

# Lo que Darwin descubrió al admirar la naturaleza

Las efemérides del nacimiento de Darwin y de la publicación de su obra “El origen de las especies” han removido el sedimento de su legado. Se analiza la aportación de su teoría a la visión actual de la evolución biológica en el contexto de la genética moderna.



>> M. Carmen Álvarez Herrero

**E**l bicentenario del nacimiento de Darwin, coincidente con el 150 aniversario de la publicación de *El origen de las especies*, es una gran oportunidad para valorar su legado, que va mucho más allá de una teoría de la evolución del mundo vivo. Quizá su capacidad de maravillarse como un niño ante los paisajes que descubrió en su viaje, el poder

escudriñar lo que tenía ante sus ojos para ver más allá de lo racional, y finalmente su humildad y discreción para superar las resistencias de sus detractores, fue lo que le condujo a una contribución a la ciencia, con calado de auténtica revolución. Ese espíritu capaz de quedarse atónito ante la naturaleza, lo revela Darwin en el último párrafo de su gran obra: *There is grandeur*

*in this view of life .... "Hay grandeza en esta visión de que la vida, con todo su poder, fue infundida inicialmente a unas pocas formas, o solo a una; y que mientras este planeta ha mantenido su rumbo, según la ley inmutable de la gravedad, a partir de un comienzo tan simple, han ido y siguen evolucionando un sinnúmero de las más bellas y maravillosas formas.*

Nuestro pequeño planeta está poblado por una extraordinaria diversidad de seres vivos, capaces de aprovechar todas las formas de energía. Ello permite que se adapten a ambientes tan extremos como fondos marinos, rocas antárticas, desiertos, o fumarolas volcánicas. Esta multiplicidad de formas y funciones se conoce como biodiversidad y se ha generado gracias a la evolución de un sistema genético universal formado por moléculas de ADN y ARN (Fig. 1).

Sabemos en la actualidad que todos los seres de la naturaleza han derivado de uno o un pequeño número de ancestros que vivieron hace 3.5 billones de años. Paralelamente, todos los genes de cada uno de los seres vivos descienden de unos pocos genes originales. Esta concepción moderna del mundo vivo, surgió solo hace 150 años, cuando Charles Darwin, autor de la

teoría de la evolución, aportó evidencias contundentes sobre la “descendencia con modificación” y la selección natural como mecanismo clave de ésta.

La visión actual de la evolución surgió de la síntesis de la teoría de la selección natural de Darwin y de la genética mendeliana, complementadas con herramientas de la biología molecular. La aproximación molecular de la evolución, no solo ha consolidado sus pilares, sino que ha abierto nuevos horizontes, ante los que el mismo Darwin se habría quedado boquiabierto. Sabemos que las formas biológicas se crean y mantienen gracias a la interacción de distintas fuerzas evolutivas, donde la selección natural juega un papel crítico al promover la adaptación al entorno. La evolución, más allá de un relato histórico, nos ayuda a entender por qué la vida es como es, permitiendo abordar cuestiones

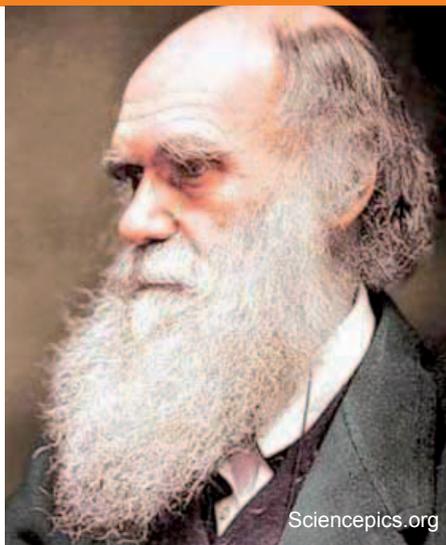
como: ¿Por qué un organismo se desarrolla a partir de una única célula? ¿Por qué es así el código genético? ¿Por qué existe la reproducción sexual? Su repercusión ha ido más allá de los límites de la ciencia, habiendo alcanzado todos los ámbitos de la sociedad humana. Hoy podemos saber mucho más que Darwin, pero nuestra teoría actual de la evolución es básicamente la misma que la suya. Por eso el genio científico de Darwin le ha situado en el podio de la ciencia contemporánea. Este británico nos puso en el camino de la evolución y por él sigue avanzando la biología evolutiva, con el empeño de conocer un poco mejor nuestra biosfera, incluyendo al hombre, como parte integrante de ella. La revolución biológica que inició Darwin en 1859 ha calado muy hondo en el campo de la ciencia, aunque solo ha llegado a penetrar parcialmente en el conjunto de la sociedad.

