

La saga natural

Capítulo 1

Germinación de una idea

LA EVOLUCIÓN ES EL PROCESO BIOLÓGICO DE ORIGEN, DIVERSIFICACIÓN y extinción de la biota del planeta. El registro fósil provee evidencias innegables de estas transformaciones y reemplazos. La explicación científica de la diversidad orgánica sostiene que ésta tiene un origen natural único (monofilético) a partir del cual se ha modificado en el tiempo. Estas ideas han tenido opositores acérrimos, sobre todo en las esferas religiosas porque se supone que contravienen el mito de la creación divina, niegan la existencia de Dios y erosionan la base de los valores éticos. Baste decir que Charles Darwin desarrolló las ideas científicas contenidas en su libro *El origen de las especies* en un silencioso aislamiento, para luego verse enfrentado a la violenta oposición religiosa de su época. Esta situación era aún más delicada dado su matrimonio con su prima, Emma Wedgwood, de profundas convicciones religiosas.

Estas ideas, revolucionarias para el contexto religioso de su tiempo, fueron apreciadas sólo 40 ó 50 años después de publicadas. La sociedad inglesa estaba escandalizada por esta nueva concepción de la naturaleza que, sin explicitarlo, desdeñaba la participación de un creador en el proceso evolutivo. El incidente paradigmático, suscitado luego de la publicación del libro de Darwin, refleja la misma confusión entre un pensamiento lineal (la escala de la vida) que culmina

con la aparición del hombre según el plan maestro del creador, y uno que privilegia la diversificación de los linajes por causas naturales. Los hechos se sucedieron cuando Samuel Wilberforce, obispo de Oxford, se enfrentó públicamente a T. H. Huxley (apodado el «sabueso de Darwin») en el Museo de Historia Natural de Oxford, Inglaterra. Con ironía, Wilberforce preguntó a Huxley: ¿Fue desde su linaje paterno o materno que usted desciende de un simio? Usando el mismo tono, Huxley replicó que si la pregunta apuntaba a tener por bisabuelo a un pobre simio en vez de un hombre con recursos e influencias que las usaba para ridiculizar una discusión científica seria, sin dudar lo afirmaba su preferencia por el simio. (El texto original dice: «Was it from your mother's side or your father's side that you were descended from an ape?» «If the question is whether I would rather have a miserable ape for a grandfather or a man of means and influence who uses these gifts to introduce ridicule into a grave scientific discussion, I unhesitatingly affirm my preference for the ape!».) Curiosamente, el error del obispo Wilberforce se mantiene luego de 150 años de desarrollo del pensamiento evolutivo.

EL PENSAMIENTO CIENTÍFICO HA IDO CRECIENDO Y MADURANDO por el propio ejercicio empírico de las ciencias. En este sentido, en el siglo XVIII, muchos científicos estaban convencidos de ir avanzando por la vía correcta para descubrir las leyes esenciales e inmutables de la naturaleza. Existía una fuerte noción de que el mundo podría ser estudiado registrado y analizado sistemáticamente de manera que el caos y la incertidumbre pudieran ser eliminados por una nueva visión mecanicista y disciplinada, al menos teóricamente. Debido a que la ciencia es perfectible (y no inmutable), muchas de las ideas tenidas por ciertas en ese entonces han sido descartadas porque se ha probado su falsedad. Las ciencias biológicas han progresado desde tiempos de Darwin mediante acumulación de evidencias consistentes con el paradigma del que nacen (inductivismo). Por lo tanto, abundaban las críticas que aludían a la imposibilidad de derribar el «dogma evolutivo» porque no habían hipótesis alternativas en su edificación teórica. La aproximación hipotético-deductiva cambió radicalmente la explicación evolutiva porque permitió contrastar predicciones derivadas de hipótesis antagónicas. Los

espectaculares avances en genética y biología molecular, paleontología, etc. que han llenado los anales científicos de datos cada vez más complejos de comprender y analizar, siguen siendo coherentes y dando apoyo empírico a la evolución por causas naturales. A continuación se esbozan algunas ideas precursoras del pensamiento evolutivo moderno.

■ Ideas predarwinianas

Aristóteles (384-322 a.C.), discípulo de Platón, escribió la *Historia Animalium* donde describe la **Scala Naturae**, un sistema clasificatorio basado en el estudio de unas 500 especies (**Figura 1-1**). Enfatizaba que el orden natural era eterno y que las especies eran entidades inmutables y perfectas que se ordenaban jerárquicamente y en forma progresiva hacia un ascenso de la vida. El pináculo estaba coronado por la aparición del hombre. Aristóteles aseguraba que el orden de la vida era originado por una «fuerza vital», que los ciclos no producían cambio fundamental en el orden universal y que las variaciones naturales entre los individuos reflejaban las imperfecciones del ideal de perfección platónico.



Figura 1-1 La gran cadena del ser

La *Scala Naturae* (Escala de la Naturaleza o Cadena del Ser), derivada de la doctrina aristotélica, concibe el mundo como un conjunto de entidades ordenadas jerárquicamente de manera lineal, continua y progresiva, según sus grados de perfección.

Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon (1707-1788). En su libro *Epochs of Nature* (1788), sostiene la generación espontánea de la vida y la existencia de un plan maestro inscrito en la naturaleza. Por lo tanto, nada podía alterarse y, si algo era alterable, la capacidad de cambio era parte del plan preestablecido. También argumentaba que la tierra tenía unos 70.000 años de antigüedad. Sus contribuciones corresponden a un dogma científicamente irrefutable.

Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829). En 1809, Lamarck publicó una teoría de la evolución basada en sus observaciones de invertebrados fósiles depositados en el Museo de Historia Natural de París. Sus ideas se basan en la creencia de una supuesta tendencia progresiva interna que forzaría a los organismos a elevarse paulatinamente en la escala natural. La primera ley de su *Philosophie Zoologique* sostiene que «en todo animal que no ha traspasado el término de sus desarrollos, el uso frecuente y sostenido de un órgano cualquiera lo fortifica poco a poco, dándole una potencia proporcional a la duración de ese uso, mientras que el desuso constante de tal órgano le debilita y hasta le hace desaparecer» (Lamarck, 1ª traducción española, 1986). Este enunciado ilustra la **Regla**

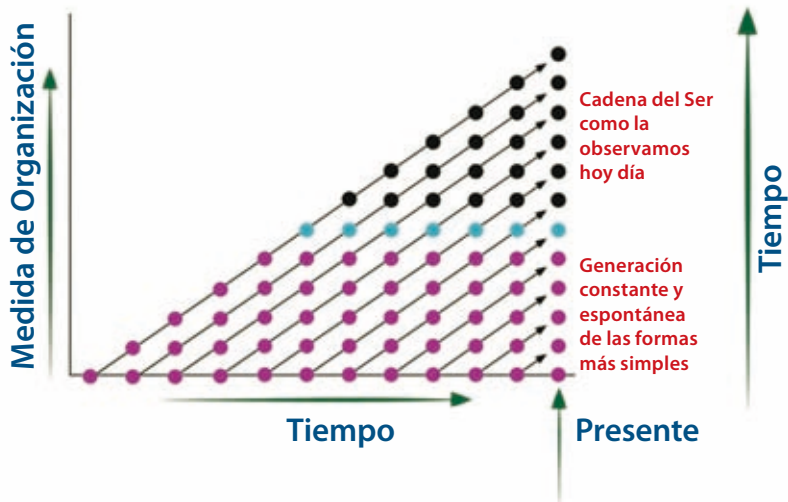


Figura 1-2 Regla de la progresión orgánica según Lamarck

La acumulación progresiva de caracteres adaptativos da cuenta de la Cadena del Ser, que también proclamaba Lamarck.

de la Progresión, que tuvo gran influencia en el pensamiento evolutivo de la época (**Figura 1-2**). El ejemplo más conocido es el alargamiento del cuello de la jirafa que, por no alcanzar los brotes altos de las acacias africanas, habría precipitado un cambio interno, heredable. Estas modificaciones de los hábitos permitían que los descendientes naciesen con el cuello más largo que sus progenitores y así sucesivamente hasta completarse la transformación. La regla lamarckiana supone una herencia de los caracteres adquiridos como un acto de volición, imposible en los vegetales. De acuerdo con esta concepción, los hijos de un fisicoculturista deberían heredar la musculatura del padre porque el rasgo adquirido se transmite de una generación a la siguiente. Un segundo aspecto relacionado con la progresión y la Escala Natural tiene que ver con las discontinuidades del registro fósil. Como se suponía que todas las transformaciones eran graduales, debían existir los **eslabones perdidos** que conectaban unas formas con otras. Incluso se llegó a ilustrarlos y darles nombre científico (**Figura 1-3**). Aunque las ideas de Lamarck, ejemplificadas por la herencia de las características adquiridas, ha sido ridiculizada porque no propone un mecanismo, algunos datos



experimentales señalan que la adaptación al ambiente es posible bajo tal concepción (Landman, 1991). En efecto, los estudios en epigenética y en aspectos conductuales tienen un fuerte componente adquirido, tal como ocurre en la transmisión del estrés de padres a hijos, en las gallinas (Liu, 2007).

Alfred Russel Wallace (1823-1913). Fue un naturalista británico cuyas contribuciones a la zoogeografía le dieron gran prestigio. Junto a Darwin llegó a la conclusión de que el cambio evolutivo se explicaba por selección natural. En 1858, Wallace envió una carta a Darwin que contenía un artículo que delineaba los mismos principios que éste había desarrollado, pero que todavía no publicaba. Para solucionar esta situación potencialmente conflictiva, y considerando que Darwin tenía un manuscrito previo de 144 páginas, ambos autores presentaron sus ideas en la misma reunión de la Sociedad Linneana de Londres. Atendiendo a estos hechos, la teoría de la selección natural debería conocerse, en rigor, como la teoría de Darwin-Wallace.

■ Las ideas de Charles Darwin y el contexto histórico de su época

El estudio de la evolución darwiniana, como teoría que unifica y explica el origen y causas de la diversidad biológica, se enraíza en la experiencia observacional de Darwin en Patagonia y Galápagos. Los fósiles de Patagonia le proporcionaron datos incontrovertibles de los cambios que afectan el tamaño y la forma de los organismos, a medida que transcurre el tiempo. Por ejemplo, los fósiles de grandes marsupiales diente de sable (*Thylacosmilus*), cuyos colmillos medían 20-30 cm de largo, son indicadores faunísticos extintos que se diferencian notablemente de las formas vivientes. Otro grupo de mamíferos patagónicos, extremadamente diversos eran los Xenarthra (etimológicamente, «articulaciones raras»). Entre ellos sobresalen los Gliptodontes, que eran armadillos gigantes de dos metros de diámetro y los perezosos terrestres (*p. ej.*, *Megatherium*, *Milodon*), de dos a tres metros de altura. Un tercer grupo de mamíferos extintos encontrados en Patagonia lo constituían los Notoungulados (ungulados del sur). Eran formas herbívoras, con molares de bajas cúspides (*p. ej.*, *Toxodon*). Otras formas de ungulados patagóni-

cos extintos son los ancestros de los camélidos sudamericanos (Simpson, 1980).

