada parte del organismo se reproduce por separado, y los hijos se vuelven a juntar (respondiendo a un mecanismo genético o social) para producir otro organismo. Ejemplos:
 - Las empresas utilizan cualquier persona que pase por allí, para reproducirse generando una sucursal. Solamente se revisan sus funcionalidades (hoja de vida, títulos y experiencia). Al respecto, los estándares de calidad ISO que tratan de hacerse uniformes internacionalmente apuntan a ello: facilitar que un puesto de trabajo sea ocupado por cualquier persona que cumpla ciertos requisitos. Los trabajadores se reproducen y sus hijos formarán parte de otras empresas, por la presión social de tener que buscar trabajo para sobrevivir.
 - El ADN utiliza cualquier molécula que pase por allí, de tipo A, T, G, C para reproducirse. Solo busca la funcionalidad adecuada, en este caso, que sea complementaria de la otra hebra de ADN.

- El animal acuático llamado *Nanomia* es realmente una colonia de varios animales (Smith, 2001, p. 206). Este puede parecer un ejemplo excepcional, pero no lo es tanto. Incluso los seres humanos estamos formados por un porcentaje de células muy alto que no tiene nada que ver con nuestro genoma pero que, si las matamos, morimos nosotros después. Son bacterias que están principalmente en el intestino, pero también en la piel y los vasos sanguíneos, y hay tantas como células humanas (Sender *et ál.*, 2016).
- La maquinaria reproductiva es externa al organismo. El organismo convence o manipula al propietario para que la use para reproducirle a él. Ejemplos:
 - Los virus, que invaden una célula y la manipulan para usar su sistema reproductivo para su propio beneficio.
 - Los memes, que manipulan cerebros humanos para lograr copiarse de unos a otros.
 - Todas las variantes de reproducción por ingeniería genética, fuera del útero o con madre de alquiler.
 - Los objetos de plástico y otros materiales, que se reproducen usando impresoras 3D.
 - En el problema de ingenio “Campeón en reproducción” se muestra otro ejemplo muy sorprendente.

A su vez se puede hacer una taxonomía teniendo en cuenta el papel que juega el grupo respecto al individuo cuando ocurre la reproducción:

- Si el individuo nace dentro del grupo (como las macromoléculas dentro de las células y las personas dentro un país) o fuera y luego se incorpora a él (como los trabajadores de una empresa y los futbolistas en un club).
- Si el individuo puede cambiar de grupo (como los trabajadores de una empresa, las personas de país o los aminoácidos de un cuerpo cuando son devorados por otro) o no puede (como los organelos de una célula y las células de un cuerpo a otro).
- Si el individuo se reproduce a la vez que el grupo (como los organelos en células) o independientemente (como los trabajadores de una empresa).
- Si al morir el grupo mueren los individuos que lo conforman (como los organelos en células y las entidades oficiales de un país) o sobreviven (como los trabajadores de una empresa y los aminoácidos de una proteína).

En un nivel emergente N se da por hecho que existe la infraestructura del nivel anterior $N-1$. Por ejemplo, las empresas cuentan con la existencia de trabajadores, los carnívoros cuentan con la existencia de herbívoros, las plantas cuentan con la existencia de agua y minerales y aire, y las moléculas cuentan con la existencia de átomos.

VIDA ES EVOLUCIÓN

Vemos entonces que la vida, al igual que la realidad, la inteligencia, etc., es un concepto difuso. Aun así, hay una característica muy importante presente en todos los seres vivos: cuando la complejidad de un sistema es tan alta que puede sacar copias de sí mismo (reproducirse) entonces emerge un nuevo fenómeno, la evolución.

La teoría de la evolución fue propuesta por Charles Darwin en 1859 en el ámbito de la biología. Pero lo que seguramente no podría imaginar en aquella época es que la evolución es algo más general: es un algoritmo. Además, es uno de los algoritmos más simples y potentes que hay, aunque como contrapartida, es lento. El que mejor lo entendió fue Lawrence Fogel, quien en 1966 enunció los cuatro requerimientos para que haya evolución, independientemente del sustrato (biológico, químico, mecánico, electrónico, de *software*, económico, de ideas, etc.). Los podemos ver en el recuadro 5.

Recuadro 5: El algoritmo de la evolución

Para que haya evolución se requieren cuatro cosas:

- una población de entes...
- que saquen copias de sí mismos, es decir, que se reproduzcan sexual o asexualmente o de cualquier otra manera tal que los hijos se parezcan mucho a los padres...
- con errores en las copias, es decir, que aunque los hijos sean muy parecidos a los padres, no sean idénticos...
- y que estén sometidos a una presión selectiva. Esto significa que no todos los entes sacan copias de sí mismos en la misma cantidad. Cuanto mejor resuelvan un cierto problema (en biología, sobrevivir y encontrar pareja) más hijos tendrán.

Para Darwin los entes eran los seres vivos. Pero no es necesario restringirnos a la biología. Estos entes realmente pueden ser cualquier cosa: mecanismos, circuitos electrónicos, compuestos químicos, edificios o robots. Y, en computación, estructuras de datos, autómatas o programas.

La parte más difícil del algoritmo es conseguir que los entes tengan capacidad de sacar copias de sí mismos. Actualmente los edificios mencionados no tienen esa capacidad, pero si algún día la tuvieran y se dieran las otras

tres condiciones, la evolución aparecería de inmediato. Es más, sería imparable. No es trivial hacer desaparecer un proceso evolutivo ni frenarlo, y habitualmente es imposible. Por eso tenemos tantos problemas de salud con los virus y las bacterias.

El etólogo Richard Dawkins, en los dos primeros capítulos de su libro *El Gen Egoísta* explica muy bien cómo funciona este algoritmo. Recomiendo la completa lectura de este libro, pues tiene ejemplos sorprendentes e ilustrativos de la evolución, aunque limitados al ámbito biológico. A continuación presentaremos un resumen con lo esencial para comprender el algoritmo.

Para ello comenzaremos con la pregunta que abre ese libro: ¿qué cosas son las que perduran? Si visitamos un planeta y luego retornamos a él unos miles o incluso millones de años después, ¿qué cosas seguirán allí? Obviamente, en primer lugar, las cosas más estables, como montañas y mares. Y en segundo lugar, las cosas que se autorrepliquen, pues si un objeto saca copias de sí mismo lo encontraremos con facilidad innumerables veces (la complejidad que se requiere para que haya autorreplicación la analizamos en el capítulo “Autómatas Celulares” del primer libro). Es decir, conforme aumenta la complejidad de un objeto es menos probable encontrarlo espontáneamente (Figura 63). Piense en lo improbable que debe ser encontrarse un hacha de piedra en la superficie de la Luna. Hay un montón de objetos muy complejos que es prácticamente imposible que existan espontáneamente. Pero después de este “desierto existencial”, aparecen objetos mucho más complejos cuya probabilidad de encontrarlos es prácticamente uno, si se dan las condiciones adecuadas. Son los objetos autorreplicantes, los capaces de sacar copias de sí mismos.

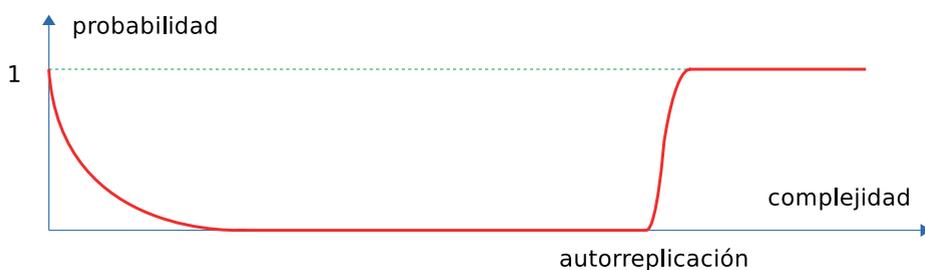


Figura 63. Umbral de autorreplicación

Mientras estamos en esa zona desértica, la combinatoria es el único fenómeno que está explorando posibles estructuras para aumentar la complejidad. Es una búsqueda completamente al azar, sin ningún tipo de guía. Por eso es tan difícil llegar a la autorreplicación. Una vez que se alcanza la autorreplicación, si es que se alcanza, aparece también la evolución que

incluye un bucle de realimentación positiva: cuantos más entes haya que se reproduzcan, más entes habrá. Y un bucle de realimentación negativa: la presión selectiva dificulta la reproducción a los entes menos adaptados al medio, de modo que busca óptimos. Y si te alejas de esos óptimos te va a ir mal. A partir de allí, gracias a estos dos bucles de realimentación, la complejidad se mantiene e incluso crece rápidamente, dando lugar a la inteligencia y a la consciencia.

Todo esto es un resumen rápido de lo que nos espera, y de momento merece la pena situarse en el umbral donde aparece la autorreplicación, para analizarla más despacio y entender las consecuencias. Supongamos entonces que ya tenemos autorreplicación y que, para ponernos en el escenario biológico de Dawkins, existe una molécula capaz de realizar esa tarea en el caldo primitivo en los orígenes de la Tierra. Dawkins discute los mecanismos que pudo emplear esa molécula para lograr la autoduplicación, pero eso no nos interesa aquí y, de hecho, han aparecido otras propuestas distintas⁵².

Como decíamos, partimos de una molécula A capaz de sacar copias de sí misma usando los elementos químicos que tiene alrededor (Figura 64-a). Inevitablemente se producirán algunos errores en las copias (Figura 64-b), por ejemplo porque para una reacción química se requiere un elemento que está escaseando pero a cambio existe otro con propiedades parecidas (esto ocurre con los elementos que están en la misma columna de la tabla periódica, como el sodio y el potasio, que son intercambiables en muchas reacciones, aunque el resultado final no es exactamente igual). Por ello en algún momento aparecerán variantes de esa molécula algunas de las cuales seguirán teniendo la capacidad de autocopiado, como A_1 , A_2 , etc.

Es obvio que el autocopiado es un proceso de realimentación positiva que produce un crecimiento exponencial. Y las exponenciales tienen varios parámetros. Por ejemplo, la molécula A saca dos copias de sí misma cada cierto tiempo, mientras que la molécula A_1 solo saca una copia de sí misma, aunque lo hace más rápidamente. La molécula A_2 es más lenta y la A_3 es más prolífica.

52 Ver Patel, Percivalle, Ritson, Duffy y Sutherland (2015), donde se explica que el ácido cianhídrico puede generar los precursores de los ribonucleótidos, los ácidos y los lípidos necesarios para llegar al “mundo del ARN”. A su vez, el ácido cianhídrico procede de la desestabilización de las órbitas de los asteroides por las interacciones de Júpiter y Saturno, que produjeron el último gran bombardeo sobre la Tierra. El carbono de los meteoritos reaccionó con el nitrógeno de la Tierra para generar el ácido cianhídrico.