## >> Darwin y su entorno

Charles Darwin nació en 1809 en Inglaterra, en el seno de una familia acomodada y culta, destacó desde muy joven por su afición como naturalista.

A finales de 1831 inició un viaje de 5 años en el H.M.S. Beagle en el que recorrió las costas del sur del Atlántico y del Pacífico. En sus largas expediciones tierra adentro, recolectó, observó y trató de interpretar la flora, la fauna y las formaciones geológicas, sobre todo de América del Sur. En las Galápagos se sintió muy cerca de ese “gran misterio de los misterios” (sustitución de unas especies por otras), que recogió en su cuaderno de notas “El diario de los investigadores”.

En 1838 le surge la chispa de su teoría al leer un ensayo de Malthus, donde exponía que la población humana tiende a crecer a mayor ritmo que los recursos necesarios para la supervivencia, lo que



provocaría una lucha por la existencia. En la intuición de Darwin: si los individuos difieren en su capacidad para sobrevivir y esas variaciones son heredables, estas serían seleccionadas de forma natural (“selección natural”). Darwin consciente

de la fragilidad de “su teoría”, sobre todo por desconocer las leyes de la herencia, junto a la hostilidad que esperaba de la sociedad victoriana, no se atrevió a publicarla hasta que recibió un artículo de A.R. Wallace, que le sirvió como detonante al contener una teoría evolutiva similar a la suya.

Su gran obra: *El origen de las especies por medio de la selección natural* que publicó finalmente en 1859, fue una explosión madura de ideas incubadas durante 20 años, ideas que ya había vertido en cuadernos de notas, manuscritos y cartas. Una obra llena de entusiasmo y perspicacia inductiva, producto de un hombre joven, que regresó de su viaje rebosante de sensaciones. La odisea intelectual de Darwin acerca de la evolución, resulta incluso más cautivadora que las aventuras que vivió a bordo del Beagle.



Figura 1. **Biodiversidad:** A modo de hilos de agua de una cascada, también en el árbol de la vida se van desgajando ramas progresivamente. “Pináculo” de aves marinas en época reproductiva y floresta primaveral, dos bellos exponentes de la naturaleza que maravilló a Darwin. Fotos: M. Carmen Álvarez Herrero.

## >> Evolución y Biología Molecular

Después de un siglo de confusión y disputa, la teoría de la evolución de Darwin, se fundió con la genética y otras ramas de la biología, resultando en la teoría sintética, de la que fue un gran protagonista el prestigioso genetista de poblaciones T. Dobzhansky, autor de la frase: “Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución”. En la teoría sintética, además de la selección natural se integran otras fuerzas (mutación, flujo genético y deriva), de cuya interacción resulta el modelado de los rasgos biológicos de los individuos de una población, en un momento determinado de su historia.

La teoría darwiniana fue recibiendo apoyos cada vez más sólidos y clarificadores, de disciplinas biológicas nacidas en el siglo XX, como bioquímica, genética, ecología, etología o neurobiología. Pero fue sin duda la biología molecular la que mayor impulso dio a la teoría de Darwin.

En la época en que la evolución fue de la mano de la genética clásica o mendeliana, no se conocía ni el material básico de los genes, ni cómo estos controlan el funcionamiento y desarrollo de los organismos. Si bien la bioquímica del material genético se conoció en la

primera mitad del siglo XX, no fue hasta el periodo 1940-1965 cuando ocurrió un avance revolucionario de la biología, al establecerse por fin a nivel molecular la naturaleza de los genes, cómo se duplican, cómo funcionan, cómo pueden cambiar por mutaciones, cómo se regulan y cómo evolucionan. Todo ello bajo un prisma de unidad y simplicidad, que abarcaba a todos los seres vivos.

