

EVOLUCIÓN

Una introducción

Alberto Rodríguez Santos

<https://epsilon.com>

Evolución 1

INTRODUCCIÓN

La evolución es un hecho: el estudio comparado de la anatomía animal, el registro fósil y, de un modo definitivo y extraordinariamente preciso, la información filogenética obtenida gracias a la biología molecular, aportan las pruebas necesarias para establecer que las especies se transforman a lo largo del tiempo y dan lugar a nuevas especies.

Desde las primeras y microscópicas formas de vida de hace cuatro mil millones de años hasta la diversidad micro y macroscópica de la actualidad se ha producido sobre la superficie de la tierra un aumento de la complejidad extraordinario. Hay seres vivos adaptados prácticamente a todas las circunstancias con una diversidad de soluciones realmente asombrosa.

No hay por qué pensar que este proceso haya sido positivo en ningún sentido particular: *evolución* no significa *mejora* ni *progreso*: significa *cambio*, un cambio que se refleja por lo general en los aspectos mencionados: diversidad y complejidad, aunque siempre hay excepciones: a veces la selección natural da lugar a simplificaciones morfológicas, como en el caso de *mixozoos*. A fin de cuentas, lo importante es tener descendencia y si en cierto momento una simplificación supone una ventaja en este sentido, será esa la opción que prevalezca.

Ante este escenario la pregunta es obvia: de acuerdo, la evolución es un hecho, pero, ¿por qué se producen estos cambios?, ¿por qué evoluciona la vida?

Los humanos hemos buscado durante milenios respuestas a esta pregunta en el mundo de la fantasía, pero no fue hasta el siglo XIX que empezamos a entender lo que estaba ocurriendo. En 1859 Charles Darwin publicó *El origen de las especies*. Con esta obra dio a conocer su teoría de la evolución por

selección natural y cambió no solo la forma de pensar la biología, sino también la filosofía y hasta el mismísimo sentido de la existencia. Explicar el proceso de la especiación, explicar cómo de unas especies surgen otras, ya era un logro sobresaliente, pero si causó el impacto que causó fue porque Darwin no echó mano de diseñadores cósmicos, ni de impulsos vitales, ni de fines predeterminados: lo único que necesitó para explicar la evolución fue azar, puro y ciego azar.

La teoría, apoyada por la paleontología y la biogeografía, dejaba, sin embargo, sin explicar ciertos aspectos, en concreto los que tenían que ver con el soporte físico de la información que define a cada especie y que cambia a lo largo del tiempo para dar lugar a nuevas especies. ¿Por qué los descendientes se parecen a los progenitores? ¿Y por qué son distintos? Cien años después, gente como Gamow, Franklin, Watson, Crick y Wilkins completaron el trabajo de Darwin al descubrir la estructura del ADN y encontrar con ello el correlato molecular de la evolución de las especies.

Para comprender el proceso que ha dado lugar a las especies vivas hoy día, humanos incluidos, vamos a ver primero los procesos que intervienen en la evolución por selección natural, después la estructura básica de una molécula, el ADN, y, finalmente, cómo la síntesis de ambas ideas es capaz de dar una explicación completa de la evolución de las especies.

EVOLUCIÓN POR SELECCIÓN NATURAL

Los sistemas pueden evolucionar de muchas maneras, pero hay un mecanismo que permite que esta evolución sea espontánea, es decir, sin necesidad de guía externa ni diseño de ninguna clase. Este mecanismo se compone de tres procesos: replicación, variación y selección. Vamos a ver su funcionamiento con un ejemplo extremadamente simple en el que, para no complicar innecesariamente las cosas, he obviado el elemento sexual.

Un relato

En la superficie de un desolado planeta vive el *comerreps*, un bichejo que se alimenta de *reps*, unos gusanos de tierra que finalizan su ciclo vital saliendo a la superficie. Cuando esto ocurre, los comerreps se lanzan sobre ellos para devorarlos. Los reps no son muy abundantes, por lo que los comerreps compiten duramente entre ellos por tan preciados manjares.

El comerreps se autofecunda y pare cada año una camada de nuevos comerreps idénticos a sí mismo salvo raras excepciones. Estas excepciones, que se producen completamente al azar, se manifiestan en pequeños cambios anatómicos que con frecuencia pasan desapercibidos, aunque no siempre.

