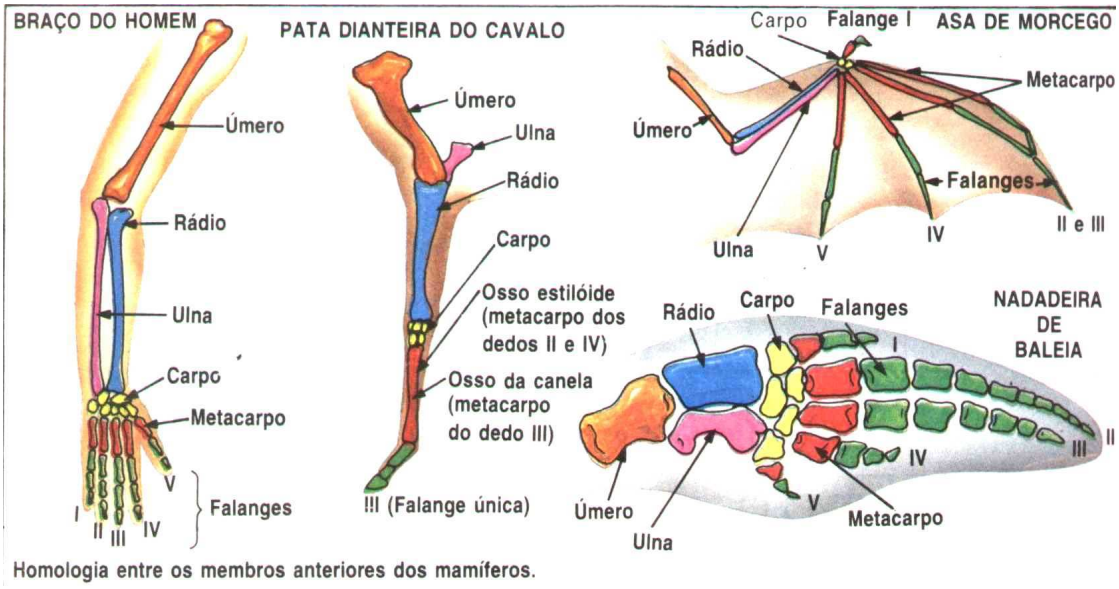
Introdução à evolução

1. O que é a evolução?

Evolução é o processo através no qual ocorrem as mudanças ou transformações nos seres vivos ao longo do tempo, dando origem a espécies novas.

2. Evidências da evolução

A evolução tem suas bases fortemente corroboradas pelo estudo comparativo dos organismos, sejam fósseis ou atuais. Os tópicos mais importantes desse estudo serão apresentados de forma resumida.



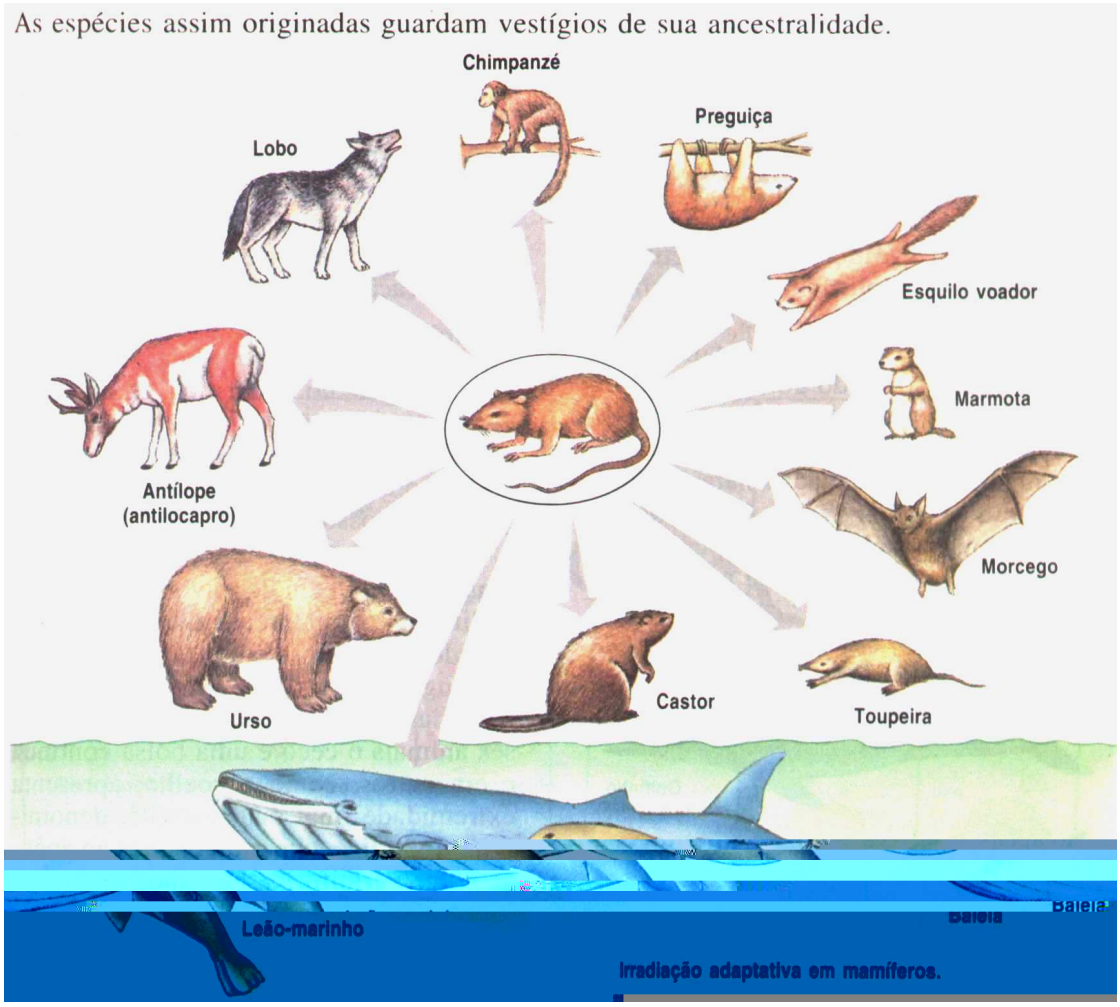
Homologia entre os membros anteriores dos mamíferos.

2.1 Homologia e analogia

Por **homologia** entende-se semelhança entre estruturas de diferentes organismos, devida unicamente a uma mesma origem embriológica. As estruturas homólogicas podem exercer ou não a mesma função.
O braço do homem, a pata do cavalo, a asa do morcego e a nadadeira da baleia são estruturas homólogicas entre si, pois todas têm a mesma origem embriológica. Nesses casos, não há similaridade funcional.

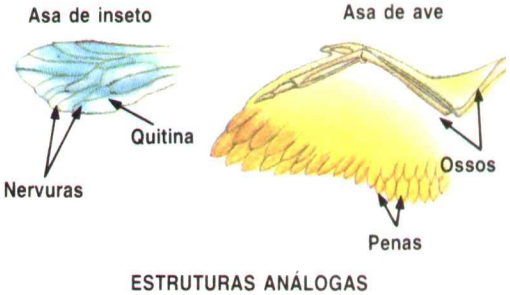
Ao analisar, entretanto, a asa do morcego e a asa da ave, verifica-se que ambas têm a mesma origem embriológica e estão, ainda associadas á mesma função.

A homologia entre estruturas de 2 organismos diferentes sugere que eles se originaram de um grupo ancestral comum, embora não indique um grau de proximidade comum, partem várias linhas evolutivas que originaram várias espécies diferentes, fala-se em **irradiação adaptava**.



Homologia: mesma origem embriológica de estruturas de diferentes organismos, sendo que essas estruturas podem ter ou não a mesma função. As estruturas homólogas sugerem ancestralidade comum.

A **analogia** refere-se à semelhança morfológica entre estruturas, em função de adaptação à execução da mesma função.
As asas dos insetos e das aves são estruturas diferentes quanto à origem embriológica, mas ambas estão adaptadas à execução de uma mesma função: o vôo. São , portanto, estruturas análogas.



