nuevo medio ambiente. Estos comprenden lo que Richard Goldschmidt, de la Universidad de California, denominó "monstruos prometedores". Sugirió, por ejemplo, que el tipo ancestral de ave Archaeopteryx originó las aves modernas por una mutación que en un solo paso cambió la forma de su cola. Archaeopteryx tenía cola larga, en forma de reptil, que se cubrió de plumas. Si una sola mutación causó un acortamiento de la cola, podría haber resultado entonces un "monstruo prometedor" con la disposición de las plumas en forma de abanico característica de las aves modernas. Esta cola en forma de abanico, más adaptada para volar que la anterior, larga y semejante a la de reptil, daría a sus poseedores una ventaja selectiva durante la evolución. Dichos cambios esqueléticos se sabe que ocurren como resultado de una sola mutación. El gato Manx, por ejemplo, debe su rabo corto y tieso a una mutación que provoca el acortamiento y la fusión de la mayoría de las vértebras caudales. Una mutación similar en un Archaeopteryx ancestral podría haber conducido a la presente disposición en forma de abanico de la cola de las aves modernas.(fig. 4-1)

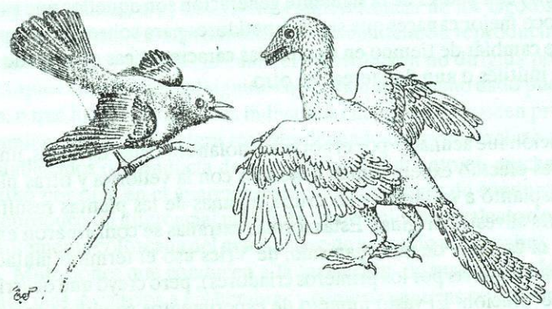


Fig. 4-1. Comparación de la estructura de la cola del ave primitiva Archaeopteryx (derecha) y la cola de un ave moderna (izquierda).

Tipos de Mutaciones. Algunas mutaciones, mutaciones cromosómicas, van acompañadas de un cambio visible en la estructura del cromosoma o de un cambio en el número total de cromosomas por célula. Un solo cromosoma puede ser añadido al conjunto diploide usual o suprimido de él, o el conjunto total de cromosomas puede duplicarse o triplicarse, dando organismos llamados poliploides. Las plantas y los animales poliploides suelen ser de mayor tamaño y más robustos que sus padres diploides. Se observan cambios en el número de cromosomas más frecuentemente en plantas que en animales, porque la naturaleza del proceso reproductor en las plantas permite a estos cromosomas alterados pasar de una generación a la siguiente. Algunas variedades cultivadas de tomates, maíz, trigo y otras plantas deben su vigor y el gran tamaño de su fruto al hecho de que son poliploides.

La base física de las mutaciones genéticas, que incluye cierta alteración de la secuencia de nucleótidos en el DNA, y la índole de algunas otras mutaciones cromosómicas.

Los genetistas usan el término polimorfismo ("muchas formas") para referirse a dos o más tipos de individuos que difieren discontinuamente -es decir, sin formas intermedias- en cierta característica determinada genéticamente. Los grupos sanguíneos humanos O,A,B y AB ofrecen un ejemplo clásico de polimorfismo. Dentro de una población dada podría esperarse que el proceso de selección produzca una población completamente homocigota, pues cualquier miembro de un par de alelos determina el rasgo con mayor valor adaptativo. Esto sucede realmente en ciertas líneas

evolutivas, pero no es la única posibilidad en la reproducción diferencial. Por ejemplo, los individuos heterocigotos para el gen de la anemia drepanocítica (Ss) son algo más resistentes al paludismo que individuos normales homocigotos (SS). En el Africa Central, donde el paludismo es endémico, hay una fuerte presión de selección positiva en favor de individuos heterocigotos (Ss) a causa de su resistencia al paludismo, una fuerte presión de selección negativa contra los anémicos drepanocíticos (ss) y una ligera presión de selección negativa contra individuos normales homocigotos (SS) debido a su falta de resistencia al paludismo. Estas fuerzas separadas y opuestas actúan para mantener un equilibrio, un polimorfismo equilibrado, de homocigotos y heterocigotos.

