

## Diversidade dos Seres Vivos







Fundação

**CECIERJ**

Consórcio **cederj**

Centro de Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro

## Diversidade dos Seres Vivos

Volume 1 - Módulo 1  
3ª edição

Claudia A. M. Russo

Leandro O. Salles

Paulo Brito



**GOVERNO DO  
Rio de Janeiro**

**SECRETARIA DE  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

Ministério  
da Educação



Apoio:



# Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Rua Visconde de Niterói, 1364 – Mangueira – Rio de Janeiro, RJ – CEP 20943-001

Tel.: (21) 2299-4565 Fax: (21) 2568-0725

## Presidente

Masako Oya Masuda

## Vice-presidente

Mirian Crapez

## Coordenação do Curso de Biologia

UENF - Milton Kanashiro

UFRJ - Ricardo Iglesias Rios

UERJ - Cíbele Schwanke

## Material Didático

### ELABORAÇÃO DE CONTEÚDO

Claudia A. M. Russo

Leandro O. Salles

Paulo Brito

### COORDENAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL

Cristine Costa Barreto

### DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL E REVISÃO

Alexandre Rodrigues Alves

Nilce P. Rangel Del Rio

### COORDENAÇÃO DE LINGUAGEM

Maria Angélica Alves

### REVISÃO TÉCNICA

Marta Abdala

## Departamento de Produção

### EDITORA

Tereza Queiroz

### COORDENAÇÃO EDITORIAL

Jane Castellani

### REVISÃO TIPOGRÁFICA

Jane Castellani

Sandra Valéria F. de Oliveira

### COORDENAÇÃO DE PRODUÇÃO

Jorge Moura

### PROGRAMAÇÃO VISUAL

Bruno Gomes

Fabiana Rocha

Reinaldo Lee

### ILUSTRAÇÃO

Bruno Gomes

Reinaldo Lee

### CAPA

Reinaldo Lee

Eduardo Bordoni

### PRODUÇÃO GRÁFICA

Andréa Dias Fiães

Fábio Rapello Alencar

Copyright © 2005, Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da Fundação.

R969d

Russo, Claudia A. M.

Diversidade dos Seres Vivos / Claudia A. M. Russo. – 3.ed.  
– Rio de Janeiro : Fundação CECIERJ, 2008.

155p.; 19 x 26,5 cm.

ISBN: 85-89200-60-4

1. Biodiversidade. 2. Evolução. 3. Seleção natural.  
4. Taxonomia. I. Salles, Leandro. II. Brito, Paulo. III. Título.

CDD: 333.95

2008/2

Referências Bibliográficas e catalogação na fonte, de acordo com as normas da ABNT.

# Governo do Estado do Rio de Janeiro

**Governador**  
Sérgio Cabral Filho

**Secretário de Estado de Ciência e Tecnologia**  
Alexandre Cardoso

## Universidades Consorciadas

**UENF - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO  
NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**  
Reitor: Almy Junior Cordeiro de Carvalho

**UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO  
RIO DE JANEIRO**  
Reitor: Ricardo Vieiraves

**UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**  
Reitor: Roberto de Souza Salles

**UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO**  
Reitor: Aloísio Teixeira

**UFRRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL  
DO RIO DE JANEIRO**  
Reitor: Ricardo Motta Miranda

**UNIRIO - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO  
DO RIO DE JANEIRO**  
Reitora: Malvina Tania Tuttman



## SUMÁRIO

<b>Aula 1</b> – Biodiversidade e a ordem natural	<b>7</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 2</b> – História do pensamento evolutivo	<b>19</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 3</b> – Filogenia	<b>33</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 4</b> – Taxonomia	<b>49</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 5</b> – Seleção natural	<b>63</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 6</b> – Introdução às macromoléculas	<b>77</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 7</b> – Origem das macromoléculas	<b>89</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 8</b> – Origem da vida	<b>103</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 9</b> – Primeiros organismos	<b>113</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 10</b> – Diversidade de procariontes	<b>125</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 11</b> – Diversidade de bactérias	<b>135</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	
<b>Aula 12</b> – Origem da célula eucarionte	<b>147</b>
<i>Claudia A. M. Russo</i>	





# Biodiversidade e a ordem natural

AULA

1

## objetivo

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Familiarizar-se com o conceito de biodiversidade.
- Compreender os conceitos de herdabilidade, replicação, mutação, seleção natural e verificar como esses conceitos estão associados às propriedades intrínsecas de sistemas biológicos.

## BIODIVERSIDADE E O COTIDIANO

### BIODIVERSIDADE

Segundo o dicionário Aurélio, biodiversidade é a existência, numa dada região, de uma grande variedade de espécies, ou de outras categorias taxonômicas.

Nosso curso trata da diversidade dos seres vivos também conhecida popularmente como **BIODIVERSIDADE**. Hoje em dia, você pode encontrar essa palavra freqüentemente em manchetes de jornais e revistas. A diversidade dos seres vivos diz respeito ao estudo desses seres e das características que os tornam diferentes uns dos outros.

Vamos iniciar este curso abordando diretamente sua questão central — o que é biodiversidade? Apesar de estar em evidência há pelo menos uma década nas mais diferentes formas de mídia de acesso popular, o grande público freqüentemente possui uma visão superficial dos significados do termo biodiversidade. Você já deve ter tido contato com chamadas jornalísticas do tipo: “este vazamento de óleo é uma ameaça à biodiversidade do rio”, “fogo destrói as florestas atlânticas deste Parque Nacional, que apresenta uma das maiores concentrações de biodiversidade do Brasil” ou, ainda, “dadas as dimensões crescentes de impacto, é absolutamente emergencial estabelecer estratégias de conservação para a biodiversidade da Amazônia”.

Mas, o que é exatamente biodiversidade — foco de tamanha preocupação das sociedades contemporâneas?

Inicialmente, repare que as escalas de aplicação desse termo podem variar bastante, como por exemplo: quando se fala nos aspectos da biodiversidade do Parque Nacional da Floresta da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro, biodiversidade das florestas atlânticas, biodiversidade do continente sul-americano ou mesmo biodiversidade de nosso planeta.

Veja que além de esse termo ser aplicável para escalas geográficas e ecológicas completamente distintas, ele também pode referir-se a dimensões temporais — geológicas — igualmente diferentes. Dessa forma, a biodiversidade deve sempre referir a um determinado local e um intervalo de tempo específicos. Por exemplo, “dados relativos à biodiversidade do **PERÍODO QUATERNÁRIO** da história geobiológica do planeta são de especial importância para a compreensão de fenômenos macroclimáticos atuais, como o El Niño”. Se considerarmos que a vida no planeta Terra tem pelo menos 3,5 bilhões de anos, podemos nos referir a qualquer intervalo de tempo, dentro desse período de acordo com a problemática de interesse.

### PERÍODO

#### QUATERNÁRIO

A história da vida na Terra é dividida em períodos. Os últimos 2,5 milhões de anos são denominados geologicamente o Período Quaternário. Você vai saber mais sobre esses períodos na Aula 15 deste curso.

Concluímos, portanto, que a complexidade do uso do termo biodiversidade depende da especificação dos parâmetros relativos à dimensão espacial (i.e., ao local) e temporal (i.e., a época) em questão.

## Definições de biodiversidade

Antes de dar continuidade a esta leitura, faça uma auto-avaliação expondo no papel o que você entende por biodiversidade.

Decompondo essa palavra, você aprende que o radical **BIO** especifica o significado da diversidade, determinando a interpretação do termo como diversidade biológica ou, ainda, diversidade dos seres vivos. Note que o título deste curso é exatamente “Diversidade dos Seres Vivos”. Se você consultar um dicionário para conhecer o termo diversidade, você vai encontrar definições que juntam o conceito de entidades com suas quantidades relativas num determinado ambiente ou num determinado espaço de tempo. As entidades podem estar associadas em agrupamentos, desde que exista algum tipo de relação entre elas.

Neste ponto, um exemplo do nosso cotidiano pode ajudá-lo a compreender melhor o significado de diversidade e a perceber como podemos aplicá-lo a qualquer tipo de objeto. Por exemplo, num determinado estojo existem 20 objetos que servem para escrever. Cada um deles pode ser classificado em três grupos distintos: canetas, lápis ou lapiseiras. Assim, podemos dizer que a diversidade do estojo representa o número de grupos (três) e a quantidade relativa de objetos presentes nesses três grupos (quatro canetas, três lápis e duas lapiseiras).

### **Bio**

Radical grego que significa vida.

Ex.: biologia, que significa o estudo dos seres vivos.

Note que esses grupamentos primários podem ser ainda subdivididos, ou seja, podemos agrupar os objetos em subgrupos tais como canetas esferográficas ou pilot, lápis HB ou 2B, e lapiseiras 0,5mm ou 0,7mm. O agrupamento pode ser ainda mais específico, como canetas esferográficas nas cores preta, vermelha ou azul. Finalmente, a diversidade de objetos para escrever no estojo advém da variabilidade dos objetos em si e da quantidade relativa em cada um dos diferentes grupos e subgrupos.

Voltando ao nosso curso, ou seja, à biodiversidade, as entidades são os seres vivos. Assim, o termo biodiversidade trata dos seres vivos que estão presentes num determinado ambiente em um momento específico. Os seres vivos podem ser colocados em grupos distintos. Por exemplo, lembremos que a palavra mamífero designa um grupo específico de seres vivos que possuem **GLÂNDULAS MAMÁRIAS**, assim como caneta esferográfica designa um grupo de objetos para escrever com tinta. Esse grupamento mamífero também pode ser subdividido em subgrupos. Roedores (i.e., ratos, camundongos), primatas (i.e., macacos) e quirópteros (i.e., morcegos) são subgrupos componentes do grupo maior dos mamíferos. Quando estamos descrevendo a diversidade dos seres vivos, a questão central está justamente no reconhecimento dos agrupamentos “naturais”, ou seja, naqueles que possuem sentido biológico real. Esse tipo de agrupamento nos leva a conhecer as entidades de uma forma mais eficaz (você irá aprender mais sobre a classificação dos organismos em agrupamentos naturais nas Aulas 3 e 4).

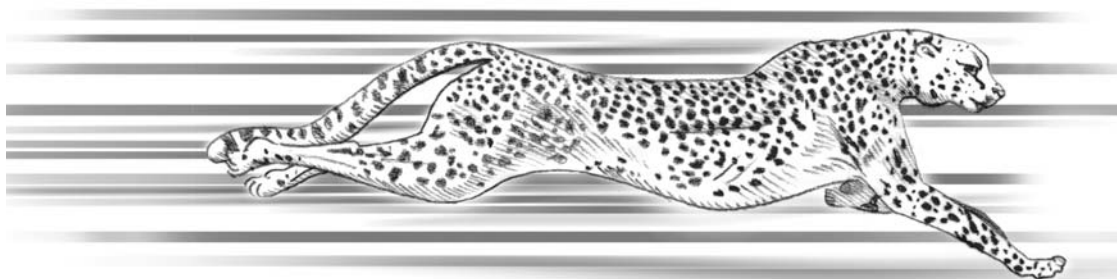
#### **GLÂNDULAS MAMÁRIAS**

São as glândulas que produzem leite materno que alimentam os filhotes recém-nascidos. Nos seres humanos, que também são mamíferos, essas glândulas estão presentes no seio materno.

Mas você pode estar se perguntando por que a classificação é importante. Para ilustrar essa importância, imagine ter ouvido seu amigo, Leonardo, falar que num safári fotográfico na África ele viu um guepardo. Mas o que vem a ser um guepardo? — pergunta você. Um guepardo — diz seu amigo — é um mamífero. Ao ouvi-lo pronunciar “mamífero”, você já elimina uma boa parte da diversidade biológica. Ou seja, um guepardo não é um fungo, nem uma planta, nem um protista, nem um peixe, nem um inseto.

Ele não pertence a nenhum desses outros grupos. Mais importante do que isso, você imediatamente descobre informações novas sobre ele, simplesmente pelo fato de você saber que ele é mamífero. Todos os mamíferos possuem pêlos recobrindo seu corpo e glândulas mamárias que alimentam seus filhotes recém-nascidos. Assim, você já sabe que o guepardo também possui essas características. Você está percebendo a importância de agrupar espécies? Mas então, o que vem a ser um guepardo? Seu amigo vai lhe dando mais informações: ele é felino, muito parecido com o leopardo — diz.

Note que, com informações referentes a grupos que ele pertence, você consegue ter uma idéia do que é um guepardo, mesmo sem conhecê-lo. Finalmente, na **Figura 1.1**, você pode observar um guepardo e, portanto, conhecê-lo formalmente.



**Figura 1.1:** Um guepardo. Esses animais estão entre os mais velozes mamíferos do planeta, podendo atingir 95 km/hora em corridas curtas.

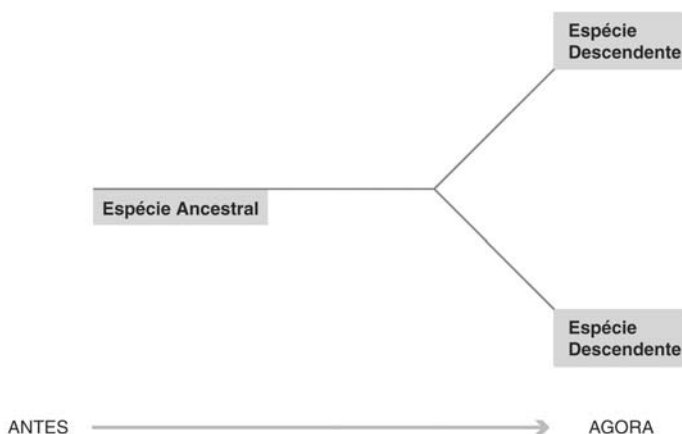
Com esse exemplo, você deve ter percebido que a divisão em grupos de diversidade, inclusive a biológica, é fundamental. Se não fossem colocadas em grupos, você precisaria de uma descrição imensa para cada organismo a que você fosse se referir para conseguir se comunicar sobre a diversidade biológica. Lembre-se de que existem hoje mais de 2 milhões de espécies já descritas e a separação dessas espécies em grupos é muito importante para facilitar a comunicação entre cientistas e o público em geral.

## Sistemas biológicos

### SISTEMAS BIOLÓGICOS

Sistemas são conjuntos de partes integradas de alguma forma. Todo sistema tem uma dinâmica própria. Um sistema biológico é um conjunto de partes que, entre outras propriedades descritas no texto, contém informações sobre a estrutura e auto-replicação do próprio sistema.

Todos os seres vivos podem ser interpretados como sistemas biológicos. Existem, de fato, algumas particularidades dos **SISTEMAS BIOLÓGICOS** quando comparados com outros tipos de sistemas físicos ou químicos. Nesta aula, vamos resumir alguns dos aspectos de importância. Os sistemas biológicos diferem dos demais pela capacidade de **auto-replicação**. (Veja isso em maiores detalhes na Aula 7.) Essa replicação nada mais é do que a capacidade de produzir cópias de si mesmo. Tais cópias são chamadas de descendentes e os originais são denominados ancestrais. Esse elo de parentesco que liga o ancestral a seus descendentes define as chamadas linhagens ancestral-descendente. Portanto, uma espécie ancestral, ou uma linhagem ancestral, dá origem a várias espécies descendentes (**Figura 1.2**).



**Figura 1.2:** Uma linhagem ancestral-descendente mostrando a espécie ancestral e suas duas espécies descendentes.

## Auto-replicação

### AUTO-REPLICAÇÃO

Auto-replicação é a capacidade de reprodução por si, sem ajuda externa.

Todos os sistemas biológicos realizam a **AUTO-REPLICAÇÃO**. Em última análise, essa replicação ocorre através da duplicação do DNA com auxílio de proteínas (enzimas). Você irá ver mais detalhadamente a relação entre esses dois tipos de moléculas e como elas juntas conseguem perpetuar as informações na cadeia ancestral-descendente na Aula 6. Exatamente durante a replicação do DNA, as informações contidas nele são reproduzidas, determinando assim as estruturas (morfológica, bioquímica, fisiológica etc.) dos sistemas descendentes.

Esse, certamente, é o principal fenômeno biológico que determina que bactérias, estrelas-do-mar, peixes, baleias e humanos consigam manter sua sobrevivência por meio da auto-replicação. Por esse processo, o sistema biológico ultrapassa a sua condição mortal de indivíduo e se torna “**IMORTAL**” como uma linhagem ancestral-descendente.

## Herdabilidade e mutação

É fundamental entender que replicações em sistemas biológicos dão origem a unidades idênticas. Ou seja, o organismo ancestral dá origem, por meio da replicação, a cópias idênticas de si mesmo em seus descendentes. Essa capacidade dos sistemas biológicos, de passar informação gênica idêntica através de suas gerações, é conhecida como herdabilidade. (Leia um pouco mais sobre esse assunto na seção reprodução sexuada e assexuada.)

## Um pouco mais sobre o DNA

A molécula de DNA é o principal componente dos **CROMOSSOMOS** onde se localizam todos os genes em cada uma de nossas células. Todos os genes de todos os organismos estão localizados especificamente na molécula de DNA (**Figura 1.3**), que é constituída por uma seqüência de nucleotídeos (unidade básica da molécula) organizados em forma de dupla hélice. Existem 4 tipos diferentes de nucleotídeos (Adenina, Timina, Guanina, Citosina).

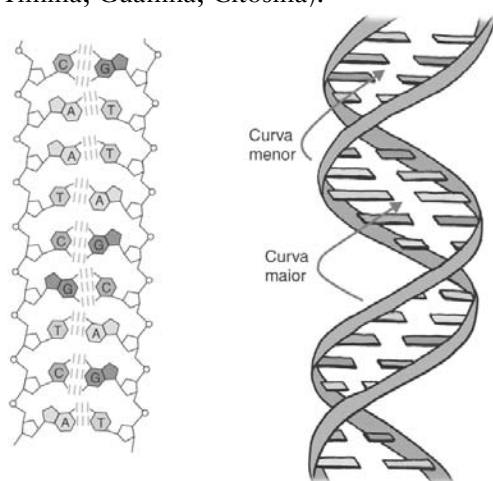
### IMORTAL

Naturalmente, as linhagens não são imortais porque algumas já deixaram de existir. Um dos exemplos mais famosos é a linhagem dos dinossauros, que foi extinta há 65 milhões de anos.

### CROMOSSOMOS

Unidade morfológica e fisiológica que contém a informação genética.

Os cromossomos são constituídos de proteínas e de DNA.



**Figura 1.3:** Uma molécula de DNA. Note a dupla hélice da molécula e seus nucleotídeos constituintes.

O arranjo desses quatro tipos de nucleotídeos, ao longo da molécula de DNA, determina todos os genes e, conseqüentemente, todas as proteínas da célula e as características dos organismos.

### MUTAÇÕES

São modificações na cadeia de DNA causadas por erro da enzima que duplica o DNA.

Um aspecto crucial sobre a replicação biológica é que ela é suscetível a erros. Isso acontece porque o sistema de replicação de DNA, mais especificamente a enzima responsável — a DNA-polimerase —, pode cometer erros no processo de replicação. Esses erros, como já sabemos, são o que chamamos de **MUTAÇÕES**. Nesses casos, o ancestral não dará origem a cópias idênticas de sua molécula de DNA a seus descendentes, mas sim a cópias ligeiramente diferenciadas que poderão produzir indivíduos mais adaptados ou menos adaptados ao meio (na Aula 5 você irá conhecer melhor o processo evolutivo de seleção natural e sua importância na Biologia).

### Reprodução sexuada e assexuada

Na realidade, quando falamos que um ancestral produz cópias idênticas de si mesmo em seus descendentes estamos falando de sistemas de replicação simples, como aqueles que regem a duplicação do DNA nas células de todos os organismos. Esse tipo de sistema só se aplica à duplicação de moléculas como o DNA. Na reprodução das espécies, como as esponjas, os golfinhos, os gatos, os sistemas de reprodução são mais complexos. Por exemplo, todos os mamíferos se reproduzem sexuadamente. Assim, dois organismos são necessários para reprodução. Os filhos de um casal de mamíferos não são idênticos a nenhum dos pais, pois herdam metade dos genes de seu pai e metade dos genes de sua mãe. (Na Aula 16 você irá saber mais sobre as diferenças entre a reprodução sexuada e a assexuada.)

Como mutações são erros cometidos pela enzima responsável pela replicação do DNA, a primeira coisa que temos de deixar claro é que os erros são aleatórios, ou seja, eles nada têm a ver com o ambiente ou com as condições ambientais a que o organismo está sujeito. A enzima, na realidade, tem como objetivo a reprodução perfeita (e idêntica) da cópia ancestral do DNA nas cópias descendentes. Entretanto, essa enzima (como todos nós, aliás) é capaz de cometer erros, mas, quando a enzima comete um erro, ela não tem a menor idéia do que irá acontecer com o organismo depois da mudança. Quando essa mudança ou mutação é vantajosa, ela rapidamente se torna uma adaptação no organismo, isto é, uma característica que irá ajudá-lo a sobreviver no ambiente que ele vive.



Por exemplo, se a mutação permitir ao organismo enxergar seu alimento mais facilmente, ela será vantajosa para o indivíduo mutante e poderá se espalhar para toda a população, tornando-se uma adaptação. Na Aula 5, iremos ver mais profundamente esse mecanismo de espalhamento de características por meio da seleção natural.

Por outro lado, a segunda coisa que iremos esclarecer sobre mutações é que a maior parte delas são deletérias, ou seja, elas são prejudiciais à vida do organismo mutante. Vamos voltar ao nosso cotidiano para entendermos melhor essa questão das mutações gênicas serem em sua maioria deletérias. Por exemplo, se você tem um relógio que está funcionando muito bem, ele não atrasa nem adianta um segundo sequer. Depois de um tempo você resolve mexer no relógio e troca uma de suas peças. Como você não é relojoeiro, não tem muita idéia do que você está fazendo e começa a experimentar trocas aleatórias com as peças do relógio. O que vai acontecer com o relógio? Depende. Se você trocar uma peça sem importância para o funcionamento do relógio, como a pulseira, ele vai continuar funcionando sem problemas (além da necessidade de você carregá-lo na mão). Porém, se você trocar a bateria do relógio por uma outra peça qualquer, o seu relógio vai parar de funcionar imediatamente, pois dificilmente uma mudança aleatória irá melhorar a condição do relógio.

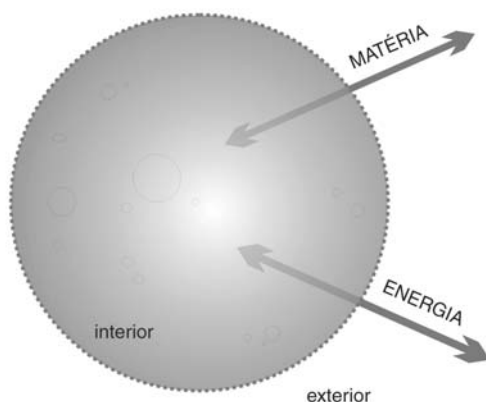
Nas células vivas, o processo de mutação acontece da mesma forma. Imagine que neste momento milhões de enzimas estão sendo produzidas e funcionando perfeitamente nas suas células. Essas proteínas são fabricadas de modo a permitir que você esteja lendo esta apostila e absorva seu conhecimento. Todas as enzimas têm como molde seus respectivos genes presentes na fita de DNA. Caso haja uma mutação no gene que especifica a enzima A, essa enzima será produzida de maneira diferente, quer dizer, a mutação no DNA irá especificar uma mudança na enzima correspondente. Se essa mudança for muito deletéria, o organismo pode ficar muito prejudicado e até vir a morrer em decorrência da mutação, levando à falência o sistema biológico. Em populações humanas, muitas doenças são consequência direta de mutações que ocorreram no DNA de nossos antepassados.

Nós iremos retornar a esse assunto nas Aulas 5 e 6, mas nesse momento é mais importante saber que os erros ou mutações nas cadeias de DNA são a fonte primária de transformação dos sistemas biológicos. A maior parte desses erros, como no caso do relógio, deve levar a deficiências na enzima e conseqüentemente à desvantagem do indivíduo mutante e a sua morte. Porém, o importante para a adaptação dos organismos ao ambiente é exatamente a fração irrisória que é vantajosa dentre todas as mutações. São elas que irão implicar a emergência de organismos descendentes diferentes de seus ancestrais e mais adaptados às condições do ambiente naquele momento. E pela conseqüência dessas mutações é que percebemos os organismos bem adaptados a seus ambientes, pois aqueles que não possuíam adaptações morreram e foram eliminados da população.

Ora, para encurtar a trajetória desta aula, pode-se dizer que a diversidade de seres vivos de nosso planeta Terra é diretamente associada ao conjunto dessas mutações raras e vantajosas para os organismos! A pressão de seleção é a força (vetor) antagônica a toda e qualquer variação que venha resultar numa queda de adaptabilidade do sistema, relativa ao contexto ecológico e evolutivo vivenciado pelo sistema.