ESTRUTURAS ANÁLOGAS

As estruturas análogas não refletem por si sós qualquer grau de parentesco. Elas fornecem indícios da adaptação de estruturas de diferentes organismos a uma mesma variável ecológica. Quando organismos não intimamente aparentados apresentam estruturas semelhantes exercendo a mesma função, dizemos que eles sofreram **evolução convergente**.

Ao contrário da irradiação adaptativa (caracterizada pela diferenciação de organismos a partir de um ancestral comum. dando origem a vários grupos diferentes adaptados a explorar ambientes diferentes.) a evolução convergente ou convergência evolutiva é caracterizada pela adaptação de diferentes organismos a uma condição ecológica igual. assim, as formas do corpo do golfinho, dos peixes, especialmente tubarões, e de um réptil fóssil chamado ictiossauro são bastante semelhantes, adaptadas à natação. Neste caso, a semelhança não é sinal de parentesco, mas resultado da adaptação desses organismos ao ambiente aquático.

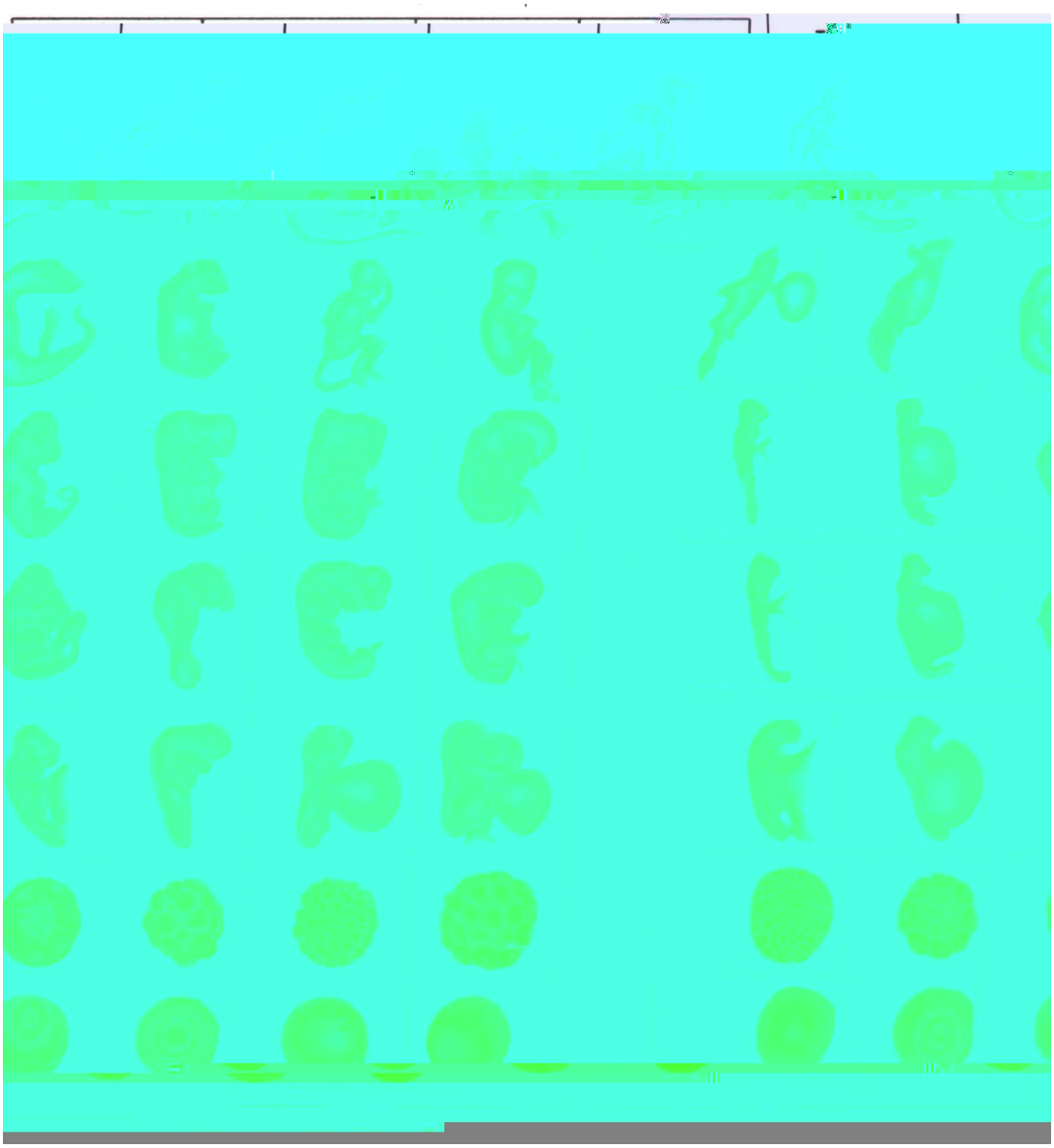
Analogia : semelhança entre estruturas de diferentes organismos, devida unicamente à adaptação a uma mesma função. São consideradas resultado da evolução convergente.

2.2 Órgãos vestigiais

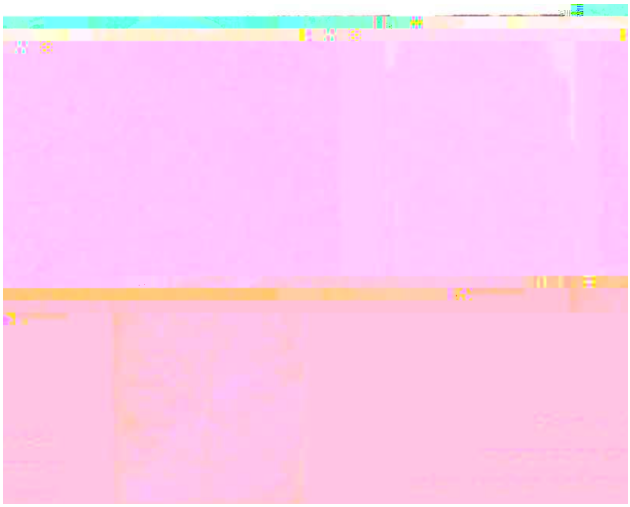
Órgãos vestigiais são aqueles que, em alguns organismos, encontram-se com tamanho reduzido e geralmente sem função, mas em outros organismos são maiores e exercem função definitiva. A importância evolutiva desses órgãos vestiginais é a indicação de uma ancestralidade comum.

Um exemplo bem conhecido de órgão vestigial no homem é o apêndice vermiforme , estrutura pequena e sem função que parte do ceco (estrutura localizada no ponto onde o intestino delgado liga-se ao grosso).

Nos mamíferos roedores, o ceco é uma estrutura bem desenvolvida, na qual o alimento parcialmente digerido á armazenado e a celulose, abundante nos vegetais ingeridos, é degradada pela acção de bactérias especializadas. Em alguns desses animais o ceco é uma bolsa contínua e em outros, como o coelho, apresenta extremidade final mais estreita, denominada apêndice . que corresponde ao apêndice vermiforme humano.

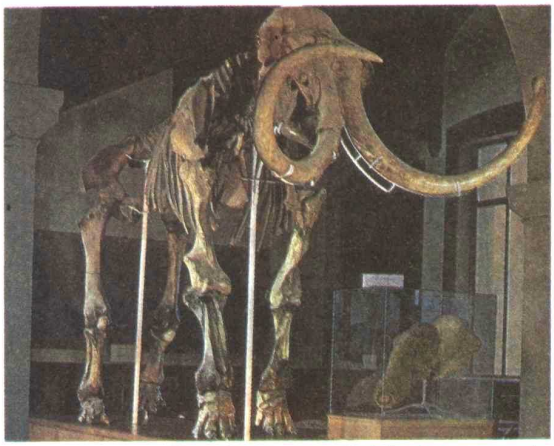


2.4 Estudo dos fósseis

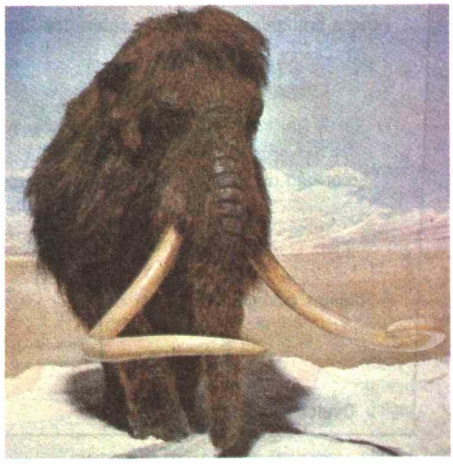


É considerado fóssil qualquer indício da presença de organismos que viveram em tempos remotos da Terra. As partes duras do corpo dos organismos são aquelas mais freqüentemente conservadas nos processos de fossilização, mas existem casos em que a parte mole do corpo também é preservada. Dentre estes podemos citar os fosseis congelados, como, por exemplo, o mamute encontrado na Sibéria do norte e os fosseis de insetos encontrados em âmbar. Neste último caso, os insetos que penetravam na resina pegajosa, eliminada pelos pinheiros, morriam, A resina endurecia, transformando-se em âmbar. , e o inseto aí contido era preservado nos detalhes de sua estrutura.