La existencia de variación puede ser de valor adaptativo para una población, porque una población homocigota completamente no tendría substrato genético sobre el cual pudiera actuar la selección natural. Una población que tiene un buen pronóstico de supervivencia en el futuro es la que ha mantenido suficiente variación para permitir más cambios adaptativos. Observaciones de poblaciones silvestres de moscas de la fruta y otros organismos han demostrado que sus fondos comunes genéticos cambian adaptativamente, aun en respuesta a cambios ambientales como alteraciones de las estaciones.

El individuo heterocigoto puede tener mayor aptitud para reproducirse y sobrevivir que los correspondientes individuos homocigotos. Pero, obviamente, el estado heterocigoto no puede mantenerse en una población si no se produce también cierto número de individuos homocigotos algo menos aptos. Los valores selectivos relativos de los estados heterocigotos y homocigotos determinarán la razón particular de alelos del fondo común genético que resultará en la proporción óptima de heterocigotos y homocigotos.

Debido a la constante competencia por el alimento y el espacio para vivir, cada grupo de organismos tiende a diseminarse y ocupar el mayor número posible de hábitat. Este proceso de evolución partiendo de una sola especie ancestral y originando una variedad de formas que ocupan hábitat algo diferentes se denomina radiación adaptativa. Es claramente ventajosa en la evolución porque permite a los organismos descubrir nuevos recursos de alimentos o escapar de algunos de sus enemigos. (fig. 4-2)

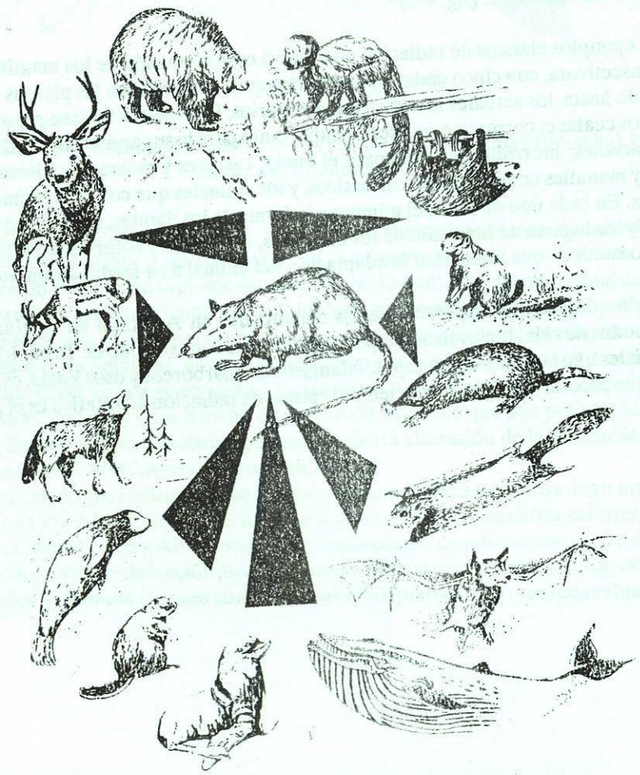
Uno de los ejemplos clásicos de radiación adaptativa es la evolución de los mamíferos placentarios. De una criatura primitiva, insectívora, con cinco dedos y patas cortas que caminaba con las plantas de los pies planas sobre el suelo ha evolucionado hasta los actuales mamíferos placentarios. Entre éstos figuran perros y ciervos adaptados a la vida terrestre, para los cuales el correr con rapidez es importante para la supervivencia. Ardillas y primates adaptados para la vida en los árboles; murciélagos aptos para el vuelo; castores y morsas que llevan una existencia anfibia; ballenas, marsopas y manatíes completamente acuáticos, y los animales que construyen madrigueras, topos, ardillas de tierra y musarañas. En cada uno de éstos, el número y la forma de los dientes, la longitud y el número de huesos de las patas, el número y los lugares de inserción de los músculos, el espesor y color de la piel, la longitud y forma de la cola, etc., han sufrido cambios que aumentan la adaptación del animal a su medio ambiente particular.