### **Su capacidad para maravillarse como un niño ante los paisajes, ver más allá de lo racional y su humildad fue lo que le condujo a su auténtica revolución en la ciencia**

Las técnicas de biología molecular, permitieron a finales del siglo pasado, manipular (amplificar, cortar, pegar) las moléculas genéticas de ADN y ARN, abriendo las puertas a la “clonación” de genes individuales y por ende al conocimiento de sus secuencias; es decir, al significado de los genes en lenguaje de proteínas, piezas protagonistas en la construcción y funcionamiento de los

seres vivos. A partir de este momento, la biología molecular y la evolución caminan de la mano, habiéndose generado un sinfín de datos de secuencias y de marcadores moleculares de innumerables organismos. Este análisis molecular ha puesto de manifiesto un hecho evolutivo de gran relevancia, y es que gran parte de la variación genética tiene un efecto mínimo en la eficiencia biológica de los individuos; o dicho, de otro modo, que el efecto de esa variación sería “neutro”, ni perjudicial, ni beneficioso, en relación a la capacidad de adaptación de los organismos. Este descubrimiento dio lugar a la teoría Neutralista, liderada por el japonés M. Kimura en 1969, que lejos de desautorizar, complementa a la Teoría adaptativa por selección natural de Darwin.

Con el desarrollo de la biología molecular, las técnicas analíticas del ADN han ido aumentando su potencial, para finalmente llegar a establecer las secuencias de genomas completos, habiendo sido el primero el de nuestra especie en el 2003, seguido de los de otras especies de distintos grupos taxonómicos y de todos los niveles de complejidad, desde virus, bacterias, arqueas y eucariotas. En la actualidad se pueden contar por cientos las especies cuyos genomas están secuenciados.

La contribución más llamativa de la biología molecular a la evolución es el hallazgo del hermanamiento entre los seres vivos. Si bien para Darwin el parecido entre organismos fue algo más que evidente, el alcance de ese parecido no se reveló hasta que se descubrieron los principios universales de la biología molecular, a mitad del siglo pasado. El dogma central de esta rama científica afirma que todos los organismos (excepto algunos virus) utilizan la molécula ADN para almacenar su información genética, información que transcribe en una molécula de ARN, la cual se traduce mediante un código genético universal en una secuencia de proteínas. Esto supone que el código que define la vida y las funciones moleculares más básicas para la célula, se han conservado prácticamente inalterables a lo largo de grupos tan distantes en la evolución, como bacterias, la levadura de cerveza, o el hombre. Todos los seres vivos compartimos pues el mismo lenguaje genético, así como los procesos que lo transforman en lenguaje de proteínas, con lo que ello supone en la estructura y función de las células/organismos. No podía existir un vínculo biológico más fuerte de unidad entre los seres vivos que la universalidad del “sistema genético”.

Otra aportación destacable de esta área científica a la evolución, es haber revelado la enorme cantidad de genes compartidos por especies, incluso muy separadas en el árbol evolutivo. Genes que cuando se transfieren de unas especies a otras, son acogidos e interpretados como si de los propios se tratara, llegando incluso a restablecer la función en un individuo con el gen en cuestión mutado (inactivo). Un ejemplo de este tipo nos lo ofrece el gen FOXP2, el cual según el equi-

## No podía existir un vínculo biológico más fuerte de unidad entre los seres vivos que la universalidad del “sistema genético”

po de la Dra. Scharff, de la Universidad de Berlín, es esencial para aprender la secuencia de movimientos de labios y lengua del lenguaje humano, pero también se requiere para el aprendizaje del canto de los pájaros. Este ejemplo ilustra una situación muy generalizada en la distribución de genes por el árbol de la vida, que nos revela que, aunque las formas, estructuras, comportamientos, adaptaciones, etc. parezcan muy distintas, tenemos mucho más lazos que nos unen, que diferencias nos separan.