Também são consideradas fósseis impressões deixadas por organismos que viveram em eras passadas , como , por exemplo, pegadas de animais extintos e impressões de folhas, de penas de aves extintas e da superfície da pele dos dinossauros.



Esqueleto e reconstituição de um mamute (aproximadamente 3 m de altura), animal extinto que viveu na América do Norte e na Eurásia.



A importância do estudo dos fósseis para a evolução está na possibilidade de conhecermos organismos que viveram na Terra em tempos remotos, sob condições ambientais distintas das encontradas atualmente, e que podem fornecer indícios de parentesco com as espécies atuais. Por isso, os fósseis são considerados importantes **testemunhos** da evolução.

3. As Teorias evolutivas

Várias teorias evolutivas surgiram, destacando-se , entre elas, as teorias de **Lamarck** e de **Darwin.** Atualmente, foi formulada a **Teoria sintética da evolução**, também denominada **Neodarwinismo**, que incorpora os conceitos modernos da genética ás idéias essenciais de Darwin sobre seleção natural.

3.1 A teoria de Lamarck

Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829), naturalista francês, foi o primeiro cientista a propor uma teoria sistemática da evolução. Sua teoria foi publicada em 1809, em um livro denominado Filosofia zoológica. Segundo Lamarck, o principio evolutivo estaria baseado em duas Leis fundamentais:

- **Lei do uso ou desuso**: o uso de determinadas partes do corpo do organismo faz com que estas se desenvolvam, e o desuso faz com que se atrofiem.
- **Lei da transmissão dos caracteres adquiridos** : alterações provocadas em determinadas características do organismo, pelo uso e desuso, são transmitidas aos descendentes.

Lamarck utilizou vários exemplos para explicar sua teoria. Segundo ele, as aves aquáticas tornaram-se pernaltas devido ao esforço que faziam no sentido de esticar as pernas para evitarem molhar as penas durante a locomoção na água. A cada geração, esse esforço produzia aves com pernas mais altas, que transmitiam essa característica à geração seguinte. Após várias gerações, teriam sido originadas as atuais aves pernaltas.

A teoria de Lamarck não é aceita atualmente, pois suas idéias apresentam um erro básico: as características adquiridas não são hereditárias.

Verificou-se que as alterações em células somáticas dos indivíduos não alteram as informações genéticas contida nas células germinativas, não sendo, dessa forma, hereditárias.

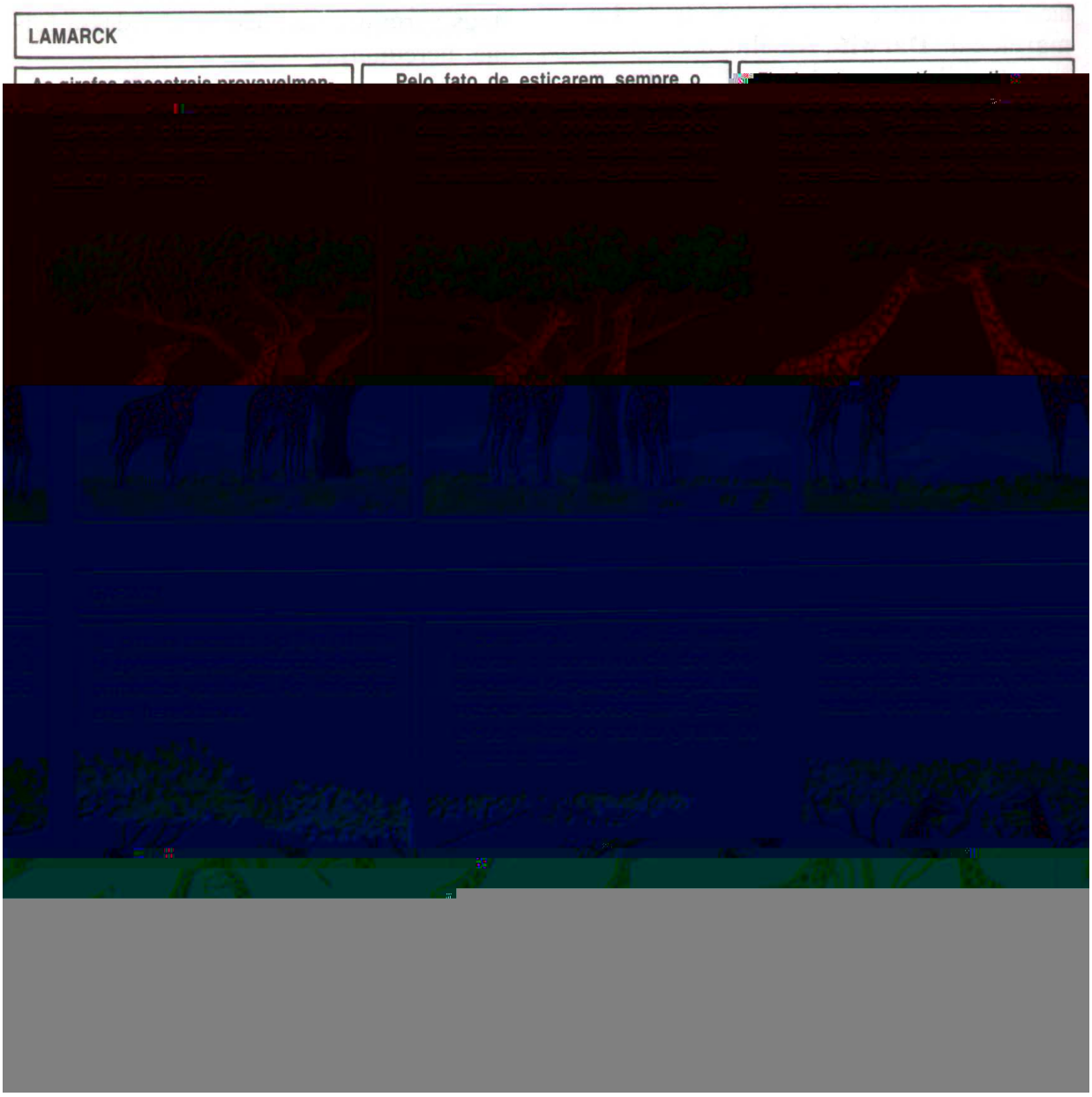
3.2 A teoria de Darwin

Charles Darwin (1809-1882), naturalista inglês, desenvolveu uma teoria evolutiva que é a base da moderna teoria sintética: a teoria da **seleção natural**. Segundo Darwin, os organismos mais bem adaptados ao meio têm maiores chances de sobrevivência do que os menos adaptados, deixando um número maior de descendentes. Os organismos mais bem adaptados são, portanto, selecionados para aquele ambiente.

Os princípios básicos das idéias de Darwin podem ser resumidos no seguinte modo:

- Os indivíduos de uma mesma espécie apresentam variações em todos os caracteres, não sendo, portanto, indenticos entre si.
- Todo organismo tem grande capacidade de reprodução, produzindo muitos descendentes. Entretanto, apenas alguns dos descendentes chegam à idade adulta.
- O número de indivíduos de uma espécie é mantido mais ou menos constante ao longo das gerações.
- Assim, há grande "1á 6 6g¸Á5w a@ x Wq 5w CDS Vá ÿÑ)'2J8V7ofÑ5v4 (253%6 JmW8(é6 0@d4E{x)f3V-qK

A abordagem de Darwin sobre a evolução era bastante distinta daquela de Lamarck, como pode ser visto no esquema a seguir.