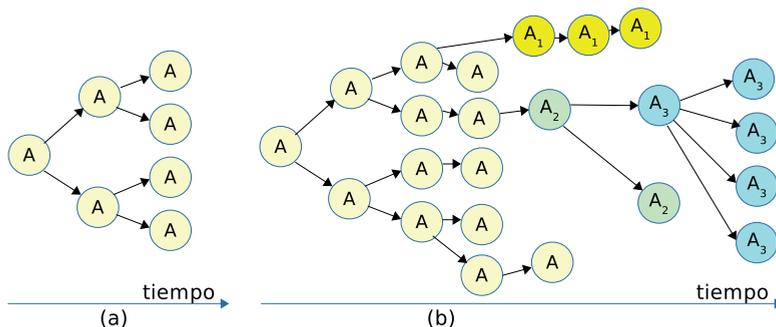


Figura 64. Autorreplicación: (a) exacta y (b) con mutaciones

Si hay moléculas autorreplicantes similares a estas en un charco de agua con minerales, hay varios factores que influyen en lo que voy a encontrar cuando regrese unos años después:

- **La longevidad.** Cuanto más estable sea la molécula, más tiempo tendrá para sacar copias de sí misma.
- **Lo prolífica que sea.** Es decir, la cantidad de copias que saque por unidad de tiempo.
- **Lo exacta que sea.** Si las copias son imperfectas, las originales serán más difíciles de encontrar.
- **Lo agresiva que sea.** Conforme los minerales del charco se vayan agotando, quizás alguna de esas moléculas descubra, por mutación, que las otras moléculas son también una fuente de esos minerales. De este modo aparecerán las primeras moléculas protocarnívoras, capaces de descomponer otras para reutilizar sus componentes. Ello tendría una doble ventaja: por un lado, conseguir minerales para sí misma; por otro, disminuir la competencia de las otras moléculas.
- **Las protecciones que desarrolle.** Las moléculas capaces de protegerse de esas protocarnívoras tendrán ventajas frente a las que no puedan hacerlo. Ello puede traducirse en crear barreras como, por ejemplo, membranas celulares.

Esto es una guerra que, en evolución y en teoría de juegos, se llama “carrera de armamentos” o “carrera de la Reina Roja”⁵³, cuyo único objetivo es sacar copias de sí mismo. Con el paso de eones se desarrollaron estrategias muy sofisticadas como la encapsulación de estas moléculas re-

53 En “Alicia a través del espejo”, Lewis Carroll en una parte del cuento Alicia y la Reina Roja de la baraja recorren un camino que se mueve hacia atrás cada vez que ellas da un paso hacia adelante, por lo que tienen que correr mucho para poder mantenerse en el mismo sitio.

plicadoras (que hoy llamamos genes) dentro de torpes robots controlados por ellas. Dawkins los llama “máquinas de supervivencia” y nos llena de asombro cuando comprendemos que son los vegetales, animales e incluso nosotros, los humanos, y que siguen manteniendo el mismo y único fin: su replicación. El ambiente cada vez más complejo ha hecho que surjan, por mutaciones, características nuevas como cerebros que se comportan con inteligencia y con consciencia, que ayudan a estos robots a tomar decisiones rápidas orientadas a la supervivencia y reproducción de los genes que los fabricaron. Pero ello tiene un costo: la inteligencia va asociada a un cierto grado de libertad, por lo que los cerebros de las máquinas de supervivencia no tienen por qué seguir los dictados de los genes, o no siempre. La evolución de los genes es lenta y no pueden controlar por completo las decisiones de los cerebros, que son muchísimo más rápidas. Los genes van perdiendo libertad mientras que la van ganando los cerebros⁵⁴.

Además los cerebros, usando herramientas físicas y culturales, cumplen rápidamente su misión de supervivencia y de óptimo de reproducción (no tiene sentido reproducirse más allá del óptimo, tanto que las crías carezcan de alimento), por lo que les queda tiempo libre en el que siguen pensando y haciendo cosas que habitualmente son neutrales a la supervivencia y reproducción. Pueden pintar, cantar, resolver acertijos matemáticos y otras cosas raras. Eventualmente muchas de esas cosas también ayudan a sacar copias de sí mismos, pero a largo plazo y como resultado inesperado, pues los genes solo controlan lo inmediato.

La longevidad genera un crecimiento lineal de copias, mientras que ser más prolífico implica un crecimiento exponencial, de modo que cuando un animal tiene que decidir apostar más o menos recursos en una u otra cosa, la evolución presiona hacia tener más hijos. Esa es otra de las razones por las que la diferenciación sexual también lleva aparejado el envejecimiento y la muerte: un crecimiento exponencial siempre gana a uno lineal. Al respecto se puede ver también el ya presentado problema 11.

Muchas veces se ha malinterpretado a Dawkins diciendo que su exposición de lo que es la evolución a nivel genético nos lleva a un determinismo en el comportamiento. Dawkins no dice esto, y si hay libertad o no en nuestras acciones no depende de nuestros genes. Al menos en animales supe-

54 La libertad inevitablemente se irá concentrando en un solo nivel. Entendamos la razón con un ejemplo: si vas conduciendo una bicicleta, tú tienes libertad para decidir hacia dónde quieres ir, y para ello manipulas los controles de la bici (pedales, freno...) que obedece ciegamente. Pero si la bici tuviera libertad (por ejemplo, decidiendo caprichosamente cuando quiere girar a la izquierda) entonces tú ya no la tienes.

riores. El tema ya se mencionó en el capítulo “Libertad”, pero lo que aquí queremos aclarar es que los genes construyen los cuerpos y sus cerebros de manera más o menos determinista (aunque el ambiente también influye mucho en ambas cosas). Sin embargo, lo que los cerebros decidan no está determinado por los genes, salvo en casos de enfermedades muy graves. Entre otras cosas, en el genoma humano no hay información suficiente para decidir dónde van a estar las neuronas cerebrales y con qué otras neuronas van a tener conexiones. En el comportamiento de un individuo influyen sus genes (especialmente en lo que tiene que ver con instintos de supervivencia y reproducción), las hormonas (que a su vez dependen de los genes, pero sobre todo dependen de las interacciones sociales, el ambiente, la comida, la contaminación del entorno...), la sociedad (los padres, los pares, los educadores...) y hay una parte que no se sabe de dónde procede, probablemente de algún acontecimiento aislado y significativo en la infancia, o simplemente el azar, por lo que queda algo de margen para actuar en libertad.

En *El gen egoísta* Dawkins prosigue argumentando que en un ambiente altamente competitivo es inevitable que los genes lo sean, y que las máquinas de supervivencia que generan también sean así. Para ello primero define “altruismo” como la actitud de un individuo para ayudar a otro incluso a costa de su propia supervivencia, así sea en pequeña cantidad o probabilísticamente. En este sentido, un animal que arriesgue su vida para salvar a otro, es altruista. Y una persona rica que regala comida a otra no lo es, puesto que con esa acción no se pone en riesgo ni disminuye su probabilidad de supervivencia. El libro continúa mostrando muchos ejemplos de egoísmo entre los animales, pues eso es lo que cabe esperar, que sigan el dictado de sus genes. Pero también muestra casos de altruismo y advierte que, dado que son una anomalía no predicha por la teoría, hay que analizarlos muy bien para entender de qué se trata. Al final resulta que todas las acciones son solo aparentemente altruistas, son un egoísmo disfrazado.

Dawkins argumenta certeramente que es imposible que exista verdadero altruismo dirigido por los genes. Si tenemos un organismo con un gen que controla el comportamiento, de dos alelos, altruista y egoísta, el organismo que porte el gen altruista va a ayudar a la supervivencia o reproducción de los demás organismos, a expensas de él mismo, de modo que el organismo que porte la variante egoísta se va a encontrar rápidamente en mayor proporción en la población.



Fuente: CC 2.0, Marty Stone (Flickr). Disponible en: <https://goo.gl/bjSe9a>

Personaje 6

Richard Dawkins (1941-)

Richard Dawkins es un biólogo evolutivo, etólogo y un excelente divulgador científico. En su primer libro, *El gen egoísta*, definió lo que sería toda su carrera como divulgador. Ahí proponía una nueva forma de ver la evolución, centrada en los genes. Mucha gente no ha leído el libro y se queda con la falsa impresión de que los genes deben ser malos porque son egoístas, o algo así. No seas tú uno de ellos. Muy por el contrario, el altruismo en los individuos sofisticados emerge como consecuencia del egoísmo de sus genes. En este libro crea el concepto de *meme*, como unidad replicante de información, que se ve ahora tanto en Internet con significados menos claros. Otros de sus libros son *El fenotipo extendido*, *El relojero ciego*, *Escalando el monte improbable*, *Evolución: el mayor espectáculo sobre la Tierra* y *La magia de la realidad*. ¿Cómo sabemos lo que realmente es verdad? También es un firme defensor del método científico que se opone a las religiones, los esoterismos, las medicinas alternativas y las pseudociencias. Es uno de los más conocidos *brights*, o “iluminados, brillantes”, que tienen una concepción naturalista del mundo en contraposición a la supernatural (creacionismo). Ver <https://www.the-brights.net/>

Lo único que puede existir es altruismo para los organismos que compartan muchos genes, es decir, dentro de las familias⁵⁵, como cuando los padres protegen a los hijos. El ejemplo más obvio es el de muchos tipos de hormigas donde, por la forma de reproducirse, las hermanas tienen casi todos los genes idénticos. Por ello a una hormiga le da igual reproducirse ella misma o dejar que la reina (la madre de todas) lo haga, pues genéticamente hablando, el resultado va a ser el mismo. Esta es la razón por la que las hormigas no se reproducen individualmente sino que todas ayudan a que la reina lo haga. La reina es algo así como el órgano sexual del hormiguero. De la misma manera las hormigas están dispuestas a dar la vida defendiendo el hormiguero, porque los genes que sobrevivan serán los mismos suyos.

Sin embargo, el altruismo también puede existir debido a otras razones distintas a los genes, por ejemplo culturales que enseguida pasaremos a ver.

55 Como chiste, el biólogo Haldane decía que daría la vida por 2 hermanos u 8 primos (porque en promedio no se perderían genes).

La evolución dirigida por los genes no es solo un modelo teórico⁵⁶. En el 2009 Dawkins, quien además de ser un excelente científico también es un prolífico escritor, publicó el libro *Evolución: el mayor espectáculo sobre la Tierra* donde muestra con toda certeza que la evolución es un hecho, para que los escépticos pierdan toda capacidad de argumentación en contra. Aparte de miles de evidencias indirectas, también hay experimentos directos que se realizan con moscas o con bacterias, aprovechando que su ciclo de vida es más corto, con lo que es posible obtener cientos de generaciones en cuestión de semanas.