Una radiación adaptativa comparable de los marsupiales en Australia ha originado especies que se han adaptado a muchos modos de vida. Incluyen marsupiales carnívoros como el lobo de Tasmania, tipos que se alimentan de hormigas, marsupiales que horadan como topos, falangistas semiarbóreos y osos koala, canguros herbívoros de los llanos, y bandicutos que parecen conejos. Otro ejemplo clásico de radiación adaptativa es el de los reptiles durante la era Mesozoica.

La radiación adaptativa puede tener lugar en una escala muy pequeña, como la representada por la variedad de pinzones que se encuentran hoy en las islas Galápagos. Algunas de estas aves viven en tierra y se alimentan de semillas, otras se alimentan principalmente de cactos, y aún otras han preferido vivir el los árboles y comen insectos. Estos cambios han ido acompañados de cambios evolutivos en el tamaño y estructura del pico. La esencia de la radiación adaptativa es entonces la evolución a partir de una sola forma ancestral, dando una variedad de diferentes formas, cada una de las cuales está adaptada y especializada en cierta forma única a sobrevivir en un hábitat particular.

La radiación adaptativa que da origen a varios tipos de descendientes, adaptados da distintos modos a diferentes medios ambientes, se denomina "evolución divergente". El fenómeno opuesto, evolución convergente, ocurre también con bastante frecuencia; es decir, dos o más grupos poco relacionados pueden adquirir, al adaptarse a un medio ambiente similar, características más o menos similares. Por ejemplo, las alas han evolucionado no sólo en las aves, sino en los mamíferos (murciélagos), en los reptiles (pterosaurios) y en insectos. Una forma muy similar y aerodinámica, las aletas dorsales, aletas caudales y miembros anteriores y posteriores han aparecido en delfines y marsopas (que son mamíferos), en los extintos ictiosaurios (que eran reptiles) y en peces óseos y cartilaginosos. (fig. 4-4) Los topos y las ardillas de tierra se han adaptado a la vida subterránea y han adquirido estructuras similares en patas delanteras y traseras adaptadas a la excavación . El topo es insectívoro y la ardilla de tierra es roedor. El ojo del calamar y el de un vertebrado como el pez son también muy similares en estructura, aunque muy diferentes en su origen embrionario.

Fig. 4-2. Radiación adaptativa. Todos los mamiferos representados evolucionaron a partir de un antepasado comun en el centro, y se adaptaron a una gran variedad de habitat.



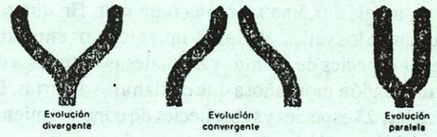


Fig. 4-3. Diagrama que ilustra la diferencia entre evolución divergente, convergente y paralela.

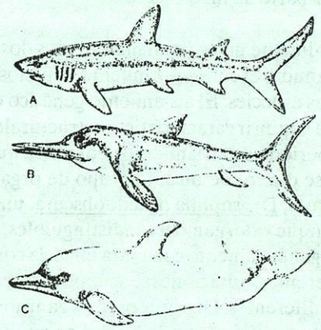


Fig. 4-4. Evolución convergente, A ,tuburon; B, ictiosaurio (reptil fósil, y C, delfin (mamifero); se advierte cierta semejanza superficial entre los tres por haberse adaptado a medios similares.

La unidad de clasificación de plantas y animales es la especie. Es difícil dar una definición de este término que pueda aplicarse uniformemente a todo el reino animal y a todo el reino vegetal, pero una especie puede definirse como una población de individuos con características estructurales y funcionales similares, que tienen un antecesor común y en la naturaleza sólo se aparean entre sí. Una especie es un conjunto de demes o poblaciones dentro del cual puede producirse cruzamiento -un grupo de poblaciones con un fondo común de genes. En esta definición, está implícito que no hay una corriente libre de genes entre dos especies diferentes.