3.3 A teoria sintética da evolução

A **Teoria sintética da evolução** ou **Neodarwinismo** foi formulada por vários pesquisadores durante anos de estudos, tomando como essência as noções de Darwin sobre a selecção natural e incorporando noções actuais de genética. A mais importante contribuição individual da Genética, extraída dos trabalhos de Mendel, substituiu o conceito antigo de herança através da mistura de sangue pelo conceito de herança através de partículas: os genes.

A teoria sintética considera, conforme Darwin já havia feito, a **população como unidade evolutiva**. A **população** pode ser definida como **grupamento de indivíduos de uma mesma espécie que ocorrem em uma mesma área geográfica, em um mesmo intervalo de tempo.**
Para melhor compreender esta definição , é importante conhecer o conceito biológico de espécie: **agrupamento de populações naturais, real ou potencialmente intercruzantes e reprodutivamente isolados de outros grupos de organismos.**

Quando, nesta definição, se diz *potencialmente inter-cruzantes*, significa que uma espécie pode ter populações que não cruzem naturalmente por estarem geograficamente separadas. Entretanto, colocadas artificialmente em contacto, haverá cruzamento entre os indivíduos, com descendentes férteis. Por isso, são **potencialmente intercruzantes**.

A definição biológica de espécie só é valida para organismos com reprodução sexuada, já que, no caso dos organismos com reprodução sexuada, já que, no caso dos organismos com reprodução assexuada, as semelhanças entre características morfológicas é que definem os agrupamentos em espécies.
Observando as diferentes populações de indivíduos com reprodução sexuada, pode-se notar que não existe um indivíduo igual ao outro. Execeções a essa regra poderiam ser os gêmeos univitelínicos, mas mesmo eles não são absolutamente idênticos, apesar de o patrimônio genético inicial ser o mesmo. Isso porque podem ocorrer alterações somáticas devidas á ação do meio.

A enorme diversidade de fenótipos em uma população é indicadora da variabilidade genética dessa população, podendo-se notar que esta é geralmente muito ampla.

A compreensão da variabilidade genética e fenotípica dos indivíduos de uma população é fundamental para o estudo dos fenómenos evolutivos, uma vez que a evolução é, na realidade, a transformação estatística de populações ao longo do tempo, ou ainda, alterações na frequência dos genes dessa população. Os factores que determinam alterações na frequência dos genes são denominados **factores evolutivos**. Cada população apresenta um **conjunto genético**, que sujeito a factores evolutivos , pode ser alterado. O conjunto genético de uma população é o conjunto de todos os genes presentes nessa população. Assim , quanto maior é a variabilidade genética.

Os factores evolutivos que actuam sobre o conjunto genético da população podem ser reunidos duas categorias:

- Factores que tendem a aumentar a variabilidade genética da população: **mutação genética, mutação cromossônica , recombinação;**
- Factores que actuam sobre a variabilidade genética já estabelecida : **selecção natural, migração e oscilação genética.**

A integração desses factores associada ao isolamento geográfico pode levar, ao longo do tempo, ao desenvolvimento de mecanismos de **isolamento reprodutivo**, quando, então, surgem novas espécies. Nos capítulos seguintes , esses tópicos serão abordados com maiores detalhes.

1. Introdução

A **teoria sintética da evolução** apóia-se na análise dos seguintes fatores evolutivos: **mutação , recombinação, seleção natural, migração e oscilação genética.**

2. Mutação gênica

As mutações gênicas originam-se de alterações na seqüência de bases nitrogenadas de um determinado gene, durante a duplicação da molécula de DNA. Essa alteração pode ser devida a **perda**, **adição** ou **substituição nucleotídeos** , originando um gene capaz de codificar outra proteína.

As mutações gênicas são consideradas as fontes primárias da variabilidade, pois aumentam o número de alelos disponíveis em um locus, condição que incrementa o conjunto gênico da população . Embora ocorram espontaneamente , podem , no entanto ser provocadas por agentes mutagênicos , como radiações e certas substâncias químicas (LSD, por exemplo).

As mutações ocorrem ao acaso, de modo que não é possível prever o gene a ser mutado nem relacionar a existência de mutação com a adaptabilidade às condições ambientais. **As mutações não ocorrem para adaptar o indivíduo ao ambiente** ; elas ocorrem ao acaso e, por seleção natural, São mantidas quando são adaptativas (seleção positiva) ou eliminadas no caso contrário (seleção negativa).

As mutações podem ocorrer em células somáticas ou em células germinativas sendo, neste último caso, de fundamental importância para a evolução , pois são transmitidas aos descendentes.

3. Recobinação genética.

Enquanto a mutação gênica é a fonte primária da variação genética, pois através dela é que são formados genes "novos" , a recombinação é um mecanismo que reorganiza os genes já existentes nos cromossomos.

O mecanismo primário de recombinação genética é a reprodução sexuada, que se realiza em duas fases consecutivas:

- gametogênese (formação de gametas);
- Fecundação (união do gameta masculino com feminino).

Durante a gametogênese , a célula germintiva diplóide sofre meiose, produzindo quatro gametas - células haplóides que contêm um cromossomo de cada par de homólogos. Como se sabe , os cromossomos segregam-se independentemente, o que possibilita grande número de **combinações** entre os cromossomos , dando origem a várias tipos de gametas. O número de tipos diferentes de gametas produzidos por um indivíduo diplóide é dado por 2n, onde n = lote haplóide de cromossomos.

Na espécie humana , em que n = 23 (23 pares de cromossomos), o número de gametas diferentes produzidos por um indivíduo é 223 =8388602, número válido tanto para o homem quanto para a mulher . O número de encontros possíveis entre esses gametas na fecundação é (8388602) 2, cujo valor aproximado é de 70 trilhões de zigotos possíveis . Dessa forma, a probabilidade de dois irmãos serem iguais é praticamente nula.

Todas as considerações feitas até agora não incluíram a ocorrência de crossing-over, que aumenta a variabilidade genotípica uma vez que estabelece novas combinações entre os genes e aumenta o número de tipos diferentes de gametas.

Formados os gametas pode ocorrer:

- Fecundação cruzada : união entre gametas de indivíduos diferentes, mas da mesma espécie:
- Autofecundação : união entre gametas masculinos e femininos produzidos pelo mesmo indivíduo.

Populações de indivíduos que apresentam fecundação cruzada têm maiores possibilidades de aumentar a variabilidade genética sem adição de **genes novos** (por mutação , por exemplo) do que populações de indivíduos com autofecundação.

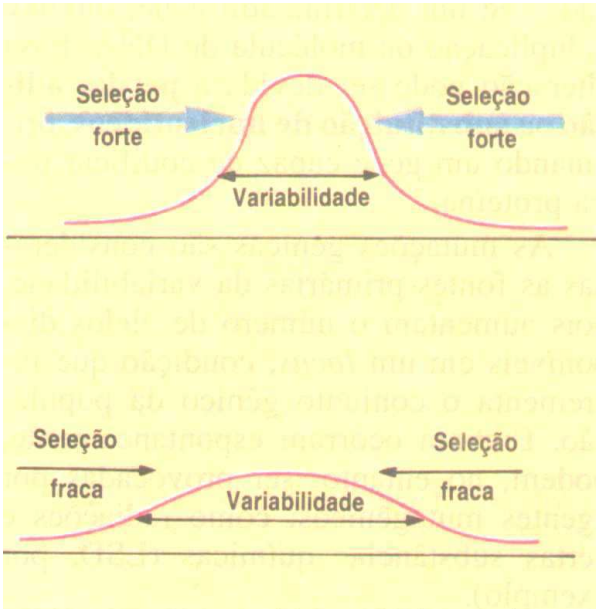
A variabilidade genética é importantes pra a sobrevivência da espécie. Nesse sentido , até bissexuados desenvolveram , ao longo de sua evolução , vários mecanismos que dificultam a autofecundação e favorecem a fecundação cruzada , possibilitando desse modo , aumento na variabilidade > Através da recombinação genética uma população pode aumentar sua variabilidade genética sem adição de genes novos, produzindo por mutação ou por imigração de indivíduos de outras populações.

