

La Tierra es un planeta vivo. Está situado a la distancia justa del Sol que permite el desarrollo de los organismos en su superficie. Además es un planeta geológicamente activo, lo que ha dado lugar a una enorme variedad paisajística, que a su vez ha favorecido la aparición de incontables formas de vida.

La característica principal de la vida en la Tierra es sin duda su inmensa diversidad. A día de hoy hemos sido capaces de describir y catalogar 1,2 millones de especies. Sin embargo, esto sólo representa alrededor del 14% del número estimado de especies que habitan en la Tierra: 8,7 millones en total.

Por otro lado, la Tierra es antigua. Su edad se estima en 4,5 billones de años. Sorprendentemente, la vida pudo estar presente incluso antes de los 3,8 millones de años. Desde el origen de la vida en la Tierra hasta nuestros días ha tenido lugar una fascinante sucesión de organismos, cuyo resultado es la biodiversidad actual.

Dos corrientes de pensamiento radicalmente opuestas han tratado de explicar el origen de esta biodiversidad. Por un lado, el supernaturalismo asocia la biodiversidad al deseo creador de fuerzas supranaturales, como dioses o seres mitológicos. Por contrapartida, el naturalismo busca las explicaciones en la propia naturaleza y sus leyes.

Gracias al esfuerzo de innumerables científicos y pensadores, disponemos a día de hoy, de una teoría integradora que no sólo da cuenta de la biodiversidad, sino que conecta los procesos biológicos a todos los niveles y entre las distintas disciplinas biológicas. Esta teoría es la teoría de la evolución.

En esta ponencia hago un recorrido histórico centrado en la evolución de la propia teoría de la evolución: desde la Grecia antigua hasta el siglo XXI, pasando por supuesto, por los trabajos clásicos de Lamarck, Darwin, Wallace y Mendel.

Sin embargo, la biología se encuentra hoy al comienzo de una nueva era, la era genómica, caracterizada por la masiva secuenciación de genomas, transcriptomas y otros “-omas”, lo cual está revolucionando esta ciencia a muchos niveles.

En consecuencia, muchos de los postulados clásicos de la teoría de la evolución están siendo revisados a la luz de los descubrimientos científicos más recientes, lo que está produciendo sorprendentes revelaciones. Es por esto que en la segunda parte de la ponencia, expongo el panorama actual sobre estas fascinantes cuestiones.

Finalmente, os invito a debatir conmigo las diferentes implicaciones que tiene para nosotros el aceptar los postulados bien de la corriente supernaturalista o bien de la corriente naturalista.

1. Del Supernaturalismo al Naturalismo

La aceptación científica y social de la evolución biológica es bastante reciente. Durante la mayor parte de la historia humana, las explicaciones dogmáticas sobre el origen del mundo y de los seres que lo habitan han sido de tipo mitológico o religioso, basadas en la existencia de dioses, semidioses o espíritus, lo suficientemente poderosos como para crear el mundo y la naturaleza según sus deseos. Esta corriente de pensamiento se denomina supernaturalismo; término que hace referencia a la supuesta naturaleza de estos seres creadores, situada por encima de la nuestra.

Por contrapartida, el naturalismo considera que los fenómenos naturales tienen causas naturales, las cuales pueden llegar a ser comprendidas aplicando el método científico. Las causas sobrenaturales no tienen cabida en ciencia ya que no pueden ser testadas mediante experimentos.

Sin duda el mito de la creación más conocido en nuestra cultura es el narrado en el primer libro del Antiguo Testamento, el Génesis. Según este mito, Dios creó a Adán, el primer hombre, y lo ubicó en el huerto del Edén; después creó a los animales y por último a Eva, la primera mujer, a partir de una costilla de Adán. Esta visión de las especies como entidades fijas creadas de

manera inmediata por Dios ha prevalecido durante la mayor parte de nuestra historia.

Debemos reconocer que resulta muy atractivo pensar que nosotros los humanos seamos la única especie creada por Dios a su imagen y semejanza, que hayamos sido colocados por él en la cúspide de la naturaleza, disponiendo de todas las demás especies para nuestro disfrute y que habitemos en un mundo situado en el centro del universo. Puedo comprender que para algunos haya resultado una lástima que la ciencia y la filosofía hayan destruido progresivamente este mito.

El primer varapalo que sufrió esta visión del mundo provino de la astronomía. Ya desde la antigua Mesopotamia el sistema astronómico prevalente fue el geocéntrico, que sitúa a la Tierra inmóvil en el centro del universo.

Este paradigma cambió en el siglo XVI, cuando Nicolás Copérnico publicó un modelo matemático para el movimiento de los astros alrededor del Sol, que resolvía muchos de los problemas del modelo geocéntrico. El modelo heliocéntrico de Copérnico chocó con las ideas religiosas de la época ya que desplazaba al ser humano desde el centro del universo a una posición móvil en la periferia.

Sin embargo, este modelo supuso una revolución científica, ya que rompió con muchas barreras del pensamiento de la época y desencadenó la idea de que el hombre está gobernado por la razón, la cual puede ser utilizada

para comprender y controlar la naturaleza. Durante el siglo XVII la razón cobró fuerza sobre la religión. Este periodo de escepticismo y de cuestionamiento de los dogmas se denomina La Ilustración y se caracterizó por la búsqueda de explicaciones racionales y naturales para el mundo.

En el siglo XVIII se produjo la transición hacia el naturalismo en geología. Hasta entonces, los geólogos explicaban la historia de la Tierra mediante relatos bíblicos como el diluvio universal. Las especies extintas del registro fósil constituían aquellas especies que no habían podido sobrevivir al diluvio. Además se creía que la Tierra fue creada en el año 4004 antes de Cristo, tal como lo calculó el Arzobispo Usher en base a la Biblia.

Los trabajos de James Hutton y Charles Lyell cambiaron la percepción de la edad de la Tierra, que quedó establecida en millones de años. El concepto de tiempo geológico será muy importante para el desarrollo de la teoría de la evolución biológica, ya que ofrece el marco temporal que necesita la evolución para modelar las especies.