En una ocasión nace, por puro azar, como ya he dicho, un comerreps más lento que su progenitor. El resultado es que, cuando los gusanos salen a la superficie, los demás comerreps se le adelantan, se comen todos los reps antes de que él pueda llegar al lugar de afloramiento y muere de hambre. Ni que decir tiene que no deja descendencia.

En otra ocasión, siempre por puro azar, un comerreps tiene un vástago más rápido que él. Cuando los gusanos salen a la luz, el joven comerreps se pone el primero de la manada, saca distancia a sus congéneres, llega al campo de reps y se come todos los gusanos que quiere. Consecuencia de ello es que sobrevive lo suficiente como para poder reproducirse y tener un montón de pequeños comerreps. Al ser casi todos copias exactas de él mismo, heredan su mejorada velocidad, lo que les permitirá imponerse en la carrera a los demás comerreps, hacerse con los deliciosos reps y alcanzar la edad necesaria para reproducirse.

Así, en pocas generaciones, todos los comerreps disponen de la nueva velocidad. La especie de los comerreps ha evolucionado.

Es importante indicar que la ventaja evolutiva no tiene por qué provenir de rasgos competitivos: puede que una mutación haga más colaboradora a una estirpe de comerreps y estos se impongan a sus compañeros más individualistas.

Los procesos

En el relato anterior podemos distinguir los tres procesos que han permitido a los comerreps mejorar su velocidad: por un lado, sus miembros son **replicantes**, es decir, capaces de producir descendientes que son copias de sí mismos. Por otra parte, estas copias no son siempre exactas, sino que presentan mutaciones, **variaciones** azarosas del modelo original. Finalmente, están sujetos a una **selección** que criba a los individuos. Como consecuencia de esta criba, unas mutaciones sobreviven mientras que otras se pierden.

Es importante insistir en que las variaciones se producen al azar: los comerreps sufren mutaciones de todo tipo, pero solo aquellas que implican una ventaja para la supervivencia pasan a las nuevas generaciones, y esto es así precisamente porque los

individuos mutados sobreviven y tienen por tanto la oportunidad de reproducirse y dejar en herencia su mutación. La evolución no es un proceso inteligente que persigue un objetivo y busca la mejor forma de alcanzarlo. Por el contrario, consistente en ensayar innumerables variantes hasta que, por pura casualidad, una de ellas aporta una ventaja.

Otro aspecto a resaltar es que la selección es ambiental: si la población de reps fuese inmensa y la de comerreps reducida, los comerreps no necesitarían correr y por lo tanto las mutaciones en este sentido no serían seleccionadas. Esto implica que la vida es un proceso histórico porque, a medida que se producen cambios en el medio ambiente, la evolución se produce en un sentido o en otro. A medida que más y más comerreps posean la nueva velocidad, esta dejará de suponer una ventaja y estaremos como al principio. Además, los reps también están sujetos a evolución y puede que una mutación les haga comerse a sus congéneres en fase terminal antes de que estos salgan a la superficie haciendo inútil la mejorada velocidad de los comerreps. También pueden aparecer, venidas de otros lugares, otras especies comedoras de gusanos. Todo ello hará que mutaciones que antes eran irrelevantes ahora resulten ventajosas para la supervivencia de los comerreps y sean seleccionadas. O lo contrario.

Cuando se habla de evolución, uno de los ejemplos que en seguida viene a la cabeza es el de las jirafas y su largo cuello. Muchos piensan que el cuello de la jirafa es largo porque de tanto esforzarse las jirafas por alcanzar las hojas más altas su cuello se ha ido estirando. Pero eso no es así: lo que ha ocurrido es que, entre otras innumerables mutaciones, algunas crías de jirafa han nacido con el cuello más largo que sus congéneres y eso les ha supuesto una ventaja a la hora de alcanzar las hojas de los árboles, ventaja que les ha permitido sobrevivir y tener una descendencia a la que dejar en herencia

su mutación. Por mucho que vayamos al gimnasio a hacer musculación nuestros hijos no van a salir más fuertes.

Un último apunte: el alargamiento del cuello de la jirafa (y, por cierto, el paralelo alargamiento de sus patas) no se produjo de golpe, sino que es consecuencia de una enorme cantidad de pequeños cambios que se han sucedido a lo largo de millones de años. La evolución es un proceso bastante chapucero que comete infinidad de errores y que necesita por ello una cantidad enorme de ensayos. Esta falta de *inteligencia* implica, como es obvio a estas alturas, la necesidad de largos periodos de tiempo para que se produzcan cambios significativos en las especies (aunque en esto, como en todo, también hay excepciones: ver por ejemplo el curioso caso de la mariposa *Biston betularia*).