4. Selecção natural

A selecção natural é o principal factor evolutivo que actua sobre a variabilidade genética da população. Pode-se dizer , simplificadamente, que a evolução é o resultado da actuação da selecção natural sobre a variabilidade genética de uma população.

A acção da selecção natural consiste em selecionar genótipos mais bem adaptados a uma determinada condição ecológica, eliminando aqueles desvantajosos para essa mesma condição. A expressão **mais bem adaptado** refere-se à maior probabilidade de, em um determinado ambiente, um determinado indivíduo deixar descendentes. Os indivíduos mais bem adaptados a um ambiente têm chance maior de sobreviver e de deixar descendentes.

A selecção natural tende, portanto, a diminuir a variabilidade genética. Desse modo, quanto mais intensa for a selecção natural sobre uma determinada população, menor será a sua variabilidade, pois apenas alguns genótipos serão seleccionados.



A selecção natural actua permanentemente sobre todas as populações . Mesmo em ambientes estáveis e constantes, a selecção natural, que age de modo **estabilizador**, está presente, eliminando os fenótipos desviantes. Vamos discutir agora alguns exemplos em que se verifica a ocorrência de selecção.

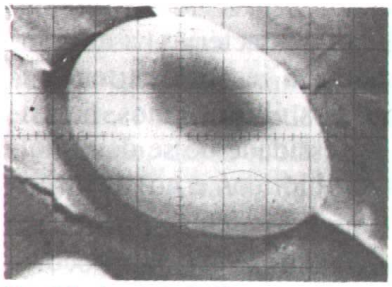
4.1 Melanismo industrial

O **Melanismo industrial** é um fenómeno observado em regiões altamente industrializadas. É caracterizado pelo aumento da frequência gênica de indivíduos com coloração escura; por isso o termo Melanismo. Um exemplo clássico de melanismo industrial é o da mariposa *Biston betularia*, em regiões industrializadas da Inglaterra.

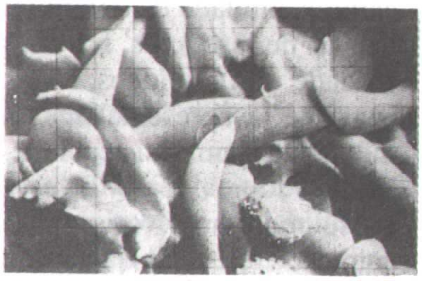
Antes do incremento da industrialização, a maioria das mariposas apresentava coloração esbranquiçada, sendo raras as de coloração escura. Os indivíduos dessa espécie têm o hábito de pousar sobre troncos de árvores que, em locais não poluídos, são cobertos por liquens, os quais dão ao tronco coloração clara. Nesses locais, ao pousar sobre os troncos cobertos por liquens, as mariposas claras não são tão visíveis quanto as mariposas escuras, que se tornam, assim, presas fáceis de seus predadores- os pássaros.

Mariposas sobre tronco coberto de líquen, em região não industrializada. A forma escura é facilmente visível, en-

Com o incremento da industrialização, a fumaça e a fuligem lançadas pelas fábricas provocam a morte dos liquens, deixando os troncos das árvores expostos. Dessa forma, o substrato utilizado pelas mariposas para pouso adquiriu coloração escura e, com isso, as mariposas claras tornaram-se mais visíveis que as escuras. Com o tempo, a forma escura começou a predominar sobre a clara, devido à actuação de selecção natural.



Hemácia de um indivíduo normal.



Hemácias falciformes.

Entre o gene para siclemia e o seu alelo que determina a síntese de hemoglobinas normais, não há relação de dominância.

Os indivíduos heterozigotos apresentam tanto hemácias e hemoglobinas normais como hemácias falciformes : apesar de ligeiramente anêmicos, sobrevivem, embora com menor viabilidade em relação aos homozigotos normais.

Em condições ambientais normais, o gene para anemia falciforme sofre forte efeito seletivo negativo, ocorrendo com freqüência baixa nas populações. Observaram-se, entretanto, altas freqüências desse gene em extensas regiões da África, onde há grande incidência de malária.

Essa alta freqüência deve-se ao fato de que os heterozigotos para anemia falciforme são mais resistentes à malária. Os "homozigotos normais" correm alto risco de morte por malária e os "homozigotos para a anomalia" morrem de anemia. O heterozigoto, entretanto, apresenta, sob essas condições ambientais, superioridade adaptativa, propiciando a alta taxa de um gene letal na população.

5. Migração

Migração corresponde à entrada ou saída de indivíduos denomina-se **imigração** e a saída, **emigração**.

Através dos processos imigratórios, há possibilidade de serem introduzidos genes novos em uma população. Assim, se indivíduos emigrarem de uma população para a outra da mesma espécie, poderão introduzir ali genes novos e contribuir para o aumento da variabilidade genotípica da população para a qual imigraram.

Através das migrações é estabelecido um fluxo gênico, que tende a diminuir as diferenças genéticas entre as populações de uma mesma espécie.

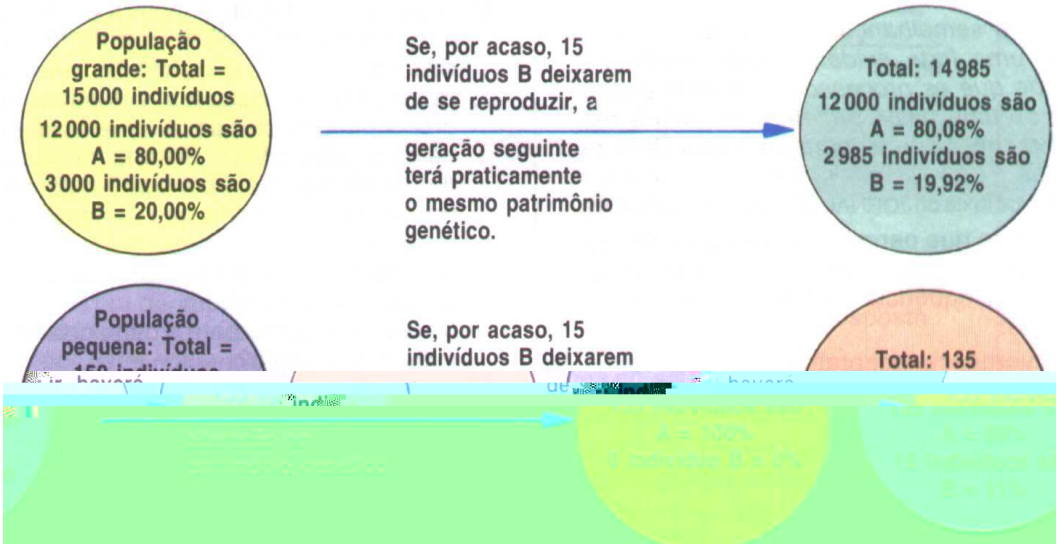
6. Oscilação genética ou deriva genética

Este processo ocorre apenas em populações pequenas. Nestas, qualquer alteração **ao acaso** pode produzir alterações na freqüência genotípica, o que não ocorre em populações grandes. Assim, os

desvios estatísticos adquirem importância especial quando se verificam em populações pequenas, pois podem até mesmo eliminar determinados genótipos.

Um caso particular de oscilação genética é o **princípio do fundador**, que se refere ao estabelecimento de uma nova população a partir de poucos indivíduos que emigram da população original. Esse indivíduos serão portadores de pequena fracção da variação genética da população de origem e seus descendentes apresentarão apenas essa variabilidade, até que genes novos ocorram por mutação. O princípio do fundador determinar, assim, uniformemente genética e fenotípica. Além disso, essa pequena população sofrerá os efeitos dos vários factores evolutivos já discutidos, podendo originar indivíduos diferentemente adaptados.

O estabelecimento de populações pelo princípio do fundador parece ser um dos métodos mais comuns de dispersão de inúmeras espécies de animais e de plantas.