En el siglo XIX el último gran tabú religioso que quedaba por romper era el biológico. Las hipótesis evolutivas propuestas por Lamarck, Darwin, Wallace y otros, supusieron abandonar la idea de la creación especial por voluntad divina y aceptar una explicación natural para la biodiversidad, que implica la transformación de unas especies en otras a través del tiempo.

2. Evidencias del proceso evolutivo hasta el siglo XIX

Las primeras teorías evolutivas buscaban dar respuesta a las abundantes evidencias científicas que contradecían la teoría de la creación especial, las cuales eran de seis tipos principales:

1. Homologías anatómicas

A principios del siglo XIX tiene lugar el desarrollo de una nueva ciencia, la anatomía comparada, que estudia las semejanzas y diferencias entre las estructuras morfológicas de los organismos. Los estudiosos de esta disciplina quedaron sorprendidos al descubrir que organismos con estilos de vida muy distintos poseen los mismos bloques anatómicos básicos, pero modificados para realizar diferentes funciones. Por ejemplo, la misma estructura ósea constituye unidades funcionales tan distintas como la aleta de una ballena, el ala de un murciélago, la pata de un gato o el brazo de una persona.

Estas estructuras se denominan homologías anatómicas y sólo tienen sentido si los organismos heredaron la unidad estructural básica de un ancestro común. Posteriormente, cada linaje modificó la estructura de diferente manera para adaptarla a la realización de distintas funciones.

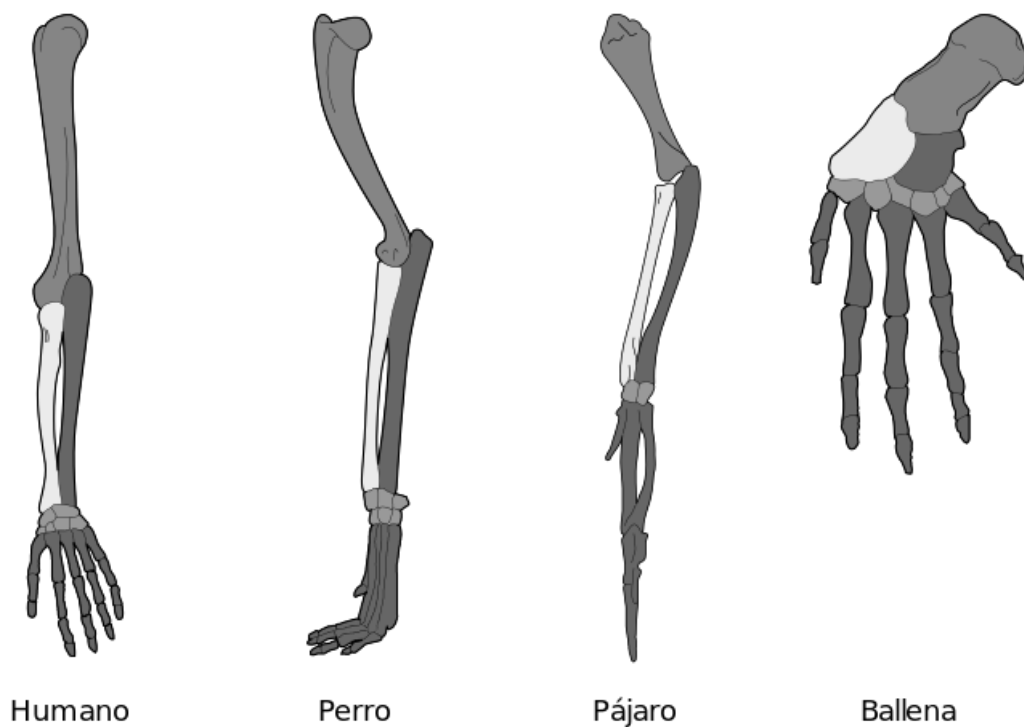


Figura 1. Homología anatómica entre los miembros superiores de los vertebrados. La misma estructura ósea básica constituye unidades funcionales tan distintas como el brazo del un humano, la pata de un perro, el ala de un ave o la aleta de una ballena.
CreativeCommons CC0 1.0 Universal PublicDomainDedication.

2. Estructuras vestigiales

Igualmente desconcertantes resultaban las estructuras vestigiales, que son versiones rudimentarias en un organismo de una estructura corporal u órgano que desempeña una función importante en otro organismo.

Por ejemplo, el coxis humano es el remanente de una cola que poseemos sólo durante el desarrollo embrionario y que es

destruida antes del parto. De hecho existen casos de personas que nacen con cola debido a mutaciones que impiden su destrucción embrionaria. Por lo tanto, el coxis evidencia que provenimos de ancestros con cola, aunque nuestro linaje la haya perdido.

Del mismo modo, los músculos erizadores del pelo, que nos ponen la piel de gallina cuando tenemos frío o miedo, son los vestigios del abundante pelo corporal de nuestros ancestros, que podían erizar para protegerse del frío o para intimidar a un enemigo, tal como hacen hoy día otros animales.

La explicación más plausible para el origen de las estructuras vestigiales es que son estructuras degeneradas porque su uso ancestral no ha supuesto una ventaja para el linaje de los organismos que las portan. Por lo tanto, sólo tienen sentido bajo una perspectiva evolutiva. ¿Por qué habría creado Dios a las especies con estructuras vestigiales?

3. Embriología comparada

En el siglo XIX se empezó a comparar también el desarrollo embrionario de diferentes especies animales. El embriólogo alemán Karl Ernst von Baer observó que todos los vertebrados muestran un patrón morfológico común en las primeras fases del desarrollo embrionario, lo que también indica una relación de parentesco entre estos animales.

4. Biodiversidad

A mediados del siglo XVII, la hipótesis dominante sobre el origen de la biodiversidad era el relato bíblico del arca de Noé. Sin embargo, para aquel entonces Carl Linnæus y otros naturalistas habían ya descrito más de 6.000 especies de animales y muchas más de plantas. Además, las grandes expediciones europeas de exploración pusieron de manifiesto la enorme diversidad biológica terrestre, que había permanecido ignota hasta la fecha para los europeos.