### Fluxo de matéria e energia

Vamos tentar compreender um pouco mais sobre os sistemas biológicos, para que possamos entender o conceito central do nosso curso, a biodiversidade. Uma outra característica de sistemas biológicos é o fato de eles serem semi-abertos para o fluxo de matéria e trocas energéticas (**Figura 1.4**).



**Figura 1.4:** Fluxo de matéria e transferência de energia num sistema biológico. Note que o sistema biológico é delimitado por uma membrana biológica semipermeável (sistema semi-aberto). Dessa maneira, nutrientes e energia podem passar de um lado para o outro, mas não proteínas ou material genético.

Isso significa que o organismo troca esses componentes com o ambiente ao respirar, ao se alimentar e ao excretar. A fronteira de um sistema biológico é o limite entre o sistema e o meio ambiente, que é delimitado por sua membrana periférica (membrana celular no caso das bactérias, pele no caso dos humanos etc.). Os sistemas biológicos necessitam de energia para garantir o desenvolvimento de suas dinâmicas internas, como as reações bioquímicas das enzimas, responsáveis pela manutenção de sua existência por meio de seu metabolismo. Nesse sentido, os sistemas biológicos devem ser capazes de adquirir energia para condução desse trabalho e se organizar. Sem essa energia o sistema irá rapidamente atingir uma alta **ENTROPIA** ou uma desordem sistêmica, que é o que acontece quando o organismo morre.

Todo sistema biológico deve obter energia suficiente para suprir seus próprios gastos metabólicos relativos a sua sobrevivência e a sua reprodução. Naturalmente, quanto maior a diferença entre o ganho energético de um organismo e o mínimo de energia que ele requer para sobreviver maior será sua vantagem em relação aos demais organismos. Nesse sentido, erros (mutações) de replicação podem implicar diferenças no balanço energético entre organismos. Ou seja, um sistema mutante pode apresentar saldo positivo de energia gasta *versus* energia adquirida (= sistema mais adaptado). Dessa forma, o indivíduo mutante irá, provavelmente, se replicar mais facilmente e com isso aumentar as chances de produzir descendentes com suas mesmas características vantajosas. (Você vai ler mais sobre isso na Aula 5.) Repare que esses novos sistemas descendentes são portadores dessa mutação que proporcionou um aumento no saldo energético. Assim, caso nas novas gerações sejam perpetuadas tais condições de vantagem energética, as formas mutantes deverão se tornar cada vez mais abundantes em relação à forma ancestral, principalmente se o recurso for limitado (não abundante para alimentação de todos os sistemas vivos do contexto). Concluindo, os sistemas biológicos são sistemas auto-replicadores, que promovem troca de energia e de matéria com o ambiente, de maneira a possibilitar os recursos necessários ao seu desenvolvimento. Dentre esses recursos está incluído o necessário para garantir a auto-replicação que irá promover a imortalização do sistema.

**ENTROPIA**

É uma medida da indisponibilidade de energia, também chamada de desordem, por parte de um sistema.

Nessa linha de raciocínio, dentre uma determinada diversidade de sistemas biológicos, ou seja, dentre um grupo de espécies que compartilham o mesmo recurso energético, aqueles que apresentarem as melhores características, no sentido de maximizar seus saldos energéticos, apresentam freqüentemente as melhores probabilidades de sobrevivência e de reprodução. Na próxima aula iremos fazer uma breve revisão sobre como o pensamento evolutivo caminhou nos últimos tempos e sobre a importância do conceito de hereditariedade na biologia evolutiva.

## RESUMO

Todos os seres vivos podem ser incluídos em agrupamentos naturais que possuem sentido biológico real. Biodiversidade é o conjunto dos seres vivos, seus agrupamentos naturais e as quantidades relativas de cada um. Biodiversidade é um conceito que pode ser aplicado temporal ou espacialmente. Uma outra noção importante da aula é o conceito de sistemas biológicos e as características que os diferem dos demais tipos de sistemas. Os sistemas biológicos são auto-replicadores (reprodutibilidade). A auto-replicação também é conhecida como reprodução e faz dos sistemas biológicos sistemas imortais. A replicação se dá de forma a garantir que os descendentes ou filhos se assemelhem aos ancestrais ou aos pais (herdabilidade). A replicação é suscetível a erros (mutabilidade) que irão promover mudanças estruturais ou dinâmicas nos sistemas. Os sistemas biológicos também são caracterizados por serem semi-abertos e promoverem a troca de energia e matéria com o ambiente. Dessa forma, o sistema garante os recursos necessários ao seu desenvolvimento. Dentre esses recursos está incluído o da auto-replicação, que irá promover a própria imortalização do sistema. Nessa linha de raciocínio, dentre uma determinada diversidade de sistemas biológicos que compartilham o mesmo recurso energético, aqueles que apresentarem características melhor adaptadas, no sentido de maximizar seus saldos energéticos, apresentam freqüentemente melhores probabilidades de sobrevivência e replicação.

## EXERCÍCIOS

1. O que é biodiversidade?
2. Quais são as características dos sistemas biológicos?
3. Como o sistema biológico atinge a imortalidade?
4. Qual a importância dos agrupamentos quando estamos estudando a diversidade dos seres vivos?

## História do pensamento evolutivo

AULA

2

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Compreender evolução biológica.
- Definir padrão, processo e força evolutiva.
- Delinear o desenvolvimento do pensamento evolutivo.
- Familiarizar-se com os conceitos de variabilidade, populações e espécie de modo a distinguir as entidades da diversidade biológica.

### Pré-requisito

O aluno deve estar familiarizado com os conceitos de similaridade, hierarquia e características.

## EVOLUÇÃO NO PERÍODO PRÉ-DARWIN

Desde o final do século XVIII, o estudo dos mecanismos atuantes na evolução da diversidade biológica tem sido um dos problemas mais fascinantes e abrangentes em Biologia.

Uma das coisas que mais chama a nossa atenção quando estamos vendo um programa sobre natureza na televisão, é a diversidade de cores e formas que conseguimos distinguir nos organismos vivos. Um recife de coral, uma floresta tropical ou a mata atlântica são ecossistemas que detêm uma riqueza muito grande de cores e formas. É importante saber que toda essa diversidade foi adquirida pelos diferentes organismos ou grupos de organismos ao longo de sua história evolutiva. Quando estamos estudando essa diversidade e como ela foi adquirida ao longo do passado das linhagens dos organismos, a análise comparativa é uma das principais técnicas utilizadas. A **ANÁLISE COMPARATIVA** tem sua base na comparação dos organismos, indivíduos a indivíduos, para formar subgrupos, e depois subgrupos a subgrupos para formar os grupos e assim por diante. Vamos ilustrar um pouco para facilitar a comparação. Realmente, se você se dispuser a comparar espécies, quaisquer espécies, você deverá notar que algumas são muito semelhantes morfologicamente. Gatos e onças, por exemplo, compartilham grande parte de suas características (**Figura 2.1**).

### ANÁLISE COMPARATIVA

É um método de estudo, no qual partes equivalentes de diferentes organismos são analisadas cuidadosamente.

Apenas pequenos detalhes fazem essas espécies reconhecivelmente diferentes: a onça é maior e possui pelo amarelo com pintas pretas. Por outro lado, outras espécies, tais como chimpanzés e gatos, compartilham um número menor de características. Na realidade, percebemos chimpanzés e gatos como mais diferenciadas uma da outra. Ainda assim, mesmo entre elas as similaridades ainda são perceptíveis. Por exemplo, ambas as espécies fazem parte dos mamíferos placentários que possuem coluna vertebral (como todos os vertebrados), quatro membros (como todos os tetrápodos), pelos no corpo e glândulas mamárias (como todos os mamíferos).



**Figura 2.1:** Mamífero conhecido como gato doméstico ou, seu nome científico, *Felis catus*.

Em outras comparações, a identificação de características similares é complicada sem o uso de técnicas mais avançadas de microscopia ou de Biologia Molecular, como vamos ver adiante no curso de Evolução no quarto período.

Um exemplo dessas comparações entre organismos que apresentam maiores diferenças morfológicas é a comparação entre mamíferos e insetos ou plantas e animais. Numa análise final, pode-se dizer que todas as espécies do mundo possuem características compartilhadas com todas as outras, mesmo aquelas muito diferentes morfológicamente. Imagine duas espécies completamente distintas, por exemplo, o ser humano e uma margarida. Nesse caso, as características compartilhadas são de caráter celular ou bioquímico. Por exemplo, humanos e margaridas compartilham enzimas responsáveis pela respiração celular, que ocorre nos dois organismos. Além disso, as duas espécies possuem DNA como material genético e seu DNA se encontra compartimentalizado em um núcleo celular. Essas características compartilhadas surgiram há muito tempo, quando humanos e margaridas ainda não existiam, e apenas seres **UNICELULARES** habitavam nosso planeta.

### Algumas definições importantes

Podemos definir evolução biológica como mudança das características dos organismos ao longo do tempo. Antes de prosseguirmos estudando a evolução dos seres vivos, é importante que façamos distinção entre algumas questões básicas na Biologia Evolutiva, que é a diferença entre padrões e processos. Padrões são definidos como “aquilo que serve de base ou norma para avaliação”. Os padrões observados na natureza são características distinguíveis entre os organismos. Como evolução é mudança, as forças evolutivas (mutação, seleção natural, acaso e migração) atuam sobre os padrões originais para gerar novos padrões. Por outro lado, processos são uma “sucessão de estados ou mudanças”. Note que, como processos têm caráter histórico, eles não podem ser observados diretamente mas apenas inferidos a partir do que observamos nos padrões de diversidade. Vamos tomar um outro exemplo para clarear essas idéias. Se observarmos que uma determinada espécie de gavião possui garras muito afiadas que a possibilitam segurar sua presa facilmente, dizemos que esse padrão (garras para segurar presa) é resultado do processo de seleção natural.

#### UNICELULARES

São os organismos constituídos por uma única célula em seu corpo. Bactérias e protistas são exemplos de organismos unicelulares.



**CAROLUS LINNAEUS  
(1707-1778)**

Foi um botânico sueco, que hoje é conhecido como o pai da Taxonomia. Causou desgosto a seus pais por não mostrar aptidão para ser padre ou médico, as duas únicas profissões com prestígio na época. Durante seu curso em uma das universidades de mais prestígio, estudou plantas, sua verdadeira paixão. Em 1735, publicou o *Systema naturae*, com a primeira classificação dos seres vivos.

**FIXISMO**

O fixismo é uma antiga teoria biológica que dizia que as espécies são invariáveis. Segundo essa teoria, a diversidade dos seres vivos é decorrência direta de sua criação por um ser superior.

Especificamente, o processo pode ser encarado como o agente causador do padrão observado. Evolução neutra (por meio do acaso) ou adaptativa (por meio da seleção natural), e especiação são processos causadores de padrões observados. Forças evolutivas são os agentes causadores da evolução. A mutação, a seleção natural, o acaso e a migração são as forças evolutivas.

Concluindo, dentre todas as espécies do planeta, alguns pares de espécies são muito semelhantes, enquanto outros possuem níveis menores de similaridade. As similaridades entre os seres vivos podem ser hierarquizadas e esses seres ficam organizados em sistemas hierárquicos de classificação (ou Taxonomia) dos organismos de acordo com os níveis hierárquicos. Esse sistema foi originalmente concebido por **CAROLUS LINNAEUS** (ou simplesmente Lineu) e foi publicado na obra denominada *Systema naturae*. As formulações hierárquicas de Lineu para classificar a diversidade biológica têm como proposta fundamental o sistema binomial (na Aula 4 estudaremos em mais detalhe esse sistema).

Lineu, no início de sua carreira, era **FIXISTA**. Isso significa que ele acreditava na imutabilidade das espécies, ou seja, que as espécies tinham sido criadas independentemente por um ser superior e que iriam permanecer as mesmas indefinidamente. Entretanto, ao longo de sua carreira ele se mostrou intrigado com espécies de plantas muito semelhantes entre si e que mostravam poucas características diferentes. Assim, com base nos dados que coletou por toda sua vida, ele, posteriormente, sugeriu que as espécies poderiam se transformar em outras. Foi dessa forma que uma das primeiras idéias firmadas sobre evolução começou a surgir. Entretanto, Lineu ainda não acreditava que grandes diferenças observadas entre espécies poderiam ser explicadas por evolução.



Apesar de ter lançado a idéia de evolução das espécies, Lineu não propôs um mecanismo para explicar como a evolução acontecia. Só no início do século XIX, **JEAN-BAPTISTE LAMARCK** desenvolveu a primeira teoria na tentativa de explicar o mecanismo de como as espécies se modificavam ao longo tempo. Sua teoria, porém, tem dois pontos que hoje estão desacreditados. O primeiro, de cunho teleológico, previa um desejo *a priori* de as espécies “melhorarem” pela evolução. Ou seja, para Lamarck, as espécies evoluíam com o objetivo de se adaptarem melhor ao seu ambiente. Hoje em dia, a palavra “evolução” caracteriza qualquer modificação em espécies ou populações naturais. Essa modificação pode ser para melhor ou para pior.

O segundo ponto errado de sua teoria era o que chamamos de uso e desuso ou a herança de caracteres adquiridos. Segundo essa parte da teoria, o desenvolvimento de um determinado órgão seria diretamente proporcional ao seu uso, e isso também seria passado de geração em geração. Por exemplo, se um levantador de pesos (com seus músculos bem fortalecidos) tiver um filho, essa criança necessariamente teria músculos fortes, independente dos exercícios que ela fizer. Ora, sabemos hoje que isso não acontece. Caracteres adquiridos durante a vida não são herdáveis e por isso não passam de geração para geração.

Para sedimentar esse ponto fundamental de que caracteres adquiridos não são herdáveis vamos ver um outro exemplo. Existe uma tribo na África na qual seus membros têm uma tradição de colocar anéis em torno do pescoço. Quanto maior o número de anéis em torno do pescoço de um indivíduo, maior o status do membro na tribo. Ao longo da vida inúmeros anéis são adicionados e o pescoço de cada indivíduo vai aumentando. Se Lamarck estivesse correto em sua teoria, as crianças da tribo não necessitariam fazer mais isso, já que seus pais já tinham feito há muitos anos. Imagine só uma tribo com crianças nascendo com pescoços enormes! Realmente, não é isso que acontece. Todos os bebês nascem com pescoços de tamanho natural e o pescoço grande dos pais não passam para seus filhos. Assim, cada um dos indivíduos deve aumentar seu pescoço através do esforço individual.



**JEAN-BAPTISTE LAMARCK  
(1744-1829)**

Nasceu na França. Era o mais jovem de 11 irmãos e iniciou sua carreira prestando serviço militar seguindo a tradição de sua família. Entretanto, após um acidente que o impossibilitou de seguir carreira militar, ele, em 1778, começou a estudar Medicina. Em seguida, passou a se dedicar em seus estudos à Botânica e depois à Zoologia de invertebrados. Em 1809, ele publicou seu livro mais importante, *Philosophie Zoologique*, onde propõe o primeiro mecanismo para explicar como a evolução ocorre. Apesar disso, viveu sua vida lutando contra a pobreza e rebatendo críticas a suas teorias evolutivas.

Infelizmente, Lamarck ainda hoje é conhecido como aquele que propôs uma teoria errada e não como um pioneiro e corajoso lançador da primeira teoria coerente que explicava o mecanismo pelo qual a evolução ocorria. Mesmo com duas idéias equivocadas em relação ao que sabemos na Biologia moderna, ele deve ser lembrado por seus méritos, não reconhecidos na sua época, como o primeiro a propor um mecanismo coerente (apesar de errado) para explicar como ocorre a evolução biológica.

## O impacto de Darwin na Biologia

Meio século depois da teoria de Lamarck, a maior revolução que a Biologia já conheceu estava prestes a acontecer, quando Charles Darwin (Figura 2.2) publicou o livro *The origin of species*, em 1859.

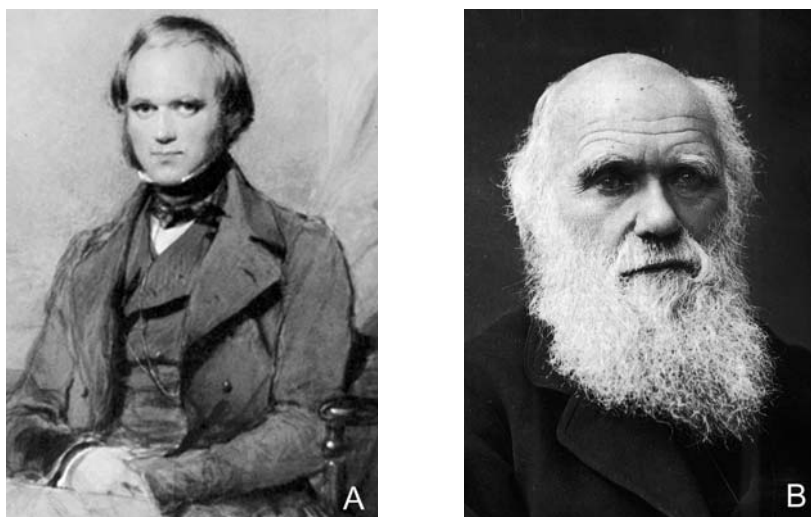


Figura 2.2: Charles Darwin novo (A) e já velho com barba branca (B).

O ponto central da teoria evolutiva de Darwin é a introdução efetiva da seleção natural como mecanismo para explicar como ocorria a evolução das espécies. Darwin propôs que a variabilidade (a diversidade de formas) era gerada ao acaso, mas a “natureza escolhia”, através do processo da seleção natural, os organismos que apresentassem as melhores características para sobreviver. Além disso, ele descarta completamente a parte teleológica da teoria anterior, contribuindo para as bases biológicas do **MATERIALISMO**.

### **MATERIALISMO**

É uma teoria filosófica que enfatiza os objetos, as necessidades e as considerações materiais, com a rejeição de valores espirituais.

Na teoria de Darwin, diferentemente da de Lamarck, as espécies evoluíam independentemente de suas vontades, de seus desejos ou de suas necessidades. Sob essa perspectiva, a primeira girafa mutante com pescoço grande adquiriu essa mutação aleatoriamente pelo erro da enzima polimerase quando estava duplicando o gene em questão. Entretanto, como foi uma mutação benéfica ao indivíduo, ela foi espalhada pela população através da seleção natural nas gerações seguintes. Esse processo de seleção natural (que iremos estudar mais detalhadamente na Aula 5) foi a grande contribuição de Darwin para a Biologia evolutiva: o primeiro mecanismo para explicar como a evolução das espécies ocorria.

### Darwin e a viagem do Beagle

Charles Darwin nasceu em 1809, filho de um médico e neto de um naturalista famoso, Erasmus Darwin. Ele, como a maior parte dos filhos de nobres ingleses da época, foi criado para ser médico ou padre. Entretanto, logo no início da Faculdade de Medicina em Edimburgo, Darwin detestou o trabalho, principalmente as cirurgias. Uma nova tentativa de educá-lo levou-o a estudar Teologia em Cambridge, mas também não foi seu forte. Durante esse tempo em Cambridge, ele aproveitou para fazer o que realmente gostava, que era colecionar insetos, plantas e rochas. Seu professor de Botânica, John Henslow, teve enorme influência, não apenas encorajando-o a seguir essa nova carreira mas também assegurando-lhe um posto no navio *H.M.S. Beagle*, viagem que durou de 1831 a 1836 (Figura 2.3) e mudou a vida de Darwin.

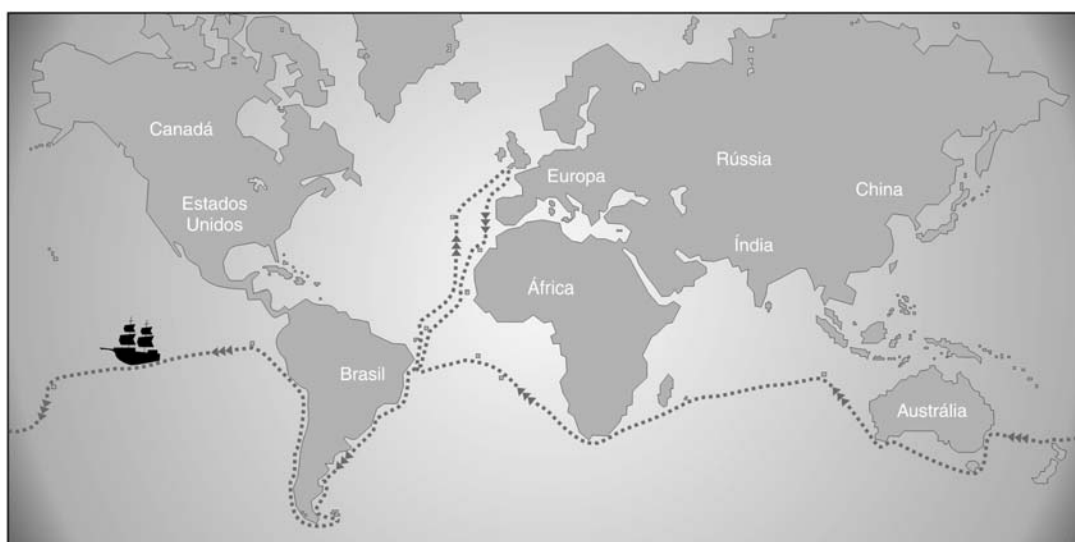


Figura 2.3: Viagem do Beagle.

Por volta do século XIX, as grandes navegações ao redor do mundo levavam consigo naturalistas que pudessem coletar e trazer de volta à Europa novos espécimens para suas coleções. O posto de Darwin no *H. M. S. Beagle*, entretanto, tinha motivações diferentes. Capitães dos navios, por serem de uma classe social mais alta, eram proibidos, por etiqueta, de sentar à mesa ou mesmo conversar com marinheiros de seu navio. Imagine você, o capitão sem poder conversar com ninguém em seu navio por quatro ou cinco anos de viagem! Não é de espantar que muitos capitães se suicidavam ou ficavam loucos pela falta de alguém para conversar. Então, Darwin, um aristocrata, foi convidado pelo capitão Robert Fitzroy para que tivesse alguém com quem conversar durante a viagem de cinco anos. Darwin visitou a Bahia, o Rio de Janeiro, a Argentina, as Ilhas Galápagos, Nova Zelândia, Austrália, Madagascar. Durante esses cinco anos de viagem, ele foi coletando e observando as características das diferentes espécies ao redor do mundo e anotando em seus diários.

As idéias de Darwin foram muito inspiradas em dois grandes nomes da época, **CHARLES LYELL** (*Principles of Geology*) e Thomas Malthus (*Essays on Populations*). O primeiro volume da obra *Princípios de Geologia* lhe foi dada pelo seu mentor, Henslow, antes de embarcar para a viagem do *Beagle*. Esse livro o impressionou tanto que ele requisitou os volumes seqüentes que lhe foram enviados durante a viagem. Naquele livro, Lyell colocava de forma clara os princípios da teoria do uniformitarianismo. Essas idéias foram extremamente importantes para sedimentar no pensamento de Darwin que as mudanças na natureza eram graduais e que os mesmos processos naturais que governam o presente governavam no passado.

**CHARLES LYELL  
(1797-1875)**

Geólogo escocês que no início de sua carreira teve que escolher entre ser um advogado ou um geólogo. Darwin disse uma vez que metade de seus livros vinham do cérebro de Charles Lyell, para termos uma idéia da influência do escocês no pai da Biologia. Na realidade, a influência de Lyell na geologia também é enorme, um biógrafo recente indica Lyell como “o espelho de tudo que importava no pensamento geológico”.

As idéias básicas do uniformitarianismo são:

- 1) As leis naturais são constantes (uniformes) no espaço e no tempo;
- 2) Os processos que operam agora para moldar a superfície da Terra devem ser invocados para explicar os acontecimentos do passado;
- 3) As mudanças geológicas são lentas, graduais e constantes e não cataclísmicas;
- 4) A Terra tem sido fundamentalmente a mesma desde sua formação. O uniformitarianismo vai contra a idéia do catastrofismo que prevalecia anteriormente.

O outro livro que influenciou Darwin, já em 1838, foi o do matemático Malthus, *Princípios das Populações*. Malthus acreditava que a população humana, sem controle externo, iria aumentar desproporcionalmente em relação aos recursos disponíveis. O que ele queria dizer é que a população humana aumenta em proporções maiores do que o alimento. Assim, a falta de alimento em relação ao número de pessoas que nascem, indica que nem todos os que nascem irão sobreviver. Darwin começou a pensar que isso também deveria valer para outras espécies. Por exemplo, Darwin calculou que se todos os filhotes de um casal de elefantes sobrevivessem, em 750 anos, haveria 19 milhões de elefantes! Naturalmente, em pouco tempo isso se tornava inviável pois não haveria comida na África para suportar essa população crescente de elefantes. Em outras palavras, nascem mais indivíduos do que o ambiente é capaz de alimentar. Ao número de indivíduos que o ambiente é capaz de alimentar, abrigar e manter chamamos de capacidade de suporte do ambiente.