Uno de los experimentos más interesantes es el del bacteriólogo Richard Lenski y su equipo, que comenzó en su laboratorio de la universidad del Estado de Michigan y sigue en marcha actualmente, consistente en un cultivo de bacterias *E. coli* repartidas en doce matraces aislados, y alimentadas por una pequeña cantidad de azúcar, citrato y otros químicos, de los cuales solo el azúcar es alimento para ellas. Este azúcar les dura poco, apenas les da tiempo a reproducirse varias veces y al final del día pasan hambre. Cada 24 horas se extrae una muestra de las bacterias que sobrevivieron y se reintroducen en otros frascos, dándoles la misma dosis de alimento. El frasco original se congela para poder analizarlo posteriormente. De esta manera mantienen doce líneas evolutivas simultáneamente que, al día de hoy han producido alrededor de 50 000 generaciones de bacterias. Inevitablemente aparecen mutaciones, algunas de las cuales usan el azúcar de forma más eficiente, con lo cual terminan imponiéndose numéricamente a las demás. Eso hace que las bacterias aumenten progresivamente de tamaño, y como las mutaciones dependen del azar, cada una de las doce líneas evolutivas siguió un camino distinto. Sin embargo, en la generación 30 000 apareció algo radicalmente nuevo en una de las doce líneas: las bacterias habían aprendido a usar el citrato como comida. Investigando cómo lo lograron, por qué demoraron tanto, y por qué solo una de las doce líneas lo consiguió, se dieron cuenta que en la generación 20 000 apareció una mutación aparentemente neutral, pero que con la mu-

56 Muchas veces se dice despectivamente que la evolución es solo una teoría. Efectivamente, es la “teoría de la evolución”, tan confirmada como la “teoría de la relatividad”, la “teoría cuántica”, la “teoría electromagnética”, etc. Quizás la confusión prospera porque en el lenguaje común, “teoría” significa algo que debe comprobarse. Mientras que en lenguaje científico una “teoría” es un cuerpo de conocimiento sin contradicciones internas, que ha superado muchas pruebas y que es ampliamente aceptado por la comunidad científica. Cuando todavía no ha superado pruebas se le llama “hipótesis” o “conjetura”. Un cuerpo de conocimiento maduro alcanza el estatus de “teoría”, que es el máximo nivel que puede alcanzar. Quizás otra fuente de confusión es que a las primeras teorías se las llamaba de forma arrogante “leyes” (ley de la gravedad de Newton o ley de Snell) pero realmente eran “teorías” (teoría de la gravedad de Newton) o simples fórmulas más o menos exactas (fórmula de la difracción de Snell).

tación de la generación 30 000 combinadas, lograban el nuevo fenómeno. O sea, descubrieron que los cambios suaves se logran con mutaciones aisladas, y los cambios bruscos con mutaciones dobles, cuya probabilidad de ocurrir es bastante más baja. De modo que es un experimento bonito que muestra la evolución en marcha, pero además reconcilia las dos versiones de la evolución: continua (Darwin y Dawkins) y saltacionista (Jay Gould y Niles Eldredge), a la vez que lo hace con la microevolución (optimización progresiva de características) y la macroevolución (aparición de nuevas especies).

Más recientemente, en 2016 el profesor Michael Baym y sus colaboradores realizaron otro experimento con bacterias en una placa de Petri gigante dividida en 9 zonas. En las dos zonas extremas (1 y 9, de la figura 65) no había nada inicialmente. En las dos zonas siguientes (2 y 8) se dispuso un antibiótico en una dosis muy leve. En las dos siguientes (3 y 7) pusieron el mismo antibiótico pero a una concentración 10 veces mayor, en las dos siguientes (4 y 6) era 100 veces mayor y en la central (5) era 1000 veces mayor. Luego se colocó una cepa de bacterias en los extremos donde crecieron sin problemas hasta tropezar con el antibiótico (zonas 2 y 8) que les impidió seguir creciendo. Pero al cabo de algún tiempo, una mutación afortunada logró producir una nueva bacteria resistente al antibiótico, y ello ocurrió en ambas zonas. Las bacterias invadieron las zonas 2 y 8 pero quedaron frenadas al tocar el borde de las zonas 3 y 7. Y volvió a ocurrir lo mismo: en poco tiempo aparecieron mutaciones que aumentaron la resistencia a esa concentración del antibiótico. Al cabo de apenas 10 días, también lograron conquistar la zona central. Los profesores usaron este experimento para prevenirnos contra el mal uso de los antibióticos: nunca hay que usarlos alegremente para cualquier enfermedad (por ejemplo, es inútil usarlos contra virus), siempre hay que tratar de usar el antibiótico más fuerte posible para el tipo de bacteria de que se trate (y por ello primero hay que identificar el tipo de bacteria) y siempre hay que tomar toda la dosis que nos prescriba el médico (es un grave error dejar de tomarla en el momento en que nos sintamos bien). Cualquiera de estas cosas que hagamos mal va a producir cepas de bacterias cada vez más resistentes⁵⁷. De hecho ya se habla de superbacterias para las que ningún antibiótico resulta eficaz. Es recomendable ver también el video (Pesheva, 2016) para tener una idea clara de cómo se produce la evolución. Para vencer los antibióticos las bacterias encontraron muchas mutaciones y allí se puede ver el árbol evolutivo. Es interesante también que

57 Y ello no está exento de controversias pues parece que los propios médicos recetan mayores dosis de las debidas, creando el problema de que también se matan las bacterias amigas (Llewelyn, 2017) dejando el cuerpo más débil frente a futuras infecciones.

las bacterias más resistentes no son necesariamente las primeras en llegar al centro. Al centro llegan las más rápidas, y son seguidas por otras cepas a las que ya se les ha despejado el camino.

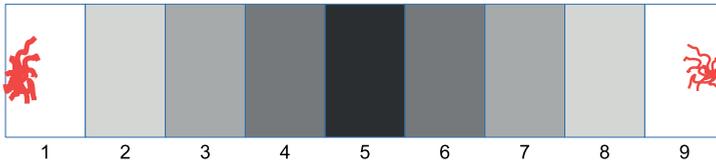


Figura 65. Experimento con bacterias y niveles progresivos de antibiótico

La evolución no suele ocurrir sola, sino que habría que hablar de coevolución: en este caso, las medicinas evolucionan (artificialmente) para ser cada vez más eficaces en matar organismos patógenos, pero estos a su vez evolucionan para ser resistentes a dichas medicinas⁵⁸.

No es difícil ver la evolución en situaciones cotidianas, si uno sabe qué buscar. Hace muchos años me cambiaron a una oficina un tanto inhóspita, con muchos mosquitos. Dados los problemas de salud que estos animales representan, comencé a eliminarlos aplastándolos con las manos. Fue muy fácil porque eran lentos y maté muchos, prácticamente todos. Prácticamente. ¿Prácticamente? Alguno se me escapó porque al cabo de unos días volví a encontrarme con muchos mosquitos, pero más rápidos. Volví a realizar la misma operación, pero para mi desgracia ellos volvieron a aparecer más adelante, y ahora, además, ya no volaban en línea recta, sino que realizaban al azar un rizo que volvía su vuelo impredecible y dificultaba su captura. Cuando me rendí, tenía la oficina llena de mosquitos veloces realizando vuelo acrobático. En este ejemplo tenemos una población de mosquitos que se reproducen. La variabilidad (mosquitos lentos, rápidos, con vuelo rectilíneo o en rizo) ya debería estar allí, en la población inicial, pues no creo que en tan poco tiempo pudieran darse mutaciones tan afortunadas. Y yo era la

58 No hay solución a este problema, pero sí puede retardarse poniendo en práctica las precauciones mencionadas. También podría hacerse una carrera de armamentos *in vitro* entre un grupo de patógenos enfrentados a sucesivas versiones cada vez más refinadas de medicamentos. Después de, digamos, cinco generaciones de patógenos distintos se podrían matar escrupulosamente todos (para que ninguno salga al mundo exterior) y vacunar a la gente con el cóctel de medicinas producidas en todas las generaciones. Un patógeno que ataque *in vivo* a una persona así vacunada moriría; si es capaz de producir una mutación afortunada, también moriría (porque *in vitro* ya ocurrió lo mismo); en el improbable caso de que logre producir una mutación doble también moriría por la misma razón. La probabilidad de que se produzca una mutación quintuple afortunada es bajísima (pero no cero), por lo que la humanidad quedará a salvo de ese patógeno durante muchísimo tiempo, pero no para siempre, y el día que ello ocurra el patógeno será superpoderoso.

presión selectiva. Mataba a los más lentos y predecibles, con lo cual permití que se reprodujeran los más rápidos e impredecibles.

Muchos años después, en el pequeño jardín de mi casa sembramos césped que quedó muy bonito, pero aparecieron malezas. Eran plantas con tallo alto y delgado y llenas de semillas. Lo que hice fue arrancarlas una a una. En semanas sucesivas aparecieron más, posiblemente porque había muchas semillas en el suelo, pero las fui arrancando metódicamente. Al cabo de un tiempo pensé que ya no había ninguna más y pasaron los días creyendo yo que era así. Sin embargo, un día al agacharme en el suelo me di cuenta que estaba completamente equivocado: había mucha maleza, como siempre, pero el tallo crecía casi paralelo al suelo con lo cual, desde lo alto, permanecía prácticamente invisible. De nuevo la presión selectiva era yo, eliminando las malezas que resaltaban porque crecían verticalmente, y dejando que se reprodujeran las que lo hacían horizontalmente. Es muy difícil detener un proceso evolutivo.

Uno de los trabajos pioneros en vida artificial se debe a Tom Ray. Este biólogo se estaba aburriendo en las selvas de Costa Rica tratando de ver en vivo y en directo la evolución, pero como habitualmente es demasiado lenta para detectarla así, decidió crear una simulación en el computador, a la que llamó "Tierra". Para ello definió lo que hoy llamaríamos una máquina virtual dotada de operaciones muy básicas y, usándolas, creó un programa que averiguaba su propio punto de inicio y de final, sacaba una copia en memoria de todo lo que hubiera entre medias, creaba con ello un nuevo hilo y lo activaba. Para evitar que la memoria se llenase, de vez en cuando mataba al azar unos cuantos hilos. Y también introdujo mutaciones al azar de vez en cuando sobre los hilos que estaban funcionando. Con lo primero tenía una población reproduciéndose, con lo segundo una presión selectiva y con lo tercero variaciones en las copias. Es decir, programó todos los ingredientes necesarios para que surgiera la evolución. Y eso es lo que ocurrió pues con asombro vio que en poco tiempo aparecieron espontáneamente muchos otros programas reproduciéndose. La sorpresa mayor vino cuando se dio cuenta que había algunos programas más cortos que el suyo, que se suponía que era el más corto posible. Al investigar su funcionamiento, vio que no tenían toda la funcionalidad de la autocopia sino que hacían uso de trozos de código de otros programas. Es decir, eran el equivalente a parásitos, y por ello lograban ser más cortos que los demás. De forma similar encontró casos de hiperparasitismo y de simbiosis. Esta es una prueba contundente de que la evolución funciona en un caso general y abstracto, como es el *software*, por lo cual es razonable esperar que también lo haga en un caso más específico, como el biológico.