La toma de conciencia de la magnitud real de esta biodiversidad generó un gran problema para la hipótesis del arca: si en la Tierra existen miles de especies, o bien el arca de Noé fue más bien un buque transoceánico en el que se apiñaron todas ellas, o bien la teoría del arca era simplemente falsa.

5. Patrones biogeográficos

La hipótesis del arca afirmaba también que las especies se distribuyeron por la Tierra a partir del lugar en el que se supone que el arca tocó tierra, esto es el Monte Ararat en Turquía. Sin embargo, el estudio de la distribución espacial de las especies, llamado biogeografía, reveló que los patrones biogeográficos sólo tienen sentido bajo la hipótesis evolutiva. ¿Por qué si no hay canguros en Australia y no los hay en Turquía?

6. El registro fósil

En el siglo XIX, el registro fósil ya evidenciaba la existencia de formas de vida del pasado diferentes de las actuales. Algunos las consideraban las especies extintas durante el diluvio universal. ¡Se ve que el arca de Noé no daba abasto!

Pero si la hipótesis de la evolución de las especies es cierta, el registro fósil debería contener formas de transición en las que se combinen caracteres antiguos y nuevos. Al poco tiempo de que Darwin publicase *El origen de las especies*, la forma de transición más famosa a fecha de hoy fue descubierta: el reptil-ave *Archaeopteryx*, que poseía una estructura corporal de dinosaurio, pero plumas y alas como las aves.

3. La Teoría de la Evolución hasta Darwin y Wallace

Tal cúmulo de evidencias científicas predispuso a los pensadores del siglo XIX para tomar en serio las hipótesis evolutivas. Sin embargo estas hipótesis no constituían estrictamente una

novedad, ya que su enunciado se remonta incluso a la antigua Grecia.

La primera persona en proponer el concepto de evolución biológica fue Anaximandro de Mileto, en el siglo VI antes de Cristo. Este filósofo creía que el origen de la vida estaba en el agua y que las diferentes formas de vida se habían desarrollado unas a partir de otras en un ambiente acuático. Según Anaximandro el ser humano se había desarrollado a partir de peces. Aunque esta idea pueda parecer un poco extraña, hoy día sabemos que en esencia es correcta, ya que los humanos somos mamíferos y por tanto evolucionamos a partir de reptiles, los cuales a su vez provienen de peces que dieron el salto a tierra firme.

Sin embargo la visión estática de las especies como entidades fijas creadas por Dios perduró hasta el siglo XVIII. El primero en desafiar esta visión dogmática fue el naturalista francés Georges Louis Leclerc, conde de Buffon, al proponer que ciertos cambios son posibles dentro de las mismas. También Erasmus Darwin, el abuelo del famoso Charles Darwin, publicó ideas evolucionistas por aquella época. Sin embargo, ninguno de estos dos pensadores propuso un mecanismo para explicar por qué cambian las especies.

El primero en proponer una hipótesis evolutiva testable fue Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet Chevalier de Lamarck. Gracias a su obra, *Filosofía Zoológica*, publicada en 1809, el

concepto de evolución cobró popularidad y llegó a un público mucho mayor. Lamarck pensaba que los individuos acumulan cambios en su cuerpo según el uso que hagan del mismo. Más tarde esos cambios son transmitidos a la descendencia, lo que se conoce como la herencia de los caracteres adquiridos. El ejemplo clásico es el de las jirafas, que van estirando el cuello por intentar comer de las ramas más altas. A continuación, el carácter “cuello más largo” es transmitido a la siguiente generación, que a su vez continúa estirando el cuello y así sucesivamente. La herencia de los caracteres adquiridos fue descartada por los investigadores posteriores. Sin embargo, hace poco se comprobó que Lamarck no estaba del todo equivocado, como veremos.

Lamarck también pensaba que existe una tendencia intrínseca a las formas de vida en transformarse en otras más complejas siguiendo la escala de la naturaleza de Aristóteles, que comienza con organismos sencillos como los gusanos y termina en el hombre. Pero, si los organismos sencillos se transforman en complejos, ¿cómo es posible que hoy día todavía existan organismos sencillos? En aquella época esta cuestión resultaba fácil de responder ya que se asumía que las formas de vida simples aparecían por generación espontánea. Por ejemplo, para crear ratones solo había que mezclar ropa sucia con granos de trigo y ¡pum! aparecían los ratones.

En 1859 tiene lugar un hito en la historia de la biología evolutiva: la publicación de *El origen de las especies* de Charles Darwin, cuya importancia radica en que por vez primera alguien conecta el hecho de la evolución con un mecanismo que la produce, la selección natural, para crear así la primera teoría de la evolución.