La diversidad de los fósiles patagónicos constituyó una evidencia fuerte de la modificación de los linajes en el tiempo. También observó que los mamíferos patagónicos vivientes se asemejan más a los fósiles patagónicos que a los fósiles europeos del mismo estrato geológico. La similitud morfológica de los caracteres entre organismos dispares y la distribución de plantas y animales en continentes e islas también sirvió de evidencia para apoyar la divergencia a partir de un ancestro común.

El despliegue histórico de la vida, con sus actores vivientes y fósiles, representa un dramático coro de divergencias y extinciones, propias del proceso evolutivo. Los fósiles representan vestigios mineralizados de organismos que habitaron la Tierra en tiempos remotos. Por tal condición, señalan cambios/reemplazos bióticos que requieren una explicación sólida y convincente. Los fósiles son metrónomos que marcan el paso gradual, y a veces sincopado, del devenir evolutivo. Su morfología y el conocimiento inferencial de sus formas de vida reflejan un mundo cambiante. Su análisis permitió que la paleontología creciera, desde una mera descripción de fósiles, para convertirse en un sólido pilar interpretativo. El gran apoyo de los fósiles a la biología evolutiva radica en que constituyen un dato objetivo, independiente del observador. El «dato» puede ser manipulado e interpretado de mil maneras; pero eso no lo invalida como tal. En este sentido, frente a la disputa creacionismo/evolución, los fósiles son el arma más poderosa de los evolucionistas.

En las Galápagos, el pensamiento científico de Darwin creció, nutriéndose de la dimensión espacial del proceso evolutivo en islas remotas. Este contexto le permitió asociar los cambios morfofisiológicos con el aislamiento geográfico para entender cómo se originan las adaptaciones en tales circunstancias. La presencia de grandes tortugas terrestres e iguanas adaptadas a una alimentación de algas submarinas puso en evidencia las transformaciones que han experimentado estos reptiles de origen continental, en tiempo relativamente breve. En el caso de las iguanas, la presión alimentaria puso un nuevo contexto ambiental para que la selección natural promoviese la modificación de las extremidades (garras más fuertes para sujeción en las rocas),

de la piel (más resistente al agua salada) y del sistema digestivo y excretor, que ahora digiere alimentos con alto contenido salino.

Darwin reconoció dos clases de islas: las oceánicas y las continentales. Las primeras se encontraban muy alejadas del continente, se formaban por acción volcánica y contenían especies muy particulares que descendían con modificación desde ciertos ancestros que las habían colonizado. En contraste, las islas continentales se encontraban a menor distancia y se habían formado por separación desde el continente. También observó que las especies isleñas constituían un subconjunto de aquellas que habían colonizado el continente.

Los pinzones de las islas Galápagos representan otro pilar zoológico que apoya la idea darwiniana de descendencia con modificación. Su estudio demuestra la diferenciación de aves insulares cuyos ancestros viven en el continente. Las modificaciones del pico de los pinzones son un típico caso de radiación adaptativa ya que las distintas formas, derivadas de un linaje ancestral, han particionado el nicho trófico desde especies granívoras a insectívoras. Incluso, una especie hace uso de «herramientas», al utilizar una espina de cactus para buscar y extraer orugas desde las oquedades de esas plantas.

Las ideas de Darwin se enmarcan en una concepción geológica uniforme. Este uniformismo, propuesto por el geólogo inglés Charles Lyell alrededor de 1830, sostiene que los procesos erosivos, tectónicos, volcánicos, etc., del pasado han tenido cualidades y efectos similares a los actuales. Lyell también aplicó el uniformismo a las especies, atribuyéndoles invarianza en el corto plazo. Estas ideas sirvieron a Darwin para sostener que el cambio evolutivo es gradual. El uniformismo se oponía al catastrofismo, que afirmaba que las discontinuidades entre la fauna fósil y la actual se debía a eventos únicos y diferentes de los actuales. Para los biogeógrafos, la gran contribución de Lyell significó que los fósiles fuesen considerados indicadores fiables para escudriñar el pasado y no meros artefactos aleatorios y confusos. Desde entonces, un fémur fosilizado se interpreta como el hueso mineralizado, propio de la extremidad de un animal con ciertas características particulares, y no como una roca con forma de hueso.

Antes de iniciar sus viajes alrededor del mundo (embarcado en el H.M.S. *Beagle*, entre 1831 y 1836), las ideas biológicas de

Darwin giraban alrededor del fijismo y la inmutabilidad de las especies donde cada unidad biológica constituía una entidad única, separada de las otras por características fundamentales, renuentes al cambio. La idea de evolución era familiar a su abuelo, Erasmus Darwin, pero dicha intuición carecía de evidencia y no ofrecía un mecanismo director para las modificaciones morfofisiológicas de los organismos.