La evolución es una realimentación positiva fuerte y difícil de detener una vez que se ha puesto en marcha. Al respecto, en el 2009 Rafael Moreno realizó su tesis de maestría en EVALAB creando una simulación de un sistema ecológico con predadores y presas moviéndose por una cuadrícula. Había también energía solar que llegaba periódicamente para hacer crecer las plantas en la base de la cadena alimenticia. Era un sistema abierto, pues le entraba energía del exterior, y cada ente tenía capacidad de reproducirse si se alimentaba lo suficiente. Lo que vimos en este sistema es que era muy difícil destruir la vida en él. Había catástrofes y grandes extinciones de vez en cuando, pero la vida siempre se recuperaba. La única forma que encontramos de acabar con toda la complejidad fue apagar el sol artificial durante bastante tiempo. Esto nos dice que la vida debe ser una propiedad muy común en todo el universo. Es bonito ver que en los últimos 15 años la ciencia ha pasado de rechazar esa posibilidad a aceptarla abiertamente, seguramente como consecuencia de que se han descubierto muchos exoplanetas, y varios de ellos con condiciones adecuadas para una vida similar a la terrestre. La NASA acaba de anunciar que la vida puede ser posible en Encélado (satélite de Saturno) además de en Europa (satélite de Júpiter). Incluso en mundos con tan poca temperatura como Plutón la NASA ha encontrado sistemas geológicos complejos. No se puede descartar la vida allí, como tampoco se puede descartar en Venus o incluso Mercurio, a pesar de que las condiciones son adversas, pues simultáneamente se han encontrado en la Tierra variantes de la vida un poco distintas a las tradicionales. No es obligatorio que la vida sea idéntica a la terrestre y podría estar basada en otros elementos químicos. Incluso aquí en la Tierra se han encontrado arqueas a muchos kilómetros de profundidad bajo el suelo, que no necesitan agua ni luz solar para vivir, sino que en su lugar usan monóxido de carbono e hidrógeno (Baker *et ál.*, 2016); también se han encontrado bacterias extremófilas en volcanes submarinos, a altas temperaturas y viviendo con sustancias químicas poco habituales, como la última encontrada en las Islas Canarias por Danovaro *et ál.* (2017); en ambientes muy fríos y salados, sin oxígeno (Murray *et ál.*, 2012); en un lago de California se encontró una bacteria que es resistente al venenoso arsénico, e incluso lo utiliza para sus propios fines (Erb *et ál.*, 2012); además, se sabe desde hace tiempo que muchos hongos, bacterias y arqueas pueden subir a la parte alta de la atmósfera, soportando bajas temperaturas, falta de oxígeno y fuerte radiación ultravioleta (Fulton *et ál.*, 1965), pero es que algunas bacterias aguantan bien en el espacio y ya se han colado en naves de la NASA, regresando vivos (Satomi *et ál.*, 2006) y es posible que hayan llegado así a Marte. La evolución logra que la vida sea muy flexible y adaptable a diversos ambientes.

Hay modelos teóricos de sistemas evolutivos prebióticos, donde por ejemplo se muestran pasos intermedios antes de llegar al ARN y ADN, como en Goldford *et ál.* (2017), donde se propone una química precursora de la vida que ni siquiera necesita fosfatos, que hoy día son imprescindibles.

Pero la evolución no se encuentra únicamente en biología. Dawkins propone otro sistema evolutivo donde la unidad de información son los memes. Un meme es simplemente una idea. Los memes luchan por reproducirse pero no pueden hacerlo por ellos mismos sino que tienen que seducir primero a un cerebro humano para que lo haga, contando la idea a otros humanos, escribiéndola en un libro o enviándola por *e-mail*. Vemos que los memes cumplen las cuatro condiciones para que haya evolución del recuadro 5. Por ejemplo, la ciencia es un proceso evolutivo porque:

- Hay una colección de memes, que son las ideas, conjeturas, hipótesis y teorías científicas.
- Que se reproducen por medio de libros, revistas y congresos de ciencia, usando como herramienta para ello el cerebro de los científicos.
- La reproducción no siempre es exacta porque hay errores experimentales (por ejemplo, los radioastrónomos de Bell Labs que descubrieron la radiación de fondo del universo, estaban buscando caca de pájaro⁵⁹), o los científicos, ingenieros y artistas proponen mejoras o combinan varias ideas para formar una nueva, como cuando en el antiguo Egipto solían construir tumbas en forma de edificio rectangular con los lados inclinados, llamadas *mastabas*; el emperador Zoser pidió a su arquitecto colocar una *mastaba* encima de otra y, repitiendo el proceso varias veces levantó algo nuevo, que hoy se conoce como pirámide.
- Y los memes están sometidos a una presión selectiva, dado que los científicos ponen a prueba las ideas en los laboratorios y ven cuál es la que se adecúa más a la realidad. Esa es la que va a ser más reproducida en revistas y congresos.

59 Al respecto, recomiendo leer *Eureka y Euforias* de Gratzner, un libro muy divertido y enriquecedor. Muestra muchísimos descubrimientos científicos y de ingeniería realizados gracias a la suerte. En este sentido se puede uno preguntar por qué se orientan tan mal los proyectos de investigación, con metas y fechas rígidas, burocratizando todo el proceso, cuando la suerte es un factor tan determinante. La investigación japonesa para fabricar la “quinta generación de computadores” fracasó por esas razones. Solo se puede hacer investigación predecible en resultados a un nivel muy elemental, por ejemplo, voy a sumar 2 más 2 a ver cuánto sale, y dedicaré tantos días y tanto dinero. Estoy seguro de que puedo cumplir los objetivos, pero a eso no deberíamos llamarlo “investigación”, sino “desarrollo”. La investigación requiere cronogramas abiertos, y la posibilidad honorable de fracasar o de que salgan resultados distintos a los objetivos proyectados.

Las ingenierías también son un proceso evolutivo donde se combinan ideas para crear otras nuevas (teléfono + cámara + computador = *smartphone*) y la presión selectiva son los gustos de los compradores. Lo que más se vende se va a reproducir más también. Incluso las ideas políticas o la moda son también sistemas evolutivos. En el caso de la moda, la presión selectiva es la aceptación de los demás frente a mi manera de vestir o de peinarme.

Volviendo al algoritmo evolutivo, otro investigador que ha estudiado de forma abstracta cómo pudo ser este proceso de autoduplicación es Stuart Kaufmann en lo que llama reacciones autocatalíticas⁶⁰. Las conclusiones son muy bonitas porque, por un lado, muestran que es inevitable que ocurra la autocatálisis cuando tenemos muchos compuestos químicos y muchas reacciones entre ellos. Por otro lado, sugiere una relación entre el número de estructuras de alto nivel que se forman (N_c , número de células distintas en un organismo biológico) y el número de reacciones autocatalíticas existentes (N_G , número de genes en ese organismo) que es aproximadamente

$$N_c \approx \sqrt{N_G} \quad \text{Ec. 34}$$

Y, como un tercer aporte, ha servido como inspiración para el desarrollo de químicas artificiales, que son básicamente gramáticas computacionales con reglas de producción. El conjunto de átomos artificiales (que son las proposiciones de la gramática) así como las reacciones químicas entre ellos (que son las reglas de producción) se generan al azar. Esto es muy importante, pues si uno quiere estudiar la emergencia de propiedades desde una concepción naturalista del mundo, es decir, no teleológica, es imprescindible que las condiciones iniciales y las reglas no sean muy específicas, no estén diseñadas *ad hoc* para conseguir cierto resultado. Por ello las químicas artificiales resultan muy interesantes, al no disponer de los conocidos átomos hidrógeno, helio, litio, berilio, etc, sino de otros abstractos que se fabrican al azar. Las conclusiones que se sacan de estos sistemas son más generales. Y, a pesar de la aleatoriedad, efectivamente salen conclusiones. En este sentido, en el 2007, Speroni y Diitrich nos presentaron un trabajo muy interesante: en el computador crearon una química artificial aleatoria, dejando que se desarrollaran reacciones en el tiempo. El espacio era digital (una matriz de celdas) y solo ocurrían reacciones entre los productos químicos que estaban en la misma celda. Al observar el sistema a diferentes escalas apareció una superposición de muchos compuestos químicos nuevos y en distintas proporciones en función de la escala. Lo que querían saber es si había emer-

60 Catálisis: una reacción química que se acelera en presencia de un cierto material, que pasa a llamarse catalizador. Autocatálisis: cuando dicha reacción química produce su propio catalizador.

gencia de estructuras y a que escala ocurrían, para lo que realizaron dos simulaciones: una normalmente y la otra agitando, es decir, intercambiando al azar celdas de vez en cuando. Ellos observaron que había diferencias entre las dos simulaciones, de donde dedujeron que había estructuras que la agitación destruyó. Este trabajo es muy bonito e ingenioso.

Otro tema polémico es la evolución humana. Se dice equivocadamente que la evolución nos está empujando a los humanos a tener el cerebro cada vez más grande para ser más inteligentes (y ahora, curiosamente, también aparece la otra opción, cada vez más pequeño) o a que solo tendremos dos dedos porque eso es lo que se necesita para manejar el *mouse* del computador. Se dicen muchas tonterías. Sin duda que esos rasgos pueden aparecer debido a mutaciones al azar, pero ninguno de ellos garantiza tener más hijos, de modo que los genes causantes no van a inundar nuestras poblaciones. La verdad es que tener hoy más o menos hijos no depende de ningún rasgo esencial. Ser más atractivo para encontrar más parejas depende de modas, que pueden cambiar volublemente con el tiempo. E incluso así, los métodos anticonceptivos ampliamente difundidos hace que ello no se traduzca a tener más hijos.

Se dice frecuentemente que la evolución se ha detenido en los humanos, debido al avance de la ciencia y la medicina. Así, personas que en un entorno aislado podrían fácilmente morir (debido a enfermedades o incapacidades físicas o cognitivas), dentro de nuestra sociedad perviven y además pueden perfectamente tener hijos. De modo que ya no hay presiones evolutivas.

Esto tampoco es cierto. Hay estudios (Rosling, 2010) que indican que el número de hijos de un grupo social depende inversamente del grado de riqueza, de la educación, del acceso a servicios sociales (como la salud y las pensiones de jubilación) y, por supuesto, del acceso a métodos anticonceptivos baratos. Se tienen muchos hijos, dicho rápidamente, cuando se sabe que bastantes pueden morir, y en ello no nos diferenciamos del resto de animales y plantas. Sin embargo, las estadísticas dicen que actualmente en casi todos los países la población ya no está creciendo exponencialmente e incluso está bajando, y lo normal es tener solo dos hijos, salvo en los sitios donde no hay servicios de salud adecuados para los niños (Rosling, 2012). Y por ello se espera que nos establezcamos en 10^{10} personas en el 2060 aproximadamente.