Depois de muito trabalho, Darwin finalmente lançou a teoria que mudaria a Biologia para sempre. Populações naturais são variáveis nas mais diversas características morfológicas e fisiológicas. Essa variação é gerada aleatoriamente. Entretanto, como o número de filhotes produzido é maior do que aquele que poderia sobreviver e, portanto, apenas aqueles com as melhores características irão sobreviver, os sobreviventes passarão essas características para seus descendentes e, assim, as características melhores serão mantidas nas espécies e nas populações. Hoje, Darwin é considerado o pai do pensamento evolutivo. Seu trabalho mais importante, a *Origem das Espécies*, foi publicado em 1859, mais de vinte anos após a volta da viagem. Essa primeira edição se esgotou no primeiro dia de lançamento e é considerada um marco em toda a Biologia.

Darwin, prevendo o furor que sua teoria ia causar na comunidade científica e não querendo que ela tivesse o mesmo destino da de Lamarck, passou mais de vinte anos cuidadosamente coletando e descrevendo exemplos, desde sua viagem finda em 1836 até a publicação da *Origem* (em 1859). Com isso, após o lançamento do livro, em pouco tempo grande parte da comunidade científica, e mesmo parte da população, já estava convencida da existência da evolução. Darwin passou sua velhice rebatendo críticas e recebendo elogios sobre sua teoria. Com a saúde nem sempre boa, devido a uma doença adquirida durante a viagem no *Beagle*, Darwin se absteve de trabalhar e ocupava o seu tempo estudando. Darwin morreu em 19 de abril de 1882.

### Darwin e Wallace

Quando Darwin retornou de sua viagem no *Beagle*, em 1836, suas teorias ainda não estavam formadas. Foi só pelo ano de 1844 que ele já tinha completado a maior parte de seus trabalhos mais importantes, incluindo aí a finalização de sua teoria da seleção natural. Entretanto, ele se reservou de publicá-las e deu ordens a sua esposa de fazê-lo, em caso de sua morte, já que sua saúde não era das melhores. Ele voltou a estudar casos e a descrever minuciosamente as evidências mais contundentes sobre a teoria de seleção natural que já estava bem sedimentada em sua cabeça. Alguns colegas de Darwin insistiram para ele publicar logo suas idéias. Entretanto, Darwin, cauteloso pelo impacto que suas idéias causariam, queria embasá-las muito bem antes da publicação, para que não tivessem o mesmo fim das de Lamarck. Por volta do ano de 1856, Darwin começou a escrever suas idéias mais objetivamente, capítulo por capítulo, do que seria seu livro, *Origem das Espécies*.

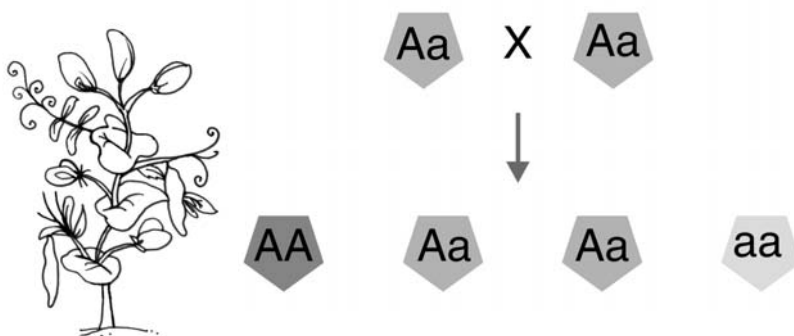
Enquanto isso, do outro lado do mundo, Wallace estava em expedição na Malásia. Alfred Russel Wallace era um naturalista inglês que também estava familiarizado com alguns dos trabalhos importantes que basearam as idéias de Darwin, como o de Malthus. Um certo dia, Darwin recebeu uma carta de Wallace, colocando em papel algumas das principais idéias de Darwin. Na carta, Wallace mencionava a idéia central da seleção natural e perguntava se ele achava adequado submeter o trabalho para publicação nos anais da **Sociedade Lineana**.

Darwin, como bom cavalheiro que era, entregou o documento para a sociedade lineana, indicando-o para publicação. Submeteu o artigo de Wallace prontamente, mas, ao mesmo tempo, ficou desolado, pois entendeu que o trabalho de toda sua vida tinha ido por água abaixo. No entanto, os colegas da sociedade a que Darwin entregou o documento sabiam de longa data das idéias de Darwin e sugeriram que os dois apresentassem juntos suas publicações à sociedade em 1858. Darwin aceitou a idéia e tratou de escrever um pequeno resumo de suas idéias para apresentar à sociedade. Apenas um ano mais tarde, em 1859, ele terminou a primeira edição de um dos livros mais significativos na história da Biologia. A importância do embasamento do trabalho de Darwin, e não apenas da idéia de seleção, fica clara quando vemos a citação dos trabalhos de 1858 e de 1859.

Esses trabalhos, embora anteriores ao livro, são muito menos citados e, assim, muito menos lidos do que *Origem das espécies*.

### Teoria sintética da evolução

Depois de Darwin, a teoria evolutiva ganhou muitos adeptos, mas a herdabilidade das características não estava clara para ele. Apenas depois dos trabalhos de **GREGOR MENDEL** a teoria evolutiva ganhou uma base sólida e bem fundamentada. Mendel percebeu, estudando milhares de ervilhas (**Figura 2.4**) por várias gerações, que algumas características eram sempre observadas em todas as gerações. Outras características “pulavam” gerações.



**Figura 2.4:** Os pares de letras representam genes responsáveis por uma certa característica. (e.g. rugosidade e cor). Em um cruzamento, o indivíduo gerado recebe apenas um alelo (A ou a) de cada um de seus pais, definindo diferentes combinações (e fenótipos) possíveis.



#### **GREGOR MENDEL (1823-1884)**

Nasceu na Morávia, na Áustria. Era um monge que passou a vida estudando ervilhas. Ele descobriu que as características dos indivíduos eram herdadas de maneira discreta pelos genes. Seu trabalho foi extremamente influente na Biologia e deu base para o campo da Genética.

#### ALELOS

Uma das duas formas alternadas que um determinado gene pode apresentar, responsáveis por características alternadas. Por exemplo, no cruzamento da Figura 2.4, as letras “A” e “a” correspondem a dois alelos diferentes, onde “A” corresponde ao alelo dominante e “a” ao alelo recessivo.

Ou seja, algumas características eram herdadas de pai para filhos sempre, enquanto outras não, desapareciam por uma ou duas gerações, mas de alguma forma eram mantidas na população, pois reapareciam em futuras gerações. As primeiras características eram as dominantes, enquanto as segundas eram as recessivas. Todos os indivíduos de reprodução sexuada herdam um alelo de cada um de seus pais; assim, cada indivíduo possui dois **ALELOS** para uma determinada característica que é codificada por um gene. Quando esses dois alelos são idênticos o indivíduo é denominado homozigoto; quando eles são diferentes, o indivíduo é denominado heterozigoto para aquela característica.

Fenótipo é a aparência do indivíduo. Ex.: cor do cabelo, cor de pele etc. Genótipo são os alelos que ele carrega. Ex.: AA, AB, BC etc. Se o genótipo for homozigoto ele possui dois alelos iguais para uma determinada característica (AA, BB, CC etc.); se o genótipo for heterozigoto, o indivíduo possui dois alelos diferentes (AB, AC etc.). Em uma população natural, existem indivíduos homozigotos e heterozigotos. O alelo é dito dominante se sua presença no heterozigoto garante o fenótipo dominante.

Um indivíduo heterozigoto, com um alelo dominante e um alelo recessivo, expressa sempre o **fenótipo** dominante. Ou seja, ele terá uma aparência igual ao do indivíduo com dois alelos dominantes. Essa simples e breve noção de herdabilidade finalizou as bases da teoria de Darwin.

### A variabilidade nas populações naturais

Na década de 1930, alguns geneticistas juntaram as idéias de Mendel e Darwin e desenvolveram a denominada Teoria Sintética da Evolução. A primeira questão fundamental no estudo evolutivo é a **VARIABILIDADE**. Se repararmos cuidadosamente nos indivíduos de uma determinada população veremos que não são idênticos, pelo contrário, cada um apresenta características singulares que os fazem diferentes dos demais. Toda a variabilidade observada entre indivíduos de uma população ou de uma espécie ou de uma família pode ter duas origens: a genética e a ambiental. A variabilidade genética tem origem nos genes, ou seja, os indivíduos comparados têm alelos diferentes (oriundos de mutações diferenciadas) para uma determinada característica.

#### VARIABILIDADE

Pode ser definida como a presença de características variantes em uma determinada população. Por exemplo, na espécie humana, a característica cor dos olhos possui variantes, ou seja, é variável. Indivíduos de populações humanas apresentam fenótipos de cor preta, castanho, azul, verde, entre outras.

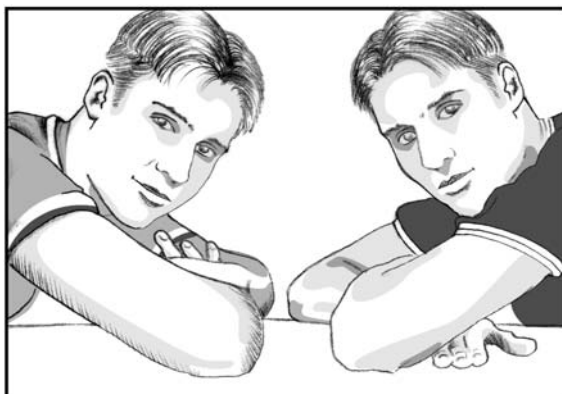


Por outro lado, a variabilidade ambiental tem origem no ambiente, ou seja, mesmo indivíduos idênticos geneticamente que se desenvolveram em ambientes diferentes, podem diferir em suas características fenotípicas.

Na população humana, por exemplo, podemos encontrar pessoas parecidas, mesmo sem qualquer relação de parentesco. No entanto, dificilmente veremos duas pessoas idênticas. Nem mesmo gêmeos univitelinos são necessariamente idênticos: um às vezes é mais gordo, ou mais alto, ou mais moreno, ou mais ágil, ou mais esperto etc. Gêmeos **UNIVITELINOS** são, por definição, idênticos geneticamente. Por isso, todas as diferenças que observamos entre esses indivíduos são originárias de diferenças no ambiente em que eles vivem (**Figura 2.5**).

#### UNIVITELINOS

Irmãos gêmeos que se originaram de um único ovo (um espermatozóide que fecundou um óvulo) que se dividiu.



**Figura 2.5:** Gêmeos univitelinos mostrando algumas diferenças sutis. Como gêmeos univitelinos apresentam exatamente os mesmos genes, todas as diferenças observáveis entre esses dois é ambiental.

Por exemplo, se um gêmeo idêntico gostar mais de ir à praia, ele vai tender a ter a pele mais morena do que seu irmão. Isso claramente não significa que seus filhos nascerão mais morenos do que seus sobrinhos. A razão é que a diferença nesse caso não é genética, mas sim ambiental (ou seja, exposição ao sol) e, portanto, não é passada para seus descendentes.

Essa dicotomia está presente em qualquer população natural. A variabilidade que observamos entre indivíduos de qualquer população, quer seja de bactérias, de plantas ou de mamíferos, pode tanto ter origem genética como ambiental. A distinção entre essas duas causas não é trivial, mas é possível de ser feita.

### Base genética de uma característica

Por exemplo, se quisermos saber se a quantidade de pêlos em uma espécie de roedor tem base genética ou não, devemos primeiro medir a quantidade de pêlos em uma determinada área do corpo de diversos indivíduos e comparar os valores encontrados entre organismos aparentados com aqueles não aparentados.

Se o número de pêlos entre organismos aparentados for mais semelhante do que entre sem parentesco algum, podemos afirmar que a quantidade de pêlos nessa espécie de roedor tem alguma base genética. No curso de Genética (quarto período) você vai ver mais detalhadamente como fazemos para distinguir a variabilidade com causa genética de outra com causa ambiental.

Apenas a variabilidade com origem genética é passada de pais para filhos. Portanto, essa variabilidade é de extrema importância em termos evolutivos. É através dela que todas as espécies mudam sua forma no tempo e espaço. Em última análise, todas as características de uma espécie surgiram pela primeira vez em um indivíduo de uma população de uma espécie e foi sendo passada ao longo das gerações. Isso significa que a variabilidade genética em populações naturais constitui a origem de toda a diversidade observada entre espécies.

## RESUMO

A teoria evolutiva influenciou profundamente cientistas, filósofos, líderes religiosos e o público em geral. O pensamento evolutivo foi construído aos poucos. Um dos grandes passos foi a percepção de que a similaridade entre as espécies pode ser hierarquizada. Ou seja, alguns pares de espécies são muito semelhantes, enquanto outros possuem níveis menores de similaridade. Carolus Linnaeus publicou uma das primeiras versões dessa hierarquia na sua obra *Systema Naturae*. Apenas quando Charles Darwin publicou o livro *The Origin of Species* que foi lançada a teoria que mudaria a Biologia para sempre. A variação entre os filhotes era gerada aleatoriamente. Entretanto, como o número de filhotes produzido era maior, apenas aqueles dotados de melhores características iriam sobreviver. Os sobreviventes iriam passar essas características para seus descendentes e assim as melhores características permaneceriam na população.

## EXERCÍCIOS

1. Qual foi a importância do trabalho de Lamarck na Biologia?
2. Que teorias contribuíram para sedimentar a teoria de Darwin sobre a seleção natural?
3. Que ponto estava faltando para finalizar a teoria da seleção natural como Darwin propôs?
4. Qual a diferença entre genes dominantes e genes recessivos?

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Familiarizar-se com a Filogenia e sua relação com os padrões de diversificação das espécies.
- Familiarizar-se com o conceito de especiação, espécie e homologia.

## Pré-requisito

O aluno deve estar familiarizado com conceitos de história, ancestralidade e genealogia.

## HISTÓRIA EVOLUTIVA



### ERNST MAYR

Nasceu em 1904 e ainda continua produtivo, com o lançamento do livro *O que é evolução* em 2001. Ele se formou em Medicina e completou seu doutorado no mesmo ano. Começou sua carreira estudando pássaros, e hoje é considerado um dos grandes teóricos em Biologia.

A Biologia evolutiva compartilha com a Astronomia e com a Geologia a tarefa de interpretar fenômenos que não podem ser entendidos hoje sem a compreensão de seu passado. As estrelas da Via Láctea, o Aconcágua e os pássaros da praia de Ipanema, todos têm histórias que lhes fornecem características que os diferenciam das estrelas de outras galáxias, do Pico da Neblina e dos pássaros da praia de Cabo Frio.

Para entendermos a importância da Biologia evolutiva, ou seja, a parte da Biologia que estuda a história evolutiva das espécies, reportemo-nos a um dos grandes pensadores da matéria, **ERNST MAYR**, que coloca em perspectiva o conceito de Evolução. Mayr fala que Evolução é o conceito mais importante em Biologia e que nenhuma pergunta em Biologia pode ser adequadamente respondida sem que a evolução esteja sendo considerada. Ele ainda divide a Biologia primariamente em duas partes: a Biologia funcional e a Biologia evolutiva. A primeira parte trata do estudo das funções e dos processos que envolvem os seres humanos, tais como a respiração, o vôo, a reprodução etc.

A segunda lida com as causas históricas, ou seja, com a porção da história evolutiva que é responsável por cada uma das partes do organismo. Como vimos na aula passada, a Biologia evolutiva tem na análise comparada a ferramenta básica para compreensão. Por meio da comparação da estrutura entre diversas espécies, o pesquisador pode inferir relações de parentesco entre espécies ou delinear as mudanças que as características sofreram ao longo do tempo.

Esta aula nos dará uma idéia de como podemos acessar a história filogenética compartilhada das espécies e qual sua influência na formação das espécies contemporâneas.

### ESPECIAÇÃO

É o processo pelo qual espécies vivas se diferenciam em outras espécies, ou o processo de transformação de uma espécie ancestral em duas espécies descendentes.

## Especiação

Vamos iniciar essa aula abordando uma questão simples, mas de difícil resposta. Como uma espécie é formada? Uma resposta simples a essa pergunta é “uma espécie é formada por meio do processo de **ESPECIAÇÃO**”. Então vamos esclarecer o que é um processo de especiação antes de seguirmos em frente. Um evento de especiação dá origem a duas espécies, ditas descendentes, a partir de uma única espécie, dita ancestral.

Todas as espécies modernas e todas as que já habitaram a Terra são evolutivamente relacionadas, ou seja, elas têm uma espécie ancestral em comum. Em momento da sua história (evolutiva), duas espécies quaisquer já foram uma única espécie. A diversidade que habitou e habita nosso planeta é fruto de inúmeros processos que chamamos de **especiação**. No processo de especiação, uma espécie se transforma em duas, essas duas mais tarde irão se transformar em quatro, essas quatro em oito e, assim por diante, teremos toda a diversidade biológica.

Será que você compreendeu bem esse conceito? Vamos pensar num exemplo mais familiar para ilustrar melhor. Imagine sua família mais próxima: seu pai, sua mãe e seus irmãos. Você pode pensar sobre a origem dessa sua família mais próxima como a data de nascimento do seu pai ou de sua mãe, provavelmente por volta da década de 1960. Entretanto, se você pensar melhor, a sua família não se originou na década de 1950, pois seu pai não nasceu do nada, ele foi concebido pelos seus avós. Então vamos agora pensar numa família mais completa: seus tios, suas tias, seus primos e seus avós. Essa sua família mais completa teve sua origem há mais tempo, não foi? Provavelmente na década de 1920 ou de 1930, no nascimento de seus avós, que deram origem a seus pais, que deram origem a você e seus irmãos. Entretanto mesmo esse último exemplo, ainda é incompleto pois seus avós tiveram pais que deram origem a eles também. Repare que nesse exemplo familiar, você pode voltar no tempo quanto quiser. Além disso, quanto maior o número de pessoas que você inclui na sua família, mais antigo é o seu ancestral comum entre eles. Seus familiares se relacionam na sua **HISTÓRIA GENEALÓGICA**. Isso vale também para a diversidade biológica, quanto maior o número de espécies que estamos nos reportando, o ancestral comum entre todas elas é mais antigo. Todas as espécies do planeta são aparentadas e se relacionam na sua história filogenética. Sim, mas é claro que elas possuem níveis diferentes de parentesco. Assim como você tem um grau de parentesco maior com seu irmão do que com seu primo, um camundongo e um rato possui um grau de parentesco maior (= ancestralidade comum mais recente) do que um macaco e um rato. Se pegarmos todas as espécies que habitam nosso planeta, o ancestral comum de toda diversidade viveu há cerca de três bilhões e meio de anos!

#### **HISTÓRIA GENEALÓGICA**

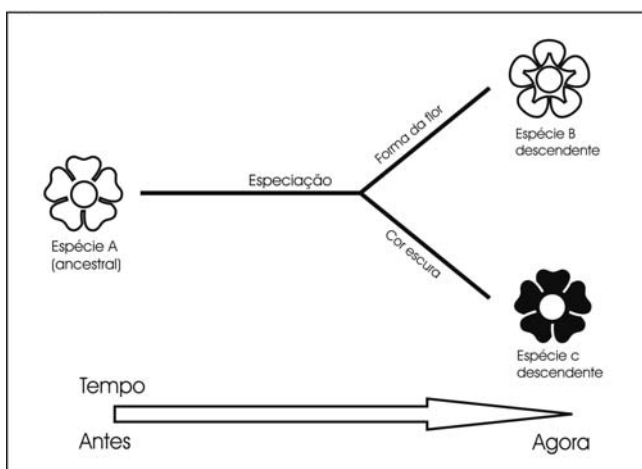
É a história dos antepassados de um indivíduo e a indicação dos casamentos e das sucessivas gerações que o ligam a um ou mais ancestrais.

Repare agora que a gente pode inserir características no meio desses processos de especiação. Pense em você e seus irmãos e a quantidade de traços que vocês possuem em comum. Agora arranje uma foto antiga de seu avô (ou avó) e de seu pai (ou mãe), ambos da sua idade. Veja se você consegue distinguir alguma característica que você tem em comum com ele. É mais difícil encontrar características semelhantes do que na comparação com seus irmãos, não é? No estudo da diversidade das espécies também nos deparamos com uma questão semelhante. Quanto mais recente for a história evolutiva compartilhada entre duas espécies, mais características elas terão em comum. Mais especificamente, o ancestral comum de todas as espécies do planeta se parecia com uma das bactérias atuais.

É preciso deixar bem claro que o exemplo da história genealógica da sua família serve para te ajudar a pensar sobre grau de parentesco existente entre as diferentes espécies. No entanto, todos os seus familiares são da mesma espécie e foram gerados através de um processo reprodutivo simples. Por outro lado, especiação é um processo complexo que envolve a existência de mutações somadas a pressões e condições ambientais ocorrendo ao longo de muito tempo. Então vamos voltar às espécies e sua formação? Bom, para uma espécie se transformar em duas espécies são necessários alguns passos. Por exemplo, o isolamento geográfico é fundamental no modo de especiação que chamamos de alopátrica. Esse é o **MODELO** mais simples e mais freqüente de especiação e por isso é o único que iremos abordar neste curso introdutório de Diversidade dos Seres Vivos. Alopatria é um conceito que se relaciona com o ambiente em que se dá

#### MODELO

Em evolução é a representação simplificada e abstrata de um fenômeno ou de um processo evolutivo, como a especiação.



**Figura 3.1:** Espécie A (ancestral) dando origem às espécies descendentes B e C, por meio de um evento de especiação.

a especiação. Na especiação alopátrica, duas populações localizadas em lugares distintos (*alo*: diferentes, *patria*: local) se tornam espécies distintas. Por outro lado, na especiação simpátrica (*sim*: igual, *patria*: local), duas populações que habitam o mesmo local se tornam espécies distintas. Em ambos os casos, uma espécie se transforma em duas, como mostra a **Figura 3.1**.

Agora vamos pensar mais sobre o processo de especiação. Quando uma população está vivendo num mesmo lugar, todos os genes que aparecem por mutação são potencialmente compartilhados por todos os organismos da população. Isso significa que os genes de um indivíduo mutante podem estar presentes, na próxima geração, na prole de outros indivíduos, caso o mutante cruze com eles. Por isso dizemos que todos os genes de uma população podem atingir todos seus membros da população cruzante. Porém, ao longo dos anos, populações naturais ou partes de populações naturais se separam devido a diferentes causas. Por exemplo, o desvio de um rio pode dividir uma população em duas partes.

No caso da **Figura 3.1**, esse rio pode ter surgido e promovido o processo de especiação. Em primeiro lugar, o rio separou a população original de plantas em duas subpopulações (isolamento geográfico). A princípio, essas duas partes da população eram idênticas entre si, isto é, compartilhavam os mesmos genes e, portanto, as mesmas características morfológicas. Entretanto, depois de longo **TEMPO** as duas começam a se diferenciar morfológicamente. Isso acontece porque indivíduos dos dois lados da montanha irão sofrer mutações diferenciadas. Lembre-se de que as mutações ocorrem nos indivíduos por erro da enzima DNA polimerase (veja mais sobre esses erros na Aula 6). Assim, independente do ambiente, mutações diferentes irão acontecer nas populações nas duas margens do rio que, isoladas, não mais conseguem cruzar entre si. No exemplo abaixo, a subpopulação B deu origem a uma espécie com flores arredondadas e mais complexas, enquanto a subpopulação C deu origem a uma espécie com flores escuras. Essas mutações observáveis podem ser consideradas marcadores das duas espécies, que devido ao tempo que estão evoluindo independentemente, elas devem ter acumulado mutações que vão prevenir o cruzamento entre B e C mesmo sem a barreira geográfica.

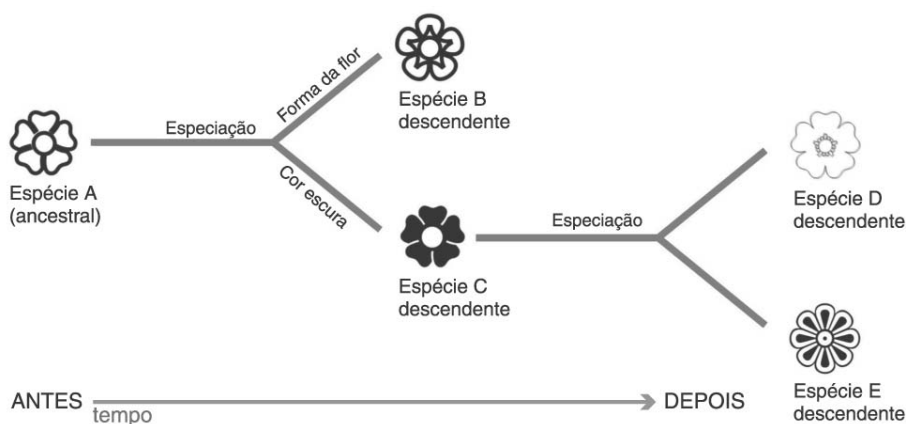
**TEMPO**

Algumas estimativas indicam que o tempo médio necessário para completar uma especiação é de um milhão de anos.