Durante su viaje en el *Beagle*, Darwin comenzó a recolectar evidencia para el que sería su libro más importante, *El origen de las especies* (Darwin, 1859). Es importante destacar que la teoría de la evolución no sostiene que el hombre desciende del mono. Por el contrario, afirma que el hombre y el mono tuvieron un ancestro común en el pasado; por eso se habla de **ancestría con modificación**.

Darwin era un hombre bien educado para su época. Estudió en Edimburgo y Cambridge entre 1825-1831. Llegó a Sudamérica en el *Beagle*, comandado por el capitán Robert FitzRoy. El viaje duró cinco años. Durante su visita a Chile experimentó un gran sismo, el 20 de febrero de 1835. Después de sus viajes, publicó tres libros: *Structure and Distribution of Coral Reefs* (1842), *Volcanic Islands* (1844) y *South America* (1846), en el cual propuso ciertas teorías (aún vigentes) que combinaban el vulcanismo con la erosión. De acuerdo con sus escritos, estaba convencido de que las cuatro fuerzas geológicas de Lyell (levantamiento de masas terrestres, subducción, erosión y sedimentación) eran superiores a las de sus antecesores para explicar el balance natural en el tiempo. Al regreso de sus viajes en el *Beagle*, Darwin conoció las ideas de Thomas Malthus (1766-1834) sobre ciertos principios demográficos expuestos en su libro *Essay on the Principle of Population* (1797). Malthus sostenía que la sobrepoblación genera pobreza y hambre y que si no hay restricción a la reproducción sexual se produce una **lucha por la existencia**. Estas ideas fueron tan cruciales para Darwin, que escribió: «...it at once struck me that under these circumstances favorable variations would tend to be preserved and unfavorable ones to be destroyed» («me conmovió instantáneamente que bajo estas circunstancias las variaciones favorables tendieran a ser preservadas mientras las desfavorables a ser destruidas»).

Darwin sostiene que el mundo (la superficie terrestre, los organismos y el universo) está en flujo permanente (= evolución).

Al afirmar que los cambios eran regulares y gobernados por ciertos factores ambientales, Darwin sostuvo que, si se conocían los agentes causales del presente, se podía explicar cómo se había producido la modificación de los organismos. Así, su visión de la evolución reflejaba dos aspectos cruciales: que las diversas formas de vida han aparecido por descendencia con modificación de especies ancestrales, y que el mecanismo de modificación es la selección natural. Este mecanismo, que ha actuado por millones de años, produce adaptación como resultado.

La **revolución ideológica darwiniana** consta de cinco pasos:

1) La Teoría de Selección Natural requiere que las características consideradas presenten variación y que ésta sea heredable. Sin selección, las características favorables son eliminadas (o mantenidas) en las poblaciones por puro azar.

2) Todos los organismos tienen una capacidad reproductiva que excede al reemplazo.

3) El ambiente es finito y azaroso y, por lo tanto, hay una suerte de «lucha por la existencia» entre los organismos.

4) Como consecuencia de las diferencias individuales, los individuos más aptos dejan más descendencia.

5) Los descendientes tienden a parecerse a sus progenitores porque heredan sus genes.

Según lo esbozado anteriormente, la mecánica básica de la selección natural se apoya en tres hechos innegables: sobreproducción de descendientes, herencia y variación. También consta de un silogismo inferencial: la selección natural (o el argumento del éxito reproductivo diferencial) promoverá, en promedio, las variantes orgánicas que, fortuitamente, estarán más adaptadas a los ambientes fluctuantes. Dichos organismos pasarán sus características a la descendencia mediante la herencia (**Figura 1-4**).

Darwin rechazó las ideas de Lamarck en cuanto a que a) la evolución era un proceso de perfeccionamiento gradual que culminaba con la aparición del hombre; b) si las especies se modificaban, otras debían formarse por creación continua y espontánea; y c) el mecanismo de la evolución operaba mediante herencia de caracteres adquiridos. Pero este último argumento fue rechazado sólo parcialmente porque aún no se conocía la

diferencia existente entre **somatoplasma** y **germoplasma**. August Weissmann demostró en 1883, mediante un clásico experimento **hipotético-deductivo** en ratones, que la teoría del uso y desuso de Lamarck era errada. Su plan de investigación consistió en criar una camada de ratones y cortarles la cola a todos. Luego los apareaba y volvía a cortarles la cola a los descendientes. Este proceso de cría y corte lo reiteró por 40 generaciones; pero los ratones siguieron naciendo con cola, a pesar de las predicciones lamarckianas de **herencia adquirida**. Weissmann concluyó que el somatoplasma y el germoplasma eran dos linajes celulares separados y que los cambios (o mutaciones) que ocurrían a nivel somático no se heredaban. Esta diferenciación, que se conoce actualmente como la **barrera de Weissmann**, fue prueba fehaciente de que el lamarckismo no tenía sustento empírico y que el uso o desuso era una aseveración sin fundamento científico. La controversia acerca de los caracteres adquiridos aún continúa.