También en Ellis (2017) se muestra que las personas ateas tienen menos hijos que las religiosas. Y el metaanálisis de Zuckerman (2013) confirma una correlación inversa entre inteligencia y religiosidad, así como entre inteligencia y fertilidad. Aunque los genes no son las únicas fuerzas que moldean la inteligencia y la religiosidad (ya que el ambiente social y educativo también influye), son malas noticias para los humanos. Hay una presión evolu-

tiva en contra de la inteligencia (y, por ende, de la consciencia) que podría, en últimas, favorecer la emergencia de un nivel consciente superior a escala planetaria, mientras desaparece a nivel individual humano. Los humanos nos convertiríamos en simples células del superorganismo que se forme.

Merece la pena también reflexionar que la evolución biológica es lenta, y que los humanos hemos creado computadoras y robots, cuya evolución es mucho más rápida. Como decíamos en otra parte, a los robots solo les falta controlar su propia reproducción para que el fenómeno sea imparable. Al respecto, el astrónomo Martin Rees (2017) comentaba que la búsqueda de inteligencia extraterrestre, cuando tenga éxito, no nos revelará seres orgánicos verdes de cinco patas, sino robots.

De modo que la evolución en humanos sigue en marcha, y puede tener consecuencias muy distintas a las imaginadas.

VIDA ES COMPETENCIA, PERO TAMBIÉN COOPERACIÓN

La evolución se basa en la competencia entre entes para conseguir recursos que existen de forma limitada y así poder sobrevivir y reproducirse. Pero entonces, ¿cómo es posible que en un ambiente así surja la cooperación? Ya hemos visto que desde un punto de vista genético es imposible, y cuando parece que hay altruismo en realidad hay un egoísmo disfrazado. Esto ocurre cuando individuos fuertemente emparentados se ayudan unos a otros, pues lo único que hacen es apoyar a sus propios genes aunque en un cuerpo distinto.

Como vimos en el algoritmo generador de complejidad evolutivo del libro anterior, puede ocurrir que individuos que luchan entre sí queden atrapados juntos, bien sea dentro de una membrana, bien sea un obstáculo natural que los aísla. ¿Qué ocurre entonces? La teoría de juegos nos ayuda a entenderlo y en ese libro también hay un capítulo sobre el tema, que recomiendo repasar ahora para recordar qué es una matriz de pagos. Un ambiente muy común que analizábamos allí es el dilema del prisionero. Recordemos (Figura 66) que cada jugador tenía dos opciones, cooperar y traicionar, y que las matemáticas de las matrices de pago llevaban inexorablemente a ambos a traicionarse, a pesar de que cooperar sería la solución global óptima para ambos.

Pero hay otra consideración si el juego se repite muchas veces. Porque entonces existe la posibilidad de llegar a acuerdos implícitos de cooperación y, que si uno de los jugadores incumple, el otro puede retaliarlo en la siguiente jugada. ¡Analicémoslo!

		Jugador B	
		Cooperar	Traicionar
Jugador A	Cooperar	3, 3	0, 5
	Traicionar	5, 0	1, 1

Figura 66. Dilema del prisionero

Si de alguna forma estamos cooperando en sucesivas jugadas, cada uno ganará 3 puntos. Pero si uno se aprovecha y traiciona (mientras el otro sigue cooperando), ganará 5 puntos que es mejor. Lo que ocurre es que si el otro es inteligente, en la siguiente jugada puede vengarse, eligiendo traicionar con lo cual ganará 5 puntos si el otro decide volver a la cooperación. En caso contrario quedarán en una retaliación continua, donde cada uno ganará solo 1 punto, pero la posibilidad de vengarse existe.

El problema es que si ambos jugadores saben que el juego se va a repetir N veces, cuando llegue la última jugada lo mejor que pueden hacer ambos es traicionar, pues después de esa jugada no hay posibilidad de ser retaliado. Es la misma situación que el juego sin repeticiones. Entonces los dos saben que en la jugada N ambos deben de traicionar. Ahora se puede analizar la jugada anterior ($N-1$): dado que la jugada N es fija, ya se conoce de antemano, tampoco es posible retaliar en la jugada $N-1$. Por tanto, la solución óptima es la misma del juego de una única vez: que ambos traicionen. Y el mismo razonamiento se aplica para la jugada $N-2$, $N-3$... 3, 2 y 1. En todas las jugadas conviene traicionar.

Es distinto cuando el número de jugadas es indefinido o es desconocido por ambos jugadores. Fue Robert Axelrod quien primero planteó un concurso para programadores, que podían presentar algoritmos que jugaran con esta matriz de pagos. Enfrentó varias veces todos los jugadores contra todos (lo que se llama un torneo) y cada uno fue acumulando puntos. Después de ello eliminó a los peores y duplicó a los mejores. Y volvió a repetir todo. Al final quedó un único algoritmo ganador, llamado desde entonces TIT_FOR_TAT, que consistía en lo siguiente:

Inicialmente, la primera vez que jugaba contra otro jugador, comenzaba cooperando. A partir de allí repetía la última jugada que ese jugador le había hecho. Si le habían cooperado, cooperaba. Si le habían traicionado, traicionaba. El algoritmo es muy simple. Solo requiere un bit de memoria para recordar la última jugada de cada jugador. En la figura 67 podemos ver el algoritmo en forma de máquina de estados.

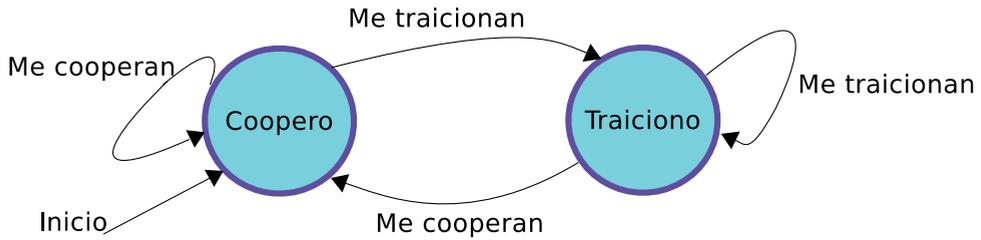


Figura 67. TIT_FOR_TAT

No es el único algoritmo que puede ganar este juego, pero todos son muy similares, compartiendo las siguientes características:

- Es cortés (comienza cooperando y nunca es el primero en traicionar).
- Olvida (solo tiene 1 bit de memoria).
- Responde (traiciona si le traicionan).
- Su estrategia es clara (fácil de reconocer y entender).

Axelrod publicó los resultados de este torneo y convocó a uno nuevo. La gente sabía entonces que el algoritmo a batir era el TIT_FOR_TAT y se presentaron bastantes más algoritmos. Lo interesante es que volvió a ganar TIT_FOR_TAT. Hagamos un análisis de casos, para ver por qué esta estrategia es tan buena. Supongamos que solo hay tres jugadores, que vamos a llamar SIEMPRE_COOPERA, SIEMPRE_TRAICIONA y TIT_FOR_TAT. El concurso consiste en enfrentar esos 3 jugadores entre sí, por parejas, un número determinado de veces (por ejemplo, $N=100$) aunque este número no es conocido por los jugadores. En la figura 68 podemos ver los puntajes que ganarán, cuando se enfrentan de dos en dos. Cuando el puntaje de la primera vez es distinto a las demás veces, se indica entre paréntesis. Así, la casilla que dice (5,0) 1,1 significa que la primera vez que se enfrenten el SIEMPRE_TRAICIONA ganará 5 puntos mientras que el TIT_FOR_TAT ganará 0, pero las demás veces ganará 1 punto cada uno.

Las puntuaciones totales después de 100 juegos de estos son fáciles de calcular y aparecen en la figura 69. La estrategia de cooperar siempre obtiene pocos puntos en comparación con las otras dos. Y el TIT_FOR_TAT pierde frente a la estrategia de traicionar siempre, pero por muy poco.

	SIEMPRE_COOPERA	SIEMPRE_TRAICIONA	TIT_FOR_TAT
SIEMPRE_COOPERA	3,3	0,5	3,3
SIEMPRE_TRAICIONA	5,0	1,1	(5,0) 1,1
TIT_FOR_TAT	3,3	(0,5) 1,1	3,3

Figura 68. El juego de Axelrod, para solo 3 jugadores

SIEMPRE_COOPERA	600
SIEMPRE_TRAICIONA	1408
TIT_FOR_TAT	1398

Figura 69. Puntajes totales después de 100 torneos

Fijémonos ahora si hay algunos jugadores que juegan SIEMPRE_TRAICIONA y algunos otros que juegan TIT_FOR_TAT. Por brevedad supongamos que hay dos de cada tipo (Figura 70).

	SIEMPRE_TRAICIONA	SIEMPRE_TRAICIONA	TIT_FOR_TAT	TIT_FOR_TAT
SIEMPRE_TRAICIONA	1,1	1,1	(5,0) 1,1	(5,0) 1,1
SIEMPRE_TRAICIONA	1,1	1,1	(5,0) 1,1	(5,0) 1,1
TIT_FOR_TAT	(0,5) 1,1	(0,5) 1,1	3,3	3,3
TIT_FOR_TAT	(0,5) 1,1	(0,5) 1,1	3,3	3,3

Figura 70. El juego de Axelrod con varias copias de los mejores jugadores

Después de 100 torneos los totales son bastante distintos a los anteriores (Figura 71) y TIT_FOR_TAT gana contundentemente. La razón es que TIT_FOR_TAT juega muy bien contra copias de sí mismo ganando 3 puntos cada vez, mientras que SIEMPRE_TRAICIONA contra sí mismo es muy malo, ganando apenas 1 punto.

Lo que esto indica, y se ha visto en innumerables competencias realizadas desde entonces, es que si hay un pequeño grupo de jugadores cooperativos (con características similares a TIT_FOR_TAT) emerge la cooperación en todo el grupo.

SIEMPRE_TRAICIONA	816
SIEMPRE_TRAICIONA	816
TIT_FOR_TAT	1596
TIT_FOR_TAT	1596

Figura 71. Puntajes totales después de 100 torneos

Curiosamente, TIT_FOR_TAT no puede ganar a nadie por parejas. Lo máximo que puede hacer es empatar. Y a veces pierde, aunque no por mucho. Pero globalmente consigue más puntos que los demás. Esa falta de envidia del algoritmo es muy importante.

Las estrategias que no responden (como RANDOM, SIEMPRE_COOPERA, SIEMPRE_TRAICIONA) suelen quedar de últimas cuando hay mucha variedad de jugadores. Y también las que responden pero de una manera tan compleja que pareciera que no lo hacen. Esto no quiere decir que TIT_FOR_TAT gane siempre, pues depende del entorno en el que juegue. Es una estrategia robusta, en el sentido de que se defiende bien en muchos entornos. De hecho ya se han encontrado otras variantes que son mejores, pero al ser más complejas son también más frágiles.