Cuando Darwin para representar la jerarquía entre especies, trazó en su cuaderno “b”, el árbol de la vida (Fig. 3), probablemente no podía imaginarse que ese árbol con diseño infantil se iba a convertir en un “frondoso drago”, como los que nos ofrecen las filogenias actuales, utilizando datos de secuencias moleculares. La información evolutiva prácticamente ilimitada, codificada en el ADN de los organismos

vivos, y el conocimiento de sus secuencias, permite a los evolucionistas actuales trazar con más precisión las relaciones filogenéticas entre especies. Esto dio nacimiento a la disciplina de la evolución molecular. La idea era muy simple: cuanto más próximas sean dos especies, más parecidas serán sus secuencias de ADN, de ARNs y de proteínas y más cerca estará en el árbol, el punto en que se separan. Según este criterio, la biología molecular ha hecho posible la reconstrucción del “árbol universal de la vida” (Fig. 2), la sucesión continuada de formas, que van desde el ancestro de todos los organismos hasta cada una de las especies que actualmente habitan la tierra. En su base esta LUCA, (Last Universal Common Ancestor) de todos los seres vivos. A partir de LUCA sale un tronco que se bifurca una y otra vez para dar un vasto ramaje, donde cada rama representa una única especie. Las ramas que se interrumpen son especies que se han extinguido y las que continúan, son las que viven aun.

En los años 70 los evolucionistas moleculares empezaron a definir con más nitidez el perfil del árbol, al comparar secuencias de ARN de plantas, animales y microorganismos. Este simple intento llevó, entre otros éxitos, a añadir una gruesa rama, representada por el grupo de las arqueas unicelulares, que hasta entonces se habían incluido dentro de las bacterias. A mediados de los 80 reinaba un gran optimismo respecto a que las filogenias moleculares podrían finalmente revelar el árbol de la vida en toda su esplendor, pero las cosas parecieron complicarse.

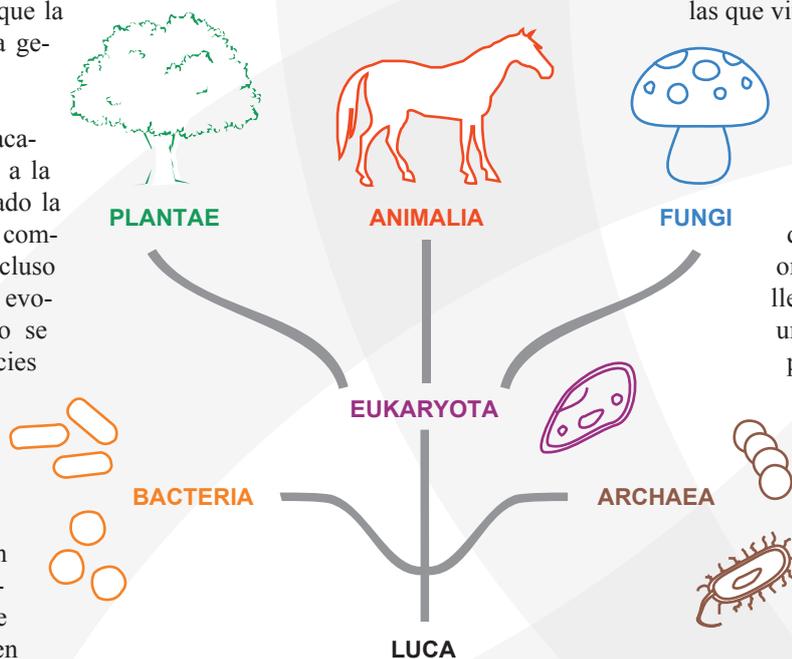


Figura 2: Árbol universal de la vida. SEDOC



Figura 3. La historia de la vida que diseñó Darwin en su “árbol de la vida” no se puede representar simplemente por un árbol con perfil de “drago”, cuyas ramas se bifurcan progresivamente, sino como una frondosa “encina” en que las ramas se entrelazan a modo de maraña.  
Fotos: Drago (M. Carmen Álvarez Herrero), encina (Isftic -Jorge Martínez Huelva-)

>> Si Darwin hubiera sabido...