### Mutações vantajosas, desvantajosas e neutras

As mutações terão destinos de acordo com o grau de vantagem que elas promovem no indivíduo, conforme já foi discutido em aulas anteriores. Mutações vantajosas tenderão a se espalhar para toda a população através da seleção natural, pois os indivíduos que as carregam terão maiores probabilidades de sobrevivência, de reprodução e, conseqüentemente, de passar essa mutação vantajosa para todos os seus numerosos descendentes. Mutações desvantajosas serão muito provavelmente eliminadas também pela seleção natural. Além dessas, existem as neutras, guiadas pelo acaso (também chamado de deriva gênica), que poderá aumentar ou diminuir as frequências gênicas de genes neutros indiscriminadamente.

Mais tarde, a espécie C pode ser também dividida pelo aparecimento de um rio que promoverá o isolamento geográfico entre partes de sua população. Da mesma forma, mutações ocorrerão dos dois lados do rio, independentemente, e assim eventualmente também a espécie C irá se dividir em duas espécies, D e E (Figura 3.2).



**Figura 3.2:** Espécie A (ancestral) virando B e C (descendentes). Repare que a espécie C, descendente de A, também pode ser considerada ancestral dando origem às espécies D e E.



E do mesmo modo, sucessivamente, uma espécie se transforma em duas podendo-se concluir que a partir de uma única espécie ancestral surgiu toda a diversidade da vida moderna e passada do planeta.

A melhor maneira de representarmos as relações da **Figura 3.2** é através de uma árvore filogenética. As espécies D e E são filogeneticamente mais próximas entre si do que qualquer delas com a espécie B, pois elas possuem um ancestral comum, a espécie C, que não é compartilhado por B. Repare que, em última análise, todas possuem um ancestral comum, a espécie A. Uma árvore filogenética (ou filogenia) representa graficamente as relações evolutivas entre espécies e apresenta informações em duas dimensões. Na figura, é mostrado o padrão das relações entre os grandes grupos de organismos. No eixo horizontal o tempo é representado.

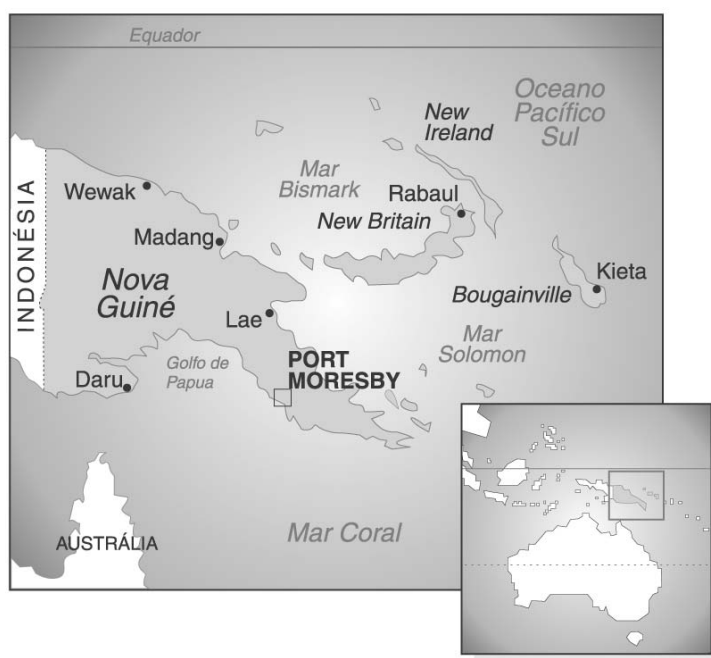
Como a espécie humana vive pouco tempo, não podemos observar processos de especiação diretamente na maior parte das vezes. Como mencionado anteriormente, a análise comparativa é a principal ferramenta para construção de filogenias. Existem hoje análises comparativas com base em diferentes métodos de análise: morfologia, citologia, genética molecular etc. No segundo módulo do curso iremos discorrer sobre metodologias de construção de árvores filogenéticas; por enquanto, apenas os conceitos ligados a ela são importantes e devem ser extensamente compreendidos.

## Espécies

Estamos discorrendo sobre especiação e filogenias, mas realmente o conceito mais fundamental é o de espécie. Ou seja, o que nos faz perceber quando uma espécie se transformou em duas? Naturalmente, o conceito de espécie é central nesse debate.

Para respondermos a essa questão devemos primeiro perguntar: o que vem a ser uma espécie? Espécie é um palavra derivada do latim, e significa tipo ou aparência. No entanto, qualquer tentativa de biólogos em definir espécie esbarra em algum problema. Será que espécies são unidades discretas, reais e relevantes biologicamente?

Isto é, será que o que chamamos de espécies são entidades naturais que representam uma entidade biológica real ou elas foram criadas apenas para facilitar a comunicação entre taxonomistas? Se espécies fossem divisões artificiais, classificações independentes deveriam reconhecer diferentes espécies. Assim, pessoas sem qualquer conhecimento da classificação ocidental deveriam dividir as formas de vida em unidades diferentes daquelas reconhecidas pelos taxonomistas. Na realidade, elas não o fazem. Por exemplo, uma tribo da Nova Guiné (Figura 3.3) reconhece 174 espécies de vertebrados, enquanto os taxonomistas reconhecem 178.



**Figura 3.3:** Mapa da Nova Guiné e sua localização no mapa da Oceania (em detalhe).

A explicação mais óbvia é que espécies são, de algum modo, reais, pois a maneira com que a tribo reconhece uma é independente e semelhante àquela que usamos em taxonomia. Portanto, espécies representam unidades observáveis na natureza em um determinado momento.

Hoje em dia, existe uma concordância entre os pesquisadores da área: espécies são as unidades da diversidade da natureza. O problema aparece quando tentamos definir os limites para essas unidades.

Isso porque temos na natureza espécies com características morfológicas, fisiológicas e ecológicas tão diferentes que caracterizá-las em um único conceito de espécie é tarefa árdua, se não impossível.

Um conceito de espécie deve ser universal para que possamos usá-lo para delimitar espécies de mamíferos, de plantas, de bactérias, de **PROTISTAS**, de cnidários etc. Além disso, ele deve ser naturalmente coerente. Isso significa que ele deverá estar delimitando uma entidade biológica real, cujos limites traduzem algo de relevante sobre a biologia dos indivíduos.

Até hoje, mais de 20 conceitos de espécie foram propostos. Cada um deles enfatiza alguns pontos importantes, embora negligenciando outros. Por exemplo, alguns conceitos são baseados em noções de similaridades (morfológica, genética etc.), outros em capacidade reprodutiva, e outros, ainda, em dados ecológicos, como compartilhamento de **NICHOS ECOLÓGICOS**. Todos os conceitos possuem pontos fracos e pontos fortes. Na realidade, a maior parte dos conceitos foi criada para se adequar aos próprios objetos de estudo dos autores. Não é intenção deste curso trazer tal polêmica à tona, mas simplesmente levá-la ao seu conhecimento. Você terá a oportunidade de se aprofundar sobre a questão das espécies na disciplina de Evolução (no quarto período) deste curso em Ciências Biológicas. No momento, iremos apenas levantar o conceito mais usado na literatura, o conceito biológico.

### Conceito biológico de espécie

Como vimos em alguns exemplos, numa observação de plantas ou animais na natureza você poderá descobrir que o critério de similaridade morfológica para distinguir espécies nem sempre funciona. Ernst Mayr também foi um dos primeiros pesquisadores a ressaltar a importância do cruzamento na caracterização de espécie.

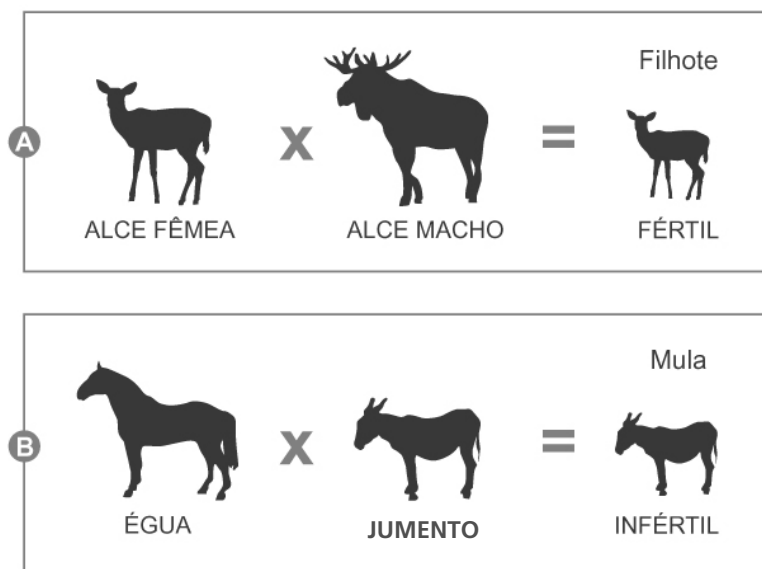
#### PROTISTAS

São organismos eucariontes e unicelulares; você irá saber mais sobre eles nas Aulas 15 e 16.

#### NICHOS ECOLÓGICOS

É o conjunto total de condições sob as quais o indivíduo vive e se reproduz.

Em sua definição, espécies são grupos intercruzantes (ou potencialmente intercruzantes) de populações naturais que são reprodutivamente isolados de outros grupos semelhantes (Figura 3.4).



**Figura 3.4:** Cruzamento com prole fértil é sinal de que os indivíduos representam a mesma espécie (A), cruzamento com prole estéril ou incompatibilidade para cruzamento é sinal de que os indivíduos pertencem a espécies diferentes (B).

O conceito biológico é um dos mais usados em Biologia evolutiva. Isso porque ele enfoca uma característica básica que diferencia o nível espécie dos outros níveis taxonômicos: o cruzamento.

O cruzamento é uma propriedade fundamental para definirmos entidades biológicas reais pois é o cruzamento que promove a disseminação de características para todos os membros do grupo intercruzante, como vimos anteriormente. No entanto, esse conceito também apresenta alguns pontos fracos. Por exemplo, ele é inaplicável quando as populações em questão estão em regiões geográficas diferentes. Isso acontece porque populações alopátricas são incapazes de cruzar, já que a distância entre elas inibe o cruzamento e não porque são espécies diferentes.

Esse conceito também é inaplicável quando pensamos na dimensão temporal. Será que, a espécie de um peixe que habitava um determinado lago há dez mil anos é a mesma que o habita hoje em dia? E a de ontem é a mesma que a de hoje?

No final desse debate fica claro que estabelecer “o que é espécie” não é simples. Algumas evidências apontam na direção de que espécies são unidades reais da natureza, que o problema está no nosso reconhecimento dessas unidades. Isso pode ser porque nós, humanos, somos uma espécie visual. Para nós, o reconhecimento entre coisas diferentes é baseado principalmente em diferenças visuais que elas apresentam. Dessa forma, quando as espécies em questão reconhecem seus semelhantes também por diferenças visuais, podemos ter alguma segurança em que reconhecemos alguma unidade natural. Por exemplo, espécies de aves usam características visuais para reconhecer seus parceiros. Assim, nosso reconhecimento das espécies de aves deve ser melhor do que o de espécies de esponjas que reconhecem umas as outras por elementos químicos.

### ***Drosophila persimilis* x *Drosophila pseudoobscura***

Uma questão interessante é a que ocorre com as moscas do gênero *Drosophila*. Esse gênero é muito importante, já que possui um grande número de espécies, mais de 1.400. Entretanto, duas espécies descritas são peculiares: *Drosophila persimilis* e *Drosophila pseudoobscura*, por serem idênticas morfológicamente. Tais espécies são o que chamamos de crípticas, ou seja, indistinguíveis em termos de sua morfologia. Entretanto, segundo o conceito biológico de espécie, elas são diferentes, já que não se reproduzem entre si. Isso significa que uma fêmea de uma espécie consegue reconhecer como parceiro apenas machos de sua própria espécie, apesar de nós não sermos capazes de fazer essa distinção. Por que um macho de *Drosophila persimilis* reconhece uma fêmea de *Drosophila pseudoobscura* como diferente e não cruza com ela, e vice-versa? Por outro lado, nós, taxonomistas, não conseguimos distingui-las. O que você acha? *Drosophila persimilis* e *D. pseudoobscura* são espécies diferentes ou não? Realmente, o importante biologicamente é que, se uma não cruza com a outra, elas estariam evoluindo independentemente e, portanto, seriam unidades evolutivas diferentes. Em nosso curso, a partir deste momento, chamaremos de espécies diferentes, unidades evolutivas diferentes.

## **Análise comparativa**

Numa análise comparativa, devemos escolher o grupo de características que iremos estudar para traçar as histórias evolutivas com base nelas. Como já mencionamos, todas as espécies vivas e mesmo aquelas que já morreram são descendentes de uma única e primeira espécie ancestral. Essa espécie definitivamente tinha as seguintes características:

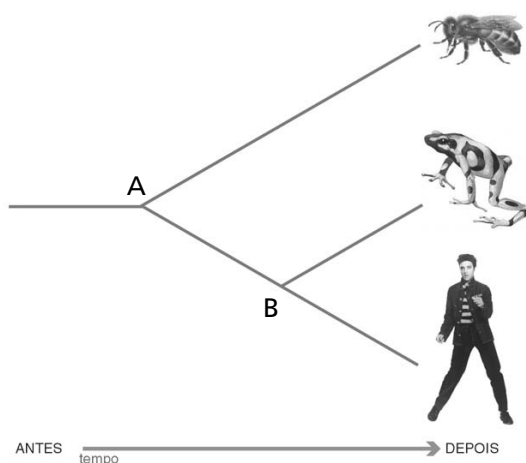
- a) DNA era o material genético;
- b) A catálise de reações químicas era feita através de enzimas (proteínas);
- c) As proteínas eram sintetizadas tendo como molde as cadeias de DNA de acordo com o mesmo código genético (Aula 6);
- d) O DNA era replicado (reprodutibilidade) para originar descendentes idênticos (herdabilidade);
- e) O processo de replicação era passível de erros (mutações).

Comparando cada um dessas características entre as espécies vivas do mundo, verificamos alguns aspectos tão semelhantes e tão complexos, como um código genético de 64 palavras que codificam exatamente os mesmos aminoácidos (ver Aula 6), que ficaria impossível imaginar que todos os organismos adquiriram exatamente essas mesmas características independentemente, ou seja, que este conjunto de atributos surgiu por mutações independentes, em quase todas as espécies existentes, em diversos momentos diferentes do tempo! Vamos ver um exemplo do cotidiano para ilustrar melhor esse ponto. Imagine uma sinfonia completa com 50 instrumentos diferentes. Cada um desses instrumentos contribui para o ritmo harmonioso final. A probabilidade de a mesma sinfonia ter sido vislumbrada por duas pessoas independentemente, sem qualquer conexão entre elas, é muito pequena. Essa probabilidade vai diminuindo conforme mais instrumentos são adicionados e ela fica mais longa.

Da mesma forma, na natureza. Quando nos deparamos com características complexas presentes em mais de uma espécie, a história compartilhada de organismos é a mais simples alternativa para explicar essas semelhanças encontradas.

Nesse caso, características compartilhadas por quaisquer espécies decorreram de mutações que suas linhagens ancestrais sofreram antes dos eventos de especiação que deram origem à diversidade de espécies do grupo. Quanto mais recente é a história compartilhada de dois organismos, mais semelhantes eles serão, pois mais características foram adquiridas durante essa longa história em comum. Mas como é que ocorre a história compartilhada?

Pense em quaisquer três organismos de espécies diferentes. Dois deles possuem uma parte de sua história evolutiva compartilhada que não o é pelo terceiro membro da série. Por exemplo, imagine três organismos muito diferentes: uma abelha, um sapo e o Elvis Presley (**Figura 3.5**).



**Figura 3.5:** Relações filogenéticas, ou de parentesco, entre uma abelha, um sapo e o Elvis Presley.

Entre essas espécies, duas delas são mais próximas evolutivamente entre si. Nesse caso, o Elvis Presley (um mamífero tetrápode) e o sapo (um anfíbio **TETRÁPODE**) possuem um ancestral em comum que a abelha não compartilha. Repare que o eixo horizontal é a representação do tempo e as linhas que juntam as espécies representam as linhagens antes e depois dos dois eventos de especiação (A,B) retratados na figura. Então, pela figura, podemos concluir que o Elvis e o sapo têm um ancestral comum, que era um tetrápode, que não é compartilhado com a abelha.

Todos os mamíferos, incluindo o Elvis Presley, são vertebrados como o sapo. Junto com eles estão as aves, as tartarugas, os lagartos, os peixes ósseos e muitos outros. Isso quer dizer que todos esses organismos possuem uma coluna vertebral que promove a sustentação de seu corpo.

#### TETRÁPODES

São animais com quatro membros. Constituem o grupo dos tetrápodes os mamíferos, as aves, os répteis e os anfíbios.

Como a coluna vertebral é algo extremamente complexo, faz pouco sentido pensar que diversas linhagens adquiriram esta característica independentemente. Se você pensar com cuidado verá que faz mais sentido pensar que essa característica apareceu uma única vez na espécie que deu origem a todos os vertebrados (i.e., na espécie ancestral dos vertebrados), como mostrado na **Figura 3.5**.

Voltando ao nosso exemplo, exatamente no instante em que a abelha se separou da linhagem dos vertebrados essas duas espécies eram idênticas, como as flores no exemplo anterior. Depois do isolamento geográfico, as linhagens foram adquirindo mutações diferentes e se diferenciando aos poucos. A linhagem das abelhas adquiriu patas, asas, olhos compostos; a linhagem dos vertebrados adquiriu coluna vertebral, quatro membros articulados, olhos complexos etc. Por sua vez, quando a linhagem do sapo se separou da linhagem do Elvis (mamíferos), ela também adquiriu suas próprias mutações. A do sapo, por exemplo, sofreu mutações relativas a dedos largos e aderentes, pele lisa, enquanto a dos mamíferos sofreu outras adaptações relativas a glândulas mamárias, pêlos etc. Ficou claro agora?

Você pode estar se perguntando, mas como sabemos disso? Ou seja, como inferimos quais espécies são mais próximas evolutivamente de outras? A resposta é a análise comparativa e a análise filogenética. Por meio da análise comparativa, podemos estabelecer as relações de parentesco de acordo com metodologias específicas que serão aprofundadas na aula Análise Filogenética, do Módulo 2. Por enquanto, devemos primeiro definir as características e compará-las entre as diferentes espécies. Isto é, devemos escolher as características **homólogas**.

#### HOMOLOGIA

É similaridade entre duas características devido a sua origem ancestral comum.

### Homologia

Características homólogas devem suas semelhanças às histórias evolutivas em comum entre os organismos. Por exemplo, o ancestral comum de todas as aves era provavelmente próximo ao *Archaeopteryx*, tinha asa com penas. Como todas as aves apresentam asas, assim como o ancestral comum a todas elas, a asa é uma característica homóloga entre as aves. Podemos olhar para as asas de cada uma das espécies, examinar as semelhanças e as diferenças para traçar a origem das linhagens de aves modernas. Entretanto, nem todas as asas são homólogas.

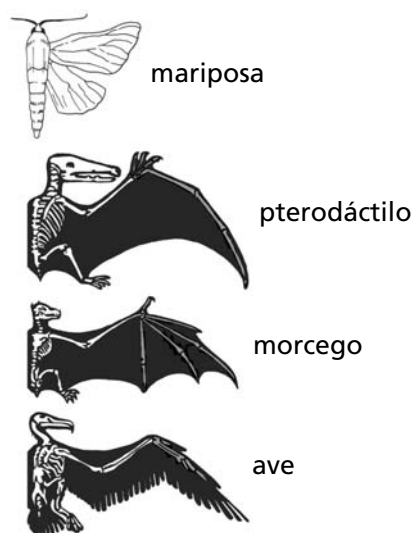


Por exemplo, qualquer observador mais atento verá que a asa de uma mariposa e a asa de um morcego, apesar de terem a mesma função, são características que diferem totalmente quanto a sua estrutura interna (**Figura 3.6**). A asa de uma mariposa não tem qualquer articulação e possui veias. Por outro lado, a asa de um morcego é formada pelo alongamento de seus dígitos. Na realidade, a asa de um morcego, que faz parte do grupo dos mamíferos, é muito diferente da asa de uma ave ou mesmo de um réptil voador antigo, um pterodáctilo. Todas elas servem para a mesma função: voar.

Na realidade, existem dois tipos de similaridades em características: homologias e analogias. Esses termos foram cunhados pelo anatomista britânico Sir **RICHARD OWEN**. Owen descrevia homologia como “...o mesmo órgão [...] em uma variedade de formas e funções...”. Por exemplo, a pata dianteira de um cavalo, o braço humano e a asa de um pássaro são estruturas homólogas. Isso porque eles possuem a mesma estrutura básica: o membro dianteiro com cinco dedos de um animal de quatro membros (tetrápodes, como mamíferos, aves, répteis e anfíbios).

Repare cuidadosamente nessas estruturas que chamamos de asas; suas características básicas são completamente diferentes. E por isso as asas da **Figura 3.6** são chamadas de estruturas análogas, podendo ser definidas como “uma parte de um órgão [...] que possui a mesma função”. As asas de pássaros e de morcegos são ao mesmo tempo homólogas (como membros dianteiros de animais tetrápodes) e análogos (como asas funcionais).

Finalizando, duas características são homólogas quando suas partes semelhantes têm origem ancestral comum. O conceito de homologia cunhado por Owen é extremamente importante em análise comparativa, pois nesse tipo de análise devemos selecionar cuidadosamente as características homólogas e compará-las.



**Figura 3.6:** Asas e membros superiores de vários animais. As características homólogas estão com a mesma tonalidade.

#### **RICHARD OWEN (1804-1892)**

Nasceu em Lancaster, na Inglaterra. Ele se formou em Medicina e se especializou em Anatomia comparada.

## Owen e Darwin

Owen, durante sua vida, teve muita influência como anatomista, e suas palestras eram muito prestigiadas, incluindo em sua plateia membros da realeza londrina em inúmeras ocasiões. Inclusive, ele lecionou História Natural aos filhos da Rainha Vitória, e impressionou a todos quando disse que os girinos se transformavam em sapos durante a vida. Darwin, seu contemporâneo, também assistiu a várias palestras de Owen e era, portanto, familiar a suas idéias. Entretanto, Owen era fixista (ver conceito na Aula 2), ou seja, não acreditava em evolução. Além disso, ele era extremamente arrogante e chegou a se tornar inimigo público de Darwin depois da publicação da *Origem das Espécies*, em 1859.

### RESUMO

Organismos vivos podem nos esclarecer muito sobre sua história evolutiva.

A diversidade dos seres vivos que habitou e habita nosso planeta é fruto de inúmeros processos, que chamamos de especiação. Na especiação, uma espécie se transforma em duas e, eventualmente, essas duas se transformam em quatro e assim por diante. Árvores filogenéticas são representações gráficas dessa história compartilhada entre as espécies. Espécies que são filogeneticamente próximas compartilham muitos caracteres; por outro lado, espécies mais distantes filogeneticamente compartilham menos caracteres. Através de uma análise comparativa de características podemos determinar as relações filogenéticas entre as diferentes espécies. O conceito de homologia é extremamente importante quando vamos selecionar as características para serem usadas na análise. Dois caracteres são homólogos quando suas similaridades são decorrentes de sua origem ancestral comum.

### EXERCÍCIOS

1. Qual a semelhança entre história filogenética e história genealógica?
2. Qual o modelo de especiação mais frequente? Por quê?
3. Quais são os problemas do conceito biológico de espécie?
4. O que é homologia?

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Compreender os conceitos introdutórios à Taxonomia dos seres vivos.
- Distinguir a importância da Taxonomia na Biologia.

## Pré-requisito

O aluno deverá conhecer bem os conceitos de populações, espécies, classificação, especiação e extinção.

## TAXONOMIA E O SEU COTIDIANO

A Taxonomia é o campo da Biologia que estuda, descreve e classifica todos os organismos em grupos taxonômicos. Como já vimos na Aula 1, a Taxonomia é um campo muito importante, não apenas para os cientistas, como também para o público em geral. Quando você ouve na televisão que “uma espécie da família tal foi encontrada na Mata Atlântica”, a reportagem está se referindo ao sistema de classificação hierárquico criado por Lineu (relembre sua biografia na Aula 2).

Um outro exemplo que podemos encontrar em nosso cotidiano é quando alguém fala que “tal espécie é ‘prima’ da outra espécie”; essa pessoa está também se referindo ao sistema de classificação de Lineu. Você também já deve ter ouvido falar em nomes científicos. Pois é, é justamente através desse sistema hierárquico que os cientistas provêm e são providos dos chamados “nomes científicos” de todas as espécies. Por exemplo, os seres humanos são conhecidos cientificamente como membros da espécie *Homo sapiens* (Figura 4.1), da Família Hominidae, da Ordem Primates, da Classe Mammalia.



**Figura 4.1:** Toda a diversidade humana pertence a uma única espécie: *Homo sapiens*.

Existem cerca de dois milhões de espécies já descritas pelos pesquisadores em todo o mundo. Imagine que você é um pesquisador do século XV, que foi contratado em um determinado museu, mas você não conhece nenhum sistema de classificação. Se você fosse propor um sistema de classificação para organizar essas espécies em grupos, que tipo de critério você usaria? Vamos imaginar por exemplo, que você proponha um sistema de classificação no qual o critério de classificação seja presença de olhos.