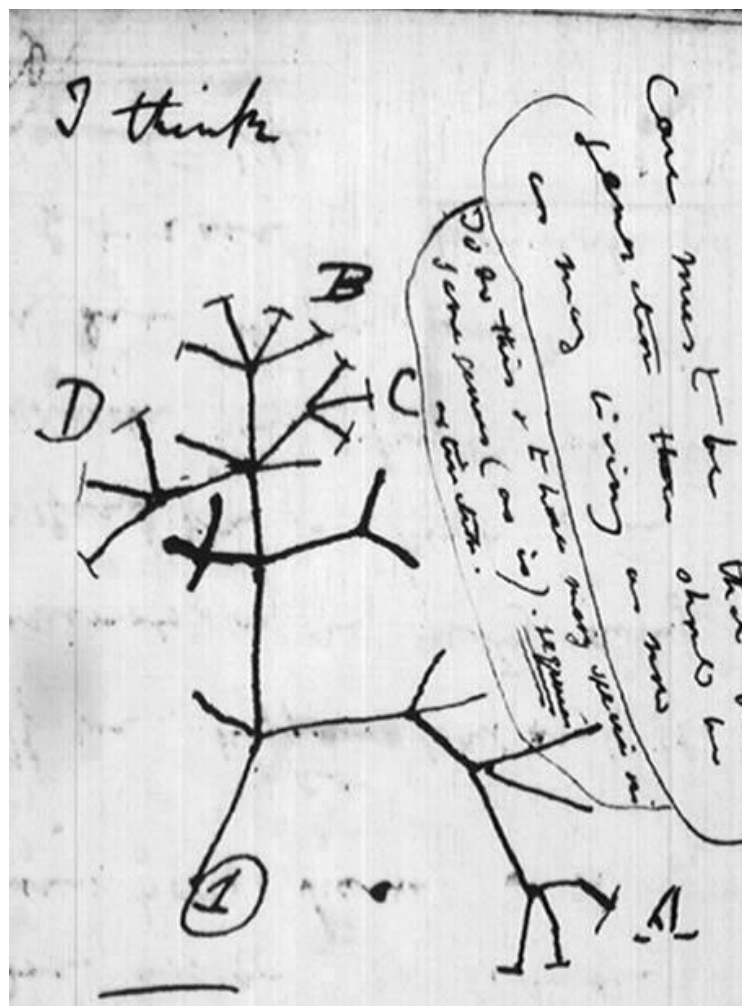


Figura 2. Primer diagrama en forma de árbol filogenético en el que Charles Darwin ilustra la idea de descendencia común.

Entendemos por selección natural el hecho de que algunos caracteres heredables aumentan la probabilidad de que los individuos que los

portan se reproduzcan, por lo que son seleccionados por la naturaleza y se mantienen a lo largo de las generaciones, mientras que otros caracteres reducen esta probabilidad, por lo que tienden a desaparecer. El concepto de selección natural fue propuesto por al menos dos personas antes que Darwin, sin embargo éste fue el primero en adoptarla como mecanismo evolutivo.

Además, Darwin introduce por primera vez el concepto de descendencia común, es decir, que las especies se multiplican en el tiempo a partir de ancestros comunes. A pesar de ser Darwin quien se ha llevado la fama por todo esto, el biogeógrafo Alfred Russel Wallace llegó a las mismas conclusiones que Darwin de forma independiente y en la misma época. Por tanto, Wallace es considerado codescubridor de la teoría de la descendencia con modificación por selección natural, la cual está compuesta por cuatro postulados:

1. Los individuos de una población de cualquier especie presentan variación en la mayoría de sus caracteres.

2. Parte de esta variación se hereda.

3. En cada generación nacen más individuos de los que pueden sobrevivir y algunos individuos tienen mayor éxito que otros en sobrevivir y reproducirse.

4. Que un individuo se reproduzca no depende del azar sino de la variación hereditaria en sus caracteres. Los individuos portadores de caracteres que aumentan las posibilidades de

sobrevivir y reproducirse en un determinado medio, van por lo tanto a reproducirse más, lo que va produciendo cambios en la población a lo largo del tiempo, es decir, evolución.

El principal problema para la aceptación de la teoría de Darwin y Wallace era que nadie en aquella época entendía el funcionamiento de la herencia de los caracteres biológicos. Darwin creía, al igual que Lamarck, en la herencia de los caracteres adquiridos. Sin embargo, algunos investigadores hicieron experimentos para probar que la herencia de los caracteres adquiridos no se cumplía. Por ejemplo, August Weismann cortó la cola de sucesivas generaciones de ratones. Sin embargo, de los cruces de ratones sin cola nacían siempre ratones con cola.

En contrapartida, Weismann propuso la teoría del plasma germinal, según la cual la herencia en organismos multicelulares sólo ocurre mediante la unión de los gametos (óvulos y espermatozoides). Conforme a esta teoría, un carácter adquirido por cualquier parte del cuerpo que no sea los gametos no será transmitido a la descendencia. Además Weismann postuló que el proceso generador de variación morfológica es la reproducción sexual. La fusión de la teoría del plasma germinal con el Darwinismo dio lugar al Neodarwinismo.

4. La influencia de la Genética en la Teoría de la Evolución

La genética es la ciencia que estudia la herencia de los caracteres biológicos. El primer genetista fue el monje agustino Gregor Mendel, quien publicó sus trabajos sobre las leyes que controlan la herencia de los caracteres siete años después de la publicación de *El origen de las especies*. Sin embargo los experimentos de Mendel no sirvieron de gran ayuda al Darwinismo, ya que pasaron desapercibidos y fueron ignorados hasta comienzos del siglo XX.

Mendel realizó sus experimentos con plantas de guisantes. Mediante cruces entre variedades de plantas con rasgos distintos, estudió cómo estos rasgos se transmitían de unas generaciones a otras. Mendel demostró así la existencia de entidades físicas particulares que transmiten la información sobre los caracteres biológicos a través de las generaciones. Mendel descubrió lo que más tarde se denominarían “genes”.

El desarrollo de la genética durante el siglo XX nos ha permitido conocer y comprender la herencia biológica, lo cual ha resultado fundamental para entender el funcionamiento de la evolución. La genética nos ha enseñado que los genes se localizan en los cromosomas, que a su vez se encuentran en los núcleos de las células. Además, los cromosomas están constituidos por ADN, que es una molécula con estructura de doble

hélice compuesta por cuatro bases nitrogenadas llamadas adenina, timina, citosina y guanina. Los genes son por tanto fragmentos de ADN que guardan la información sobre un carácter concreto, como puede ser la formación del ojo. Por otro lado los alelos son las diferentes versiones de un gen, que introducen variación en ese carácter, como por ejemplo, el color de ese ojo.