Surg. de novas espécies

1. Introdução

Nos capítulos anteriores, foram estudados os fatores evolutivos que promovem a variabilidade genética e os que atuam sobre a variabilidade já estabelecida .Foi visto. Também que se pode considerar natural atuando sobre a variabilidade genética. Assim populações de uma mesma espécie podem desenvolver características novas em função de alterações na relação organismo – ambiente . Neste capítulo , discutiremos como a interação de todos esses fatores pode originar espécies novas.

2. A origem das espécies.

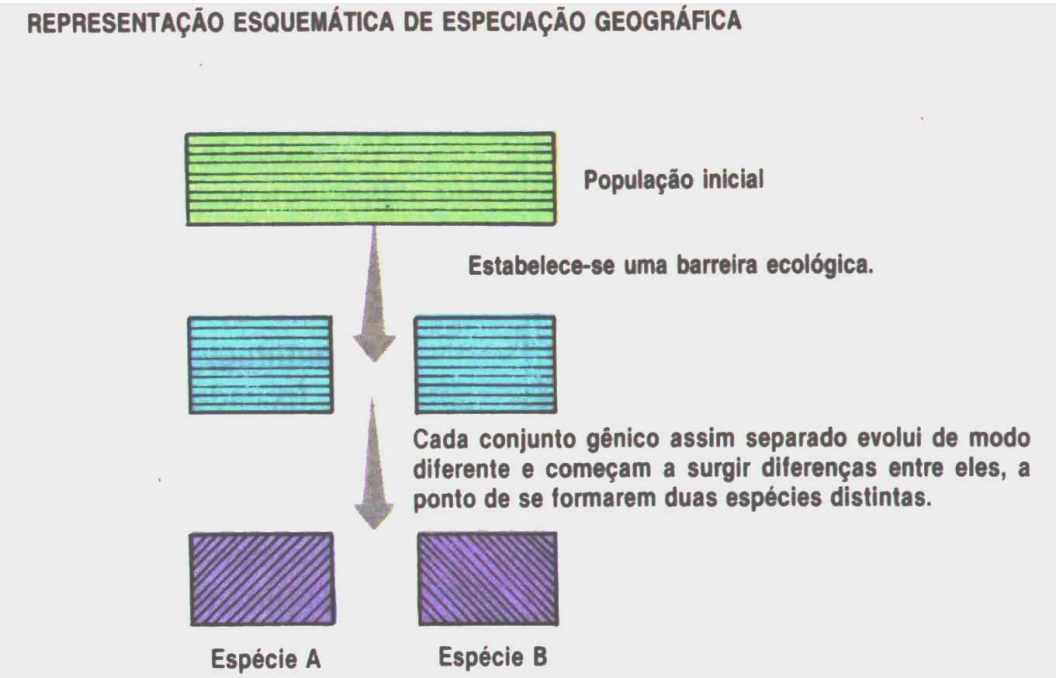
Mecanismos de especiação são aqueles que determinam a formação de espécies novas. O mecanismo de especiação mais conhecido é o da **especiação geográfica.**

Este mecanismo pode de ser simplificadamente explicado, tomando-se como exemplo uma população com conjunto genético grande, que vive em determinada área geográfica em um dado momento.

Suponhamos que o ambiente onde essa população ocorre sofra alterações bruscas, tais como modificações climáticas ou eventos geológicos (terramotos, formações de montanhas etc.). Essas alterações podem determinar o surgimento de faixas de território em que a existência dos indivíduos da população torna-se impossível. Quando essas faixas desfavoráveis separam áreas que ainda reúnem condições favoráveis à sobrevivência dos indivíduos que formavam a população inicial elas são denominadas **barreiras ecológicas** ou **barreiras geográficas** .

As barreiras ecológicas impedem a troca de genes entre os indivíduos das populações por elas separadas, fazendo com que variabilidades genéticas novas surgidas em uma população , não sejam transmitidas para outra. Além disso , as condições do ambiente , nas áreas separadas pela barreira, dificilmente são exactamente as mesmas , o que determina diferente pressões seletivas. Então as populações assim separadas vão acumulando ao longo do tempo, podendo chegar a desenvolver mecanismos de isolamento reprodutivo. Quando isto ocorre , considera-se que essas populações pertencem a espécies distintas.

As **espécies** são portanto, como já vimos, populações de indivíduos potencialmente intercruzantes e reprodutivamente isolados de outras populações.



3. Os mecanismos de isolamento reprodutivo.

O desenvolvimento de mecanismos que determinam o isolamento reprodutivo é fundamental para a origem das espécies. Populações reprodutivamente isoladas de outras passarão a Ter história evolutiva própria e independente de outras populações . Não havendo troca de genes com populações de outras espécies , todos os fatores evolutivos que atuam sobre populações de uma espécie terão uma resposta própria . Dessa forma, o isolamento reprodutivo explica não a penas a origem das espécies , nas também a enorme diversidade do mundo biológico.

É importante esclarecer que os mecanismos de isolamento reprodutivo não se referem **apenas** á esterilidade , pois isolamento reprodutivo **não é** sinônimo de esterilidade. Duas espécies podem estar reprodutivamente isoladas devido a fatores etológicos ou ecológicos que impendem o fluxo gênico, e não devido á esterilidade.

Um exemplo pode ser dado por duas espécies de patos de água doce, *Anas platyrhinchos* e Anas acuta, as quais , apesar de nidificarem lado a lado , não trocam genes , pois respondem a estímulos sensoriais diferentes . A cópulas entre machos e fêmeas de uma espécie é desencadeada por certos estímulos sensoriais que não têm efeito sobre machos e fêmeas da outra espécie . Com isso , é muito raro haver cópula entre indivíduos das duas espécies.No entanto , se essas duas espécies forem criadas em cativeiro, elas poderão se reproduzir, originando descendentes férteis .Neste caso, não é a **esterilidade** o fator de isolamento reprodutivo e sim o fator etológico (compartamental).

Os mecanismos de isoloamento reprodutivo podem ser classificados do seguinte modo:

Os mecanismos pré-copulatórios : impedem a cópula.
– **Isolamento estacional** : diferenças nas épocas reprodutivas.
– **Isolamento de hábitat ou ecológico:** ocupação diferencial de hábitats.
– **Isolamento etológico:** o termo **etológico** refere-se a padrões de comportamento. Para os animais, este é o principal mecanismo pré-copulatório. Neste grupo estão incluídos os mecanismos de isolamento devidos à incompatibilidade de comportamento baseado na produção e recepção de estímulos que levam machos e fêmeas à cópula. Esses estímulos são específicos para cada espécie. Dois exemplos desse tipo de incompatibilidade comportamental levando ao isolamento reprodutivo são os sinais luminosos, emitidos por vaga-lumes machos, que apresentam variação dependendo da espécie. Eses sinais variam na freqüência, na duração da emisão e na cor (desde braco, azulado, esverdeado, amarelo, laranja até vermelho). A fêmea só responde ao sinal emitido

pelo macho de sua própria espécie. O outro exemplo é o canto das aves: as fêmeas são atraídas para o território dos machos de sua espécie em função do canto, que é específico.
– **Isolamento mecânico:** diferenças nos órgãos reprodutores, impedindo a cópula.

- **Mecanismos pós-copulatórios:** Mesmo que a cópula ocorra, estes mecanismos impedem ou reduzem seu sucesso.
– **Mortalidade gamética:** fenômenos fisiológicos que impedem a sobrevivência de gametas masculinos de uma espécie no sistema reprodutor feminino de outra espécie.
– **Mortalidade do zigoto:** se ocorrer a fecundação entre gametas de espécies diferentes, o zogoto poderá ser pouco viável, morrendo devido ao desenvolvimento embrionário irregular.
– **Inviabilidade do híbrido :** indivíduos resultantes do cruzamento entre indivíduos de duas espécies são chamados híbridos interespecíficos. Embora possam ser férteis, são inviáveis devido à menor eficiência para a reprodução.
– **Esterilidade do híbrido :** a esterilidade do híbrido pode ocorrer devido à presença de gônadas anormais ou a problemas de meiose anômala.

O isolamento reprodutivo total entre duas espécies deve-se, em geral, a vários fatores, dentre os quais um pode ser mais efetivo do que os outros.