Buscando una explicación para el origen de especies nuevas, hemos de describir como la suma de cambios evolutivos unitarios en una población puede acabar en el establecimiento de especies nuevas (y de géneros, familias y órdenes nuevos). Esto requiere que se produzcan barreras de reproducción entre las especies incipientes a medida que se van estableciendo. Cuando el cruzamiento entre subgrupos de una población se hace progresivamente menos frecuente y los híbridos resultantes se vuelven progresivamente menos fecundos, los distintos grupos se convierten

finalmente en especies diferentes. Cualquier factor que reduzca el grado de cruzamiento entre grupos de organismos se denomina "mecanismo aislante".

Un tipo muy común de aislamiento es el geográfico, la separación de grupos de organismos afines por alguna barrera física como un río, un desierto, un glaciar, una montaña o un mar. En una región montañosa las cordilleras individuales levantan barreras eficaces entre los valles. Valles no muy alejados entre sí, pero separados por cordilleras siempre cubiertas de nieve, suelen tener especies de plantas y animales peculiares a dichos valles. Así, generalmente hay más especies en un área dada de una región montañosa que en llanuras abiertas. Por ejemplo, en las montañas de la región occidental de Estados Unidos hay 23 especies y subespecies de conejos, mientras que en la región mucho más extensa de llanuras del Medio Oeste y el Este sólo hay ocho especies de conejos.

El Istmo de Panamá ofrece otro notable ejemplo de aislamiento geográfico. A uno y otro lados del istmo los filos y clases de invertebrados marinos están constituidos por especies diferentes, pero estrechamente relacionadas. Por espacio de 16 millones de años de la era terciaria no hubo unión entre América del Norte y América del Sur, y los animales marinos podían emigrar libremente entre los que es ahora el Golfo de México y el Océano Pacífico. Cuando volvió a emerger el Istmo de Panamá, los grupos estrechamente relacionados de animales quedaron aislados y las diferencias entre la fauna de las dos regiones representa la posterior acumulación de diferencias hereditarias. Cuando se cavó el Canal de Panamá, se logró que algunas de las formas más móviles emigran de uno a otro océano. Sin embargo, gran cantidad del canal está lleno de agua dulce y se encuentra a 28 metros arriba del nivel del mar. Esta es una barrera formidable para la migración de la mayor parte de invertebrados.

El aislamiento geográfico generalmente no es permanente, y los dos grupos anteriormente aislados pueden llegar a ponerse en contacto de nuevo y reanudar el entrecruzamiento, a menos que se haya producido durante ese lapso aislamiento genético o esterilidad entre las especies. El aislamiento genético es resultado de mutaciones ocurridas independientemente de las mutaciones para adquirir características estructurales o funcionales. El aislamiento genético sólo puede aparecer tras un prolongado periodo de aislamiento geográfico que provoca grandes diferencias entre dos grupos de organismos, o puede originarse dentro de un solo grupo de organismos por lo demás homogéneos. Por ejemplo, en una especie de mosca de la fruta, Drosophila pseudoobscura, una mutación por aislamiento genético ha producido dos grupos de moscas que, aunque externamente indistinguibles, son completamente estériles cuando se aparean. Estos dos grupos están aislados genéticamente con tanta eficacia como si vivieran en diferentes continentes. Con el transcurso de las generaciones, diferentes mutaciones se acumulan en cada grupo por casualidad y por selección, y los dos grupos llegan a ser visiblemente diferentes. Dos grupos de organismos que viven en la misma área geográfica pueden ser aislados ecológicamente si ocupan diferentes hábitat. Los animales marinos que viven en la zona comprendida entre la pleamar y la bajamar están eficazmente aislados de otros organismos que viven sólo unos pocos metros debajo del nivel de la bajamar.

Podría resultar aislamiento ecológico del simple hecho de dos grupos u organismos procreen en épocas del año algo diferentes.

Aunque los miembros de diferentes especies no son infecundos entre sí, ocasionalmente miembros de dos especies diferentes pero estrechamente relacionadas pueden entrecruzarse produciendo una tercera especie por hibridación. Dichos fenómenos hacen difícil establecer una definición precisa y rápida de la especie. Por hibridación, los mejores caracteres de cada una de las especies originales pueden combinarse en un solo descendiente, creando así un nuevo tipo más capacitado para sobrevivir que sus padres. Si la nueva forma combinó los peores caracteres de ambos padres, obviamente se encontrará en gran desventaja y difícilmente podrá sobrevivir.