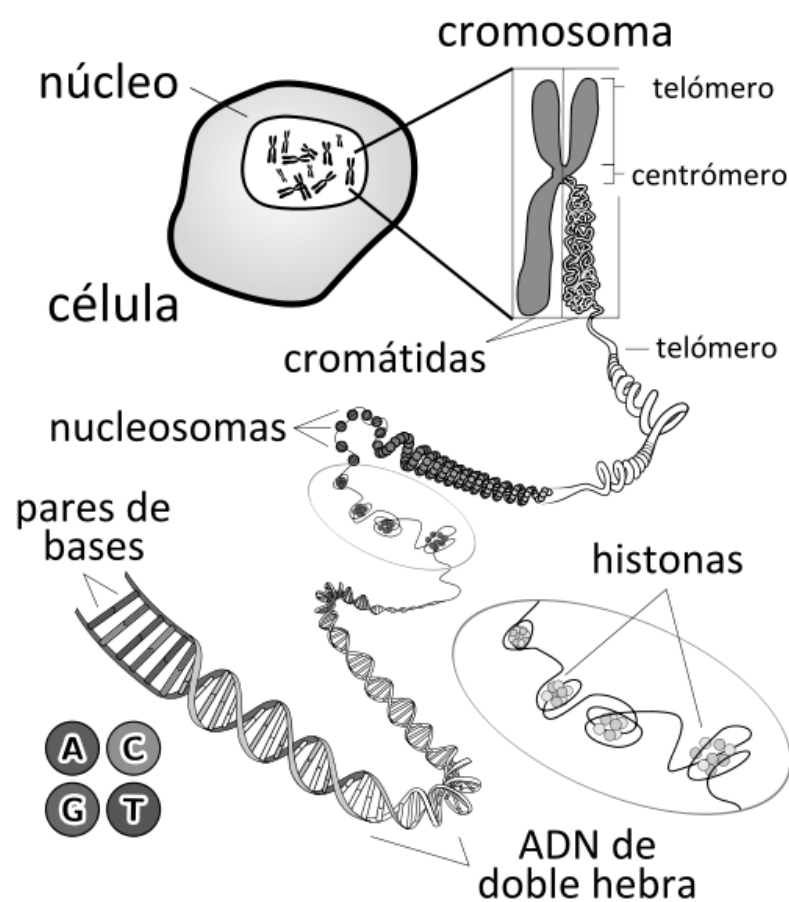


Figura 3. Organización del materia genético en eucariotas. Las unidades que transmiten la información genética se denominan genes y se localizan en los cromosomas, que a su vez se encuentran en los núcleos de las células. Los genes son fragmentos de ADN, una molécula con estructura de doble hélice compuesta por cuatro bases nitrogenadas (adenina, timina, citosina y guanina). El orden de las bases en la cadena de ADN constituye la información genética.

CreativeCommonsAttribution 3.0 Unportedlicense.

El orden de las bases en la cadena de ADN constituye la información genética, ya que las células producen las proteínas siguiendo las instrucciones del ADN. Es por esto que cambios en las bases del ADN, llamados mutaciones, pueden producir proteínas mutantes y por tanto dar lugar a caracteres nuevos. Darwin no sabía cómo se originaba la variabilidad en los caracteres porque no conocía las mutaciones.

La genética se mantuvo al margen de la evolución durante sus comienzos. Sin embargo entre los años 30 y 50 del siglo XX tuvo lugar la fusión del neodarwinismo con la teoría mendeliana de la herencia, dando lugar a la teoría sintética de la evolución. Esta fusión ocurrió en dos fases. En la primera tuvo lugar el desarrollo de la genética de poblaciones, que aplicó modelos matemáticos para describir cómo cambian las frecuencias de alelos en las poblaciones a lo largo de las generaciones debido a la selección natural y otros factores. Esto demostró teóricamente que la selección natural puede operar sobre la genética mendeliana, dando plausibilidad a la teoría de la evolución de Darwin. En la segunda fase tuvo lugar la integración en el marco de la teoría sintética de diferentes áreas de la biología que hasta entonces se habían desarrollado de manera independiente, como la genética, la zoología, la paleontología y la botánica.

La teoría sintética definió la evolución como el proceso gradual de cambio en las frecuencias alélicas de las poblaciones debido a la acción de

la selección natural sobre los individuos. Este enfoque reduccionista, centrado en el cambio de frecuencias alélicas, dominó la biología evolutiva hasta hace bien poco. Sin embargo surgieron dos críticas principales al mismo; la primera tuvo que ver con el gradualismo de la evolución y la segunda con el papel de la selección natural como único mecanismo evolutivo.

La teoría del equilibrio puntuado de Niles Eldredge y Stephen Jay Gould contradice la visión gradualista de la evolución de la teoría sintética. Según el equilibrio puntuado, las especies no evolucionan de forma gradual porque vayan acumulando pequeños cambios, sino que los cambios se producen de forma repentina y son importantes. Sin embargo, durante la mayor parte del tiempo no se producen cambios en las especies. Hoy día se acepta que tanto la visión gradualista como la puntualista son correctas, ya que en evolución caben fenómenos de ambos tipos.

Por otro lado la teoría neutralista de la evolución molecular, propuesta por Kimura en 1968, se opone a que la selección natural sea el único mecanismo capaz de poner en marcha la evolución y propone que el azar juega también un papel fundamental. Esta teoría se basa en que la mayoría de mutaciones en el ADN no llevan asociado un cambio en los caracteres a nivel macroscópico. Por lo tanto, no resultan beneficiosas ni perjudiciales para los individuos que las portan y en consecuencia la selección

natural no puede elegir entre ellas. Se denominan mutaciones neutras y tan sólo el azar determina cuales de ellas pasan a la siguiente generación.

Por ejemplo, las tuátaras son reptiles que parecen muy antiguos ya que morfológicamente han cambiado muy poco. Sin embargo el estudio de su ADN muestra que a nivel molecular acumulan cambios a un ritmo muy rápido. Estos cambios son neutros ya que no han afectado a su morfología. Pero para entender mejor el papel fundamental del azar en la evolución pensemos en el león más fuerte, rápido y apuesto del Serengeti. Estas características hacen que sus probabilidades de tener descendencia sean muy altas; la selección natural está a su favor. Pero he aquí que al pobre le cae un rayo justo antes de reproducirse. ¡Mala suerte! El azar ha vencido a la selección natural.

5. La Síntesis Expandida

A partir de los años 70 del siglo XX, la biología entra en una nueva era gracias a la secuenciación genómica y el avance de la biología molecular. El genoma es el conjunto de genes contenidos en los cromosomas, lo que representa la totalidad del

material genético que posee un organismo o una especie en particular. Los fascinantes descubrimientos científicos realizados a partir de estos años han revolucionado la visión que teníamos del proceso evolutivo y han dado lugar a la expansión de la síntesis hacia otras áreas de la biología, tanto antiguas como nuevas.