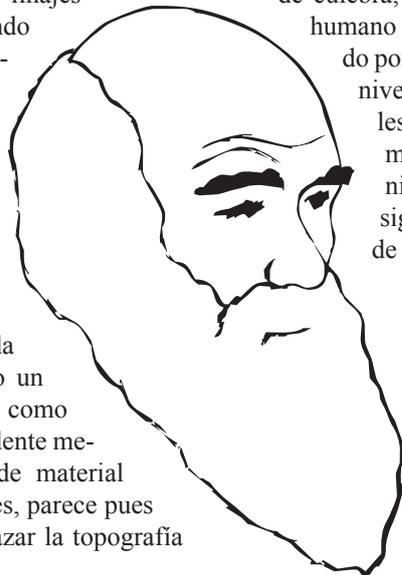
Las expectativas de conseguir un diseño definitivo del árbol de la vida utilizando datos moleculares, se vieron truncadas en los años 90, cuando en bacterias y arqueas empezaron a usarse las secuencias de ADN de genomas completos. Lejos de confirmarse los perfiles de las filogenias de ARN, aparecían modelos, solo explicables si se asumía que el material genético, además de pasar de los parentales a la descendencia, podía transferirse entre especies distintas. A este fenómeno se le denominó “transferencia horizontal”, en contraste con la herencia “vertical” de padres a hijos. A primera vista el árbol de Darwin resultaba incorrecto.

Inicialmente, la transferencia horizontal se consideró algo anecdótico en la evolución, en el sentido de que sólo aparecería en microorganismos y afectando a caracteres poco importantes, como puede ser la resistencia a antibióticos en bacterias. Lejos de ser un proceso raro, las evidencias en virus y procariontes (arqueas y bacterias) han sido más y más frecuentes, por lo que el papel de la transferencia horizontal en la evolución de estos organismos ha ido ganando importancia en los últimos años. Así, en el 2008, el grupo de Dagan, de la Universidad de Dusseldorf (Alemania), examinando más de medio millón de genes de 181 procariontes, en-

contró que el 80% de los genes mostraban signos de transferencia horizontal. Parece ser que niveles similares se han detectado igualmente en los unicelulares eucariotas (protistas), presentando casos de máximo grado de horizontalidad, al fusionarse genomas completos de linajes distintos. Considerando que los microorganismos (bacterias arqueas y eucariotas unicelulares) representan el 90% de las especies conocidas en el planeta, quizás habría que replantear el modelo de evolución de la vida en la tierra, no como un árbol, sino mas bien como una red. Este sorprendente medio de intercambio de material genético entre especies, parece pues a simple vista, amenazar la topografía del árbol darwiniano.

¿Que sabemos de la transferencia horizontal en organismos superiores más complejos? A medida que aumenta la secuenciación de genomas en plantas y animales, parece que la transferencia horizontal resulta “familiar” en estos organismos. Este intercambio de genes entre

especies alejadas, se debe a la intervención de virus capaces de cortar y pegar trocitos de genomas, y transferirlos entre especies alejadas en la filogenia. Como ejemplos anecdóticos, decir que en la vaca se encontró un fragmento de ADN de culebra, y que el 40% del genoma humano procede de ADN transferido por virus. Si bien parece que el nivel de transferencia en animales y plantas no es de la misma magnitud que en microorganismos, sí debe considerarse significativo desde el punto de vista evolutivo.



Otro fenómeno biológico que Darwin desconocía y que puede desdibujar el perfil nítido del árbol de la vida, es la “endosimbiosis”. Se sabe que, en una época temprana de la evolución, los eucariotas “engulleron” dos tipos de procariontes de vida libre. Uno de ellos dio lugar a los orgánulos productores de energía en las células (mitocondrias), mientras que el otro dio lugar a los cloroplastos, en los que tiene lugar la fotosíntesis en las plantas. Estos endosimbiontes transfirieron grandes fragmentos de sus genomas a los

## La transmisión de genomas, detectada en las últimas décadas, afecta al modelo clásico, lo que añade un elemento más a la revisión del árbol de Darwin

de las células hospedadoras, siendo la relación actual de plena colaboración entre el sistema genético del núcleo celular y el de los orgánulos, es decir un auténtico trabajo en equipo, que resulta en una maquinaria de máxima eficiencia, representada por las células eucariotas.

El equivalente en plantas y animales de “encuentros” en la naturaleza entre genomas de especies distintas, ocurre mediante el fenómeno de “hibridación” o de cruzamientos interespecíficos. Según L. Rieseberg, botánico de la Universidad de British Columbia (Canadá), alrededor del 14 por ciento de las especies de plantas actuales son el producto de la unión de linajes separados. En cuanto al mundo animal, algunos investigadores evolutivos defienden que la hibridación representa una fuerza de gran peso en su evolución. Así J. Mallet, del University College de Londres, afirma que el 10 por ciento de los animales hibridan con otras especies. Parece pues bastante claro que cuanto más sabemos de la evolución de los organismos microbianos y de los de rango superior, es más evidente que la historia de la vida no se puede representar simplemente por un árbol con perfil de “drago”, cuyas ramas se bifurcan progresivamente, sino como una frondosa “encina” en que las ramas se entrelazan a modo de maraña.