Cuando se cruzan dos especies con distinto número de cromosomas, la descendencia suele ser estéril. Los cromosomas diferentes no pueden aparearse en la meiosis, y los óvulos y espermatozoos resultantes no reciben la dotación apropiada de cromosomas, uno de cada especie. Cuando, dentro de tales híbridos interespecíficos, el número de cromosomas se duplica, puede tener lugar meiosis en forma normal, y se producirán óvulos y espermatozoos fértiles normales. En lo sucesivo, la especie híbrida se reproducirá, y no producirá descendencia fecunda cuando se aparee con una u otra especie progenitora. Muchas especies afines de plantas superiores tienen números de cromosomas que son múltiplos de cierto número básico. Las especies de trigo comprenden unas con 14, 28, 42 y 56 cromosomas, y especies de violetas con múltiplos de seis, desde 12 hasta 54.

El hecho de que surgan tales series naturales por hibridación y duplicación de los cromosomas es apoyado por experimentos de laboratorio que dan series similares. Uno de los más famosos de estos cruzamientos experimentales fue hecho por Karpechenko, quien cruzó nabo con col, esperando quizá obtener una planta con hojas de col y raíz de nabo. Los nabos y las coles pertenecen a diferentes géneros, pero ambos tienen 18 cromosomas. El híbrido resultante tendría también 18 cromosomas, nueve de su progenitor nabo y nueve de su progenitor col. Como los cromosomas del nabo y la col no eran semejantes, no se aparearon durante la meiosis, y el híbrido fue casi completamente estéril. Pero, por casualidad, algunos de los óvulos de espermatozoos formados contenían 18 cromosomas, y un cruze entre dos de éstos dio por resultado una planta con 36 cromosomas. Esta planta fue fértil, pues durante la meiosis los pares de cromosomas del nabo experimentaron sinapsis, y los pares de cromosomas de la col también. El híbrido exhibió algunas características de cada progenitor, y las transmitió después. Desafortunadamente, tenía hojas semejantes a las del nabo y raíz parecida a la de la col. Como no pudo ser cruzado fácilmente con cualquiera de sus especies progenitoras, era en realidad una nueva especie producida por hibridación, seguida por duplicación del número de cromosomas.

Un hecho similar en la naturaleza ha sido documentado en el césped de las lagunas. Uno de éstos, Spartina townsendi, apareció primero hace más de 100 años en el puerto de Southampton, Inglaterra, en compañía de otras dos especies, Spartina stricta y Spartina alterniflora. La nueva especie, Spartina townsendi, era mucho más vigorosa que las progenitoras y pronto se extendió. Era especialmente valiosa para reunir y conservar unido el suelo y fue trasplantada a los diques holandeses y a otras partes del mundo. Como era intermedia en muchas características entre las dos especies con las que se encontraba primero, se creyó que se había originado como híbrido. Cuando fue posible examinar el número de cromosomas, se confirmó la hipótesis, pues se halló que Spartina townsendi tenía 126 cromosomas, Spartina stricta 56, y Spartina alterniflora 70. Así, no hay duda de que surgen nuevas especies del número de cromosomas.

La historia evolutiva de cualquier grupo de organismos se conoce como su filogenia. Es básico en cualesquiera aspectos de la investigación biológica saber qué organismos están más estrechamente relacionados -es decir, cuáles tienen antecesores comunes en el pasado reciente y cuáles antecesores comunes sólo en el pasado más distante. Para establecer las relaciones filogenéticas de un grupo de organismos, cada investigador debe examinar el mayor número posible de características de cada tipo, buscando patrones de similitudes y diferencias que puedan proporcionar indicios. Los filogenetistas originalmente se limitaron en gran parte a comparar caracteres morfológicos -tipos de huesos, músculos y nervios- pero ahora pueden examinarse muchos caracteres fisiológicos, bioquímicos, inmunológicos y citológicos y usarse para demostrar la validez de las relaciones inferidas sobre la base de caracteres morfológicos. Es tranquilizador saber que las relaciones evolutivas inferidas de los análisis bioquímicos más recientes y complejos de los tipos de proteína hallados en diferentes especies concuerdan notablemente con las relaciones evolutivas establecidas hace un siglo basándose en similitudes morfológicas.