Un gran mito que se derrumbó como consecuencia de la secuenciación genómica es la idea de que los genes se disponen bien organizados, uno al lado del otro, en los cromosomas. La secuenciación del genoma humano ha puesto de manifiesto que sólo un 1,5% del mismo da lugar a proteínas. Entonces, ¿para qué sirve el 98,5% restante? Parte de la respuesta a esta pregunta tiene que ver con los experimentos de Barbara McClintock en los años 40. Estudiando el maíz, McClintock descubrió los transposones o genes saltarines, que constituyen la mitad de nuestro genoma y el 90% del genoma del maíz.

Los transposones son pequeños fragmentos de ADN capaces de copiarse a sí mismos e integrarse en distintos lugares del genoma al azar. Por lo tanto, pueden insertarse dentro de un gen y destruirlo. Así mismo, pueden arrastrar consigo a genes cercanos o a fragmentos de genes a otras regiones cromosómicas. Al ser capaces de mezclar y modificar los genes, los transposones constituyen un nuevo mecanismo generador de variabilidad genética. Por ejemplo,

son los responsables de las diferencias en la pulpa de las naranjas.

Dado que los transposones son capaces de copiar e integrar en el genoma también a los genes cercanos a ellos, pueden duplicar los genes. Susumu Ohno propuso en 1970 la duplicación génica como un nuevo mecanismo evolutivo. Según Ohno, una copia del gen duplicado puede conservar la función original, mientras que la otra copia puede acumular mutaciones y adquirir una nueva función. La duplicación génica ha dado lugar a familias de genes de enorme importancia. Por ejemplo, las inmunoglobulinas que forman parte de nuestro sistema inmune han ido apareciendo por duplicación génica y posterior diversificación funcional.

Sin embargo, también pueden tener lugar duplicaciones a mucha mayor escala, como por ejemplo la de todo un cromosoma. En humanos, las duplicaciones cromosómicas dan lugar a síndromes como el de Down, ya que poseer una copia cromosómica extra genera inestabilidad en el genoma. Sin embargo, cuando se duplica todo el genoma, los cromosomas están balanceados y la situación es estable. Las duplicaciones genómicas son bastante frecuentes en la naturaleza, sobre todo en plantas. Los individuos resultantes suelen ser más vigorosos, de mayor tamaño y pueden mostrar caracteres nuevos, lo que contribuye a la formación de nuevas especies.

Otra área que está aportando descubrimientos fascinantes sobre evolución es la genética del desarrollo embrionario. Un conjunto de genes clave regulan la formación de las estructuras morfológicas durante el desarrollo embrionario de los animales. Un pequeño cambio en esta regulación génica puede tener consecuencias enormes para el individuo adulto. Por ejemplo, si tomamos el gen que regula la formación de patas en la mosca y lo activamos en su cabeza, la mosca desarrollará patas en vez de antenas. Del mismo modo, si duplicamos el gen que regula la formación de las alas, la mosca desarrollará un set adicional de alas. De hecho, se ha visto que la gran diversidad de tipos corporales de los artrópodos es debida a pequeños cambios en estos genes. El estudio de los genes que regulan el desarrollo embrionario y de su relación con la evolución de las especies es hoy día una de las áreas de mayor interés en biología, denominada Biología Evolutiva del Desarrollo, o Evo-Devo.

La hibridación o cruce de dos especies distintas constituye otro mecanismo evolutivo. Hasta hace poco tiempo ha habido mucha polémica en torno a si se produjo hibridación entre los seres humanos y los neardentales. Hoy día, gracias a la secuenciación del genoma humano y del neardental a partir de restos óseos, sabemos la verdad. La comparación de estos genomas indica que sí tuvo lugar un evento de hibridación entre ambas especies, que ha dejado en el

genoma humano hasta un 4% de genes neardentales, los cuales están implicados en fisiología y en el desarrollo del cerebro, la piel y los huesos. Sin embargo, esta hibridación ocurrió sólo en algunas poblaciones humanas, que ya habían salido de África, las cuales dieron lugar a los humanos de Europa, Asia y Oceanía. Por lo tanto, las poblaciones humanas ancestrales que permanecieron en África no estuvieron en contacto con los neardentales y no poseen sus genes.

De modo que dos especies cercanas pueden cruzarse y producir descendencia híbrida. Sin embargo, resulta mucho más sorprendente que dos especies pertenecientes a reinos biológicos distintos puedan relacionarse ecológicamente de manera tan íntima que den lugar a un ser nuevo. El ejemplo más fácil de visualizar son los líquenes, compuestos por un alga y un hongo viviendo juntos. La relación ecológica entre dos especies se denomina simbiosis y es uno de los mecanismos más importantes que promueven la aparición de nuevas especies.

La simbiosis puede ser beneficiosa para ambas especies, como en el caso del gusano-planta *Symsagittifera roscoffensis*. Los juveniles adquieren algas del medio marino y las incorporan bajo su piel. Los adultos ya no necesitan alimentarse porque las algas producen los nutrientes para ellos. Las algas a su vez, se benefician de la protección que ofrece el cuerpo del gusano. En otros casos, una especie se

beneficia perjudicando a la otra, como algunos gusanos parásitos. Cuando la simbiosis influye en la evolución de ambas especies hablamos de coevolución. Por ejemplo, diferentes especies de colibríes y de plantas tropicales han evolucionado conjuntamente, ajustando el tamaño de los picos y el tamaño de las flores. En esta simbiosis el colibrí consigue néctar de la planta, la cual a su vez consigue ser polinizada por el colibrí.

La fusión de especies también ha tenido lugar entre microorganismos y ha sido fundamental para nuestra propia evolución. La teoría de la endosimbiosis seriada, propuesta por Lynn Margulis a finales del siglo pasado, explica que los orgánulos celulares llamados mitocondrias, encargados de producir la energía necesaria para los procesos vitales, son en realidad bacterias que pasaron a vivir en simbiosis con otros microorganismos. Por lo tanto, todas las células que forman nuestro cuerpo son el resultado de la fusión de dos especies de microorganismos. Por otro lado, los cloroplastos son los orgánulos celulares que permiten a las plantas sintetizar la materia orgánica a partir de la energía luminosa del sol, los cuales también se originaron por endosimbiosis a partir de cianobacterias.