Otro problema que enfrentó la teoría de Darwin guarda relación con los principios hereditarios. En el siglo XIX, los naturalistas que estudiaban caracteres cuantitativos de los animales



Figura 1-4 Visión darwiniana de la evolución

Diagrama que muestra el razonamiento de Darwin sobre la interacción organismos-ambiente. Como la reproducción genera muchos más individuos que los que el ambiente permite, se produce una fricción («lucha por la existencia») en relación con el rasgo heredable que se considere. La ventaja adaptativa de unos organismos frente a otros corresponde al efecto de selección natural, que a la larga produce la adaptación de los organismos a las condiciones ambientales de ese momento.

domésticos adherían a la herencia de las **sangres mezcladas** como explicación de sus resultados. Según este tipo de herencia, del cruzamiento entre organismos altos y bajos se obtendrían descendientes de tamaño intermedio. Pero si el resultado implicaba homogeneización de la variación, ¿cómo se explicaba la persistencia de la variabilidad fenotípica durante millones de años de supuesta homogeneización? En un intento poco fructífero, Darwin desarrolló la **teoría de las gémulas**, una variante singular del **preformismo**. En resumen, esta teoría argumentaba que cada parte del cuerpo formaba copias microscópicas de sí misma (gémulas) que viajaban por el torrente sanguíneo para ensamblarse en las gónadas (**Figura 1-5**). Pero la respuesta a la

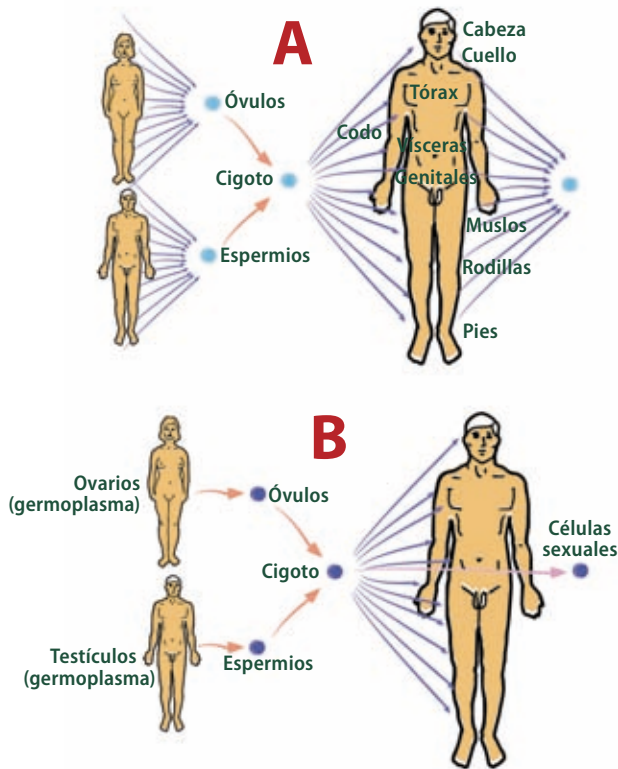


Figura 1-5 Preformismo y epigénesis

A) La Teoría de la Pangénesis sostiene que todas las células del cuerpo contribuyen con su material genético en la formación de los gametos. **B) La Teoría del Germoplasma de Weissmann** demostró que sólo las gónadas producen el material genético que forma los gametos.

paradoja de la homogeneización evolutiva no se explicaba por gémulas ni preformismo, sino por la teoría de la herencia particulada, derivada del trabajo de Gregor Mendel. Sus leyes de la herencia, publicadas en 1865, permitían explicar la persistencia y la variación de los rasgos fenotípicos. Todo indica que Darwin no leyó el artículo que Mendel le envió a su domicilio pues fue encontrado en su biblioteca, sin abrir. En este punto es preciso destacar que, aunque Darwin no pudo explicar coherentemente el origen de la variación (porque no conocía los principios de la transmisión hereditaria), su teoría de la evolución es formal y epistemológicamente correcta. Desde una perspectiva informacional, la evolución darwiniana sólo transmite información genética entre las generaciones. En cambio, la visión lamarckiana sostiene que la información, obtenida durante la vida del organismo, se transmite a las generaciones futuras. Esta precisión es importante, especialmente frente al dogmatismo creacionista, que insiste en que Darwin no pudo explicar el origen de las especies. La eficacia de su formulación radica en que el mismo mecanismo (selección) crea lo adecuado al tiempo que elimina lo inadecuado. La formulación darwiniana es fundamentalmente externalista porque, mediante mutaciones aleatorias, el organismo proporciona el material básico. No hay reacción interna que module el flujo de su propio cambio. También es una teoría eminentemente funcional, pues el cambio evolutivo es de naturaleza adaptativa, como se ilustra en la **figura 1-4**.

■ Las evidencias de evolución

La evolución es ante todo un hecho que ha acontecido. Como tal, debe haber pruebas incontrovertibles de que así fue. Las evidencias de evolución más contundentes surgen del registro fósil, la anatomía comparada, la biología molecular (estructural y regulatoria), la biogeografía, la genética y la genómica comparada. Estas evidencias apoyan la tesis de que la vida tiene un solo origen (hipótesis de monofilia) y que las diferencias entre los organismos se producen por modificaciones sucesivas, y no por haberse creado anatomías diferentes desde su inicio. Los fósiles son restos mineralizados de organismos que existieron en tiempos pretéritos; no son una construcción mental del hombre para dar

sentido a la naturaleza. Por el contrario, representan la impronta de sucesos acaecidos que deben ser explicados coherentemente. Tal coherencia se sustenta en el análisis de procesos naturales.