Las opiniones de los investigadores discrepan respecto a la naturaleza de las mutaciones, a las que se presentaron en la evolución y al grado de que intervinieron en la misma los distintos factores de selección, aislamiento, recombinación genética, hibridación y volumen de los grupos, aunque en ciertos principios fundamentales hay unanimidad de pareceres. Entre ellos destaca la opinión de que los cambios en cromosomas y en genes constituyen la materia prima de la evolución, que es necesario cierto grado de aislamiento para la creación de una nueva especie, y que la selección natural es precisa para la perpetuación de algunas de las mutaciones ocurridas, pero no de todas. Además, se conocen cinco principios de la evolución los cuales suscriben prácticamente todos los biólogos:

1. La evolución es más rápida en unos momentos que en otros. En la época actual prosigue con rapidez y aparición constante de nuevas formas de extinción de otras. ¿A qué factores se debe todo esto?.
2. La evolución es de intensidad variable en los diferente tipos de organismos. En un extremo de la escala se encuentran los moluscos bivalvos conocidos como braquiópodos, mantenidos invariables durante un lapso de 500 millones de años, pues los fósiles de aquel tiempo revelan identidad con las formas presentes. En contraste, han aparecido varias especies de homínidos, que se extinguieron en los últimos cientos de miles de años. En general, la evolución es rápida al aparecer una nueva especie, para luego ser más lenta una vez que el grupo ha logrado establecerse.

3. Las nuevas especies no evolucionan a partir de las adelantadas y especializadas, sino de las relativamente sencillas y sin especialización . Los mamíferos, por ejemplo, no descienden de los especializados dinosaurios, sino de grupos de reptiles pequeños y sin rasgos distintivos.

4. La evolución no procede siempre de lo simple a lo complejo. Hay, en efecto, muchos ejemplos de evolución "regresiva" por la cual, de una forma superior ha derivado una más sencilla. Muchos parásitos evolucionaron de un progenitor de vida independiente, desde luego más completo que la forma adaptada a la vida parasitaria. Las aves sin alas como el casuario descienden de otras que podían volar y lo mismo pasa con varios insectos ápteros, descendientes de unos parecidos alados. También las serpientes han evolucionado desde reptiles con patas, en tanto la ballena, sin extremidades posteriores, deriva de mamíferos con cuatro miembros. Estos casos confirman el hecho de que las mutaciones son casuales, de que no progresan de lo simple a lo complejo o de lo "imperfecto" a lo "perfecto". Si de todo esto llega a resultar que una especie tiene ventajas en ser de estructura más sencilla, o incluso prescindir de algún carácter toda mutación en este sentido se acumulará por selección natural.

5. La evolución ocurre por poblaciones, no por individuos; por procesos de mutación , reproducción no casual, selección natural y desplazamiento genético.

PRUEBAS DE LA EVOLUCION

Las pruebas de la evolución orgánica son tan decisivas que nadie enterado de sus bases científicas puede dudar de que las nuevas especies derivaron de otras antecesoras por descendencia con modificaciones. La presencia de fósiles es prueba directa de la evolución orgánica, y brinda detalles de las relaciones evolutivas de varias líneas de descendencia.

Incluso si no existiera el registro notablemente detallado de los fósiles, estudios de anatomía, fisiología y bioquímica de plantas y animales modernos, su desarrollo y citogenética, la forma como están distribuidos sobre la superficie de la Tierra, proporcionan la demostración categórica de que ha tenido lugar una evolución orgánica.

La ciencia de la paleontología tiene por objeto buscar, interpretar y clasificar las pruebas abundantes y diversas de la vida en tiempos pretéritos. La palabra fósil (del latín fossilium, a la vez derivado de fodere, cavar) no se refiere únicamente al estudio de huesos, dientes, conchas y otros tejidos duros conservados de vegetales y animales, sino de toda huella o señal dejada por un organismo que vivió en otro tiempo.