Então, por esse sistema teríamos dois grandes grupos: os Ocellata (com olhos) e o Aocellata (sem olhos). Tudo bem, sem problemas. Mas por que o critério olhos? Não poderíamos usar o critério patas? Ou o critério cor? Será que o critério “presença ou ausência de olhos” tem mais sentido biológico do que o critério “presença ou ausência de patas”? Na realidade, não. Um critério é biologicamente indistinguível do outro, ou seja, equivalentes e assim cada pesquisador iria escolher um critério diferente do último que estudou o grupo.

Imagine só a confusão que seria se a cada momento mudássemos as definições de palavras da Língua Portuguesa. Pois é, na classificação biológica, também precisamos de estabilidade para promover e facilitar a comunicação entre os pesquisadores e o público em geral. Na última aula vimos que todas as espécies estão relacionadas evolutivamente e que elas possuem um ancestral em comum e que espécies mais próximas filogeneticamente compartilham uma maior parcela de sua história evolutiva e um ancestral comum mais recente. Por outro lado, espécies mais distantes filogeneticamente evoluem independentemente há mais tempo e seu ancestral comum viveu há mais tempo. Nesta aula iremos fazer uma introdução ao sistema atual de nomenclatura biológica, discorrer sobre a sua importância fundamental em Biologia e saber como a história filogenética das espécies se encaixa nesse sistema de classificação.

### **A importância da comunicabilidade**

A Taxonomia surgiu no século XVII, quando Lineu criou um sistema hierárquico de nomenclatura. Esse sistema tão antigo ainda é a base fundamental para nosso esquema atual de nomenclatura, descrição e classificação dos organismos. A Taxonomia é a ciência que descreve e classifica os organismos vivos.

Por exemplo, imagine que você esteja fazendo uma excursão de campo na Mata Atlântica e se depara com o organismo da **Figura 4.2** bebendo água num riacho.



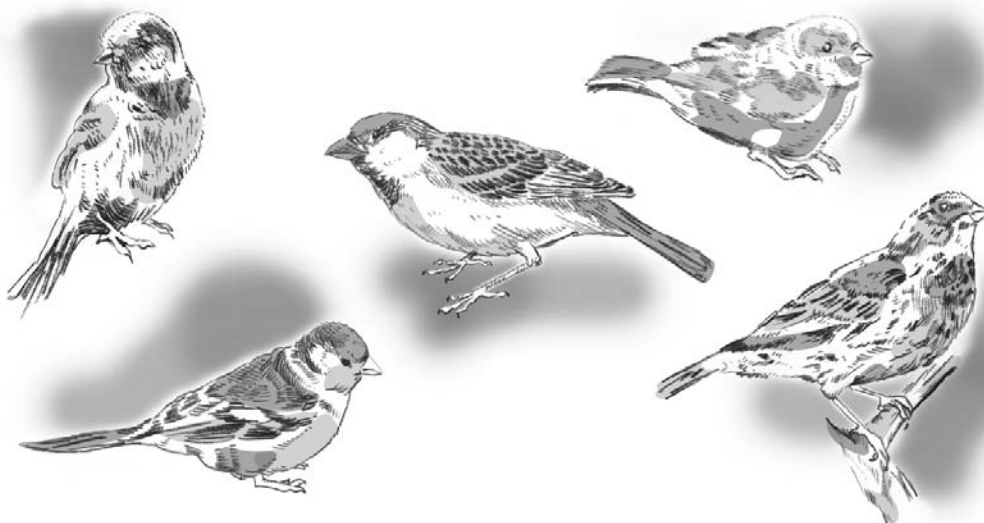
**Figura 4.2:** Onça pintada bebendo água no riacho.

Quando você retorna da excursão, o professor pergunta-lhe o que você encontrou na floresta. No caso do organismo acima, o animal é suficientemente conhecido e você dispõe de palavras para descrevê-lo. Ou seja, se você mencionar “**onça pintada**”, seu professor imediatamente saberá o que você encontrou na sua excursão.

Entretanto, o que aconteceria se o organismo que você avistou na excursão fosse desconhecido pelo público em geral e não tivesse um nome em português? Nesse caso, você provavelmente recorreria à seguinte descrição: animal de quatro patas, pesando aproximadamente 100 quilos, com garras grandes, dentes afiados, feições que lembram as de um gato doméstico e com o corpo coberto por uma pelagem amarela, com manchas pretas, do tamanho de uma noz. Dessa forma, o professor poderia ter uma idéia do que você encontrou. Mas repare que essas trinta e nove palavras têm, na melhor das hipóteses, o mesmo efeito de apenas duas: onça pintada.

Dizendo unicamente “onça pintada”, conseguimos nos comunicar mais facilmente sem recorrer a uma descrição detalhada do organismo cada vez que temos de mencioná-lo.

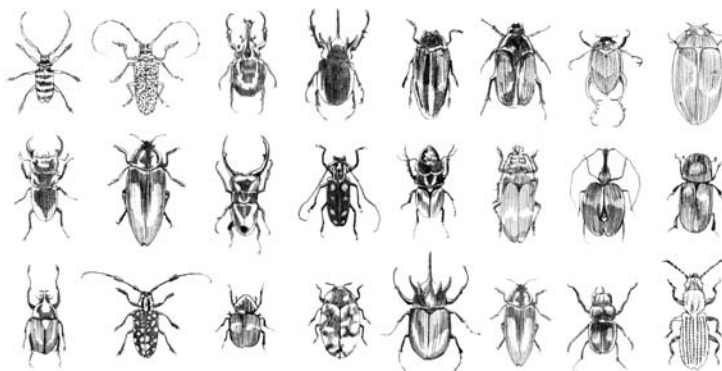
No caso de mamíferos, boa parte das espécies é conhecida do grande público pelo nome comum, mas e no caso de outros organismos não-mamíferos? Certos grupos são menos conhecidos do grande público e por essa razão um nome diz respeito a um grupo maior de espécies reconhecidas cientificamente. A palavra “pardal”, por exemplo, se refere a diversas espécies de pássaros. Portanto, se você avistasse um pardal na excursão, você deveria mencionar não apenas a palavra pardal, mas também uma descrição breve do animal, para que o professor soubesse exatamente o que você viu no passeio (Figura 4.3).



**Figura 4.3:** Essa figura mostra uma parcela da diversidade de pardais que existem na natureza. Se você disser que viu “um pardal” na sua excursão, como saber qual tipo de pardal foi avistado?

A questão se complica mais quando estamos lidando com organismos menores e menos conhecidos do grande público do que com mamíferos ou aves. No caso de **besouros**, por exemplo, a situação fica ainda pior, porque essa única palavra diz respeito a mais de 350.000 espécies! Imagine encontrar palavras para distinguir cada uma dessas 350.000 espécies para explicar ao seu professor exatamente o que você viu na excursão... Impossível, não é mesmo?

Note que a questão central ainda é a comunicabilidade. Quando você fala que encontrou uma onça pintada, o professor sabe exatamente que espécie você encontrou na mata. No entanto, quando você fala que encontrou um besouro, o professor restringe a imaginação dele para 350.000 espécies (Figura 4.4), ou seja, ele não sabe exatamente o que você viu na excursão.



**Figura 4.4:** Que besouro você avistou na excursão? A diversidade dos besouros é muito maior do que a amostra acima!

A questão ficaria mais complicada ainda se você tivesse de relatar seus achados a uma pessoa que não falasse português? É evidente que os pesquisadores precisam de uma linguagem de comunicação abrangente (aplicável a toda a diversidade biológica: plantas, fungos, esponjas, mamíferos) e universal (usável por todos os pesquisadores, independente de sua língua natal). Assim, eles poderiam se comunicar falando de qualquer organismo, mesmo aqueles menos conhecidos do público em geral.

#### ROEDORES

Representam o grupo de mamíferos mais numeroso em termos de número de espécies descritas. Ratos, camundongos e esquilos pertencem a esse grupo. O maior roedor do mundo, conhecido cientificamente pelo nome *Hydrochoerus hydrochaeris*, é a nossa capivara. Esse animal pode chegar até 90 kg e pode ser encontrada facilmente no Pantanal Matogrossense.

#### Primeira linguagem científica: o latim

Como mencionamos anteriormente, a comunicação entre pesquisadores pode ser complicada. Vamos tomar inicialmente a questão da linguagem. Imagine um pesquisador alemão, um chinês, um japonês, um francês, e um brasileiro. Pense que todos eles trabalham com o mesmo grupo de mamíferos, por exemplo, **ROEDORES**. Eles trabalham publicando descrições, em sua própria língua, das espécies encontradas em seus respectivos países. Imagine como o francês iria saber se determinada espécie A já tinha sido descrita na Alemanha e, portanto, uma nova descrição se tornaria irrelevante e sem sentido.



Nesse caso, cada um desses pesquisadores deveria aprender todas as línguas de todos os pesquisadores do mundo para poder trocar informações de maneira eficiente. Seria impossível.

A difusão do conhecimento científico através da **COMUNICAÇÃO** é fundamental para sabermos o que já foi feito, se já foi publicado, para que possamos sempre andar mais adiante. Portanto, uma linguagem universal não é apenas importante mas condição fundamental, como vimos no exemplo citado. A comunicação será implementada, desde que todos os pesquisadores do mundo tenham que saber somente uma língua adicional além da sua língua natal. Por isso, já no século XV, o primeiro passo para facilitar a comunicação entre pesquisadores foi adotar o latim como linguagem científica. Assim, todos os pesquisadores publicavam seus trabalhos em latim e os novos organismos eram descritos nessa língua. Cada pesquisador que encontrasse uma nova espécie a descrevia em latim e, assim, essa descrição ficava disponível para todos.

#### COMUNICAÇÃO

Pesquisadores importantes em todas as áreas da ciência publicam seus achados em revistas. Dessa forma, a pesquisa científica avança mais facilmente, pois os resultados de um pesquisador podem ser utilizados por pesquisadores do mundo todo.

#### O ESPERANTO

Hoje em dia, a maior parte das grandes revistas do mundo recebem e publicam artigos em inglês e, assim, o inglês substituiu o latim como linguagem científica. Por exemplo, um pesquisador alemão deve aprender além do alemão, sua língua materna, o inglês. Isso é importante porque na maior parte dos congressos e encontros científicos internacionais, a língua é o inglês. A maioria das revistas importantes nas diversas áreas do conhecimento publicam apenas artigos científicos escritos em inglês. Recentemente, surgiu um movimento para que a linguagem universal na Terra fosse o esperanto. Uma questão interessante é que o esperanto não é uma língua originalmente falada por um país, isto é, foi uma linguagem criada. O desenvolvimento do esperanto se deu de maneira que congregasse porções de todas as línguas faladas no mundo. Palavras similares presentes em diversas línguas facilitariam o aprendizado do esperanto a todos os povos da Terra. Assim, para que todo mundo pudesse se comunicar com todo mundo, cada pessoa deveria aprender apenas duas línguas: a sua materna (falada por seus pais) e o esperanto. Dessa maneira, a cultura individual de cada país seria preservada e todos os povos do mundo poderiam se comunicar. Um ponto central na criação do esperanto é que como ele não é empregado oficialmente em nenhum país, ninguém teria vantagem a princípio.



#### Esperanto

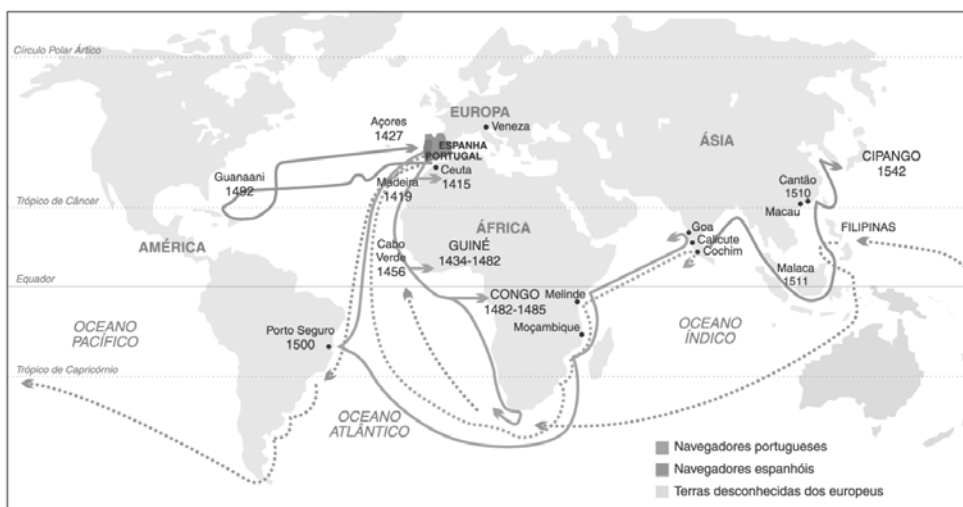
Saiba mais sobre o esperanto no site da Web [www.esperanto.org.br](http://www.esperanto.org.br)

## Sistemas de classificação

Então voltando à classificação biológica, vamos iniciar por definir sistema de classificação, que é um conjunto de regras seguidas pelos taxonomistas para classificar os organismos. O primeiro sistema de classificação criado, portanto, foi dar nomes em latim que descrevessem perfeitamente os organismos. No entanto, esse sistema logo se tornou obsoleto por dois motivos. O primeiro deles foi a extensão dos nomes. Usavam-se, por vezes, 15 palavras para descrever uma única espécie. Por exemplo, uma planta semelhante ao cravo era denominada da seguinte forma: *Dianthus floribus solitariis, squamis calycinis subovatis brevissimus, corollis crenatis*. (Hoje em dia é conhecido simplesmente por *Dianthus caryophyllus*.) Ou seja, os nomes descreviam a aparência externa do organismo. Repare que os nomes em geral servem para facilitar a comunicação. Se eu menciono “mesa” você imediatamente sabe o que eu estou falando e eu não preciso usar a descrição de mesa: tampo de madeira, com pés que servem para sustentação. Portanto, nomes descritivos tinham pouca utilidade, porque os pesquisadores tinham de usar muitos nomes para cada organismo e isso dificultava a leitura de um texto científico.

O segundo motivo: o pesquisador descrevia um dado organismo, acreditando que as características por ele escolhidas eram as mais marcantes. Esses dois motivos afetavam a comunicabilidade do sistema e, por consequência, o sistema se tornou obsoleto rapidamente.

Esse problema da comunicabilidade ficou crítico a partir do século XV, quando as grandes navegações avançaram pelo mundo (**Figura 4.5**) trazendo para a Europa plantas e animais oriundos das mais remotas e diversas regiões do globo.



**Figura 4.5:** As rotas das grandes navegações.

Especialistas em Botânica e em Zoologia se encarregavam de descrever minuciosamente cada um dos milhares de organismos coletados. O trabalho de descrição e identificação das espécies, antes difícil, se tornou rapidamente impossível com o número e a diversidade de organismos que ali chegavam. Os biólogos claramente necessitavam de um sistema único, estável e conciso para nomear os organismos.

## O Sistema binomial

O botânico sueco Carolus Linnaeus (veja biografia na Aula 2) desenvolveu um método de nomenclatura chamado sistema binomial. Esse sistema é usado até hoje por taxonomistas do mundo inteiro quando descrevem os organismos. Cada espécie recebe um nome dito “específico”, constituído de duas partes. A espécie da **Figura 4.2**, a onça pintada, é conhecida por toda comunidade científica mundial pelo sistema binomial como *Panthera onca*.

A nomenclatura de cada espécie descrita deve seguir uma série de regras, minuciosamente detalhadas no Código de Nomenclatura Zoológica ou no Código de Nomenclatura Botânica. O nome, em latim, deve vir destacado no texto, por exemplo, em itálico, em egrito ou sublinhado. A primeira parte do nome — *Panthera* — é o nome do gênero. Note que o nome do gênero começa sempre e necessariamente com letra maiúscula.

### ESPONJAS

São animais invertebrados que se alimentam de partículas dissolvidas na água. A maior parte das espécies é marinha, mas algumas vivem em água doce. Algumas espécies de esponjas possuem pequenas partículas duras que chamamos de espículas, o conjunto de espículas forma o esqueleto interno desses organismos. Uma curiosidade sobre esses animais é que algumas espécies de esponjas já foram usadas para escovar os dentes de nossos antepassados! Hoje em dia, esponjas de banho naturais são feitas a partir de espécies de esponjas sem espículas.

### CNIDÁRIOS

São invertebrados marinhos em sua maioria. Um dos exemplos mais bem conhecidos são as chamadas águas-vivas que vemos na praia de vez em quando. Algumas espécies, como a caravela, podem provocar irritações e queimaduras graves quando encostam na nossa pele.

### LEONARDO DA VINCI (1452-1512)

Nasceu em Vinci. Foi pintor, escultor e nas horas vagas se dedicava à ciência. Seu quadro mais importante foi a *Mona Lisa*, que atualmente se encontra no Museu do Louvre, em Paris.

A segunda parte do nome — *onca* — sempre começa com letra minúscula. Em geral, o nome que designa a espécie resalta alguma característica morfológica da espécie. Por exemplo, o nome científico do tamanduá-bandeira é *Mimercophaga tridactyla*, onde *tri* significa três e *dactyla* significa dedos. Uma das características desse tamanduá é o fato de ele possuir três dedos, enquanto o tamanduá-mirim possui quatro dedos (*Tamandua tetradactyla*).

O nome que designa a espécie pode também lembrar o lugar onde ela ocorre. Por exemplo, *Clathrina* é um gênero de **ESPONJA** marinha que ocorre no mundo inteiro. Especialistas brasileiros em esponjas denominaram uma espécie deste gênero como *Clathrina brasiliensis*.

Nenhum outro grupo animal — um inseto, uma ave, ou outro mamífero — pode ter o mesmo nome para gênero. Ou seja, entre os animais, *Panthera* é um gênero de mamíferos, carnívoros, felinos de grande porte. No entanto, o mesmo nome de um gênero pode ser usado para animais e plantas. Por exemplo, o gênero *Cereus* é um **CNIDÁRIO** em animais e, em plantas, representa um gênero de cactus.

Outros nomes de gênero são esquisitos e impronunciáveis, como aquele que designa um primata já extinto, *Ekgmowechashala*!

### CURIOSIDADES TAXONÔMICAS

Na realidade, o pesquisador que descreve pela primeira vez uma espécie tem liberdade de escolher qualquer nome para descrever o organismo. Outros pesquisadores escolhem homenagear pessoas importantes para o cientista ou mesmo personalidades famosas. Por exemplo, uma espécie de mariposa tem o nome de *Leonardo davincii*, em homenagem ao pintor e cientista **LEONARDO DA VINCI**. Uma espécie de aranha leva o nome de *Calponea harrisonfordi*,

em homenagem ao famoso ator de cinema **HARRISON FORD**. Outros nomes prestam homenagem a personagens fictícios, como o gênero de crustáceo *Godzillius*, que homenageia o monstro Godzilla ou o gênero de peixes *Batman*, que homenageia o super-herói. Outros nomes de espécies denotam a falta de criatividade do autor que as descreveu, como o pesquisador Kearfoot, em 1907, descreveu 37 espécies de mariposas do gênero *Eucosma* com os seguintes nomes: *Eucosma bobana*, *E. cocana*, *E. dodana*, *E. fofana*, *E. hohana*, *E. kokana*, *E. lolana*, *E. momana*, *E. popana*, *E. rorana*, *E. sosana*, *E. totana*, *E. vovana*, *E. fandana*, *E. gandana*, *E. handana*, *E. kandana*, *E. mandana*, *E. nandana*, *E. randana*, *E. sandana*, *E. tandana*, *E. vandana*, *E. wandana*, *E. xandana*, *E. yandana*, *E. zandana*, *E. nomana*, *E. sonomana*, *E. vomonana*, *E. womonana*, *E. boxeana*, *E. canariana*, *E. foridana*, *E. idahoana*, *E. miscana*, *E. subinvicta*.



#### HARRISON FORD

Nasceu em Chicago (EUA) em 1942. Foi carpinteiro antes de ser escolhido para trabalhar nas trilologias de grande sucesso, *Guerra nas Estrelas* (direção de George Lucas) e *Indiana Jones* (direção de Steven Spielberg).

## O sistema hierárquico

Entretanto, não existem apenas as categorias gênero e espécie no sistema de Lineu. Na realidade, diversos níveis de classificação são agrupados hierarquicamente da seguinte forma: Domínios, Reinos, Filos, Classes, Ordens, Famílias, Gêneros e Espécies. Ou seja, um gênero contém várias espécies; da mesma forma, uma família contém vários gêneros; uma ordem várias famílias e assim por diante. Enquanto o nome específico deve sempre estar enfatizado no texto, itálico ou sublinhado, isso não se aplica a outras categorias como famílias, ordens etc.

Todos os nomes científicos são provenientes do latim ou da “latinização” de outros nomes; por essa razão nunca apresentam acentos.

Voltando à nossa onça pintada da **Figura 4.2**, a espécie *Panthera onca* pertence ao gênero *Panthera* da Família Felidae. Outros felinos conhecidos como o leão (*Panthera leo*) e o leopardo (*Panthera pardus*) também pertencem ao mesmo gênero da onça. O gato doméstico pertence a um outro gênero de felinos, *Felis*, e seu nome científico é *Felis catus*. A Família Felidae, por sua vez, pertence à Ordem Carnivora, junto

a todos os carnívoros (cachorro, lobo, coiote, gato, leão, ariranha, foca, leão marinho). A Ordem Carnivora pertence à Classe Mammalia, junto a todos os mamíferos (cachorro, gato, ariranha, foca, boi, macaco-prego, lebre, camundongo, baleia, golfinho, elefante, zebra, cavalo etc.). A Classe Mammalia pertence ao Filo Chordata (cordados) que, por sua vez, pertence ao Reino Animalia (animais) do Domínio Eukarya (eucariontes).

Não se assuste se parecer nomes demais para decorar. Você vai entender mais profundamente a Taxonomia, no curso de Introdução à Zoologia no segundo período. O importante nesse momento é você saber que esses nomes ou níveis taxonômicos são hierarquicamente diferentes.

A relação hierárquica entre os nomes é mostrada na **Tabela 4.1**.

**Tabela 4.1:** Classificação taxonômica de quatro espécies de eucariontes.

	Ser humano	Chimpanzé	Formiga	Girassol
<b>Domínio</b>	Eukarya	Eukarya	Eukarya	Eukarya
<b>Reino</b>	Animalia	Animalia	Animalia	Plantae
<b>Filo</b>	Chordata	Chordata	Arthropoda	Anthophyta
<b>Classe</b>	Mammalia	Mammalia	Insecta	Dicotyledones
<b>Ordem</b>	Primates	Primates	Hymenoptera	Asterales
<b>Família</b>	Hominidae	Hominidae	Formicidae	Compositae
<b>Gênero</b>	<i>Homo</i>	<i>Pan</i>	<i>Solenopsis</i>	<i>Helianthus</i>
<b>Espécie</b>	<i>Homo sapiens</i>	<i>Pan troglodytes</i>	<i>Solenopsis aevisissima</i>	<i>Helianthus annuus</i>

Nela vemos a classificação da nossa espécie (*Homo sapiens*) comparada à classificação de um outro primata (chimpanzé), de um invertebrado (formiga) e de uma planta (girassol). Ao longo de nosso curso, iremos percorrer sobre a diversidade dos diferentes organismos e como essa diversidade foi gerada. Por exemplo, nas Aulas 29 e 30 iremos ver a evolução dos mamíferos; nas duas últimas Aulas do curso (31 e 32) teremos uma noção geral sobre evolução humana. Essas categorias que estão especificadas na **Tabela 4.1** são usadas para todos os organismos; no entanto, quando a diversidade de espécies é muito grande em uma determinada categoria os cientistas criam novos níveis hierárquicos. Os taxonomistas do gênero de moscas *Drosophila*, por exemplo, usam quatro outros níveis taxonômicos entre gêneros e espécies: subgêneros, grupos, subgrupos e complexos de espécies para conseguir separar as mais de 1.500 espécies de *Drosophila* já descritas.

Você se lembra que no início da aula estávamos falando em critérios para definir grupos? Pois é, idealmente, grupamentos taxonômicos devem ter como critério a história filogenética dos organismos. Isso significa que os grandes grupos de espécies, de gêneros, de famílias refletem os padrões filogenéticos discutidos na aula anterior. Por exemplo, os eucariontes (classificados no Domínio Eukarya) são descendentes de uma espécie que apresentou uma membrana nuclear pela primeira vez.

O envoltório nuclear que protegia o DNA foi tão importante que essa mudança foi passada a seus descendentes e aos descendentes deles, e os inúmeros eventos de especiação geraram essa diversidade de eucariontes que encontramos hoje em dia. Os mamíferos possuem uma história e um ancestral em comum que não é compartilhada por nenhuma ave. Assim, eles são classificados em um grupo exclusivo, a Classe Mammalia. Ou seja quanto mais recente for o ancestral de um grupo, uma maior número de grupamentos taxonômicos o grupo todo terá em comum.