Como alternativa al *gradualismo* tenemos la teoría del equilibrio puntuado, que afirma que las especies permanecen estables la mayor parte de su historia y que los cambios se producen en cortos periodos de tiempo. Sin embargo, estos periodos de tiempo son *cortos* en sentido geológico, por lo que no veremos que un simio tenga una cría con alas.

EL ADN

Al describir la reproducción de los comerreps, he hablado de *herencia* y de *mutación*, pero no he explicado ninguno de los dos procesos, no he explicado por qué los comerreps son capaces de hacer copias exactas de sí mismos ni por qué en ocasiones no son tan exactas (mutan) y le pasan esa mutación a su descendencia.

Para entender cómo todo esto es posible vamos a necesitar conocer, al menos someramente, la estructura de la molécula del ácido desoxirribonucleico, más conocido por sus siglas

ADN. La importancia del ADN reside en que es capaz de lo más extraordinario, a saber, crear copias de sí misma y codificar recetas de seres vivos, pero también de lo más vulgar, como es estropearse, o, dicho técnicamente, experimentar mutaciones.

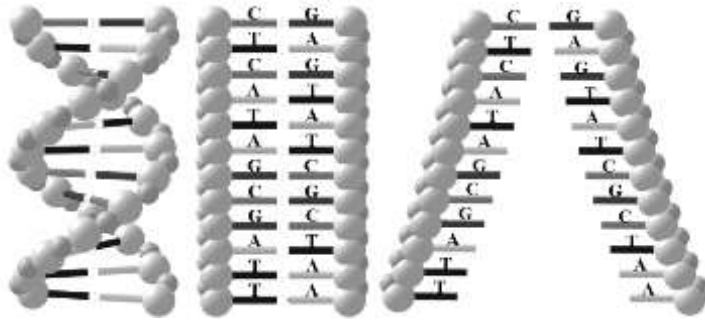
La estructura

El ADN es una gran molécula con forma de doble hélice constituida por dos largas cadenas de moléculas unidas entre sí. En la portada de este libro puedes ver un dibujo esquemático. Los eslabones de las cadenas que se enredan una respecto de la otra son azúcares (esferas blancas, más grandes) y fosfatos (esferas verdes, más pequeñas). De cada azúcar de una de las cadenas sale una molécula que se une a otra que sale de la cadena opuesta. Estas moléculas que hacen de puente entre los azúcares de las dos cadenas son **bases nitrogenadas** y en el ADN las encontramos tan solo en cuatro variantes que tienen los exóticos nombres de adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C). En el gráfico les he asignado arbitrariamente los colores amarillo, azul, rojo y verde, respectivamente. Al conjunto de una base nitrogenada, un azúcar y un fosfato se le llama **nucleótido**.

Si nos fijamos un momento en el diseño, nos daremos cuenta de una característica fundamental de las uniones entre las bases nitrogenadas, y es que la adenina solo puede enlazarse con la timina y la guanina con la citosina. Esto es crucial porque la vida sobre nuestro planeta se basa en este doble emparejamiento: adenina-timina y guanina-citosina (A-T y G-C).

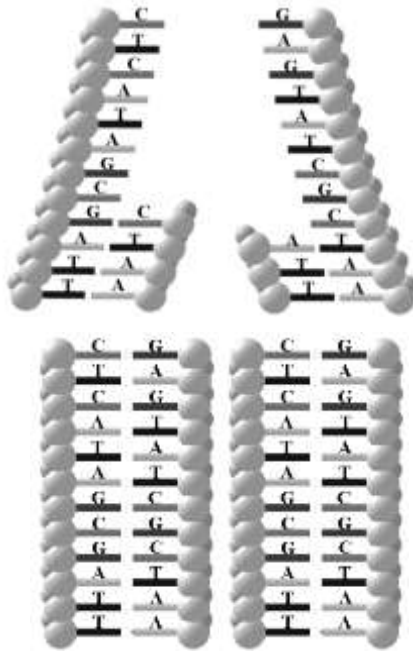
La copia

La forma en que el ADN produce copias de sí mismo es conceptualmente sencilla (otra cosa es la bioquímica involucrada). Todo empieza en una cierta zona del ADN: el origen de la replicación. En esta zona las dos cadenas se desenredan y los enlaces entre las bases se rompen, de modo que la adenina deja de estar conectada a la timina y la guanina a la citosina. Las dos cadenas de ADN se mantienen entonces separadas con sus bases desparejadas (en las siguientes figuras he sobrescrito en cada caso la inicial del aminoácido representado para mayor claridad).