Genética de populações

1. Introdução

O conhecimento da composição genética de populações é importante para o estudo da evolução. Pode-se conhecer a composição genética de uma população calculando as freqüências de genes e de genótipos que a compõem. Vamos aprender, então, a calcular essas freqüências e como elas podem ser empregadas nos estudos sobre evolução.

2. Freqüências gênicas e genotípicas.

A determinação da freqüência gênica e da freqüência genotípica de uma população pode ser exemplificada em uma população com as seguintes características:

Genótipo	N° de indivíduos
AA	3600
Aa	6000
aa	2400
Total	12000

A freqüência dos genes **A** ou **a**, nessa população, pode ser calculada do seguinte modo:

$$\text{Frequência de um gene} = \frac{\text{n°. total desse gene}}{\text{n°. total de genes para esse } \textit{locus}}$$

A frequência do gene **A** é :

3600 indivíduos **AA** -> n° de genes **A** = 7200

6000 indivíduos **Aa** -> n° de genes **A** = 6000

Total de genes **A** = 13200

O número total de genes na população para esse locus é 24000, pois, se o número de indivíduos apresenta dois alelos para o locus em questão.

$$f(A) = \frac{\text{n° total de genes } \mathbf{A}}{\text{n° total de genes 24000 para esse locus}} = \frac{13200}{24000} = 0,55$$

f(A) = 55% ou f(A) = 0,55

Para calcular a frequência de a, pode-se proceder do mesmo modo ou, então, utilizar a fórmula que estabelece a relação entre genes alelos:

$$f(A) + f(a) = 1$$

f(a) = 1 - 0,55

f(a) = 0,45

f(a) = 45%

Nessa população, as frequências dos genes A e a são, portanto, respectivamente:

$$f(A) = 55\% \ ; \ f(a) = 45\%$$

A **frequência genotípica**, neste caso, pode ser calculada do seguinte modo:

$$\text{Frequência genotípica} = \frac{\text{n° de indivíduos com um determinado genótipo}}{\text{n° de indivíduos da população}}$$

As frequências dos genótipo AA, Aa e aa nessa população são, respectivamente:

$$AA = \frac{3600}{12000} = 0,30$$

$$Aa = \frac{6000}{12000} = 0,50$$

$$aa = \frac{2400}{12000} = 0,20$$

No exemplo dado, o número de indivíduos e a distribuição dos genótipos quanto a um determinado par de alelos são conhecidos. A partir dessa população, ou de qualquer outra, pode-se estimar a frequência genética e genotípica da **geração seguinte**, com base no teorema e na fórmula de Hardy-Weimberg, cuja utilização apresenta certas restrições, como será apresentado no próximo item.

3. O teorema de Hardy-Weimberg

Este teorema, formulado em 1908 pelos cientistas **Hardy** e **Weimberg**, tem o seguinte enunciado:

> ***Em uma população infinitamente grande, em que os cruzamentos ocorrem ao acaso e sobre o qual não há atuação de fatores evolutivos, as freqüências gênicas e genotípicas permanecem constantes ao longo das gerações.***

Este teorema, então, só é válido para populações:

- Infinitamente grandes;
- Com cruzamentos ao acaso;
- Isentas de fatores evolutivos, tais como, mutação, seleção natural e migrações.

Uma população assim caracterizada encontra-se em **equilíbrio genético**. Na natureza, entretanto, não existem populações sujeitas rigorosamente a essas condições.

A importância do teorema de Hardy-Weimberg para as populações naturais está no fato de ele estabelecer um modelo para o comportamento dos genes. Desse modo, é possível estimar freqüências gênicas e genotípicas ao longo das gerações e compara-las comas obtidas na prática. Se os valores observados são significativamente diferentes dos valores esperados, pode-se concluir que fatores evolutivos estão atuando sobre essa população e que ela está evoluindo. Se os valores não diferem significativamente, pode-se concluir que a população estão equilíbrio e que, portanto, não está evoluindo.

Para demonstrar esse teorema, vamos supor uma população com as características por ele pressupostas. Nessa população, chamaremos de p a freqüência de gametas portadores do gene A e de q a freqüência de gametas portadores do gene a.

Os genótipos possíveis são AA, Aa e aa e as freqüências genotípicas em cada geração serão:

- AA: a probabilidade de um óvulo portador do gene A ser fecundado por um espermatozóide portador do gene A é:

$$p \times p^2$$

- Aa: a probabilidade de um óvulo portador do gene a ser fecundado por um espermatozóide portador do gene a é:

$$q \times q = q^2$$

- Aa: a probabilidade de um óvulo portador do gene A ser fecundado por um espermatozóide portador do gene a é:

$$p \times q = pq$$

- Aa: a probabilidade de um óvulo portador do gene a ser fecundado por um espermatozóide portador do gene A é:

$$q \times p = qp$$

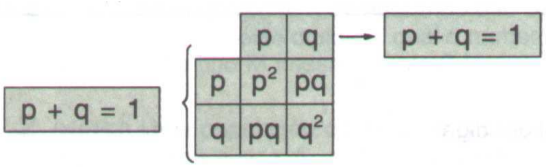
Essa relação pode ser representada do seguinte modo:

AA	2Aa	aa
p^2	$2pq$	q^2

Hardy e Weimberg compreenderam que esse resultado nada mais era do que o desenvolvimento do binômio (A+B) elevado à Segunda potência, aprendido em álgebra elementar:

$$(a+b)^2 = A^2 + 2ab = b^2$$

Chamando de p a freqüência de um gene e de q a freqüência de seu alelo e sabendo-se que p+Q =1, obtem-se a fórmula de Hardy-Weimberg:



$(p + q)^2 = 1$ ou $p^2 + 2pq + q^2 = 1$

Como:

$$p + q = 1$$
$$q = 1 - p$$

a fórmula de Hardy-Weimberg pode ser escrita dos seguintes modos:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

OU

$$p^2 + 2p(1-p) + (1-p)^2 = 1$$

4. Exemplos de aplicação da fórmula de Hardy-Weimberg

EXEMPLO 1

Para exemplificar numericamente este teorema, vamos supor uma população com as seguintes freqüências gênicas:

*p= freqüência do gene **B** = 0,9*

*q= freqüência do gene **b** = 0,1*

Pode-se estimar a freqüência genotípica dos descendentes utilizando a fórmula de Hardy- Weimberg:

$$(p + q)^2 = p^2 + 2pq + q^2 =$$
$$= (0,9)^2 + 2(0,9) \cdot (0,1) + (0,1)^2 =$$
$$= 0,81 + 0,18 + 0,01$$

81% BB 18% Bb 1% bb

Freqüência genotípica

Se a população estiver em equilíbrio, a freqüência será sempre mantida constante ao longo das gerações. Se, no entanto, verificarmos que os valores obtidos na prática são significativamente diferentes desses esperados pela fórmula de Hardy-Weimberg, a população não se encontra em

equilíbrio genético e , portanto, está evoluindo.
A freqüência de cada gene também não sofrerá alteração ao longo das gerações, se essa população estiver em equilíbrio genético.

EXEMPLO 2

A fórmula de Hardy-Weimberg pode ser utilizada para estimar a freqüência de determinado par de alelos em uma população em equilíbrio, conhecendo-se o aspecto fenotípico. Supondo que, em uma população teórica em equilíbrio, 16% dos indivíduos são míopes e o restante tem visão normal, qual a freqüência de genes recessivos e dominantes para esse caráter nessa população, sabendo-se que a miopia é derteminada por gene recessivo?

Pela fórmula de Hardy-Weimberg:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

onde:

p = freqüência do gene **M**
q = freqüência do gene **m**
$q^2 = 16\% = 0{,}16$
$q = \sqrt{0{,}16} = 0{,}4$

$q = 0{,}4$

Como:

$p + q = 1$
$p = 1 - q$
$p = 1 - 0{,}4$

$p = 0{,}6$

A freqüência do gene **m** é 0,4 e a do gene **M** é 0,6.