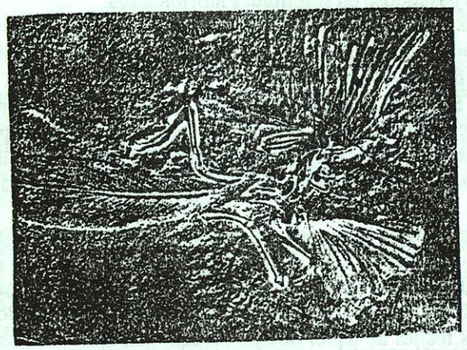


Fig. 4-5. Ejemplo de fosilización Archeopteryx.

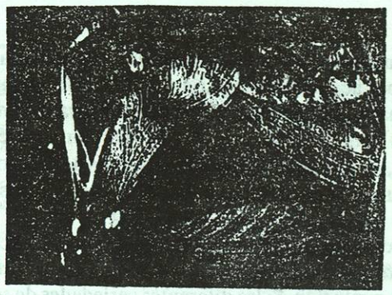


Fig. 4-6. Dos termites englobados en ambar. Estos insectos datan de mediados del periodo terciario, hace unos 38 millones de años, a pesar de lo cual la conservación es casi perfecta.

Dado el gran número de fósiles de animales y plantas encontrados es lógico deducir que sólo una pequeña parte de los seres que vivieron en otro tiempo se conservaron como fósiles, y que sólo una pequeña fracción de estos fósiles ha sido descubierta hasta la fecha. (fig. 4-5, 4-6)

Las pisadas y rastros dejados en el barro pastoso, endurecido luego, son ejemplos corrientes de fósiles, de los cuales pueden deducirse datos sobre la conformación y proporciones de los animales que dejaron estas impresiones. En 1948 se descubrieron en Pittsburgh los vestigios de un anfibio del periodo pensilvánico, que vivió hace 250 millones de años; se sabe que avanzaba a saltos en vez de dar pasos, revelado porque las pisadas se ven contiguas y a pares.

Muchos de los fósiles de vertebrados son porciones de su esqueleto, de las cuales es posible deducir la postura y el modo de locomoción. De las rugosidades en los huesos, indicadoras de la inserción de los músculos, los paleontólogos pueden deducir la posición general y tamaño de los músculos, y de aquí los contornos del cuerpo. Basándose en semejantes datos se han logrado reconstrucciones de cómo eran estos animales en vida. Sólo cabe conjeturar respecto al color del tegumento o de las escamas que los cubrían.

Un tipo notable e interesante de fósil es aquel en que las partes duras y, con más rareza, las blandas, han sido substituidas por minerales, proceso conocido por petrificación . Los minerales que reemplazan las porciones vivas pueden ser piritas de hierro, sílice, carbonato de calcio y otras substancias. Se ha dado el caso de que el músculo petrificado de un tiburón, con antigüedad de 300 millones de años, se hallaba tan bien conservado por este mecanismo, que no sólo podían distinguirse las fibras musculares, sino incluso su estriación bajo el microscopio. El bosque petrificado de Arizona es ejemplo famoso de este mismo proceso.

Los moldes y vaciados son superficialmente semejantes a los fósiles petrificados, aunque fueron producidos de modo distinto. Los moldes se formaron por endurecimiento de las materias que rodearon al organismo sepultado, el cual a su vez fue desaparecido, arrastrado por la filtración del agua subterránea. A veces los moldes se llenavan de minerales que también se endurecían para formar vaciados, o réplicas de las estructuras originales.

En condiciones de excepción los paleontólogos tienen la suerte de descubrir seres congelados en las regiones polares, especialmente en Alaska o Siberia. Enterrados en lugares a baja temperatura se han recuperado varias especies de mamut, de más de 25 mil años, tan bien conservados que su carne podía ser devorada por los perros. Otras formas de vegetales, insectos y arácnidos se han conservado incluidas en ámbar, resina fósil de pinos; originalmente la resina era tan pastosa que englobó al insecto por entero, penetró en todas sus partes y después se endureció gradualmente conservando al animal intacto.