Cada una de estas cadenas separadas va a servir ahora de molde para una nueva cadena complementaria: basta unir cada uno de los nucleótidos desparejados con un nuevo nucleótido (sintetizado para la ocasión) siguiendo los emparejamientos A-T y G-C (en la figura siguiente se puede ver cómo se empiezan a formar dos nuevas cadenas complementarias de las dos cadenas originales).

El proceso termina cuando todos los nucleótidos de las dos cadenas originales se han emparejado con los nucleótidos de las dos nuevas cadenas complementarias. De esta manera, donde había una única molécula de ADN habrá ahora dos moléculas exactamente iguales a la inicial.



Este método de replicación se dice *semiconservador* porque cada nueva molécula de ADN está formada por una cadena de la molécula original y una nueva cadena construida sobre el molde proporcionado por la primera.

El código

Visto que el ADN es capaz de replicarse a sí mismo, vamos a ver cómo también es capaz de codificar recetas para construir seres vivos.

Para dar forma a un ser vivo necesitamos **proteínas**. Entre sus funciones está formar parte estructural de los tejidos; catalizar los procesos bioquímicos en su papel de enzimas; coordinar el funcionamiento del organismo actuando como hormonas y participar de su defensa como anticuerpos. Es decir: construir

un organismo es construir sus proteínas. Ellas y un medio ambiente adecuado harán el resto.

Las proteínas son largas cadenas moleculares formadas por otras moléculas más sencillas llamadas **aminoácidos**. En un ser vivo puede haber varios miles de proteínas distintas, pero resulta que todas ellas están constituidas por secuencias de tan solo veinte aminoácidos. Esto es particularmente sorprendente, porque toda la extraordinaria complejidad de la vida se basa en un juego de construcción que solo tiene veinte tipos distintos de piezas.

Para construir un ser vivo tenemos, por tanto, que saber el orden en el que debemos encadenar las secuencias de aminoácidos que forman las proteínas. Esta información es la que está codificada en el ADN. Lo extraordinario es que conocemos el código. Un código relaciona una serie de signos con un cierto significado. En el caso del **código genético**, los signos son palabras, llamadas *codones*, de tres letras. Y los significados a los que se refieren esas palabras son los veinte aminoácidos proteicos. Lo más sorprendente viene ahora: las letras que forman el alfabeto genético son las cuatro bases nitrogenadas que unen las dos cadenas del ADN. Si recordamos sus nombres (**A**denina, **T**imina, **G**uanina y **C**itosina) podemos utilizar sus iniciales para representar las palabras de este código bioquímico. Así, los codones pueden escribirse como palabras del estilo de ATG, CCC, CGT...

Una de las hazañas científicas más importantes del siglo xx fue descifrar este código. Al hacerlo, al encontrar a qué aminoácido hace referencia cada codón, nos hicimos con la clave necesaria para interpretar los procesos de construcción de todos los seres vivos. El código completo se puede ver en la página siguiente.

El código genético es degenerado. Esto quiere decir que un mismo aminoácido puede estar codificado por más de un

codón. Esto se debe a que con las cuatro letras (A, T, G, C) de que disponemos podemos escribir sesenta y cuatro palabras distintas de tres letras. Como para ensamblar proteínas tenemos que referirnos a tan solo veinte aminoácidos, nos sobran codones, por lo que, a parte de algunas secuencias que se utilizan como signos de puntuación, se dan los casos de sinonimia que se observan en la tabla de la página siguiente.