Sabendo disto, podemos estimar a freqüência genotípica do seguinte modo:

$$p^2 + 2pq + q^2$$
$$(0{,}6)^2 + 2 \cdot (0{,}6) \cdot (0{,}4) + (0{,}4)^2$$

Logo, a freqüência genotípica é:

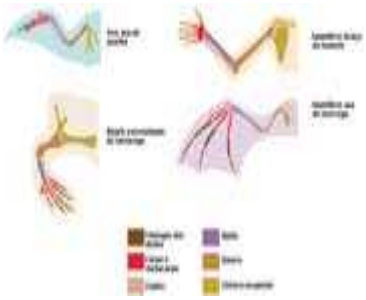
MM	=	0,36	=	36%
Mm	=	0,48	=	48%
mm = 0,16 = 16%				

Resumo

3. As revelações da estrutura óssea

O estudo comparativo da estrutura anatômica de seres vivos diferentes também ajuda a entender os mecanismos da evolução. O fato de os membros anteriores de um homem, de uma rã ou de um delfim (mamífero aquático) terem a mesma estrutura óssea, ainda que utilizada de maneiras variadas, é indício de uma ancestralidade comum.

4. A adaptação dos órgãos

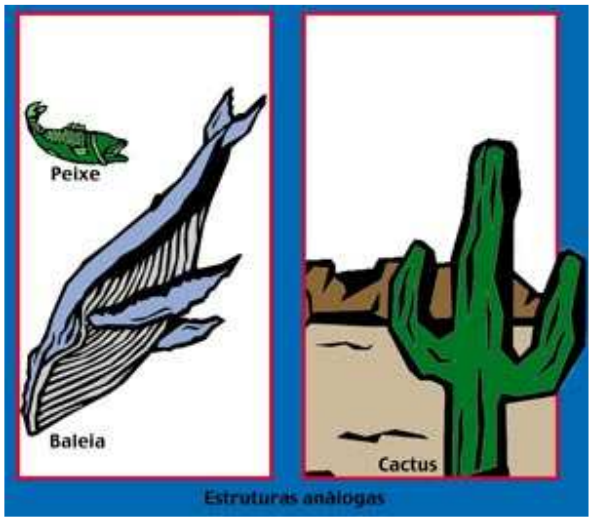


De mesma origem, os órgãos homólogos podem eventualmente desempenhar funções diferentes. A avaliação das funções da pata de um cavalo e da asa de um morcego, por exemplo, serve para exemplificar o conceito de irradiação adaptativa.

O conceito de irradiação adaptativa define que organismos com parentesco evolutivo, mas que vivem em regiões diferentes, acabaram sofrendo uma adaptação dos órgãos ao ambiente onde vivem.

De origem diferente, os órgãos análogos exercem a mesma função e ilustram o fenômeno da convergência adaptativa. Nestes casos, mesmo vivendo em ambientes iguais, as pressões da seleção natural são muito semelhantes e acabam por selecionar estruturas adaptadas ao ambiente. Desse modo, mesmo que tenham origens distintas, as estruturas acabam se tornando parecidas, a exemplo das asas de um inseto e asas de uma ave.

As formas anatômicas das baleias e peixes (animais de classes diferenciadas) e suas nadadeiras facilitam o deslocamento na água.



Plantas de famílias diferentes adaptadas às regiões secas, possuem características semelhantes.

5. Animais com parentesco, embriões parecidos Mais um argumento a favor da existência de antepassados comuns: a semelhança entre as primeiras etapas do desenvolvimento embrionário de muitas espécies. Estas semelhanças, porém, não são observadas nos animais adultos. As fendas branquiais dos peixes, por exemplo, existem também nos girinos, mas não nas rãs adultas.

As fendas branquiais ocorrem em diferentes estágios embrionários nos anfíbios, répteis, aves e mamíferos. Representam outro indício de ancestralidade comum. É como se todos os vertebrados tivessem passado por uma fase "de peixe" em seu desenvolvimento embrionário.

6. A evolução segundo Lamarck

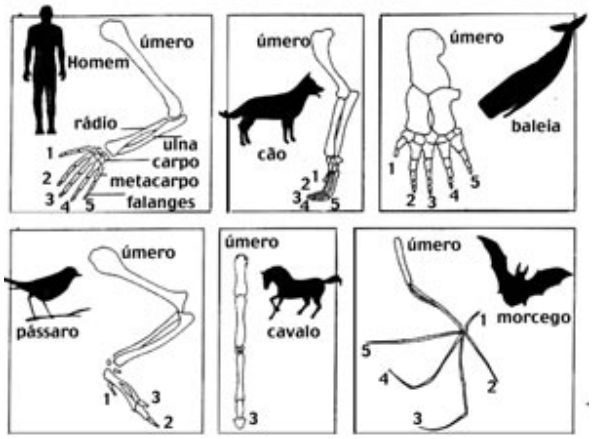
No século XIX, o francês Jean Baptiste de Lamarck desenvolveu uma teoria da evolução. Ele estabeleceu que as influências do meio ambiente são responsáveis por mudanças nos organismos e estas são herdadas por seus descendentes. De acordo com Lamarck, o pescoço da girafa cresceu pois esse animal costumava esticá-lo constantemente para alcançar o alimento. Em conseqüência disso, seus filhos nasceram com o pescoço mais comprido.

A teoria de Lamarck explica o crescimento do pescoço da girafa

Lamarck teve méritos em destacar o transformismo, mas estava equivocado na interpretação da transmissão de dados adquiridos por falta de metodologia adequada na época. Hoje, sabe-se que os caracteres adquiridos não são transmitidos aos descendentes.

7. A seleção natural de Darwin

Depois de Lamarck, o inglês Charles Darwin enunciou a sua teoria sobre a evolução, exposta no livro *A origem das espécies*. Segundo Darwin, os indivíduos de uma mesma espécie não são iguais, mas apresentam pequenas variações de suas características (como o formato do bico ou o comprimento da cauda).



Para lembrar:

O resultado da luta pela vida entre indivíduos de uma mesma espécie é a sobrevivência daqueles que possuem variações mais vantajosas. É o que se conhece como seleção natural dos indivíduos com características mais bem adaptadas.

8. A teoria da evolução hoje

Embora a teoria da seleção natural de Darwin esteja correta em linhas gerais, os cientistas logo se perguntaram qual era a causa da variação das espécies. O neodarwinismo respondeu a esta pergunta salientando que a causa da variação genética das populações ocorre por dois fatores fundamentais: o aparecimento de fenômenos aleatórios como as mutações (mudanças no material genético) e a recombinação genética (intercâmbio de genes entre os cromossomos na formação das células sexuais).

Para lembrar:

A seleção natural escolhe os indivíduos com variações mais favoráveis e permite que tenham uma descendência maior.

9. A formação das novas espécies

Tanto a mutação como a seleção natural explicam o processo de evolução dos seres vivos.

Os cientistas acreditam que a maioria da espécies surgiu depois de cumprir pelo menos três etapas: isolamento geográfico, diversificação gênica e isolamento reprodutivo. A partir daí, essas subpopulações são consideradas espécies distintas.

- Isolamento geográfico — a separação física de subpopulações de uma espécie. As barreiras que isolam as subpopulações podem ser o rio que corta uma planície, um vale que divida dois planaltos ou um braço de mar que separe ilhas e continentes.
- Diversificação gênica — a progressiva diferenciação do conjunto gênico de subpopulações isoladas. A diversificação gênica é provocada por dois fatores: pelas mutações, que introduzem alelos diferentes em cada uma das subpopulações isoladas e pela seleção natural, que pode preservar conjuntos de genes em uma das subpopulações e eliminar conjuntos similares em outra que vive em ambiente diverso.
- Isolamento reprodutivo — resulta da incapacidade, total ou parcial, de membros de duas subpopulações se cruzarem, produzindo descendência fértil. Em geral, depois de um longo período de isolamento geográfico, as subpopulações se diferenciam tanto que perdem a capacidade de cruzamento entre si, tornando-se reprodutivamente isoladas.

Glossário:

Características adquiridas: adaptações geradas em um organismo por seleção ambiental.

Fendas branquiais: câmara nas brânquias por onde a água circula.

- **Levedura:** fungos unicelulares de grande importância industrial, como o levedo da cerveja.
- **Mofo:** fungos que se alimentam de substâncias em decomposição, como o mofo do pão, dando-lhes um aspecto escuro.
- **Trilobitas:** organismos fósseis com três lóbulos que viviam no fundo do mar.