La anatomía comparada aporta explicaciones consistentes con la paleontología. Por ejemplo, al observar el esqueleto de

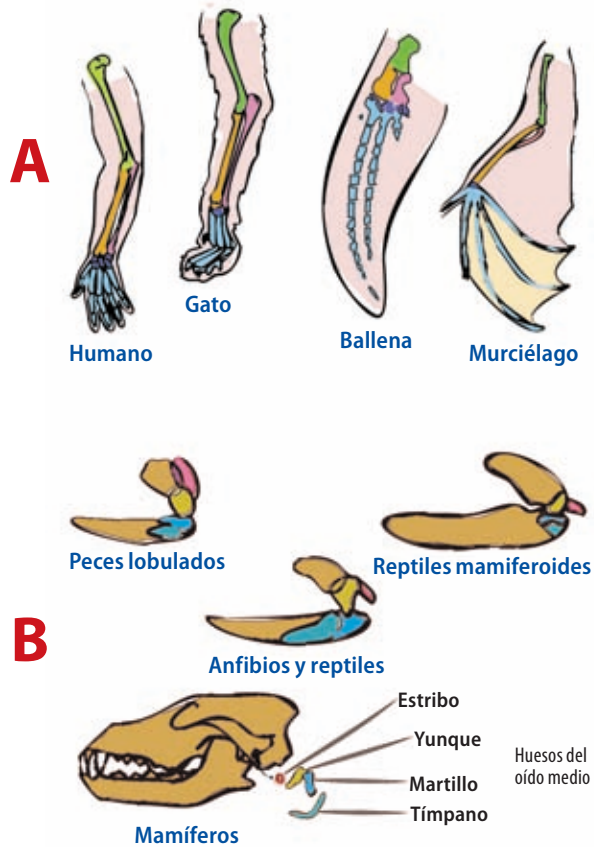


Figura 1-6 Evidencias de evolución

A) Homología en las extremidades de los vertebrados. Las similitudes estructurales (anatómicas, embriológicas o moleculares) son el resultado de ancestría común. **B)** Homología de los huesos mandibulares en vertebrados y disminución de los elementos óseos que la conforman. El cuadrado y el articular, que eran huesos mandibulares en los anfibios y reptiles se transformaron en el yunque y el martillo del oído medio de los mamíferos, respectivamente. La columnella de los tetrápodos ancestrales dio origen al estribo en los mamíferos. La articulación escamosodentaria que pone en contacto el cráneo con el único hueso de la mandíbula es un rasgo definitorio de los mamíferos. Las estructuras homólogas se ilustran de un mismo color.

ballenas, seres humanos y murciélagos se aprecia una similitud innegable en el diseño arquitectónico de las extremidades. Si examinamos el brazo humano, la pata del gato y la aleta de la ballena, se aprecia el mismo diseño anatómico (brazo, antebrazo, carpos, dedos, músculos, piel, etc.). Estas estructuras se denominan **homólogas (Figura 1-6)**, porque tienen un origen común, aunque su transformación obedece a cambios regulatorios en genes compartidos. Los análisis de anatomía comparada, por ejemplo, señalan una estrecha proximidad entre el hombre y el chimpancé y una menor afinidad de los simios con los osos. A su vez, osos y seres humanos se relacionan entre sí y, además, con las ballenas, porque todos comparten estructuras homólogas, como sus extremidades, anatomía interna, diseño corporal, etc. Del mismo modo, todos los vertebrados poseen un plan arquitectural similar cuya homología sugiere que derivan de un ancestro común.

Otras evidencias contundentes de evolución se obtienen del análisis de rasgos vestigiales que, como su nombre lo indica, no son funcionales. Sin embargo, se asemejan a otros, con funciones muy específicas, en taxa relacionados. El estudio de estas **homologías** ha demostrado que las serpientes y las ballenas aún poseen vestigios internos de lo que fue la cintura pélvica funcional, donde se articulaban las extremidades posteriores. Los fósiles que muestran formas transicionales apoyan la explicación de que las estructuras vestigiales se derivan de otras, por divergencia desde su ancestro común. Actualmente sabemos que las mutaciones que afectan la expresión del gen *HoxC6* interfieren con la aparición de las extremidades (véase Capítulo 13 **Biología del desarrollo, macroevolución y EvoDevo**). En síntesis, el estudio de las homologías ha sido el pilar para construir una teoría darwiniana de la evolución, basada en la hipótesis de monofilia.

Otras evidencias biológicas de evolución se desprenden de la observación y análisis de embriones. Durante el desarrollo intrauterino, los embriones y fetos humanos exhiben características similares a las de otros embriones de vertebrados, indicando un parentesco compartido. Por ejemplo, los arcos branquiales, los somitos y el sistema circulatorio cerrado están presentes en todos los embriones de vertebrados. En los peces y anfibios, los arcos branquiales dan origen a las branquias (agallas) mientras

que en aves y mamíferos evolucionan en estructuras del oído, de la boca y del tracto respiratorio de los adultos (*p. ej.*, trompa de Eustaquio, huesecillos del oído medio, apertura externa del oído, etc.). Es decir, las mismas estructuras se han modificado de tal modo que han adquirido nuevas funciones a partir de un código epigenético común. Esta similitud embriológica se conoce como **Ley Biogenética de Ernst Haeckel** y sostiene que la «ontogenia