Tabla: el código genético en el ADN

		T	C	A	G
T	T	TTT Fe	TTC Fe	TTA Leu	TTG Leu
	C	TCT Ser	TCC Ser	TCA Ser	TCG Ser
	A	TAT Tir	TAC Tir	TAA **	TAG **
	G	TGT Cis	TGC Cis	TGA **	TGG Tri
C	T	CTT Leu	CTC Leu	CTA Leu	CTG Leu
	C	CCT Pro	CCC Pro	CCA Pro	CCG Pro
	A	CAT His	CAC His	CAA Gln	CAG Gln
	G	CGT Arg	CGC Arg	CGA Arg	CGG Arg
A	T	ATT Ile	ATC Ile	ATA Ile	ATG Met *
	C	ACT Tr	ACC Tr	ACA Tr	ACG Tr
	A	AAT Asn	AAC Asn	AAA Lis	AAG Lis
	G	AGT Ser	AGC Ser	AGA Arg	AGG Arg
G	T	GTT Val	GTC Val	GTA Val	GTG Val
	C	GCT Ala	GCC Ala	GCA Ala	GCG Ala
	A	GAT Asp	GAC Asp	GAA Glu	GAG Glu
	G	GGT Gli	GGC Gli	GGA Gli	GGG Gli

* El codón ATG también indica el inicio de la traducción.

** Los codones TAA, TAG y TGA indican parada.

Los veinte aminoácidos proteicos

Alanina (Ala)	Isoleucina (Ile)
Arginina (Arg)	Leucina (Leu)
Asparagina (Asn)	Lisina (Lis)
Ácido aspártico (Asp)	Metionina (Met)
Cisteína (Cis)	Prolina (Pro)
Fenilalanina (Fe)	Serina (Ser)
Glicina (Gli)	Tirosina (Tir)
Ácido glutámico (Glu)	Treonina (Tri)
Glutamina (Gln)	Triptófano (Trp)
Histidina (His)	Valina (Val)

Veamos un ejemplo de traducción. Cogemos el trozo de ADN que hemos replicado antes y suponemos que la cadena codificante, la que contiene la información acerca de los aminoácidos que queremos ensamblar, es la de la izquierda.

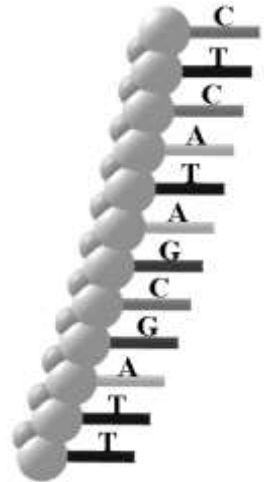
Si la leemos de arriba abajo, tenemos la secuencia

CTCATAGCGATT.

Ahora, usando el código mostrado en la tabla, traducimos cada grupo de tres letras, cada codón, por su aminoácido correspondiente:

- CTC: Leucina
- ATA: Isoleucina
- GCG: Alanina
- ATT: Isoleucina

De este modo, la secuencia de bases en la molécula de ADN se traduce en la secuencia de aminoácidos leucina-isoleucina-



alanina-isoleucina. Repitiendo este proceso a lo largo de la cadena de ADN, podemos formar, aminoácido a aminoácido, cada una de las proteínas que necesitemos para construir un ser vivo.

En realidad esta traducción no se realiza a partir del ADN, sino que el código es transferido en el núcleo celular a otro ácido nucleico, el ARN mensajero (en este ácido la timina se sustituye por uracilo). Este ARN mensajero es quien lleva la información del ADN a los ribosomas, orgánulos celulares donde se realiza la traducción y se fabrican las proteínas ensamblando los aminoácidos aportados por el ARN de transferencia.

En cualquier caso, lo importante es que disponemos de una molécula, el ADN, que no es solo capaz de replicarse a sí misma, sino también de codificar en su propia estructura toda la información necesaria para el desarrollo y funcionamiento de la vida.

Y lo asombroso es que todo esto se consigue, como ya he dicho, con cuatro bases nitrogenadas que codifican los veinte aminoácidos que forman todas las proteínas.

Mutaciones

Sí, las moléculas de ADN son capaces de replicarse a sí mismas. Gracias a esta réplica los individuos pueden dejar en herencia a sus descendientes sus características fisiológicas. Si los gatos tienen gatitos y de una semilla de calabaza sale una calabaza es porque los progenitores le pasan a sus descendientes el ADN con todas las instrucciones de la especie. En el contexto de la vida, la herencia consiste en el código genético, en la secuencia de bases nitrogenadas que van a permitir construir un nuevo individuo.