#### UM POUCO MAIS SOBRE *DROSOPHILA*

O gênero *Drosophila* é um gênero muito importante de moscas que servem como modelos. Um modelo experimental como *Drosophila* é usado para testar hipóteses científicas por meio de experimentos com esses organismos. A mosca do tipo *Drosophila* é bem diferente da mosca comum. Ela é tão pequena que até pode ser confundida com um mosquito. Faça um experimento. Coloque uma banana descascada dentro de um vidro de maionese lavado e sem tampa na área da sua cozinha. Depois de alguns dias, volte ao local com um pedaço de pano fino (pode ser uma meia fina, ou seda) e um elástico de cabelo. Coloque o pedaço de pano tapando a boca do vidro e passe o elástico em volta para firmar o pano. Armazene os animais encontrados no vidro para levar ao laboratório quando puder e dê uma olhada na lupa. Verifique se eles se assemelham aos da **Figura 4.6**.



**Figura 4.6:** *Drosophila melanogaster*. A mosquinha da fruta.

## Considerações finais

Esta aula serviu como ponto de partida para começarmos a entender e organizar o pensamento sobre a diversidade das espécies. Na próxima aula iremos fazer uma breve introdução sobre a seleção natural, o mecanismo proposto por Darwin para explicar a evolução das espécies.

### RESUMO

A Taxonomia surgiu no século XVII, quando um sistema hierárquico de nomenclatura foi criado. Esse sistema tão antigo ainda é a base fundamental para nosso esquema atual de nomenclatura, descrição e classificação dos organismos. A Taxonomia é a ciência de classificar e descrever os organismos vivos. Por classificar, devemos entender que é uma ciência que auxilia na comunicabilidade, ou seja, na habilidade de trocar informações entre pessoas. O primeiro grande passo para aumentar o fluxo de informações foi o emprego de uma linguagem única entre pesquisadores de todo mundo, o latim. O segundo foi a adoção do sistema binomial e hierárquico criado pelo botânico sueco Carolus Linnaeus. No sistema de Lineu, o nome de cada espécie é composto por duas partes. A primeira parte é o nome do gênero e a segunda é a que designa a espécie a que o organismo pertence. Por exemplo, nós, seres humanos, pertencemos à espécie *Homo sapiens*.

O sistema lineano também é um sistema hierárquico onde níveis taxonômicos menos abrangentes estão incluídos dentro dos maiores. Por exemplo, várias espécies estão designadas a um único gênero, vários gêneros estão designados a uma família e assim sucessivamente até os domínios, que constituem o nível taxonômico mais abrangente.

## EXERCÍCIOS

1. O que é comunicabilidade?
2. Como funciona o sistema de nomenclatura atual? Em que ele difere dos sistemas usados antes de Lineu?
3. Qual a importância da Taxonomia?
4. Qual a relação entre Taxonomia e Filogenia?



## Seleção natural

AULA

5

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

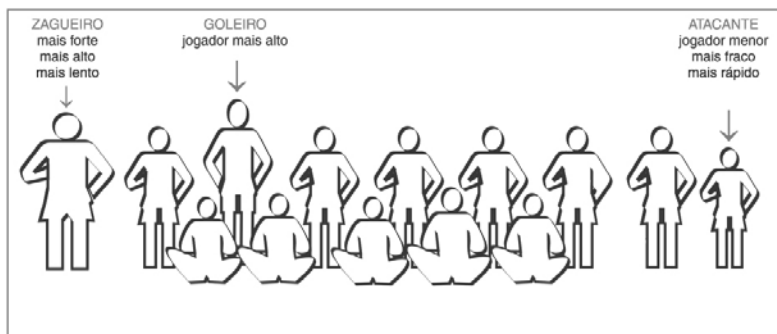
- Familiarizar-se com o conceito de seleção natural em populações.
- Aperfeiçoar a idéia de que a variabilidade das populações é gerada ao acaso, através de erros da enzima responsável pela replicação do DNA.

### Pré-requisitos

Conceitos de seleção, base genética, acaso, fenótipo, genótipo, dominância, recessividade, heterozigose e homozigose.

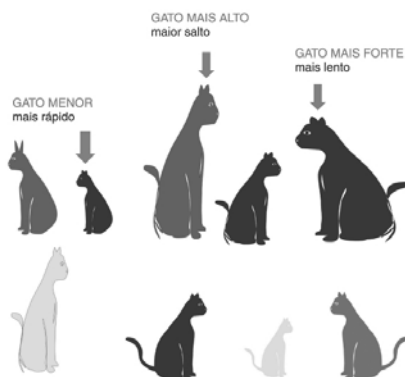
## SELEÇÃO NATURAL

Nesta aula vamos falar sobre o mecanismo proposto por Darwin para explicar como acontecia a evolução dos seres vivos, a seleção natural. Mas, para entendermos o que é seleção natural, vamos começar definindo o que é seleção de uma maneira geral. Uma seleção conhecida de todos é a nossa pentacampeã seleção brasileira de futebol. Então, vamos pensar como a seleção brasileira de futebol foi formada. A seleção brasileira reúne um grupo de jogadores de futebol que apresentam as melhores características específicas (Figura 5.1).



**Figura 5.1:** Seleção brasileira de futebol. Repare que cada jogador foi selecionado por uma determinada característica para jogar numa posição específica.

O jogador que consegue pular mais alto é escalado como goleiro, o mais rápido como atacante e assim por diante, o técnico escala toda a seleção brasileira. Essas características específicas dos jogadores permitem que a seleção brasileira jogue futebol melhor do que um conjunto aleatório do restante da população. Portanto, o processo seletivo, ou a triagem, de jogadores para um time de futebol acontece de uma maneira semelhante ao processo natural da seleção nos seres vivos (Figura 5.2).



**Figura 5.2:** A seleção natural promove uma triagem onde os organismos que apresentam as características mais vantajosas para o ambiente em que vivem têm maiores probabilidades de sobrevivência, ..., para seus descendentes. No exemplo acima, cada uma das características citadas pode ser mais vantajosa em um determinado ambiente.

Na seleção brasileira, quem escala é o técnico e na natureza quem “escala” é o ambiente de maneira geral.

Vamos pensar mais sobre isso. Semelhante ao que acontece na seleção brasileira, o processo de seleção natural tria naturalmente um grupo de organismos que apresenta as melhores características para o ambiente em que vivem. A seleção natural se baseia no fato de haver probabilidades diferenciadas de sobrevivência (fecundidade diferencial) e, portanto, de reprodução entre organismos com diferentes características. Assim, se um determinado organismo apresenta características que lhe confirmem uma vantagem na hora de conseguir comida, ou de escapar de um predador esse organismo é selecionado naturalmente para sobreviver. No caso da seleção brasileira, características como habilidade com a bola, força no chute, altura, velocidade, são as características que determinam a seleção dos jogadores pelo técnico.

Agora vamos ver um exemplo da natureza. Digamos que em uma determinada população de leões, por exemplo, todos os indivíduos apresentavam um determinado gene A. Esse gene A codificava uma proteína que atuava na visão dos organismos e os permitia enxergar perfeitamente qualquer presa que estivesse a 100 metros de distância. Num certo momento, uma leoa dessa população deu à luz um filhote mutante para o gene B. Com esse gene B, o filhote conseguia enxergar perfeitamente a 200 metros de distância. Assim, durante um período de seca durante o qual muitos organismos morreram e presas eram difíceis de serem encontradas, o filhote portador do gene B teria maior probabilidade de encontrar alimento, portanto, de sobreviver e de se reproduzir. Ao reproduzir-se, o indivíduo, agora adulto, passa para seus descendentes o gene B vantajoso. Isso ocorre de geração para geração até que todos os indivíduos da população de leões possuam o gene B. O processo que seleciona características vantajosas é chamado de **SELEÇÃO NATURAL**. Como consequência, a característica vantajosa de um indivíduo irá se espalhar por toda população em algumas **GERAÇÕES**.

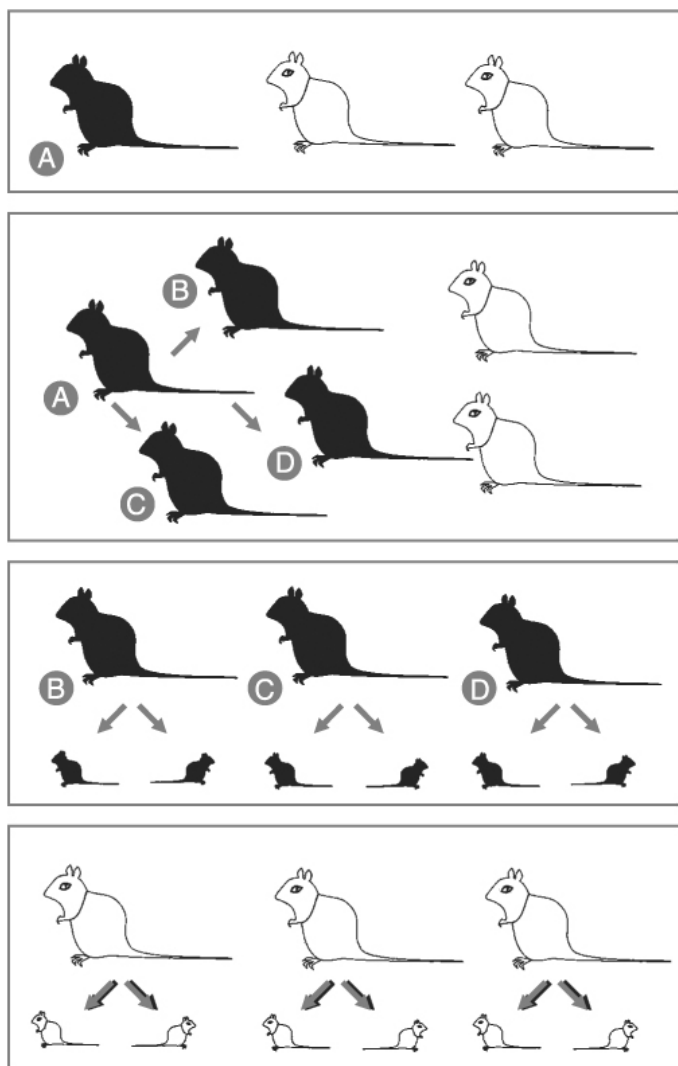
#### SELEÇÃO NATURAL

É definida como fecundidade diferencial na natureza entre organismos que possuem características adaptativas e aqueles que não as possuem.

#### GERAÇÃO

Pode ser definida como cada grau de filiação de pai a filho, ou de ascendente para descendente.

A Figura 5.3 apresenta o espalhamento da característica cor da pelagem através das gerações de ratos. Repare que, neste exemplo, a seleção natural vai fazer com que a característica “cor preta” se espalhe na população. Os indivíduos marcados com uma letra são aqueles com maior probabilidade de sobrevivência e que deixaram mais filhotes também com essa característica vantajosa.



**Figura 5.3:** O processo de espalhamento da característica vantajosa pela população, através das gerações.

Uma hipótese para explicar a vantagem seletiva dos indivíduos com a pelagem preta é que o ambiente onde esses ratos viviam era mais escuro, fazendo que os indivíduos com pelagem mais clara ficassem mais visíveis a predadores.

A seleção natural pode agir em caracteres morfológicos, anatômicos, fisiológicos ou bioquímicos. Entretanto, a seleção natural só pode atuar em características herdadas geneticamente. Ou seja, caso a variação entre indivíduos não tenha base genética (para revisão, veja Aula 2), a seleção não irá conseguir selecionar a característica vantajosa, pois os descendentes do organismo não serão portadores da característica.

### SELEÇÃO NATURAL *VERSUS* ARTIFICIAL

Darwin, quando propôs a idéia de seleção natural, pensou primeiramente na seleção artificial. Se os fazendeiros que cuidavam de gado leiteiro podiam selecionar vacas que produziam mais leite para cruzamento e na geração seguinte a produção de leite aumentaria, por que não imaginar que o mesmo processo pode ocorrer naturalmente? A criação de novas formas por evolução requer apenas variabilidade e uma “peneira” capaz de selecionar alguns indivíduos para a reprodução e bloquear outros indivíduos.

A idéia geral é que existe uma superprodução de indivíduos na natureza. Cada organismo produz muito mais filhos (filhotes) do que aqueles que sobreviverão para se reproduzir. Além disso, existe variação entre os filhotes, sendo que boa parte dessa variação não é observável diretamente. Se um organismo possui uma característica benéfica, ele, naturalmente, terá uma maior probabilidade de sobrevivência e, portanto, de reprodução. Dessa forma, ele passará a característica benéfica para seus descendentes. Como os filhos desse indivíduo herdarão a característica benéfica, a probabilidade de eles sobreviverem e se reproduzirem também será alta. Dessa forma, a característica irá não apenas se manter como também aumentar de frequência na população. Da mesma maneira, se um indivíduo possuir uma característica deletéria a probabilidade dele morrer aumentará e, assim, a característica será eliminada da população rapidamente, através da seleção natural.

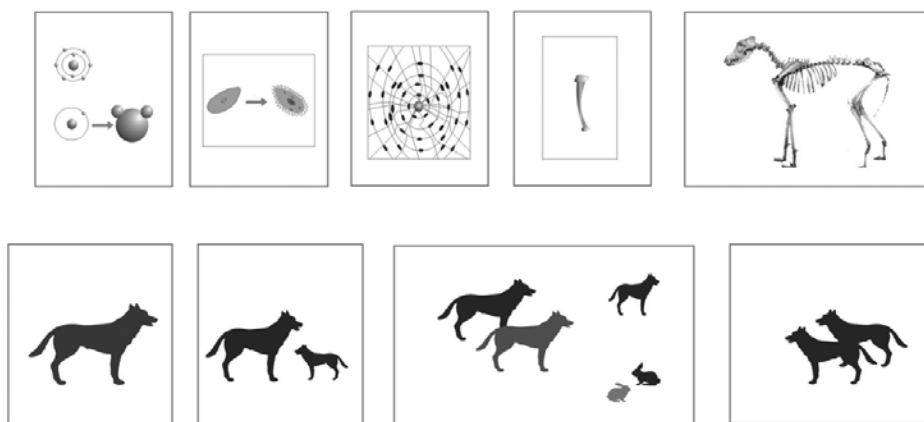
## **Sobrevivência dos mais aptos**

A frase “sobrevivência do mais apto” é geralmente associada à idéia de seleção natural de Darwin. O problema dessa associação é que gera um pensamento circular: quem sobrevive no processo de seleção natural? Os mais aptos. Quais indivíduos são os mais aptos? Aqueles que sobrevivem. O pensamento circular é perigoso em Biologia, pois uma frase circular não contém informação nenhuma. Entretanto, Darwin nunca mencionou seleção natural dessa forma. Seleção natural pode ser considerada a sobrevivência dos indivíduos que têm determinadas características mais apropriadas ao local e ao momento em que eles vivem. Um indivíduo pode ser o mais adaptado (ou seja, ele tem as melhores características), entretanto ele pode morrer por outros motivos externos. Por exemplo, o melhor caçador de todos os leões de uma população morreu atropelado. O fato de o leão ter sido atropelado, pode ter sido por acaso, e não por qualquer característica que o indivíduo tivesse apresentado. Além disso, o fato de o leão ter morrido também não significa que ele não era o mais adaptado.

## **Sucesso reprodutivo**

Um conceito fundamental para o entendimento de seleção natural é o de sucesso reprodutivo. Um organismo pode ser o mais forte, o mais rápido, o mais ágil, o mais atraente, mas de nada adiantará tudo isso se o organismo não conseguir se reproduzir. Sem reprodução, todas as características maravilhosas do indivíduo irão morrer com ele, isto é, sem reprodução, o indivíduo já é evolutivamente morto. O sucesso evolutivo do organismo é medido exclusivamente pelo número de filhotes que ele deixa para a próxima geração, ou seja, pelo número de genes com que o organismo contribui para a próxima geração.

A seleção natural ocorre sobre indivíduos, ou seja, no nível de organismos (Figura 5.4). Um outro ponto importante de lembrarmos é que a seleção natural trata-se de um processo que incide sobre o fenótipo do indivíduo e não sobre o seu genótipo. Por exemplo, em um indivíduo heterozigoto para uma dada característica deletéria pode apresentar um gene recessivo “escondido” da seleção natural (leia mais na página 73). A seleção natural atua sobre as características expressas do organismo e aquele indivíduo mais adaptado ao seu ambiente vai deixar mais prole do que outros não (ou menos) adaptados.



**Figura 5.4:** Diferentes níveis de organização dos seres vivos. (Em cima: átomos, células, tecidos, órgãos, e sistema; embaixo: organismo, população, comunidade, ecossistema.)

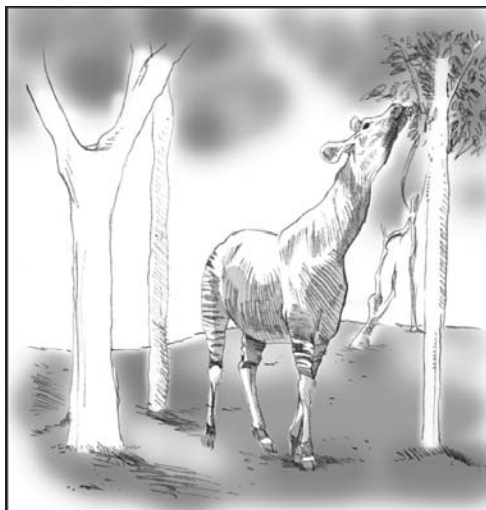
Por exemplo, digamos que em uma população antiga de girafas de pescoço pequeno surgiu uma mutação que direta ou indiretamente aumentou o pescoço daquele indivíduo mutante. Esse indivíduo mutante adquiriu uma característica que o permitiu alcançar folhas mais altas nas árvores e assim ter uma maior facilidade de se alimentar do que os outros de sua população. Essa característica, ao longo dos anos, foi se espalhando pela população e um dia todas as girafas tinham pescoço grande.

Entretanto, embora trate-se de um conceito que já vimos em aulas passadas, é importante enfatizar outra vez nesse ponto que a seleção não opera em cima do que o organismo está necessitando simplesmente. Para ela atuar, é necessário que exista variabilidade com formas vantajosas e formas desvantajosas (= deletérias), na população. Nesse caso, a seleção natural tria e seleciona as formas mais vantajosas para sobrevivência. Hoje conhecemos várias espécies que também teriam se beneficiado de um pescoço grande, entretanto, a evolução trabalha com a **VARIABILIDADE** que está disponível para as espécies.

#### VARIABILIDADE

É definida como a presença, em uma determinada população, de formas alternativas de uma determinada característica. Cor da pele, dos olhos, altura são todas características variáveis na população humana.

O ocapí da **Figura 5.5** também se esticou para pegar as folhas mais altas das árvores, mas seu pescoço não aumentou ao longo do tempo como o da girafa. Isso ocorreu pela falta de mutações adequadas no ocapí, demonstrando claramente que as mutações não ocorrem pela simples necessidade dos indivíduos, e sim por acaso.



**Figura 5.5:** O ocapí tentando alcançar folhas mais altas para alimentação. Entretanto, seu pescoço não é grande como o da girafa, pois lhe faltaram as mutações responsáveis por esse aumento.

Quando a altura do pescoço se tornou importante para as girafas da época, por exemplo, devido a um período de seca, a mutação que determinava pescoço longo tornou-se vantajosa, e aquele indivíduo deixou mais prole do que os outros, o mesmo ocorrendo com seus descendentes, até que o gene mutante se fixou na população. Durante esse processo, de todos os genes presentes no genoma da girafa apenas um (onde houve a mutação determinando o pescoço mais longo) estava sob o efeito da seleção natural positiva. É a presença deste gene que irá conferir à girafa de pescoço longo uma sobrevivência diferenciada, uma maior fecundidade e a transmissão desta característica para as gerações posteriores.

Mas é claro que a girafa tem outros genes, que determinam outras características. Esses genes serão transmitidos casualmente aos seus descendentes, já que não foram tirados pela seleção natural.

Portanto, se estivermos olhando para um gene aleatoriamente, a probabilidade maior é que ele esteja sob efeito do acaso (chamado em genética de populações de **DERIVA GÊNICA**) e não da seleção natural.

#### DERIVA GÊNICA

É a força evolutiva que promove a flutuação das frequências dos alelos devido a erros de amostragem. Se a probabilidade de sobrevivência do indivíduo não é alterada se ele possui o alelo A ou o alelo B, a evolução desse *locus* se dá pela ação da deriva gênica.



## Desenho & caos

Um ponto central no pensamento evolutivo moderno é o fato de a mutação ser uma característica gerada aleatoriamente, não aparecendo de acordo com a necessidade do indivíduo, da população ou da espécie. Esse ponto é tão importante que recomendamos que você leia o texto a seguir atentamente quantas vezes forem necessárias para que não haja qualquer dúvida a esse respeito. Isso a princípio pode parecer diferente daquilo que você está acostumado a interpretar quando observa a natureza.

Vejamos a frase: “A flor exala perfume para atrair os animais **POLINIZADORES** que irão garantir sua reprodução.” A própria explicação nos transmite uma idéia de que uma característica está nos organismos “para tal” função. Essa palavrinha “para” é enganadora e perigosa, pois dá a entender erroneamente que a evolução caminha na direção de “ajudar” o organismo, como Lamarck já propôs (ver Aula 2). Na realidade, a evolução trabalha com as ferramentas disponibilizadas pelas mutações produzidas aleatoriamente, sem cuidado algum sobre as necessidades futuras do organismo. Você pode estar se perguntando: ora, se as características mutantes são geradas aleatoriamente, como os organismos são tão adaptados a seus ambientes?

A explicação para isso é razoavelmente simples. Isso acontece porque, apesar de a mutação ser aleatória, a seleção não é. Apenas os indivíduos mais bem adaptados (ou seja, com as melhores características) sobrevivem para formar a próxima geração. Realmente, em inúmeros casos os organismos morreram pela ausência de características que lhes permitissem sobreviver. Espécies que já morreram são denominados extintas e a maior parte dela compõe os fósseis. E as espécies que só são encontradas como **FÓSSEIS** são uma evidência clara de que a evolução não tem direção.

Ainda não está convencido? Calma, vamos devagar. A aleatoriedade da geração da variação pode ser mais bem entendida se considerarmos dois pontos: a origem das mutações e as características das mutações.

O primeiro ponto, a origem da mutação, você vai compreender melhor na Aula 6, quando estivermos estudando a replicação do DNA.

### POLINIZADORES

A polinização em plantas pode ocorrer através de animais que, atraídos pelas cores, pelo cheiro ou pelo néctar, irão espalhar o pólen da planta para outras.

### FÓSSIL

São restos ou evidências de organismos que viveram no passado. Em geral, apenas as partes duras dos organismos são fossilizadas. Você irá aprender mais sobre fósseis na Aula 15 do nosso curso.

Desde já, no entanto, devemos ter em mente que as mutações são mudanças nos genes de um indivíduo. Essas mudanças são geradas por erros durante a replicação do DNA. Portanto, se as mutações são, em última análise, erros da enzima que replica o DNA, elas não podem ser dependentes das necessidades do organismo impostas pelo ambiente em que ele vive. Elas são geradas aleatoriamente pela enzima que promove a duplicação do DNA.

A mutação é aleatória, mas a seleção natural vai determinar os sobreviventes da população. Essa triagem da seleção não é aleatória. Um outro ponto que poderá fazer você entender melhor essa idéia de aleatoriedade das mutações é o exame cuidadoso delas. Se elas fossem geradas pelas necessidades do indivíduo portador, não existiriam mutações deletérias ou mutações desvantajosas para os indivíduos. Mas elas existem.

Em populações humanas, chamamos as mutações deletérias de doenças genéticas. Por exemplo, o albinismo, a hemofilia, o daltonismo são doenças que têm base genética. Nesses casos, o indivíduo doente herda os genes deletérios de seus pais ou é o indivíduo mutante. Repare que essas doenças listadas não levam à morte do indivíduo, isto é, não são **LETAIS**. Um indivíduo albino é capaz de conviver com o albinismo, viver sua vida, e se reproduzir. Por isso essas doenças são tão conhecidas do grande público – porque convivemos com elas frequentemente. Mas o que acontece, será que mutações letais não ocorrem? Ocorrem, sim. Entretanto, as mutações letais, em sua maioria, são eliminadas ainda na gestação. Existe uma estimativa de que cerca de 40% das gestações são abortadas espontaneamente, devido a mutações letais dos fetos. Esse número é impressionante! Entretanto, na maior parte dos casos, a gestante nem percebe, porque o aborto ocorre ainda antes de ela perceber que está grávida.

#### LETAL

É uma palavra que designa um gene cuja presença é mortal ao portador. Ou seja, pela herança desse gene o indivíduo morre antes de atingir a maturidade sexual e não passa o gene para a próxima geração.