Siguiendo con las bacterias, la mayoría somos conscientes de que éstas son capaces de evolucionar muy rápido, porque estamos al corriente del gran problema que supone para la medicina el desarrollo de resistencia a los

antibióticos que está teniendo lugar hoy día. El problema radica en que las bacterias pueden intercambiar fragmentos de ADN y por tanto pueden pasarse genes de unas a otras. De modo que en la naturaleza existen dos tipos de transferencia génica: la vertical que va de padres a hijos, y la horizontal, que se produce entre dos individuos de la misma especie o de especies distintas. La transferencia horizontal de genes complica mucho el árbol de la vida a nivel de microorganismos. El continuo intercambio de ADN entre linajes hace que sea más apropiado hablar de una red evolutiva que de un árbol.

La transferencia horizontal de genes supone un claro ejemplo de herencia de caracteres adquiridos: una bacteria adquiere un gen de otra bacteria, el cual puede ser beneficioso y por tanto es transmitido a la descendencia. Esto es herencia de caracteres adquiridos e indica que Lamarck no estaba totalmente equivocado. Con la secuenciación de genomas, surgen datos cada vez más sorprendentes. Por ejemplo, el gusano nematodo *Pristionchus pacificus* lleva en su genoma genes de celulasas, que son proteínas que digieren la celulosa. Lo sorprendente es que el gusano ha obtenido estos genes a partir de un hongo mucilaginoso. ¡Por lo tanto los genes han sido capaces de saltar del genoma del hongo al genoma del gusano!

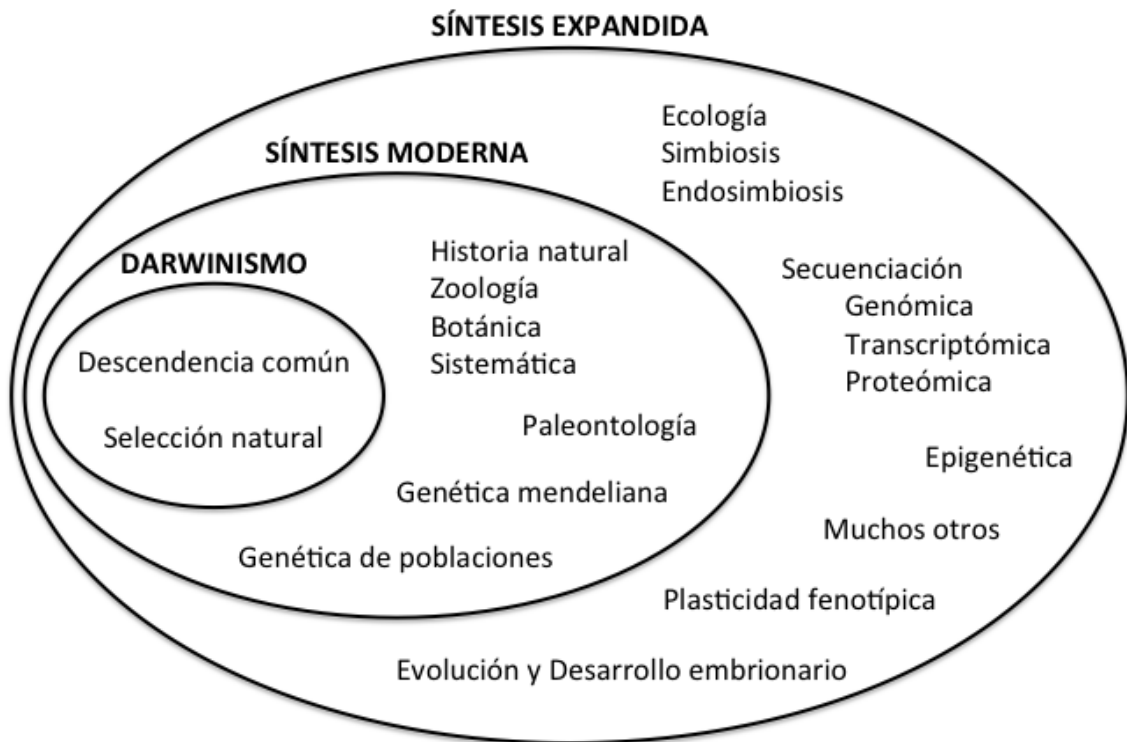


Figura 4. Esquema resumen de la evolución de la teoría de la evolución por la sucesiva incorporación de bloques de conocimiento provenientes de las diferentes disciplinas biológicas. Para más información, ver el texto.

Además, los genes pueden estar activados y producir proteínas, o inhibidos y no producirlas. Los mecanismos epigenéticos son modificaciones químicas en el ADN que regulan si un gen está activado o inhibido. Por ejemplo, todas las células de nuestro cuerpo tienen los mismos genes, pero según se activen unos genes u otros, las células darán lugar a tejido muscular, óseo, nervioso, etcétera. Además se sabe que factores externos al organismo como la dieta, el deporte, las drogas y el estrés, pueden influir en la regulación génica mediante estos mecanismos epigenéticos.

Sorprendentemente, las modificaciones epigenéticas que tienen lugar durante la vida de un individuo pueden ser transmitidas a sus hijos, lo que se denomina herencia epigenética, la cual constituye otro ejemplo de herencia de caracteres adquiridos. Estamos empezando a entender la manera en que factores como el ejercicio y la dieta modifican la forma en que se expresarán los genes de los gametos. Esto contradice la teoría del plasma germinal de Weismann, ya que los cambios que se producen en el cuerpo de los individuos sí pueden afectar a los gametos y sí pueden ser transmitidos a la descendencia. También se ha descubierto que el estado fisiológico de la madre durante el embarazo influye en la expresión de los genes en el embrión, por lo que algunos caracteres del bebé pueden estar relacionados con la fisiología de la madre.