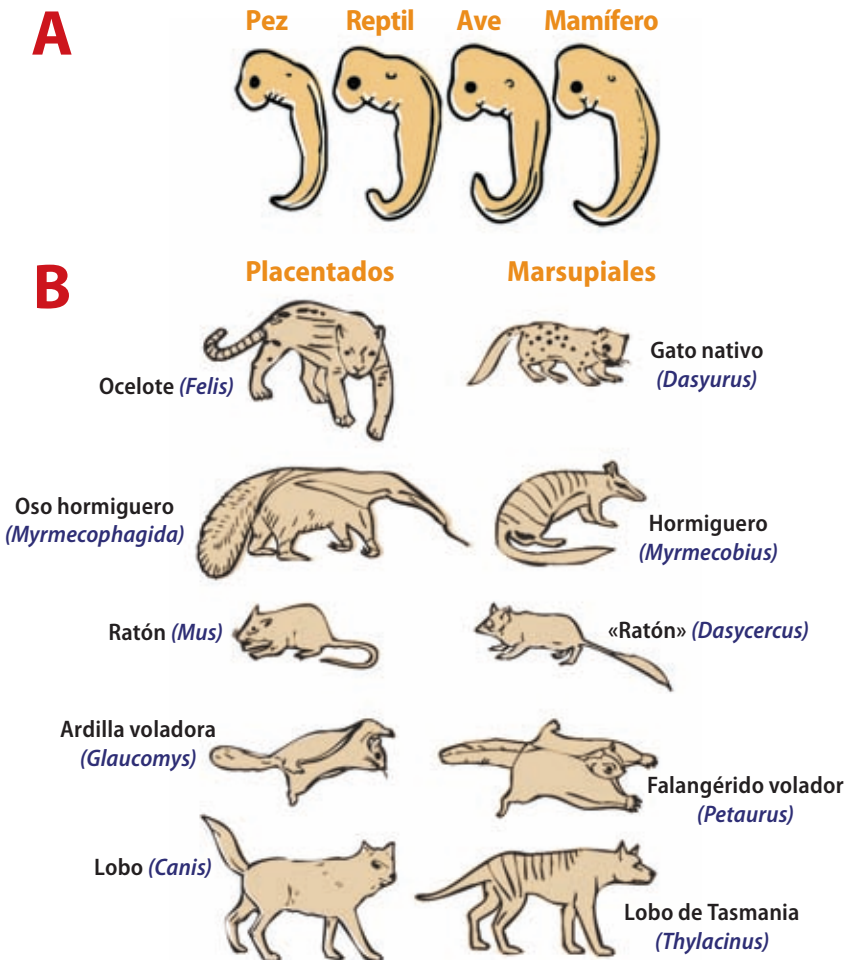


Figura 1-7 Otras evidencias de evolución

A) Desarrollo embrionario de vertebrados que muestra las similitudes ontogenéticas entre peces, reptiles, aves y mamíferos. **B)** Evolución paralela entre los mamíferos placentados (Eutheria) y los marsupiales (Metatheria) australianos. La iteración de morfologías y adaptaciones similares en ambos grupos indica que los mamíferos comparten un ancestro común del cual divergieron.

recapitula la filogenia». Aunque actualmente se reconoce que los rasgos fundamentales (iniciales) de la ontogenia están presentes en mayor número de taxa que los caracteres más específicos (o tardíos), la recapitulación en el sentido de Haeckel no es un atributo generalizado de relación 1:1 entre ontogenia y filogenia (**Figura 1-7 A**). Pero su énfasis en la embriología ha sido una contribución sustancial a la comprensión del proceso evolutivo.

La evolución morfológica paralela de los mamíferos también argumenta a favor de la ancestría común propuesta por Darwin. El paralelismo ejemplificado por los marsupiales de Australia, cuyas morfologías son similares a las de los mamíferos placentados del resto del mundo, apoyan la monofilia y la modificación del plan corporal básico, en distintos continentes (**Figura 1-7 B**). La ancestría común también explica por qué los taxa que habitan islas oceánicas se asemejan a las formas continentales más cercanas. En el caso de la herpetofauna de las islas Galápagos, las similitudes entre esas tortugas e iguanas con especies continentales apoyan la diferenciación insular a partir de emigrantes.

Los cambios heredables que pueden inducirse mediante apareamientos selectivos son evidencia sólida de que la evolución es un hecho comprobable. Los múltiples ejemplos de domesticación (gallinas, perros, palomas, gatos, caballos, repollos, tomates, maíz, etc.) han indicado que la morfología y los rasgos funcionales pueden heredarse, de modo que al realizarse un programa de selección se obtienen descendientes con aspecto muy distinto del original. Del mismo modo, el ejemplo paradigmático de la polilla *Biston betularia* indica que un cambio puede ser inducido por el contexto ambiental (véase Capítulo 4 **La síntesis moderna**).