En EVALAB hicimos un concurso similar en el año 2000 entre estudiantes de últimos semestres. El ganador lo llamamos CHARLIE y cumple con las características señaladas siendo algo más tolerante que el TIT_FOR_TAT: traiciona si en las 3 últimas jugadas recibió 2 o más traiciones y coopera en los demás casos.

Hay otro tipo de experimentos similar que se ha realizado también muchas veces en todo el mundo. En EVALAB lo hicimos dos veces, la primera en el 2001 con el trabajo de grado de José Alejandro Gómez y en un trabajo

de una asignatura, con los entonces estudiantes Víctor Alberto Romero y Carlos Andrés Delgado. Es un torneo evolutivo. Cada jugador es una máquina de estados cuya tabla de transiciones (Figura 72-a) tiene dos columnas fijas (estado actual y jugada anterior del otro jugador) y dos columnas que cambian según la estrategia implementada (estado siguiente y mi jugada actual). Estas últimas conforman el cromosoma (Figura 72-b) que se expresa generando la máquina de estados (Figura 72-c). Hay una población de cromosomas generada al azar inicialmente. Cada generación consiste en 100 torneos. Y a los jugadores que más puntos obtengan se les permite reproducirse más (con operadores de cruce y mutación).

En el ejemplo anterior hay 3 estados, pero se puede poner otro número o incluso aplicar operadores adicionales de reproducción que aumenten o disminuyan la cantidad en cada cromosoma individualmente. Solo se considera la última jugada de cada jugador, pero nada impide añadir más columnas a la tabla de transiciones para tener en cuenta más jugadas anteriores.

En este torneo evolutivo el resultado también es el mismo: emerge la cooperación, aun cuando los algoritmos ganadores puedan ser más complicados. Y este es un resultado muy importante porque en la población inicial no tiene por qué haber ningún individuo que coopere, pero las mutaciones los crean poco a poco, y la presión selectiva les permite reproducirse más. La cooperación emerge sola.

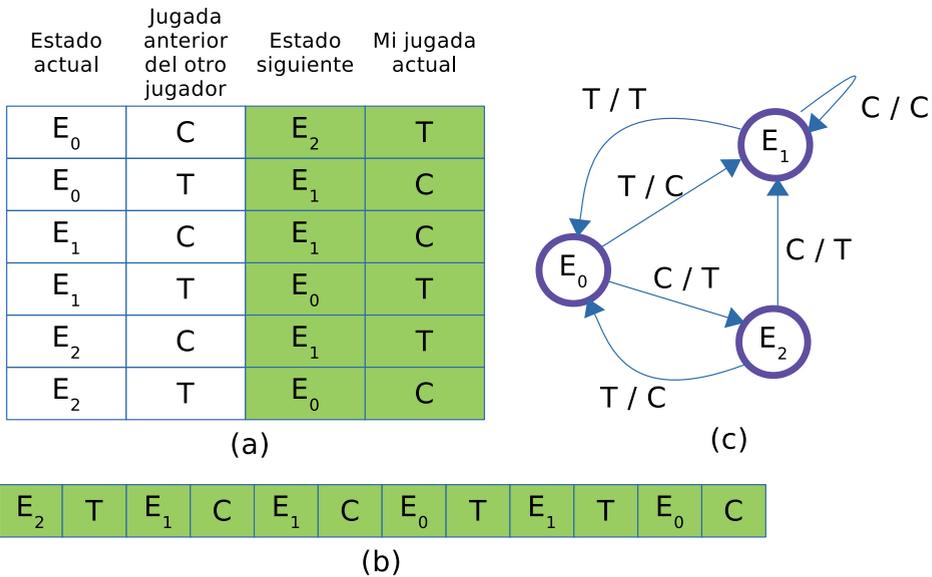


Figura 72. Jugador evolutivo: (a) tabla de transiciones; (b) cromosoma; (c) máquina de estado

En general el dilema del prisionero es un juego donde si ninguno de los jugadores trabaja entonces el resultado es neutro porque no consiguen nada pero tampoco invirtieron ningún esfuerzo. Si ambos trabajan les va bien porque consiguen sus objetivos repartiendo esfuerzos. Pero si uno trabaja y el otro no, el que no trabaja consigue lo que quiere mientras que el que trabaja tuvo que hacer todo el esfuerzo. Les suena, ¿verdad? En la vida hay muchas situaciones así. Cuando hacemos una compra por Internet podemos pagar con nuestra tarjeta de crédito o con una falsa, y el vendedor puede enviarnos la mercancía o quizás no. También aparece en las políticas respecto al cambio climático, solo si todos los jugadores cooperan conseguiremos un planeta limpio y sustentable. Si uno no lo hace obtiene beneficios sin asumir ningún costo. Incluso los animales participan en este juego u otros similares, donde enfrentan el dilema de cooperar o competir entre sí.

Al ser el juego iterado, automáticamente hay un tipo de comunicación, que es indirecta: cada jugador comunica sus intenciones a los demás porque todos pueden observar qué ha ocurrido en los juegos anteriores.

Este juego es muy interesante porque modela muchas situaciones reales, plantea un escenario altamente competitivo y, a pesar de ello, emerge la cooperación si se dan estos tres supuestos:

- Se necesita que cada jugador pueda identificar a los otros para ser selectivo en sus respuestas. Si estás de mal humor contra todo el mundo porque una persona te trató mal, estás empleando un algoritmo muy equivocado.
- Se necesita que cada jugador tenga memoria y pueda recordar cómo le fue en sus interacciones anteriores con los otros (TIT_FOR_TAT solo requiere recordar la última jugada, pero sin duda, cuanto más memoria tengas, mejor puedes analizar a tus contrincantes). De hecho, hay biólogos que sostienen que el tamaño de nuestro cerebro pasó de 400 cm³ en los homínidos de hace 2 millones de años a nuestros actuales 1500 cm³, para poder manejar correctamente las relaciones sociales con grupos cada vez más grandes de personas⁶¹. Nuestro óptimo parece estar

61 Hay muchos trabajos sobre este tema, que incluyen muchos factores, todos relativos a manejar la complejidad del entorno (Hofman, 2014). Por ejemplo, la capacidad de hacer alianzas entre miembros del grupo, detectando mentirosos y aprendiendo a mentir sin que nadie lo note, generó una especie de carrera de armamentos que aumentó el tamaño cerebral. Además, mantener un cerebro tan grande requiere muchas calorías que con las dietas de los primeros homínidos eran imposibles de conseguir. Es razonable esperar que los cerebros con mayor capacidad cognitiva busquen alimentos de mayor calidad energética y eso significa pasar a una alimentación carnívora y cocinar los alimentos, que así se digieren más rápidamente. Con ello se puede disminuir el tamaño del sistema digestivo (en las vacas es muy grande) y, a cambio, aumentar el del cerebro. Es una realimentación

en 150 personas aproximadamente, lo que se llama el número de Dunbar, descubierto en 1998. Las redes sociales virtuales de hoy día están llevando ese número mucho más allá, aunque a cambio las relaciones son menos profundas y también tenemos soporte computacional para acordarnos de cosas de los otros (rostros, fechas de cumpleaños, gustos y conversaciones previas).

- Se necesita que cada jugador interactúe frecuentemente con los otros. Esto se ha perdido ya en las grandes ciudades donde si te encuentras con una persona al azar, es prácticamente imposible que la vuelvas a ver. Y por ello algunos arquitectos mencionan que el tamaño óptimo de una ciudad debía ser unas pocas decenas de miles de habitantes, pues de otra manera el ambiente de la ciudad se hace insolidario. Sin embargo, hoy se sabe que hay muchas otras fuerzas que influyen, y que no hay tal tamaño óptimo: cuando más grande sea una ciudad, es mejor en uso de recursos, en variedad, en oportunidades que ofrece a sus habitantes, en esperanza de vida y otras comodidades.

Es muy importante remarcar que en el dilema del prisionero iterado emerge la cooperación sin necesidad de que haya un control central que dicte normas de comportamiento o imponga castigos a quien no las cumpla.

Por último hay que reconocer que no está garantizada la emergencia de la cooperación, e incluso que cuando ella aparece, no está garantizado que perdure para siempre. TIT_FOR_TAT no es una estrategia evolutivamente estable porque aunque las poblaciones de TIT_FOR_TAT no se dejan invadir por algoritmos no cooperativos, desgraciadamente si se dejan invadir por algoritmos de tipo SIEMPRE_COOPERA (ya que como ambos comienzan cooperando, siguen así y son indistinguibles cuando juegan entre ellos). Eso significa que la población de TIT_FOR_TAT puede ser desplazada por SIEMPRE_COOPERA y, una vez ello ha ocurrido, SIEMPRE_COOPERA es fácilmente invadible por estrategias no cooperativas como SIEMPRE_TRAICIONA (como ya vimos en la figura 69). En general, se puede demostrar que la cooperación es una solución inestable (García, 2011).

También en García (2011) se analiza cómo emerge la cooperación y con qué fuerza, en función del tamaño del grupo. Y se llega a la conclusión de que la cooperación interna dentro de un grupo de individuos está siempre asociada a un rechazo hacia los individuos que no pertenecen al grupo. Es

positiva. Y si estamos aquí ahora es gracias a la invención de la cocina (Herculano-Houzel, 2016), pues así dedicamos menos tiempo a comer y digerir, y nos queda más tiempo libre para construir artefactos culturales humanos.

decir, la discriminación también emerge, y no depende de la nacionalidad, la raza, el género sexual o ningún otro marcador. Se ha llegado a la misma conclusión en estudios sociales. En Wikipedia hay un excelente resumen de trabajos (Wiki, 2017), donde en un grupo homogéneo de individuos, el simple hecho de marcar a unos como “A” y a otros como “B” hace que surjan discordias entre los dos subgrupos. La segregación se ha estudiado también con otros modelos como el de Schelling, que hemos visto en el capítulo “Complejidad”, de donde se deduce que aunque los individuos considerados por separado sean bastante tolerantes, el resultado social puede ser discriminatorio. Es decir, hay claramente un fenómeno emergente (en este caso, bastante indeseable) de segregación social: en el grupo aparece algo que en el individuo no existe.

Muchos investigadores siguen proponiendo modelos de interacción entre organismos donde el altruismo emerge a pesar del egoísmo de los genes. Érika Suárez (2014) en EVALAB analizó algunos de estos modelos. Casi siempre son modelos limitados y frágiles, y el más general sigue siendo el “Dilema del Prisionero”. Por desgracia incluso en este último modelo el altruismo es inestable y no hay garantías de que perdure para siempre. En simulaciones como las del mencionado trabajo de grado de Gómez (2001) vemos que es muy normal que aparezcan etapas de cooperación, que luego se derrumban habiendo solo competencia, hasta que se construye de nuevo otro entramado cooperativo, y así sucesivamente.