Se as espécies determinassem seu próprio destino ou se as mutações fossem resultado direto da necessidade das espécies, apenas mutações vantajosas existiriam, não é mesmo? Você está agora começando a perceber como acontece a geração da variabilidade?

As mutações, como são fruto de erros na duplicação do DNA, podem ser vantajosas, deletérias, ou neutras. O processo de seleção natural vai escolher para reproduzir os indivíduos que apresentem as melhores características e por isso parece-nos, olhando a natureza, que as mutações (variabilidade) são sempre vantajosas.

Por exemplo, o albinismo é uma doença humana na qual a pele e o pêlo do indivíduo não possui qualquer pigmentação. Ou seja, esse indivíduo nunca fica bronzeado quando exposto ao sol. Essa característica é considerada uma doença porque o indivíduo portador é extremamente vulnerável à exposição ao sol. Isso, principalmente em países tropicais, pode ter consequências graves como o desenvolvimento de câncer de pele. O albinismo é causado por um defeito genético. Mais especificamente, ele é consequência de uma mutação que torna defeituosa uma das enzimas da via de produção da **MELANINA**. Quando o indivíduo é homozigoto para o gene defeituoso, ele só produzirá enzimas defeituosas, impedindo a formação de melanina. Quando o indivíduo é heterozigoto para o gene defeituoso, ele tem o **FENÓTIPO** (aparência) normal, pois apresenta um gene normal que produz a enzima responsável pela fabricação de melanina. Assim, dizemos que o gene defeituoso é **RECESSIVO** em relação ao gene que determina o fenótipo normal. Nesse caso, o gene normal é chamado de **DOMINANTE**. Voltando ao caso do albinismo, o gene para essa doença é recessivo em relação ao gene normal, já que o indivíduo heterozigoto terá o fenótipo normal.

#### **MELANINA**

É um pigmento escuro que ocorre em seres humanos e outros animais e está presente nos cabelos e na pele.

#### **FENÓTIPO, GENÓTIPO, DOMINANTE E RECESSIVO**

Lembre-se desses conceitos da Aula 2.

Você agora pode estar se perguntando: mas se a seleção natural elimina a variação deletéria, como explicar a manutenção de doenças genéticas, como o albinismo, nas populações humanas até os dias de hoje? Na realidade, a frequência de cada uma das doenças genéticas na população humana é muito baixa. Entretanto, como existem muitos tipos de doenças com base genética, elas acabam parecendo numerosas.

Um outro ponto que também explica a ocorrência de doenças é que, assim como o albinismo, a maior parte das doenças genéticas são recessivas. Isso significa que os indivíduos portadores de um único gene (genótipo heterozigoto) têm fenótipo normal. Nessa forma, os indivíduos heterozigotos têm o gene defeituoso “escondido” da seleção natural, pois como não apresentam fenótipo deletério, eles se reproduzem normalmente e continuam passando esse gene para seus descendentes mantendo o gene defeituoso na população. Quando duas pessoas heterozigotas se cruzam, podem gerar filhos com a doença (com genótipo duplo recessivo).

A última explicação é que algumas doenças genéticas só se expressam quando o indivíduo está mais velho e, portanto, já se reproduziu quando exibe a doença. Doenças como mal de Alzheimer ou de Parkinson são assim. Como elas se expressam quando o indivíduo já se reproduziu, ele já passou os genes deletérios para a próxima geração.

### SELEÇÃO NATURAL OBSERVÁVEL

A seleção natural é, em geral, um processo longo, e pode envolver milhões ou até bilhões de anos. O aparecimento da asa de morcegos deve ter ocorrido em alguns milhões de anos, desde um ancestral com quatro patas até um morcego com plena capacidade de voo. Por outro lado, a seleção natural também pode ser observada agindo rapidamente em curtos espaços de tempo. Por exemplo, a resistência de microorganismos a antibióticos e a remédios de uma forma geral é consequência desse mesmo processo de seleção natural. Por exemplo, em reportagens recentes já foi registrada a ocorrência de novas linhagens de HIV-1 resistentes ao coquetel de drogas usado no combate à AIDS.

### Um exemplo de adaptação

A **ADAPTAÇÃO** é a consequência da seleção natural, ou melhor, é a característica vantajosa que se mantém e se espalha pela população. Um exemplo muito bonito de adaptação extremamente complexa é o caso de focas.

#### ADAPTAÇÃO

É uma estrutura ou uma função alterada que promove um aumento na probabilidade de sobrevivência do organismo que a possui em relação aos demais não portadores. Uma adaptação é o resultado do processo de seleção natural.



Figura 5.6: Focas descansando na pedra.

As focas são mamíferos marinhos que respiram oxigênio atmosférico. Elas possuem um metabolismo diferenciado que lhes permite mergulhar por mais de 70 minutos a uma profundidade de mais de 300 metros, onde está seu alimento.

Nessa profundidade, nossos pulmões se colapsariam e seres humanos nunca sobreviveriam, mesmo por alguns segundos, ali. No entanto, as focas adquiriram ao longo de sua história evolutiva uma série de adaptações fisiológicas que permitem que elas não apenas sobrevivam, mas também façam desse tipo de mergulho seu mecanismo primário de captura de alimentos.

O primeiro tipo de adaptação envolve mecanismos para suprir a falta de oxigênio nos tecidos devido ao tempo do mergulho sem oxigênio de superfície. Em primeiro lugar, as focas possuem uma quantidade superior de sangue e, portanto, de hemoglobina. Como consequência direta disso, elas conseguem armazenar o dobro de oxigênio por quilo do que um ser humano. Além disso, todo oxigênio durante o mergulho fica concentrado no sangue e nos músculos onde se torna mais necessário. Apenas cerca de 5% do oxigênio total do corpo da foca se encontra armazenado nos pulmões. Essas adaptações são fundamentais, mas ainda não são suficientes para permitir o modo de vida desses organismos.

No momento em que a foca mergulha, seu coração diminui o ritmo de trabalho, necessitando de menos oxigênio para trabalhar ao longo do tempo submerso. Seu metabolismo também tem seu ritmo reduzido. Os tecidos mais críticos, como a retina, o cérebro e, nas focas grávidas, a placenta, são supridos por oxigênio, enquanto outros tecidos menos importantes, como os rins, são cortados do suprimento de oxigênio até que a foca chegue à superfície.

Assim que o nível de oxigênio no corpo diminui, outros tecidos mudam para o **METABOLISMO ANAERÓBICO**, que produz ácido lático. No entanto, para diminuir a **ACIDOSE** causada por esse aumento, o organismo confina o metabolismo anaeróbico aos músculos esqueléticos e a outros tecidos isolados da corrente sanguínea. Quando a foca sobe à superfície, esses tecidos liberam o ácido lático no sangue para serem descartados.

O segundo tipo de adaptações envolve os mecanismos para evitar problemas relativos ao aumento de pressão. A pressão de várias **ATMOSFERAS**, a que as focas comumente estão submetidas, iria quebrar nossa caixa torácica mas não faz danos a da foca. Além disso, a pressão embaixo d'água causa um aumento de excitação nas células nervosas que pode resultar em convulsões. A glândula adrenal das focas produz uma substância, cortisol, que desestabiliza as células nervosas e previne contra as convulsões.

#### **METABOLISMO ANAERÓBICO**

Alguns tecidos do nosso corpo iniciam o metabolismo anaeróbico quando ocorre falta de oxigênio. Tecidos musculares, por exemplo, quando são submetidos a um esforço muito grande.

#### **ACIDOSE**

É a produção de ácido lático, leva à sensação de fadiga e dor.

#### **ATMOSFERA**

É uma unidade convencional de pressão. Uma atmosfera é a quantidade de ar acima de nossas cabeças ao nível do mar. Durante o mergulho, a cada 10 metros de profundidade, uma atmosfera é adicionada à pressão sobre nosso corpo.

## RESUMO

Durante o processo de seleção natural, o grupo de organismos que apresenta as melhores características é selecionado para sobreviver. Isso acontece porque a prole produzida pelas espécies é maior do que a que tem chances de sobrevivência devido à escassez de recursos, *habitat* etc. A seleção natural é decorrência do fato de que os organismos com as melhores características para o ambiente em que vivem terão uma maior probabilidade de sobrevivência e de reprodução e assim passar seus genes (que determinam essas melhores características) para seus descendentes. As mutações, como são fruto de erros na duplicação do DNA, podem ser vantajosas, deletérias ou neutras. A ação da seleção natural vai selecionar os indivíduos que apresentem as melhores características e, por isso, olhando a natureza, parece-nos que as mutações (variabilidade) são sempre vantajosas.

Uma explicação para o fato de doenças genéticas ainda estarem presentes nas populações naturais, como na população humana, é que, assim como o albinismo, a maior parte delas é recessiva. O que significa que os indivíduos portadores de um único gene (genótipo heterozigoto) têm fenótipo normal. Nessa forma, os indivíduos heterozigotos têm o gene defeituoso “escondido” da seleção natural, pois como eles não apresentam fenótipo (aparência) deletério, eles reproduzem normalmente e continuam passando esse gene para seus descendentes, mantendo o gene defeituoso na população.

## EXERCÍCIOS

1. O que é seleção natural?
2. Qual a similaridade da seleção natural e seleção artificial?
3. Qual a diferença entre seleção natural e adaptação?
4. Por que dizemos que a geração da mutação se dá de forma independente do ambiente, se os organismos apresentam características vantajosas na maior parte das vezes?

# Introdução às macromoléculas

AULA

6

## objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Relembrar as estruturas das macromoléculas, proteínas e ácidos nucleicos e seus processos de interação — replicação do DNA e síntese de proteínas.

### Pré-requisito

Conceito de macromoléculas, carga elétrica, ácido, base, grupamentos químicos.

## INTRODUÇÃO

As primeiras cinco aulas de nosso curso trataram dos conceitos evolutivos básicos como a seleção natural, a especiação, a taxonomia e a filogenia. Esses conceitos são fundamentais para a compreensão dos padrões de diversidade que encontramos na natureza de forma apropriada. Na realidade, se você teve alguma dúvida lendo as aulas anteriores é importante que você retorne a essas aulas antes de prosseguir com essa e com as próximas aulas.

A partir da próxima aula, iremos dar início a uma série de descrições dos padrões de diversidade dos seres vivos encontrados de uma maneira cronológica. Naturalmente, as primeiras aulas irão começar com a origem da vida. Portanto, convém relembrar antes alguns conceitos básicos das duas macromoléculas fundamentais para a vida: as proteínas e os ácidos nucleicos. As disciplinas de Bioquímica I (deste período) e de Genética Básica (3º período) tratarão esse assunto com maior profundidade, mas nesta aula você verá alguns pontos mais fundamentais para que possamos seguir com nosso curso.

## Proteínas

Dentre todos os agentes metabólicos que permitem o funcionamento das células, as proteínas são um dos mais importantes. Elas podem ser divididas em grupos que descrevem suas funções. Por exemplo, existem proteínas estruturais, como a queratina, que é uma proteína insolúvel que forma o cabelo, a pele e as unhas do nosso corpo. Outras proteínas carregam mensagens químicas na célula, como a insulina, ou transportam o oxigênio no sangue, como a hemoglobina. Além dessas, há as que catalisam reações químicas, como a amilase, que atua na saliva quebrando o amido consumido em açúcares simples. As proteínas que catalisam reações químicas são chamadas de enzimas.

No entanto, independente de sua função, a estrutura básica de uma proteína é sempre a mesma. Uma proteína é uma molécula composta por uma (ou mais) cadeia linear de aminoácidos ligados covalentemente por ligações peptídicas (**Figura 6.1**). Dizemos que a estrutura primária das proteínas é a sequência dos aminoácidos em sua cadeia.



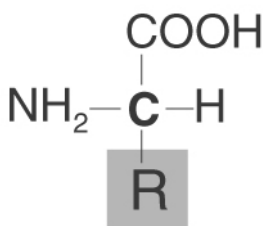
**Figura 6.1:** Estrutura de uma proteína, mostrando os aminoácidos (peptídeos) e as ligações peptídicas.



Dois aminoácidos ligados formam um dipeptídeo, três ligados formam um tripeptídeo e assim por diante. As proteínas são chamadas de polipeptídeos ou cadeias polipeptídicas e são geralmente longas. Algumas proteínas são extremamente longas podendo chegar a mais de mil aminoácidos ligados uns aos outros!

## Aminoácidos

Vinte tipos de aminoácidos são normalmente encontrados no metabolismo de todos os organismos. A estrutura básica de todos eles também é sempre a mesma: um átomo de carbono alfa ao qual todos os outros grupos se conectam; um grupo amina ( $\text{NH}_2$ ); um grupo carboxila ( $\text{COOH}$ ); um átomo de hidrogênio; e um radical cuja estrutura varia de acordo com o aminoácido. A **Figura 6.2** serve para ilustrar a estrutura geral do aminoácido, mostrando os dois grupos, o hidrogênio e o radical que estão conectados ao carbono alfa, em negrito.



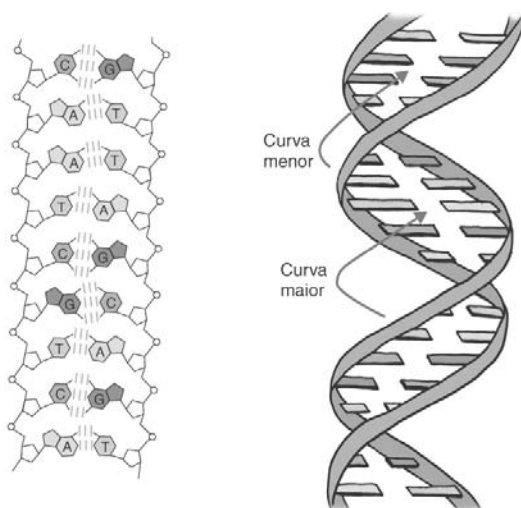
**Figura 6.2:** Estrutura básica dos aminoácidos.

O único elemento que diferencia os vinte tipos de aminoácidos é o radical. O aminoácido mais simples é a glicina, cujo radical é um único átomo de hidrogênio. De acordo com seus componentes, esse radical torna o aminoácido ácido, básico etc. Assim, pelo posicionamento e pela quantidade de aminoácidos de um tipo ou de outro, a proteína também terá suas propriedades bioquímicas estabelecidas. A estrutura primária de uma proteína é determinada por outro grupo de moléculas fundamentais e constituintes das células: os ácidos nucleicos, que descreveremos a seguir.

## Ácidos nucleicos

Assim como as proteínas são cadeias longas de aminoácidos, os ácidos nucleicos são cadeias longas de nucleotídeos. Esses ácidos nucleicos exercem uma função primordial em qualquer organismo vivo: eles transmitem a informação genética de uma geração para outra, ou seja, são responsáveis pela herdabilidade mencionada na primeira aula do nosso curso. Existem dois tipos básicos de ácidos nucleicos: o ácido desoxirribonucleico (DNA) e o ácido ribonucleico (RNA). Os dois tipos estão presentes nas células de todos os organismos vivos. No entanto, eles têm algumas diferenças estruturais e desempenham papéis diferentes de acordo com o organismo, como veremos adiante.

O DNA é geralmente encontrado em dupla hélice que consiste em duas fitas antiparalelas (Figura 6.3).



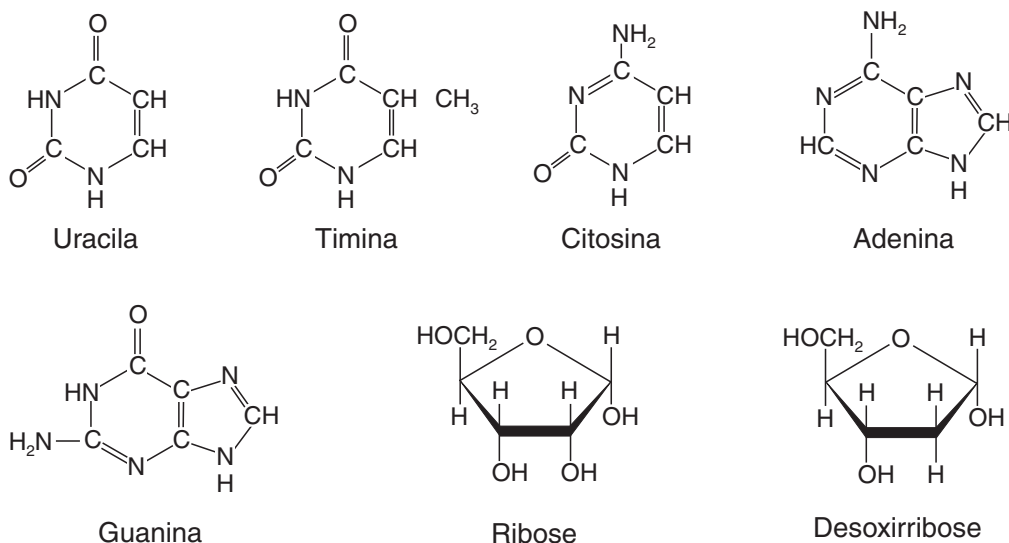
**Figura 6.3:** Estrutura geral básica do DNA.

As duas fitas são conectadas por meio de pontes de hidrogênio e são chamadas, especificamente, de pareamento de bases. Considerando as bases, repare que A se liga sempre a T por meio de duas pontes de hidrogênio, ao passo que a ligação entre C e G se dá por meio de três pontes. Por isso, a ligação CG é considerada a ligação forte do DNA. As fitas se ligam uma a outra, em direções opostas, como se uma estivesse de cabeça para baixo em relação à outra.

## Nucleotídeos

Existem duas diferenças estruturais entre o DNA e o RNA. Em primeiro lugar, o DNA tem a desoxirribose como açúcar, enquanto o RNA tem a ribose em sua estrutura primária. A desoxirribose possui um hidrogênio em seu Carbono 2, enquanto a ribose possui uma hidroxila (OH) nessa posição. A segunda diferença estrutural entre os ácidos nucleicos é a composição de suas bases. O DNA possui as bases nitrogenadas: adenina (A), citosina (C), guanina (G) e timina (T) em seus nucleotídeos, enquanto no RNA a base timina é substituída pela uracila (U).

Cada unidade de nucleotídeo (**Figura 6.4**) contém um açúcar, um grupamento fosfato e uma base nitrogenada. A e G são consideradas bases purinas e C e T (ou U no RNA), as bases pirimidinas. As bases purinas possuem dois anéis de carbono. As pirimidinas possuem apenas um anel de carbono (**Figura 6.4**). Como uma base purina sempre se liga a uma pirimidina, a largura da dupla fita é constante ao longo de toda a molécula.



**Figura 6.4:** Estrutura geral das bases nitrogenadas e dos açúcares ribose (RNA) e desoxirribose (DNA) presentes nos ácidos nucleicos.

## Replicação do DNA

Existem dois processos celulares que acontecem com o DNA e que determinam a sobrevivência da célula e de seus descendentes. O primeiro deles é chamado de replicação, que é a duplicação do material genético. O segundo é chamado de transcrição, que é o primeiro passo da síntese de proteínas. (Ver adiante.)

A replicação acontece um pouco antes da divisão celular que dá origem a duas células idênticas à célula original. Todo processo de replicação do DNA gera duas cópias idênticas de todo material genético da célula de uma só vez. A replicação do DNA se dá de uma forma **SEMICONSERVATIVA**: durante a replicação do DNA, a fita dupla se rompe e cada uma delas serve de molde para a nova fita complementar. Veja um esquema da replicação do DNA na **Figura 6.5**. As duas moléculas descendentes são idênticas entre si e em relação à original.

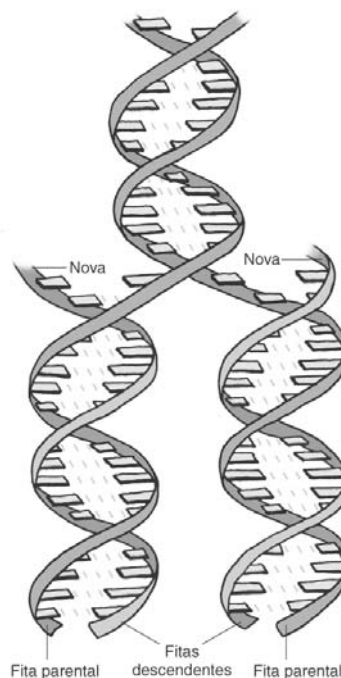
O DNA, isolado, não consegue se replicar. Diversas enzimas são responsáveis por alguma parte do processo de replicação. A DNA-polimerase é a principal enzima responsável pela replicação. Ela seleciona a sequência de nucleotídeos necessários à formação das fitas descendentes e liga cada um deles às fitas simples parentais. Outras enzimas, como a DNA-girase, a DNA-helicase e a DNA-ligase, possuem papéis secundários na replicação do DNA.

Em bactérias, que possuem uma quantidade relativamente pequena de material genético, algumas moléculas de DNA-polimerases atuam simultaneamente no processo de replicação de DNA.

Em organismos maiores, milhares de DNA-polimerases agem simultaneamente, acelerando todo o processo replicativo.

### SEMICONSERVATIVA

Durante a replicação semiconservativa, uma das fitas do DNA parental é mantida em cada dupla-hélice das células-filhas.

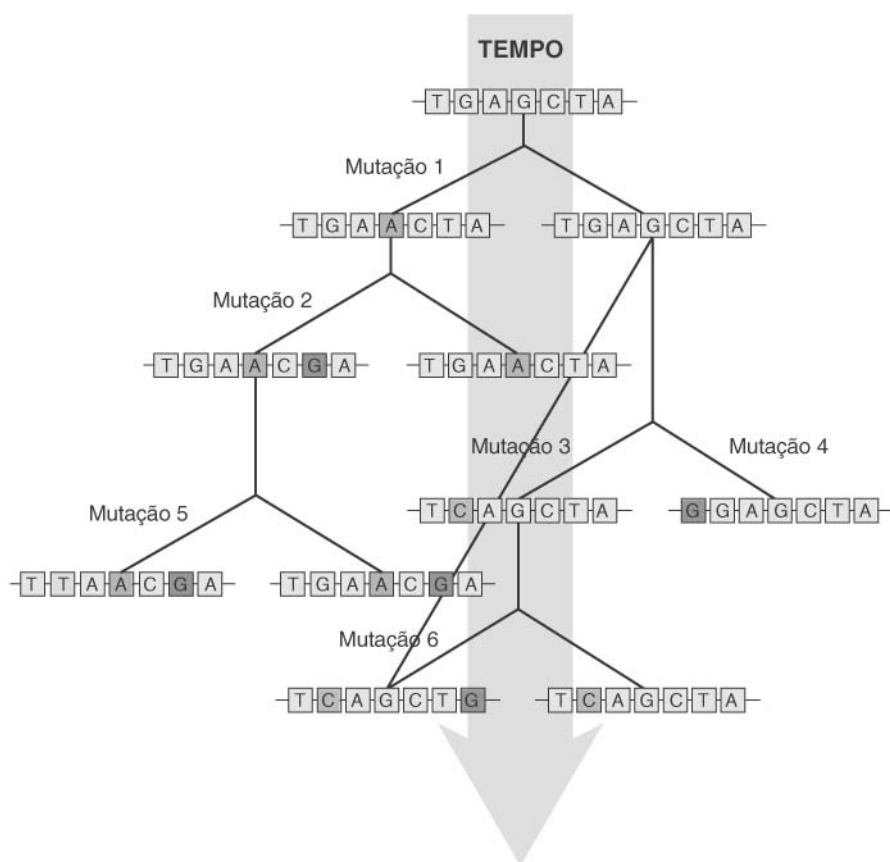


**Figura 6.5:** Replicação semiconservativa do DNA.

## Mutações

No entanto, se todas as fitas de DNA fossem idênticas à parental, não haveria variação entre os organismos. Assim, uma das propriedades fundamentais dos sistemas biológicos, a mutabilidade, estaria comprometida. Na realidade ainda seríamos todos exatamente idênticos ao primeiro sistema que conseguiu se replicar espontaneamente, ou seja, seríamos moléculas, e não organismos.

Mas, ao contrário, observamos uma variabilidade que somente pode ser explicada pelo fato de a DNA-polimerase ser passível de erros, pois a replicação de DNA tem a finalidade de produzir cópias idênticas do material genético. No entanto, de vez em quando, a DNA-polimerase seleciona o nucleotídeo errado e o coloca na cadeia nova (Figura 6.6). Quando ocorre essa seleção de nucleotídeo errado, tem-se uma mutação.



**Figura 6.6:** Uma mutação; a DNA-polimerase seleciona o nucleotídeo errado para a posição grifada.

**MUTANTE**

É um organismo portador de um gene mutante que se expressa no fenótipo do organismo.