Todos estos descubrimientos ponen de manifiesto que la evolución es un hecho complejo, en el que participan muchos mecanismos distintos a diferentes niveles. La teoría de la evolución es pues integradora, ya que cuanto más sabemos sobre biología, más patentes son las conexiones que la evolución establece entre todas las ciencias biológicas. La idea más fascinante de la teoría de la evolución es que todos los organismos que habitamos en el planeta Tierra provenimos de un ancestro común y por lo tanto, somos todos parientes más o menos cercanos. ¡Tu primo es un gusano y tu prima una bacteria!

6. Evolución vs. creacionismo: reflexiones filosóficas

Pero si a día de hoy las evidencias científicas a favor de la teoría de la evolución son apabullantes, ¿por qué existen todavía grandes colectivos de personas que se niegan a aceptarlas y prefieren seguir creyendo en el relato bíblico de la creación divina?

A mi modo de ver, la explicación religiosa reconforta al creyente por los siguientes motivos:

1. Es bueno pensar que Dios nos ha creado a su imagen y semejanza. Por lo tanto somos la obra maestra de Dios, la especie elegida, los seres más especiales de la creación.

2. Dios nos está vigilando, nos cuida y nos protege de los males.

3. Dios nos recompensará en la otra vida si nuestras obras son las adecuadas en esta.

4. Dios tiene un plan para nosotros. Nuestra vida tiene un sentido que viene dado por Dios. Después de la muerte, seguiremos existiendo en el más allá.

Por contrapartida, aceptar la teoría de la evolución lleva implícito unas consecuencias no tan geniales para nosotros:

1. Somos tan sólo una especie más, surgida por azar y evolución. No somos especiales ni la especie elegida.

2. Ningún ser todopoderoso nos protege de los males y peligros, estamos solos.

3. No habrá recompensa en la otra vida por nuestras buenas acciones, ni castigo por las malas, probablemente porque no habrá otra vida.

4. No existe un plan para nosotros pensado por Dios. Somos sólo un eslabón en la cadena de los seres vivos; una página más en la historia de la vida en la Tierra.

Religión	Ciencia	
Diseño Inteligente	Evolución y Azar	→ Admiración por nuestras especiales características Conexión con todos los seres vivos
Protección del Creador	Solos	→ Responsabilidad
Recompensa futura	Sin recompensa futura	→ Hacer lo correcto por ser lo moral
Sentido de la vida individual	Seres efímeros	→ Importantes aquí y ahora

Figura 5. Evolucionismo *versus* creacionismo. Implicaciones sobre el sentido de la vida individual de ambas corrientes de pensamiento. Ver el texto para obtener información detallada.

La visión evolutiva puede resultar por tanto mucho menos atractiva que la religiosa. Sin embargo las evidencias indican que es la más cercana a la realidad. En mi opinión es hora de aceptar estos hechos y al mismo tiempo cambiar la perspectiva, para poder ver los puntos positivos al respecto, por ejemplo:

1. A pesar de no ser la especie elegida por Dios, somos de hecho muy especiales ya que tenemos consciencia de nosotros mismos, un lenguaje complejo para comunicarnos, capacidad para crear arte, inteligencia suficiente para conocer la naturaleza y el mundo en que vivimos, curiosidad, etc.

2. Estamos solos. ¿Bueno, y qué? Tal vez es hora de aceptar que sólo nosotros podemos cuidar de nosotros mismos y que eso significa también proteger el medioambiente y a las otras especies que habitan la Tierra. Es la única manera de que nuestra existencia en este planeta sea sostenible.

3. No tenemos que ser buenos para conseguir la recompensa y evitar el castigo, sino que debemos hacerlo porque es lo moralmente correcto. Ahí radica la verdadera bondad, la que nace del que hace lo correcto porque cree que es lo que hay que hacer, sin esperar recompensa por ello.

4. Aunque seamos sólo individuos entre los millones de seres humanos y los billones de seres vivos que pueblan la Tierra y aunque nuestras vidas sólo duren unos años, esto no nos hace menos especiales o quita sentido a nuestras vidas.

Lo importante para nosotros es el aquí y el ahora. Y aquí y ahora somos importantes para las personas que nos quieren. Además, según nuestras obras seremos también importantes para la sociedad y para el conjunto de especies que habitan con nosotros en la Tierra.

Bibliografía

- Evolution. Mark Ridley. 3rd Ed. 2004. Blackwell Science Ltd.
- Evolution For Dummies. Krukonis & Barr. 1st Ed. 2008. Wiley.
- Evolution and Genetics. Britannica Illustrated Science Library. 1st Ed. 2008.
- Evolution That Anyone Can Understand. Bernard Marcus. 1st Ed. 2012. Springer.
- The Princeton Guide to Evolution. Jonathan B. Losos. 1st Ed. 2014. Princeton University Press.
- Evolution: Components and Mechanisms. David Zeigler. 1st Ed. 2014. Elsevier.
- Evolutionary Analysis. Freeman & Herron. 5th Ed. 2014. Pearson.
- How Science Works. Evolution. John Ellis. 2nd Ed. 2016. Springer.
- How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? Mora *et al.*, 2011. *PLoS Biol*, 9:e1001127.
- Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon. Bell *et al.*, 2015. *PNAS*, 112:14518-14521.
- Phylogenetic classification and the universal tree. Doolittle WF, 1999. *Science*, 284:2124-2129.
- Deregulated homeobox gene expression in cancer: cause or consequence? Abate-Shen, 2002. *Nature Reviews Cancer*, 2:777-785.
- A Draft Sequence of the Neandertal Genome. Green *et al.* 2011. *Science*, 328:710-722.
- How important are transposons for plant evolution? Lisch, 2013. *Nature Reviews Genetics*, 14:49-61.
- Deciphering the molecular bases for drought tolerance in *Arabidopsis* autotetraploids. Del Pozo & Ramirez-Parra, 2014. *Plant Cell. Environ*, 37:2722-2737.
- Epigenetics across the human lifespan. Kanherkare *et al.* 2014. *Front. Cell Dev. Biol*, 2:49.
- The role of diet and exercise in the transgenerational epigenetic landscape of T2DM. Barrès & Zierath, 2016. *Nature Reviews Endocrinology*, 12:441-451.