Otro investigador notable es Frans de Waal, que expuso sus investigaciones en TED en el 2011, donde muestra comportamientos altruistas e incluso morales en micos y elefantes. La cooperación también surge entre animales siempre que se cumplan las condiciones enumeradas anteriormente.

Quiero hacer un paréntesis para explicar que el problema principal de las ciencias humanas que tienen el loable propósito de querer adoptar el método científico (psicología, sociología, antropología...), es que resulta muy difícil controlar las condiciones de modo que se midan solo unas pocas variables experimentales y se neutralicen las demás. Porque cuando se hacen experimentos con humanos y animales, todas las variables están irremediablemente dentro de sus cerebros: sus expectativas, sus experiencias personales, sus gustos y sus imaginarios. No hay forma de sacarlas de allí.

Por ejemplo, hay dos experimentos en los que se obtienen resultados aparentemente distintos. El primero muestra mucha racionalidad y el segundo muy poca:

- El que acabamos de mencionar de Frans de Waal, que le da a dos monos capuchinos una fruta a cambio de que realicen una tarea sencilla. Ambos pueden verse entre sí. El primero realiza su tarea y recibe a

cambio un trozo de pepino, que es comida, aunque insípida. El animal lo recibe y se lo come. El segundo hace la misma tarea y recibe a cambio uvas, mucho más sabrosas, que recibe y se las come. Cuando el primero vuelve a hacer la tarea y recibir pepino, se rebela y no lo acepta. Antes lo aceptaba, pero ahora no. El investigador deduce que el animal está haciendo un juicio moral: a igualdad de trabajo, debería haber igualdad de recompensa.

- El juego del ultimátum, en el que intervienen dos personas. Una de ellas recibe una cantidad de dinero, digamos 50 monedas, y debe decidir cómo lo reparte con la otra persona. Si la otra persona no acepta el reparto, ambos se quedan sin dinero. La teoría de juegos dice que la segunda persona debe aceptar cualquier cantidad mayor que cero, aun cuando sea muy baja y poco equitativa, como por ejemplo 1 moneda. La razón de ello es que para la segunda persona más vale ganar 1 moneda a no ganar nada. Sin embargo, si la segunda persona recibe un regalo muy bajo, en los experimentos se ve que habitualmente no lo acepta, y entonces los dos salen sin nada. Los investigadores dicen que este comportamiento es irracional.

Pero si nos fijamos, en realidad ambos experimentos son el mismo: a dos individuos se les regalan cosas de diferente valor, y se miden sus reacciones. Y por eso salen los mismos resultados: el que recibe menos se enfada. Son los investigadores quienes añaden una narrativa diferente. Sin querer desmerecer ninguno de los dos trabajos, que son brillantes, quizás lo que estén midiendo ambos sea la envidia y no la ética ni la racionalidad.

Volviendo al tema principal, la justicia es otro tipo de cooperación, donde primero se deciden las reglas sociales y después se aplican. El filósofo John Rawls (2006) muestra que se puede alcanzar un sistema con reglas justas si los seres que van a jugar en ese sistema son racionales pero no saben en qué situación social les va a tocar jugar (a esto se le llama “el velo de la ignorancia”). El ejemplo que se pone para ilustrar este punto es el de un padre que llega a su casa con un pastel para sus hijos Federico y Luisa. Federico es egoísta y pide que el pastel sea todo para él; Luisa es más conciliadora y pide repartirlo en partes iguales. Muchas veces, cuando hay conflicto de intereses, el árbitro (en este caso, el padre), propone una situación intermedia:

- Federico propone 100% para él y 0% para Luisa.
- Luisa propone 50% para Federico y 50% para ella.
- El punto intermedio decidido por el árbitro es 75% para Federico y 25% para Luisa.

¡Pero eso es injusto!

La propuesta de Rawls es pedir a uno de ellos que corte el pastel en dos trozos del tamaño que quiera. Y después pedir al otro que elija el trozo que quiera.

De esta forma, la justicia tiene dos fases:

- Crear las reglas sin saber lo que te tocará en la segunda fase.
- Aplicar las reglas.

Y como no se sabe de antemano a quién le tocará cada rol en la segunda fase (en nuestro ejemplo, quién será el primero en elegir un trozo de pastel), entonces en la primera fase todos serán cuidadosos en la selección de las reglas: en nuestro ejemplo, sea quien sea que corte el pastel, lo hará por la mitad.

La justicia de Rawls se implementa muy bien de forma evolutiva porque los genes no saben a qué cuerpos irán a parar.

Pero no todo es así de fácil, pues hay juegos en los que es imposible que emerja la cooperación. Por ejemplo, en el juego la “tragedia de los comunes” que vimos también en el libro anterior, hay un recurso compartido que todo el mundo quiere usar y abusar (cuanto más lo use, más gana) y, como consecuencia de ello, el recurso termina por degradarse y desaparecer. El recurso puede ser el uso de las aceras en la ciudad, el aire o el clima. Hasta donde yo sé, no hay forma de solucionar este tipo de juegos porque aunque se ha propuesto que en estos casos debería haber una autoridad central que vele por el uso correcto y justo del recurso, en la práctica lo que ocurre es que aparece un metajuego, también de tipo “tragedia de los comunes”: conseguir controlar la autoridad central, para poder disponer del recurso para mí. Esto lo vemos habitualmente en política y da lugar a muchas formas de corrupción.

Tampoco hay solución para el juego llamado “paradoja de Braess”, del mismo capítulo, ya que habría que poner de acuerdo a todos los participantes para que usen adecuadamente las vías de comunicación, y basta con que uno no lo haga para que aparezcan desequilibrios que fuercen a otros a tampoco hacerlo.

En el juego de “destrucción mutuamente asegurada” se pretende modelar escenarios de amenaza de guerra nuclear. La matriz de pagos está en la figura 73. Aparentemente el equilibrio está en que ambos no ataquen, hasta que uno cae en cuenta que este juego se está jugando continuamente, y que cualquier error lleva a la destrucción mutua. El juego puede hacerse más complicado si se especula que se puede neutralizar la capacidad de respuesta del otro jugador y, en este caso, atacar cuanto antes es la única opción. Como puede entenderse, este tipo de escenarios son muy inciertos y peligrosos,

por lo que es mejor no entrar voluntariamente a jugarlos, pero si ya estás en un juego así todo va a depender del grado de inteligencia de ambos jugadores y cómo puedan negociar una salida de allí.

		Jugador B	
		Atacar	No atacar
Jugador A	Atacar	-10 -10	-10 -10
	No atacar	-10 -10	0 0

Figura 73. Destrucción mutua asegurada

Como vemos, la idea de este juego es que cada jugador hace la promesa de que si le destruyen, también destruirá al otro. Esta promesa se puede concretar con algún tipo de automatismo, por ejemplo, el que nos muestra Stanley Kubrick en su película *¿Teléfono Rojo? Volamos hacia Moscú* (1964). Allí hay un detector de radiactividad en un país que se va a activar en caso de ser atacado con armas nucleares. Su activación conlleva, automáticamente y sin ninguna intervención humana, el disparo de armas nucleares al otro país. La existencia de este dispositivo debe de ser conocida por el otro país para que tenga capacidades disuasorias (idealmente ambos países deben tener uno, aunque en la película solo la antigua URSS lo tenía y con tan mala suerte que no les había dado tiempo a comunicar su existencia en el momento en que se desencadena un desafortunado incidente). También en el cuento de Arthur Clarke “La Última Orden” (1974) se presenta un dispositivo similar, aunque con otro tipo de sorpresa final.

Otras variantes son si el que juega primero destruye efectivamente al otro que ya no podrá emplear sus armas jamás. Podemos ver un ejemplo de ello en la película *Batman: el caballero de la noche* (Nolan, 2008), en la escena en que hay dos barcos y cada uno puede hacer explotar al otro. O si se está construyendo un sistema de defensa tan potente que el enemigo jamás podrá superarlo. En ambos casos, la única estrategia racional es disparar primero, antes que el enemigo lo haga (o termine de construir su barrera).

El ámbito de este juego no es únicamente la guerra entre países. Muchas veces lo jugamos en lo cotidiano. Steven Pinker (1997) nos cuenta que las personas que tienen mal genio permanente y que se disparan con facilidad emplean esta táctica, quizás conscientemente o quizás no. Ya se han dado a conocer, es decir, tienen fama de que son intratables y cuando ocurre algo que les desagrada se vuelven como locos, insultando y agrediendo verbalmente a quien se acerque, sin permitir ningún tipo de diálogo. Con ello

logran sus objetivos y que nadie les lleve la contraria, por miedo a hacer despertar ese “arma de destrucción masiva”.

Otro juego aparentemente inofensivo creado por Martin Shubik (1971) que te lleva a una espiral imparables donde cada vez pierdes más, es el de la subasta de un billete de 100 euros, donde el que más ofrezca se queda con el billete, pero el segundo que más ofrezca también tiene que pagar. Inicialmente la gente ofrecerá uno o dos euros, con lo cual ganarán bastante (99 o 98 euros). Pero conforme las pujas suban, el beneficio será menor. El punto crítico de este juego se revela en el siguiente diálogo ficticio entre dos participantes en la subasta:

A: Ofrezco 97 (con lo cual todavía ganaré 3).

B: Pues yo ofrezco 98 (con lo cual ganaré 2).

A: Si quedo de segundo perderé mis 97, de manera que ofrezco 99 y me conformaré con ganar solo 1.

B: Si quedo de segundo perderé 98. Para evitarlo, ofrezco 100, con lo cual no ganaré nada, pero tampoco perderé nada.

A: Ofrezco 101, pues no quiero quedar de segundo y perder 100. Prefiero perder solo 1.

B: Ofrezco 102. Etcétera.

Este tipo de juegos es mejor no jugarlos. Pero hay que estar alerta, porque uno puede caer en ellos sin darse cuenta, ya que al principio parecen fáciles de ganar. Cualquier guerra termina de esta manera, donde ambos bandos pierden, uno más y otro menos.

Para terminar, invito a ver en YouTube un juego parecido al dilema del prisionero en un concurso de televisión (Spinout3, 2012), pues tiene un final sorprendente. En general, la teoría de juegos es creativa porque aunque las matrices de pagos sean fijas y conocidas por todos (muchas veces ni siquiera eso se da), se puede negociar o forzar el cambio del escenario para modificar la matriz de pagos, dependiendo de la inteligencia y creatividad de las personas que están jugando.