De acuerdo con las predicciones de la teoría neutral de evolución molecular (véase Capítulo 11 **Evolución molecular**), la cantidad de diferencias en la estructura de sus genes y proteínas aumenta linealmente a medida que aumenta la divergencia entre los organismos (= reloj molecular). Además, el **reloj molecular** predice que los organismos se agrupan evolutivamente según sus semejanzas moleculares. Por ejemplo, las relaciones de parentesco entre los simios indican una mayor proximidad entre el hombre y el chimpancé y una menor afinidad de ellos con el orangután. De igual modo, los monos son más similares entre sí

que a los carnívoros. Por su lado, los animales forman un grupo homogéneo diferente de las plantas. Estos ejemplos señalan que la vida está estructurada en niveles crecientes de complejidad. Las relaciones filogenéticas detectadas por electroforesis, por se-

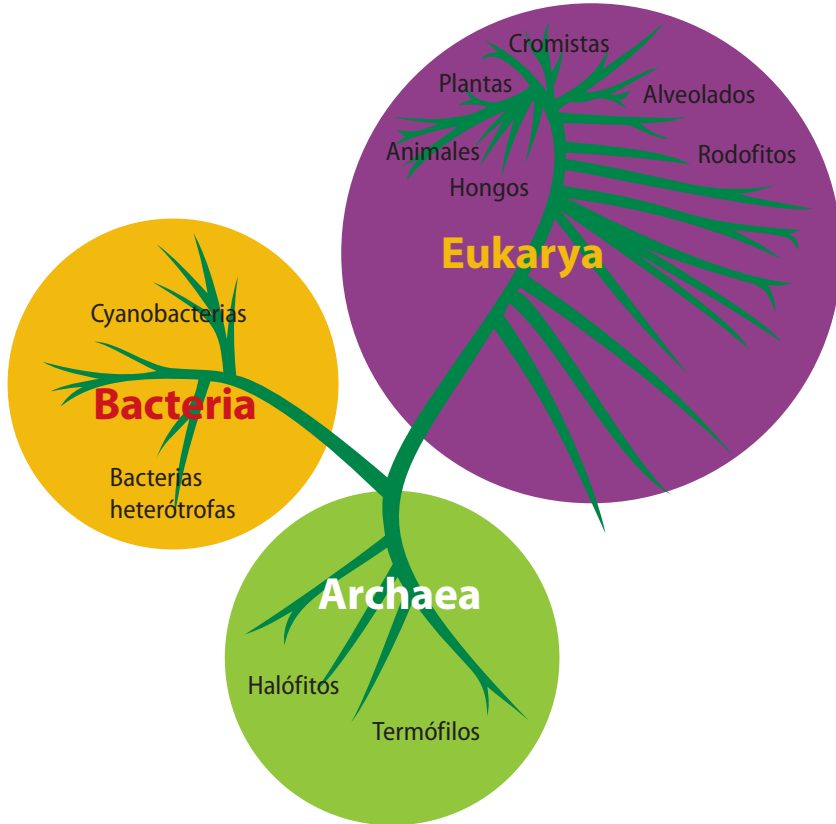


Figura 1-8 Monofilia de la diversidad orgánica

Los marcadores moleculares ribosómicos muestran que la diversidad biótica se agrupa en tres dominios e ilustran el origen monofilético de la vida. La longitud de las ramas refleja la distancia filogenética entre los taxa.

cuencias nucleotídicas y por análisis aminoacídicos, brindan relaciones de parentesco altamente concordantes entre sí. Además, los recientes análisis comparados, que usan especies cuyos genomas se han secuenciado completamente, han dado apoyo adicional a la hipótesis de monofilia. La reconstrucción del árbol de la

vida, (véase Capítulo 8 **El árbol de la vida**) mediante marcadores moleculares, muestra que la diversidad orgánica se agrupa en tres dominios de origen monofilético (**Figura 1-8**).

Otra evidencia genética contundente sobre el origen monofilético de los organismos radica en la universalidad del código genético. Salvo escasas excepciones, todos los organismos comparten el mismo conjunto de tripletes (codones) para codificar los aminoácidos que conforman las proteínas. Si los organismos hubiesen tenido orígenes independientes, se esperaría una gran variedad de códigos genéticos. Asimismo, el análisis de las proteínas de cualquier organismo vivo muestra que sus aminoácidos son de la serie «**L**» (levógiros). La existencia exclusiva de series levóginas (existiendo la posibilidad de tener series dextróginas) da apoyo adicional al origen monofilético de la vida.

Las bases genético-moleculares de estructuras clave del desarrollo embrionario apoyan la monofilia, al demostrar que organismos muy dispares (*p. ej.*, plantas y animales) se construyen con las mismas instrucciones básicas y la misma lógica epigenética. La homología genética tiene una explicación mecanística, porque los distintos taxa comparten genes de caja homeótica que son homólogos o, además, parálogos.

La citogenética también ha dado apoyo a la evolución, al establecer relaciones de parentesco mediante el análisis cromosómico comparado. Estos análisis señalan que las especies más cercanas exhiben cariotipos mucho más similares que las especies más distantes entre sí.

Con todo, el conjunto de evidencias enumeradas es consistente entre sí y apoya la conclusión de que la teoría es correcta. El advenimiento de la secuenciación genómica total de organismos ha revelado un notable incremento en la complejización genómica, desde procariontes a eucariontes, por aumentos del número de genes, de intrones y de elementos genéticos móviles. Simultáneamente, los diseños de expresión génica han evolucionado en forma cualitativamente similar, indicando que las presiones selectivas han actuado con efectos similares en muchos taxa. Este conocimiento ha puesto en evidencia la universalidad de las vías regulatorias, la base genética de las homologías morfológicas y la constancia de los algoritmos epigenéticos que definen los planes estructurales de los organismos. Todo indica que la vida compar-

te un acervo genético común, cuyo grado de diferencias es directamente proporcional al tiempo de divergencia. Este cúmulo de evidencias incontrovertibles son las bases empíricas sobre las cuales descansa la teoría evolutiva darwiniana.