Pero las réplicas no son siempre perfectas. El segundo principio de la termodinámica dice que cualquier sistema cerrado tiende a pasar de estados ordenados a estados menos ordenados. Pero esto es algo que vemos todos los días: basta dejar pasar el tiempo para que el caos se apodere del armario de la ropa. Al ADN también le pasa: no siempre se replica exactamente. Puede ser culpa del medio ambiente, de ataques de patógenos, de radiactividad, de rayos cósmicos, incluso producto de efectos cuánticos: la cuestión es que, por unas razones u otras, a veces las copias de ADN no son perfectas.

Si estas mutaciones ocurren en células no germinales podrán producir cambios en el fenotipo del individuo y ser, por ejemplo, de un color distinto al de sus ancestros, pero esta novedad no pasará a su descendencia. Sin embargo, si las mutaciones se producen en el ADN de células germinales, es decir, aquellas que generan los gametos (las células a partir de las que se desarrollará la descendencia), el individuo que se desarrolle a partir de esa secuencia alterada heredará el cambio y será distinto en algo. Será un mutante.

Dicho así puede resultar amenazador, pero lo cierto es que si no se produjesen estos errores de copia no habríamos pasado de ser una simple molécula flotando en un charco de vaya usted a saber qué. Gracias a esas mutaciones, cada generación cuenta con alteraciones que entran en el juego de la selección natural. Gracias a esos errores los comerreps pueden ser un poco más rápidos, las jirafas tener el cuello un poco más largo o los australopitecos un poco más listos. Y ser más lentos, cuelllicortos o tirando a brutos: las mutaciones se producen al azar y la mayoría de ellas no tendrán consecuencias significativas o serán mortales y desaparecerán al desaparecer los individuos que las heredan. Pero si, como hemos visto, esas mutaciones contribuyen a la supervivencia del individuo, este se reproducirá y esos preciosos errores de copia quedarán

fijados en el ADN para uso de las generaciones venideras a veces durante millones de años.

LA NUEVA SÍNTESIS

Primero tuvimos la teoría de la evolución por selección natural, que explica como los organismos se van adaptando al medio mediante un proceso de replicación, variación y selección. Después descubrimos la estructura del ADN y con ella el soporte físico de esos tres procesos, pues se trata de una molécula capaz de replicarse a sí misma, de codificar información y de mutar y generar variantes.

Ahora sabemos por qué surgen comerreps más rápidos. Ahora sabemos por qué los descendientes de los comerreps más rápidos heredan la velocidad de sus ancestros. En resumen, ahora sabemos cómo las especies van variando su diseño y cómo, en beneficio de su supervivencia, van adaptándose a las condiciones ambientales.

La evolución es un tema complejo y aún abierto: nada se ha dicho aquí de la transferencia horizontal de genes; de la recombinación; del flujo genético, de la deriva genética, de la selección sexual; del equilibrio puntuado; del desarrollo embrionario y de otros muchos aspectos que precisan o modifican la teoría. Pero este apéndice no pretende ser, ni mucho menos, ser un tratado sobre la evolución, sino tan solo indicar los puntos clave de la teoría de la evolución de las especies por selección natural y de su soporte en la estructura del ADN, lo justo para mostrar que la complejidad de la vida no surge de ninguna clase de mente y que no son necesarios ni diseñadores cósmicos ni relojeros demiúrgicos. Las especies surgen como consecuencia de un proceso espontáneo capaz de obtener soluciones a partir del azar, de congelar el error afortunado y convertirlo en regla.

Si el lector necesita sentir vértigo existencial, le recomiendo que imagine el proceso que va, ininterrumpidamente y a lo largo de miles de millones de años, de un puñado de moléculas allá en la tierra primigenia a las amebas, acelgas, tigres o humanos que hoy la poblamos.

MODELO DE LA MOLÉCULA DE ADN

<https://www.geogebra.org/m/q3mnbs2d>

PARA SABER MÁS

Algunas sugerencias para profundizar en la evolución.

- *El origen de las especies*, Charles Darwin.
- *La teoría de la evolución*, Francisco J. Ayala.
- *Genoma*, Matt Ridley.
- *El relojero ciego*, Richard Dawkins.
- *El quark y el jaguar*, Murray Gell-Mann.
- *El azar y la necesidad*, Jack Monod.
- *La biología del futuro*, AA.VV. Edición de Murphy y O'Neill.
- *La evolución del deseo*, David Buss.