RESUMEN

Definir una frontera clara entre los seres vivos y los objetos inertes es una tarea imposible. Hay una serie de propiedades comunes a todos los seres vivos (nacer, crecer, metabolismo, reproducción, morir, evolución, autoorganización...), pero hay también muchas ambigüedades y excepciones. De entre ellas, la más determinante es la reproducción. Para que haya reproducción se requiere un nivel de complejidad de alrededor de 2×10^5 bits. Esta es una cota superior todavía bastante alta, que debería poder disminuirse con nuevos enfoques.

También se discute que estar vivo necesita una dosis mínima de inteligencia. Y que la reproducción conlleva inevitablemente a la evolución. Vimos que la evolución es un algoritmo que requiere 4 ingredientes: una población de entes, que se reproducen, con errores en las copias y sometidos a una presión selectiva. Eso genera un bucle de realimentación positiva: cuantos más seres vivos haya, más seres vivos habrá.

También vimos que aunque en principio la evolución produce la competencia entre esos entes, a largo plazo suele aparecer también la cooperación por diversos mecanismos, y analizamos uno de los escenarios, el dilema del prisionero, usando la teoría de juegos.

PARA SABER MÁS

- Melanie Mitchell (2000). *Life and Evolution in Computers*. Working Paper 2000-01-001. New México: Santa Fe Institute. Disponible en: <https://goo.gl/kuEMYo><http://archives.pdx.edu/ds/psu/12383>

Es un trabajo muy interesante sobre el *software* con capacidades de auto-copia (vaya, los temibles virus de computador).

- Julio Fernández Ostozala y Álvaro Moreno Bergareche (1992). *Vida Artificial*. Madrid: Eudema S.A.

Da primero una visión teórica de las limitaciones computacionales y lo que hay que hacer para evitarlas (máquinas de Turing, problema de la parada, computabilidad super-Turing...). Después explica sistemas de vida artificial, como RedCode, Tierra, autómatas celulares, reproducción de von Neumann, el juego de la vida de Conway, vehículos e insectos artificiales, *biomorphs* de Dawkins, robots evolutivos, etc. Define sistemas anticipatorios como los que pueden predecir el futuro y tomar acciones en el presente en función de ello. Cita los trabajos de Maturana y Varela en biología: sistemas autopoieticos son los que tienen una frontera con el exterior, que defienden y construyen continuamente.

- Robert Aunger (2002). *Electric meme*. New York: The Free Press.

Es un libro con varios errores y la tesis que presenta, aunque atractiva, no está bien fundamentada. A pesar de ello es interesante pues explica la autorreplicación en muchos contextos. Su objetivo principal son los memes, pero también aborda los virus de computador, el *software* Tierra de Tom Ray, Core Wars, de los que da muy buena explicación. Y también sobre ADN, proteínas, priones y química artificial.

REFERENCIAS

Libros, artículos y enlaces web

- Axelrod, R. (1984). *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books.
- Baker, B. J., Saw, J. H., Lind, A. E. *et ál.* (2016). Genomic Inference of the Metabolism of Cosmopolitan Subsurface Archaea, Hadesarchaea. *Nature Microbiology*, 1(16002), pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1038/Nmicrobiol.2016.2>, corrected 7 March 2016.
- Baym, M., Lieberman, T. D., Kelsic, E. D. *et ál.* (2016). Spatiotemporal Microbial Evolution on Antibiotic Landscapes. *Science* 09, 353(6304), pp. 1147-1151. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aag0822>
- Calder, N. D. (2005). Altruism and Aggression. In *Magic Universe. A Grand Tour of Modern Science*. New York: Oxford University Press.
- Clarke, A. C. (1974). La última orden. En *El Viento del Sol*. pp. 60-62. Madrid: Alianza Editorial.
- Danovaro, R., Canals, M., Tangherlini, M. *et ál.* (2017). A Submarine Volcanic Eruption Leads to a Novel Microbial Habitat. *Nature Ecology & Evolution*, 1(0144). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0144>, corrected 22 May 2017.
- Dawkins, R. (1994). *El gen egoísta*. Barcelona: Salvat.
- _____. (2009). *Evolución: el mayor espectáculo sobre la Tierra*. Madrid: Espasa.
- Dennett, D. C. (1999). *La peligrosa idea de Darwin*. Madrid: Círculo de Lectores.
- Dunbar, R. I. M. (1998). The Social Brain Hypothesis. *Evolutionary Anthropology*, 6, pp. 178–190. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6505\(1998\)6:5<178::AID-EVAN5>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6505(1998)6:5<178::AID-EVAN5>3.0.CO;2-8)
- Ellis, L., Hoskin, A. W., Dutton, E. y Nyborg, H. (2017). The Future of Secularism: a Biologically Informed Theory Supplemented with Cross-Cultural Evidence. *Evolutionary Psychological Science*, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40806-017-0090-z>
- Erb, T. J., Kiefer, P., Hattendorf, B. *et ál.* (2012). GFAJ-1 Is an Arsenate-Resistant, Phosphate-Dependent Organism. *Science*, 337(6093), pp. 467-470. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1218455>
- Fogel, L. J., Owens, A. J. y Walsh, M. J. (1966). *Artificial intelligence through simulated evolution*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Fulton, J. D. (1966). Microorganisms of the Upper Atmosphere. IV. Microorganisms of a Land Air Mass as it Traverses an Ocean. *Applied Microbiology*, 14(2), pp. 241-244.
- García, J. A. (2011). *The Moral Herd: Groups and the Evolution of Altruism and Cooperation*. Amsterdam: Vrije Universiteit.

- Gratzer, W. (2000). *Eureka y euforias*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Gribbin, J. (2006). *Así de simple*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Goldford, J. E., Hartman, H., Smith, T. F. y Segrè, D. (2017). Remnants of an Ancient Metabolism without Phosphate. *Cell*, 168, pp. 1126–1134. Elsevier. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.02.001>
- Herculano-Houzel, S. (2016). *The Human Advantage: A New Understanding of How our Brains Became Remarkable*. Cambridge: MIT Press.
- Hofman, M. A. (2014). Evolution of the human brain: when bigger is better. *Front Neuroanat*, 8(15). DOI: <https://doi.org/10.3389/fnana.2014.00015>
- Hofstadter, D. (1985). *Matemagical Themas*. New York: Basic Books.
- Jacob, F. (1977). *Evolution and Tinkering Science*. 196(4295), pp. 1161–1166. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.860134>
- Klarsfeld, A. y Revah, F. (2002). *Biología de la muerte*. Madrid: Editorial Complutense.
- Llewelyn, M. J., Fitzpatrick, J. M., Darwin, E. et ál. (2017). The antibiotic course has had its day. *British Medical Journal*, 358. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.j3418>
- Murray, A. E., Kenig, F., Fritsen, C. H. et ál. (2012). Microbial Life at –13 °C in the Brine of an Ice-Sealed Antarctic Lake. *PNAS*, 109(50), pp. 20626–20631. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1208607190>
- Patel, B., Percivalle, C., Ritson, D., Duffy, C. y Sutherland, J. (2015). Common Origins of RNA, Protein and Lipid Precursors in a Cyanosulfidic Protometabolism. *Nature Chemistry*, 7(4), pp. 301–307. DOI: <https://doi.org/10.1038/nchem.2202>
- Pesheva, E. (2016). *Bugs on Screen*. Harvard Medical School. Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/hFAYY4>
- Pinker, S. (1997). *Como a mente funciona*. São Paulo: Editora Schwarcz.
- Rawls, J. (2006). *Teoría de la justicia*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Rees, M. (2017). Viajes interestelares y poshumanos. *El próximo paso: la vida exponencial*. España: BBVA, OpenMind.
- Ridley, M. (2000). *Genoma – La autobiografía de una especie en 23 capítulos*. Madrid: Editorial Santillana.
- Satomi, M., La Duc, M. T. y Venkateswaran, K. (2006). Bacillus Safensis sp. nov., Isolated from Spacecraft and Assembly-Facility Surfaces. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 56, pp. 1735–1740. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.64189-0>

- Sender, R., Fuchs, S. y Milo, R. (2016). Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body. *PLOS Biology* 14(8), pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002533>
- Shubik, M. (1971). The Dollar Auction Game: A Paradox in Noncooperative Behavior and Escalation. *The Journal of Conflict Resolution* 15(1), pp. 109-111.
- Smith, J. M. y Szathmáry, E. (2001). *Ocho hitos de la evolución: del origen de la vida al nacimiento del lenguaje*. Barcelona: Colección Metatemas, Tusquets Editores.
- Speroni Di Finizio, P. y Dittrich, P. (2007). Chemical Organizations at Different Spatial Scales. *ECAL-2007 Proceedings of the 9th European Conference on Advances in Artificial Life*. pp. 1-11.
- Steele, B. (2005). Researchers build a robot that can reproduce. Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/WpBVJa>
- Stewart, I. (1998). *El segundo secreto de la vida*. Barcelona: Colección Drakontos, Editorial Crítica.
- Vélez, A. (1998). *Del Big-Bang al Homo Sapiens*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Wiki (2017). *In-group favoritism*. Recuperado el 3 de septiembre de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/LXHhm7>
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Canada: Wolfram Media Inc.
- Wright, R. (2001). *Non Zero. The Logic of Human Destiny*. New York: Vintage Books.
- Zuckerman, M., Silberman, J. y Hall, J. A. (2013). The Relation between Intelligence and Religiosity: a Meta-Analysis and Some Proposed Explanations. *Personality and Social Psychology Review*, 17(4), pp. 325-54. DOI: <https://doi.org/10.1177/1088868313497266>

Películas y videos

- de Waal, F. (2011). *Comportamiento moral en los animales*. TEDxPeachtree, filmed Nov 2011. Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/BXiom9>
- Kubrick, S. (1964). *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú*. Reino Unido: Columbia / Hawk Films.
- Nolan, C. (2008). *The Dark Knight*. Reino Unido: Legendary Pictures Syncopy Films.
- Rosling, H. (2010). *Global Population Growth, Box by Box*. Filmed June 2010 at TED@Cannes. Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/MccEwr>
- _____. (2012). *Religions and Babies*. TEDxSummit. Filmed April 2012. Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/CjSqZU>

Spinout3 (2012). *Golden Balls, the Weirdest Split or Steal ever!* Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/B77PQX>

Skitterbot (2009). *Self-replicating blocks from Cornell University*. Recuperado el 4 de julio de 2017. Disponible en: <https://goo.gl/PnghBg>

Tesis y trabajos de grado en EVALAB

Gómez, J. A. (2001). *Desarrollo de una Máquina de Estados Finitos (FSM) evolutiva mediante algoritmos genéticos*. Cali: Universidad del Valle.

Moreno, R. A. (2009). *Estudio de la emergencia de orden complejo en una simulación de ambientes poblados por individuos que se rigen por procesos evolutivos*. [Tesis Maestría]. Cali: Universidad del Valle.

Suárez, É. (2014). *Emergencia evolutiva de grupos cooperativos guiados por el entorno*. [Tesis Meritoria]. Cali: Universidad del Valle.