Hemos considerado una serie de mecanismos “no convencionales”, de transmisión de los genomas, que se han detectado en las últimas décadas, cuyas consecuencias afectan al modelo evolutivo clásico. De forma adicional, un hallazgo de gran trascendencia en la genética moderna, el de la “herencia epigenética”, viene a

añadir un elemento más a la revisión, en el siglo XXI, del árbol darwiniano de la vida. La epigenética, tal como hoy la entendemos, es una rama muy reciente de la genética, que estudia los cambios heredables en la expresión de los genes, no debidos a mutaciones en el ADN, sino a metilaciones del ADN o a modificaciones de la estructura de la cromatina (componente de los cromosomas). Se sabe que los procesos epigenéticos participan en la regulación de la expresión de los genes, por lo que juegan un papel crítico tanto en procesos fisiológicos, como patológicos de plantas y animales. La herencia de los cambios epigenéticos entre generaciones celulares (memoria celular), es habitual en la diferenciación de las células hacia tejidos específicos.

Sin embargo ha resultado sorprendente la observación de la transmisión transgeneracional de estos cambios, es decir, el paso de padres a hijos a través de los gametos, incluso durante varias generaciones. Así numerosos hallazgos, incluyendo estudios con parejas de gemelos en humanos, han revelado que no todas las adaptaciones evolutivas son debidas a mutaciones genéticas, sino que también hay cambios heredables, que no están escritos en el ADN. Aunque la epigenética es una rama muy activa de la investigación actual, todavía nos encontramos en los albores de su descubrimiento, por lo que estamos lejos de poder valorar su alcance real en distintos aspectos de la biología de los individuos, incluida su evolución.

Si al hecho sorprendente de la transmisión entre generaciones de los cambios epigenéticos, añadimos la evidencia de que estos cambios pueden ocurrir como respuesta a factores tanto internos como externos de los organismos, nos situamos en una posición en que habría que desempolvar las ideas lamarckianas de la época de Darwin, fundamentadas en la herencia de caracteres adquiridos, tal como proponen en su libro Jablonka y Lamb, del Instituto de la Filosofía y la Ciencia de Tel

Aviv (Israel). Sin embargo, la visión del lamarckismo en la ciencia del siglo XXI tendría unas connotaciones bien distintas a las de sus orígenes, al no poder aceptar que las respuestas adaptativas acaecidas en las células somáticas, puedan pasar a las células germinales o gametos.

La abrumadora evidencia empírica del papel de la epigenética, pone de manifiesto que las secuencias codificadoras del ADN, son sólo una parte de la complicada trama celular que determina qué productos va a fabricar cada célula en cada momento de su existencia. La función celular depende de una intrincada red de señales intercelulares, así como de factores internos y externos, que interactúan de forma muy precisa y que representan las piezas de un complejo puzzle, que cada vez parecen más difíciles de poder encajar, a pesar de la incorporación en los últimos años de las potentes herramientas de las “ómicas” (genómica, proteómica...).

Podemos concluir que el árbol de Darwin no se adecua por completo a la visión que tenemos actualmente del perfil del árbol de la vida. Sin embargo las polémicas suscitadas recientemente han logrado hacer más flexibles las mentes de los evolucionistas al admitir que, aunque haya que modificar su perfil, la evolución darwiniana sigue siendo válida, a pesar de ser mucho más compleja de lo que en un principio se pensaba. Que el árbol de la vida de Darwin se llegue a tambalear, supone el inicio de un cambio revolucionario en la Biología, que podría compararse al de la teoría de la mecánica de Newton, la cual fue exitosa en su momento, pero demasiado simplista para poder explicar la complejidad del universo. El árbol de la vida fue igualmente innovador y útil en su momento, pero ahora sabemos mucho más, como para avanzar hacia la búsqueda de otros modelos topológicos de árboles filogenéticos, como apunta Baptiste, un biólogo evolutivo de la Universidad Marie Curie de Paris. ●