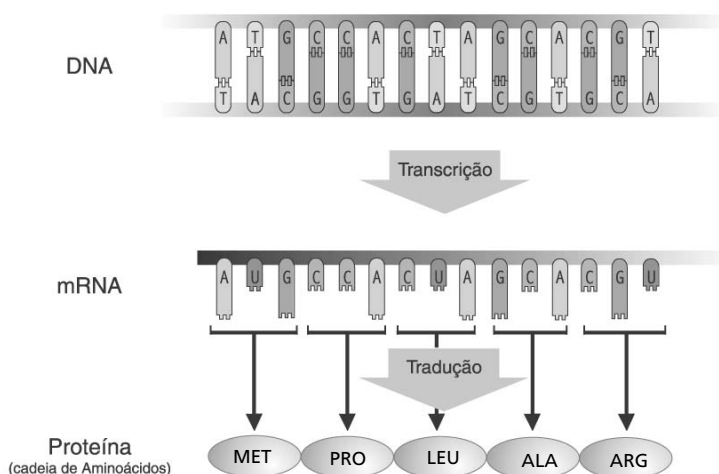
Por outro lado, nem toda mutação será convertida em variabilidade para a população de indivíduos, o que significa que nem toda mutação irá produzir um indivíduo **MUTANTE**. Por exemplo, caso a mutação ocorra numa célula somática, a mutação somática não será transmitida para a geração seguinte, e se perderá. Isso porque apenas as células destinadas à fabricação de gametas (células germinativas) têm chances de passar seu material genético para a geração seguinte. Portanto, mutação em células somáticas não tem consequências evolutivas.

Além disso, algumas mutações como as letais levam à morte os indivíduos que a carregam. Como nesse caso o indivíduo mutante não sobrevive, ele não irá transmitir essa mutação para a próxima geração. Obviamente, esse tipo de mutação também tem poucas consequências na variabilidade da população. Por exemplo: quando a mutação ocorre em um segmento de DNA, responsável pela fabricação de uma enzima importante como a DNA-polimerase. Caso essa mudança de nucleotídeo faça com que essa enzima se torne não-funcional, a célula morrerá, já que não conseguirá replicar seu material genético, eliminando a mutação da população.

**Síntese de proteínas**

O segundo processo importante que acontece com DNA é a sua transcrição em RNA (Figura 6.7).

O primeiro passo da síntese proteica.



**Figura 6.7:** Transcrição do DNA em mRNA (RNA-mensageiro) e o processo de tradução.

No processo de transcrição, assim como na duplicação de DNA, enzimas específicas quebram as pontes de hidrogênio entre as duas fitas da molécula em fita dupla de DNA. Três tipos de RNA podem ser produzidos a partir da fita de DNA, o RNA-mensageiro, o RNA-transportador e o RNA-ribossomal. A molécula de RNA-mensageiro correspondente é sintetizada por uma enzima chamada RNA-polimerase, a partir de uma das fitas da dupla hélice. Essa fita de DNA funciona como molde, assim como na replicação de DNA na qual a fita parental funciona como molde. Outras enzimas secundárias também são responsáveis por funções menores no processo.

Lembre-se de que o RNA não possui timina em sua estrutura primária e, portanto, uma adenina na fita de DNA deverá corresponder a uma uracila na fita de RNA-mensageiro. O processo de transcrição do DNA em RNA também acontece no núcleo da célula, mas o restante da síntese de proteínas ocorre no citoplasma.

Uma diferença fundamental entre o processo de replicação e o de transcrição é que a transcrição ocorre de maneira seletiva. Ou seja, quando o DNA é replicado, todo o material genético da célula é replicado de uma só vez. Por outro lado, quando o DNA é transcrito em RNA-mensageiro, os genes a serem transcritos são selecionados. Assim, diferenças nos genes transcritos existem entre diferentes células, diferentes tecidos e diferentes momentos do **DESENVOLVIMENTO** do organismo.

Depois da transcrição, a fita de RNA-mensageiro migra para o citoplasma e se acopla a um ribossomo. O ribossomo é uma estrutura celular com duas subunidades, uma grande e uma pequena, e serve de suporte para a **tradução** que se inicia. A tradução consiste na síntese da proteína propriamente dita. Trata-se da leitura do RNA-mensageiro de três em três bases nitrogenadas. Cada três bases nitrogenadas formam um códon. Cada códon determina um dos vinte aminoácidos da síntese de proteínas, de acordo com o código genético (**Tabela 6.1** na outra página). Nesse momento, entra em cena um terceiro tipo de RNA (já vimos o RNA-ribossomal e o RNA-mensageiro), o RNA-transportador. O ribossomo é formado por RNA do tipo ribossomal e proteínas ribossomais.

O RNA-transportador possui um anticódon específico e carrega sempre o aminoácido correspondente ao seu anticódon. A tradução envolve a ligação do anticódon do RNA-transportador ao códon do RNA-mensageiro e assim se inicia a síntese da proteína propriamente dita. Finalmente, o RNA-ribossomal, associado a diversas proteínas, forma o ribossomo, que é a estrutura na qual ocorre o processo de tradução.

#### DESENVOLVIMENTO

É a seqüência ordenada de mudanças progressivas que resultam num aumento de complexidade de um sistema biológico. Por exemplo, a fase embrionária do desenvolvimento humano se dá no interior do útero materno.

## O código genético

O código genético é um sistema com quatro bases nitrogenadas (A, T, C e G), agrupadas três a três para formar os códons, num total de 64 ( $4^3 = 64$ ) códons possíveis (AAA, AAT, AAC, AAG, ATA, ATT, ..., GGC, GGG). Cada códon especifica um aminoácido numa posição determinada da proteína. Como apenas vinte aminoácidos formam as proteínas e existem 64 códons diferentes, alguns aminoácidos são determinados por mais de um códon. Devido a essa propriedade, o código genético é chamado de degenerado, já que vários códons determinam o mesmo aminoácido.

**Tabela 6.1:** Código genético universal.

	T		C		A		G	
T	TTT	Phe	TCT	Ser	TAT	Tyr	TGT	Cys
	TTC	Phe	TCC	Ser	TAC	Tyr	TGC	Cys
	TTA	Leu	TCA	Ser	TAA	Stop	TGA	Stop
	TTG	Leu	TCG	Ser	TAG	Stop	TGG	Trp
C	CTT	Leu	CCT	Pro	CAT	His	CGT	Arg
	CTC	Leu	CCC	Pro	CAC	His	CGC	Arg
	CTA	Leu	CCA	Pro	CAA	Gln	CGA	Arg
	CTG	Leu	CCG	Pro	CAG	Gln	CGG	Arg
A	ATT	Ile	ACT	Thr	AAT	Asn	AGT	Ser
	ATC	Ile	ACC	Thr	AAC	Asn	AGC	Ser
	ATA	Ile	ACA	Thr	AAA	Lys	AGA	Arg
	ATG	Met	ACG	Thr	AAG	Lys	AGG	Arg
G	GTT	Val	GCT	Ala	GAT	Asp	GGT	Gly
	GTC	Val	GCC	Ala	GAC	Asp	GGC	Gly
	GTA	Val	GCA	Ala	GAA	Glu	GGA	Gly
	GTG	Val	GCG	Ala	GAG	Glu	GGG	Gly

O primeiro códon da maior parte das proteínas celulares é o ATG, que determina o aminoácido metionina (Met). Outros códons, que não correspondem a aminoácido algum, são chamados de códons de terminação. Sua ocorrência acarreta o término da cadeia polipeptídica.

A síntese de proteínas é, sem dúvida, um dos processos fundamentais da célula. O seu bloqueio acarreta necessariamente a morte celular. Por essa razão, vários antibióticos contra bactérias foram desenhados especificamente para bloquear uma ou mais fases da síntese de proteínas. Por exemplo, a tetraciclina é usada com frequência contra infecções bacterianas e cumpre essa função.



## Glossário

**Polimerase:** enzima que catalisa a reação de polimerização.

**Monômero:** cada uma das subunidades de polímeros.

Ex.: aminoácidos, nucleotídeos.

**Dímero:** agrupamento de dois monômeros.

**Trímero:** agrupamento de três monômeros.

**Tetrâmero:** agrupamento de quatro monômeros.

**Polímero:** agrupamento de um número maior de monômeros.

Ex.: proteínas, ácidos nucléicos.

**Polimerização:** reação que agrupa os monômeros para formar um polímero.

## RESUMO

Esta aula faz uma breve revisão dos dois principais grupos de macromoléculas — as proteínas e os ácidos nucléicos — e dos dois processos celulares mais importantes — a replicação do DNA e a síntese de proteínas. As proteínas são cadeias lineares com dezenas de subunidades chamadas de aminoácidos. Os aminoácidos constituintes de proteínas possuem a mesma estrutura básica: um grupo amino, um grupo carboxila e um radical. Existem vinte tipos diferentes de aminoácidos, que diferem apenas no seu radical. Os ácidos nucléicos são formados, assim como as proteínas, por um agrupamento linear de subunidades, no caso os nucleotídeos. A estrutura básica dos nucleotídeos é formada por um grupo fosfato, um açúcar e uma base nitrogenada.

Existem dois tipos básicos de ácidos nucléicos: o DNA e o RNA. Os componentes de base, nos dois tipos, são diferentes. O DNA tem adenina, guanina, citosina e timina, e o RNA tem uracila no lugar da timina. Os dois tipos também diferem em relação ao tipo de açúcar. O DNA tem desoxirribose; o RNA, ribose. O DNA, em geral, é encontrado em dupla fita e se replica no núcleo pelo processo chamado de semiconservativo. A enzima DNA-polimerase é a principal enzima da replicação, selecionando e acoplando nucleotídeos complementares a cada uma das fitas do DNA. A síntese de proteína inicia-se quando RNA-mensageiro é sintetizado como molde de uma das fitas do DNA. Esse processo é chamado de transcrição.

A segunda parte da síntese de proteínas ocorre nos ribossomos do citoplasma e é chamada de tradução. Os aminoácidos constituintes da proteína a ser sintetizada são determinados pela leitura do RNA-mensageiro de três em três bases, ou seja, de códon em códon. Cada um dos 64 tipos de códons (quatro bases agrupadas de três em três,  $4^3 = 64$ ) determina um dos vinte aminoácidos e, portanto, mais de um códon pode determinar o mesmo aminoácido. Alguns códons não correspondem a qualquer aminoácido e são responsáveis pela finalização da proteína. Esses códons são chamados códons de terminação.

## EXERCÍCIOS

1. O que todos os aminoácidos têm em comum? O que difere entre os diferentes tipos de aminoácidos?
2. Por que dizemos que a replicação de DNA é semiconservativa?
3. Qual a relação entre proteínas e ácidos nucléicos?
4. Qual o papel dos diferentes tipos de RNA na síntese de proteínas?

## Origem das macromoléculas

AULA

7

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Compreender o conceito da vida.
- Entender como estudamos a evolução de estruturas complexas.
- Identificar a importância do elemento carbono.
- Compreender a origem espontânea dos aminoácidos e dos nucleotídeos.
- Conhecer o processo de polimerização espontânea através da argila e de alta temperatura.

### Pré-requisito

Você precisará dos conceitos vistos nas Aulas 5 e 6.

## O INÍCIO DA VIDA

A última aula encerrou uma série de aulas que discutiram conceitos importantes para o entendimento sobre como a diversidade dos seres vivos foi formada ao longo dos anos. A partir desta Aula 7 vamos começar a discutir sobre a origem e a diversificação biológica de fato.

Com esse objetivo, vamos iniciar pelos primeiros organismos vivos a habitarem o nosso planeta. Mas como iremos diferenciar os primeiros organismos vivos de toda **MATÉRIA INERTE** que os precedeu? Inicialmente, esta pode parecer uma questão simples, mas vamos refletir um pouco sobre isso antes de prosseguirmos com a aula.

### **MATÉRIA INERTE**

É também chamada de matéria não-viva ou inanimada.

### **ANÁLISE COMPARATIVA**

Permite identificar propriedades e características de grupos de organismos, comparando membros distintos dos grupos.

O que difere os organismos vivos da matéria inerte? Como em basicamente toda a Biologia, iremos responder a essa pergunta com uma **ANÁLISE COMPARATIVA**. Nós podemos iniciar comparando uma ave e uma pedra. O que difere uma ave de uma pedra? Muitas coisas, não é mesmo? Um dos primeiros pontos que nos vem à cabeça é a locomoção: aves são capazes de se locomover e a pedra não é. Entretanto, pensando um pouco mais sobre o assunto, vemos que isso não é necessariamente uma diferença entre seres vivos e a matéria inerte. Alguns seres vivos, como as plantas, por exemplo, não conseguem se locomover, enquanto algumas máquinas são móveis, como os carros, os aviões, os robôs etc. Se pensarmos com mais atenção, podemos entender porque a comparação entre ave e pedra não foi uma boa opção para conseguirmos identificar o que difere organismos vivos de organismos não-vivos. Ao longo do seu curso, você irá entender que para identificar propriedades de grupos de organismos, nunca podemos restringir nossa comparação a dois objetos apenas, como na comparação aves e pedras. O motivo é que quando comparamos dois objetos, existem tantas diferenças entre eles que ficamos perdidos para identificar as propriedades que realmente estamos interessados. Como fazer então para saber o que difere organismos vivos da matéria inerte?

Faça uma experiência simples, vá ao seu jardim ou, simplesmente, olhe pela sua janela e faça duas listas: uma de organismos vivos e uma de matéria não-viva que você conseguiu identificar durante, digamos, cinco minutos de observação. Suas listas devem conter alguns itens bem familiares a nós, tais como pessoas, pássaros, plantas, insetos na lista de organismos vivos, e pedras, casas, carros na sua lista de matéria inerte.

Agora, vamos retornar à questão, quais são as propriedades que pessoas, pássaros, plantas e insetos possuem em comum, mas que não estão presentes em pedras, em casas ou em carros? Se virmos por esse lado, claramente a locomoção não faz parte das propriedades da vida. Mas então o que faz?

Repare que agora estamos selecionando um grupo de organismos que tem pouco a ver uns com os outros excetuando-se o fato deles serem organismos vivos. Agora propriedades desse grupo como um todo ficam mais evidentes e mais fáceis de identificar. O poder da análise comparativa passa então pela seleção cuidadosa dos grupos a serem comparados e de suas características. Você vai aprender mais sobre a metodologia da análise comparativa na Aula 17 e no curso de Introdução à Zoologia no seu segundo período.

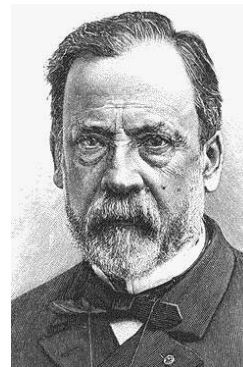
Pois bem, uma propriedade importantíssima que une todos os organismos vivos listados é capacidade de reprodução ou a capacidade de produzir cópias de si mesmo. Você pode reparar que todos os seres vivos se reproduzem, desde as bactérias, passando pelos protistas, pelos mamíferos e pelas plantas. Pedras, casas e carros definitivamente não possuem essa propriedade. Essa propriedade é extremamente importante, pois qualquer entidade viva deve ser capaz de passar seu material genético para seus descendentes (reprodutibilidade). No processo de duplicação desse material podem ocorrer erros (mutabilidade) e, assim, gerar diversidade e aí podemos incluir toda a diversidade biológica. Uma outra propriedade é que o material genético do organismo parental irá passar a seus descendentes informações (herdabilidade), sobre a própria estrutura do sistema. Mais especificamente, a definição de vida envolve as três propriedades dos sistemas biológicos que foram apresentados na primeira aula do curso: reprodutibilidade, herdabilidade e mutabilidade.

A noção antiga de moscas se originando de carne podre caiu por terra (também chamada de **GERAÇÃO ESPONTÂNEA**). Depois de alguns experimentos, incluindo um, do célebre **LOUIS PASTEUR**, ficou claro que a vida só surge a partir da vida.

Mas se vida surge a partir de vida, como surgiu a primeira entidade viva?

#### **GERAÇÃO ESPONTÂNEA**

É uma teoria segundo a qual os organismos vivos se originavam de matéria podre em decomposição. Também chamada de abiogênese.



**LOUIS PASTEUR  
(1822-1895)**

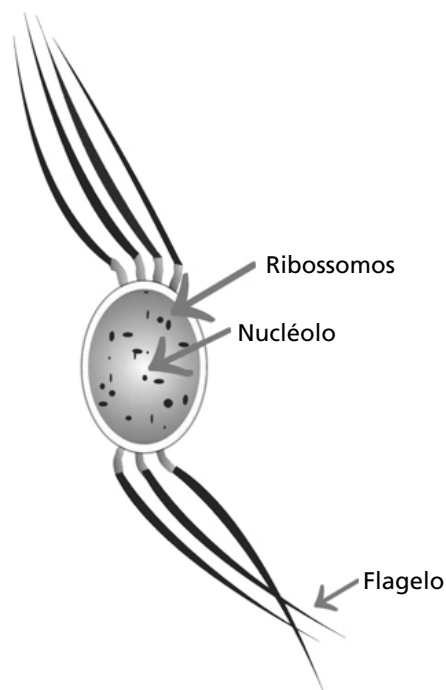
Nasceu na França e hoje é conhecido como o Pai da Microbiologia.

O processo conhecido como “pasteurização” do leite foi desenvolvido por ele. Um de seus experimentos mais famosos mostrou que um frasco vedado com nutrientes não desenvolvia bactérias, provando que a vida surge apenas a partir de seres vivos.

Certamente, pelo menos o primeiro caso de surgimento da vida se deu a partir de matéria não-viva. Mas então vamos mudar um pouco a nossa pergunta, como a matéria inerte conseguiu passar de um estado não organizado para um sistema biológico organizado espontaneamente?

### Evolução de características complexas

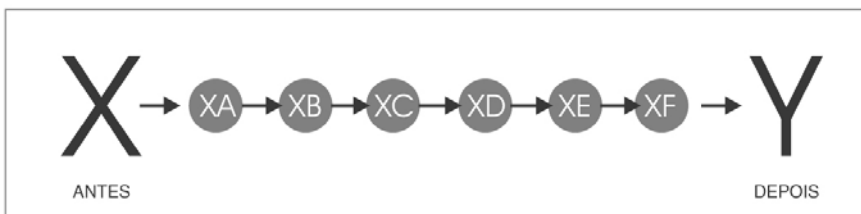
Mesmo o mais simples organismo vivo hoje em dia é muito complexo, se o compararmos com a matéria inerte (não-viva). Uma bactéria (Figura 7.1), por exemplo, possui uma membrana celular que isola seu interior do meio ambiente e seleciona a entrada e a saída de partículas; ela tem o material genético (i.e., DNA) arranjado em forma de um cromossoma circular que é duplicado antes da reprodução da bactéria; ela também possui proteínas complexas e enzimas envolvidas nos processos e nas reações químicas celulares etc.



**Figura 7.1:** O mais simples organismo vivo, uma bactéria, é ainda muito complexo para ter surgido espontaneamente.

Portanto, é inconcebível imaginar o surgimento espontâneo de um organismo, mesmo o mais simples deles, diretamente a partir de matéria não-viva. A membrana celular, o cromossomo, o plasmídeo etc. são partes do ser vivo mais simples. Assim, para concebermos o surgimento de um ser vivo a partir de matéria inerte devemos dividir esse processo em partes menores. Na realidade, o estudo da evolução de qualquer característica complexa passa necessariamente pelo desdobramento dessa característica em passos menores.

Para ilustrar o que isso significa, vamos dar uma olhada na **Figura 7.2** que mostra um esquema geral sobre a evolução da característica complexa Y, a partir de uma característica original X.



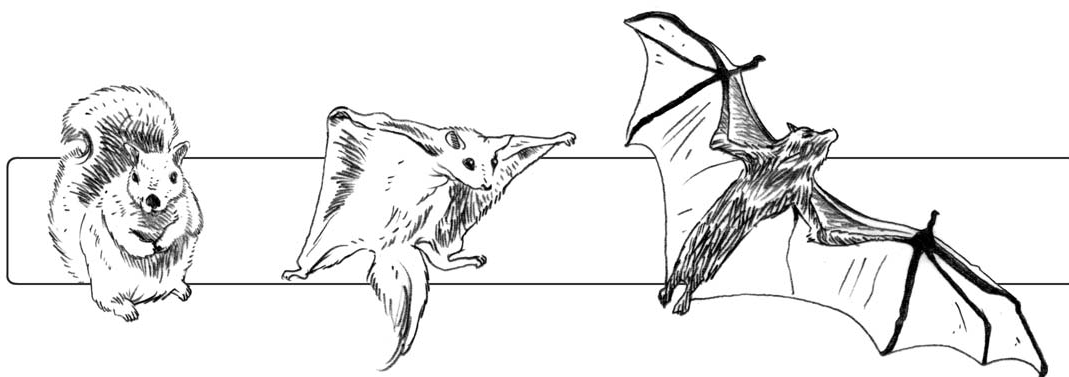
**Figura 7.2:** Evolução de uma característica complexa até Y, a partir de uma característica original X.

Nesse tipo de cenário evolutivo, cada um dos passos intermediários da transformação de uma característica para outra é decorrência de uma nova mutação que apareceu espontaneamente na população e foi substituída pela seguinte. Ou seja, X foi substituído por A, que foi substituído por B, que foi substituído por C, e assim por diante até Y. Para que a evolução de X para Y ocorra, cada passo intermediário entre eles deve representar um avanço, uma vantagem para o organismo portador em relação ao passo anterior. Dessa forma, garantimos a estabilidade do passo intermediário e a progressão de X para Y através da seleção natural (ver Aula 5). Isto é, garantimos que a nova característica não seja eliminada, já que o organismo portador dela apresenta uma vantagem adaptativa sobre os outros não-portadores. Assim, também garantimos que a direção da evolução da característica ocorra de X para A, de A para B, de B para C, até Y, e não ao contrário.

Uma outra exigência do nosso modelo de evolução de características complexas é que os passos intermediários (A, B, C, ...) devem ser pequenos o suficiente (em relação ao anterior) para que o simples acaso possa explicar seu aparecimento. Ou seja, o surgimento espontâneo de cada passo deve ser concebível, a partir do passo anterior.

Nesse modelo, o número de passos intermediários é irrelevante para que a evolução ocorra. Isso significa que poderíamos facilmente desdobrar a evolução do passo evolutivo onde “X” evolui para A, em inúmeros passos intermediários entre “X” e “A”. Um outro ponto interessante sobre o nosso modelo é que os passos intermediários não precisam ter necessariamente a mesma função do anterior.

Vamos dar um exemplo para melhor ilustrar a evolução de uma característica complexa: o surgimento da asa de um morcego. Imaginemos que os morcegos se originaram a partir de organismos semelhantes a esquilos com quatro patas, como mostra a **Figura 7.3**.



**Figura 7.3:** Evolução de morcegos a partir de organismos semelhantes a esquilos.

Como poderia ter acontecido essa transformação? Um possível cenário seria a evolução do vôo se iniciando como um sistema planar. Nesse caso, o passo intermediário, planar, é a habilidade de conseguir se estabilizar numa queda. Hoje em dia, existem diversos organismos planadores. Veremos que a habilidade de planar, assim como a de voar, poderia ser considerada adaptativa, caso o organismo original fosse habitante de lugares altos. Ou seja, sem a habilidade de planar, o organismo cairia de uma árvore e poderia se machucar muito ou até mesmo morrer. Os esquilos voadores (**Ordem DERMOPTERA** de mamíferos) possuem essa capacidade.

#### DERMOPTERA

É uma ordem de mamíferos herbívoros semelhantes a esquilos que apresentam uma membrana entre os membros anteriores e os posteriores que os permite planar.

Do mesmo modo, ao longo da evolução dos morcegos, qualquer mutação que acarretasse uma membrana entre os dedos do organismo seria selecionada. O organismo que sofresse essa mutação diminuiria a intensidade da queda e, assim, a probabilidade de se machucar se viesse a cair. Por isso, a habilidade de planar é adaptativa.

A membrana, que poderia ter surgido bem pequena, poderia ter sido desenvolvida gradualmente, até atingir o ponto que chamamos asa. A cada passo da evolução, a intensidade da queda diminuiria e, assim, a mutação seria selecionada, garantindo a direção da evolução de andar para planar, e, depois, de planar para voar. É possível, portanto, explicar a formação de qualquer estrutura complexa, como a asa, acompanhando cada um dos passos intermediários dessa evolução.



## Origem das macromoléculas

Usaremos agora a mesma lógica da evolução de características complexas para estudar a origem da vida. Nesse caso, o primeiro passo foi o surgimento das macromoléculas (proteínas e ácidos nucleicos), moléculas centrais à reprodução de toda entidade viva.

Entretanto, como mesmo essas macromoléculas são complexas, devemos iniciar com o surgimento de moléculas mais simples — aminoácidos e nucleotídeos — a partir dos compostos que sabemos presentes na atmosfera primitiva. Em seguida, iremos explicar a transformação de moléculas simples em complexas, através de reações espontâneas de polimerização.

### Terra primitiva

Há cerca de 4,55 bilhões de anos, a Terra foi formada. Naquela época, nosso planeta era muito diferente desse em que acordamos todas as manhãs. Embora o Sol da época emitisse apenas 30% da radiação que emite hoje, a Terra era um planeta extremamente quente. O constante bombardeamento de sua superfície por **METEORÓIDES** fazia dela um planeta não apenas quente, mas também crescente em massa.

Os meteoróides impactavam com tanta força que se liquidificavam e, muitas vezes, chegavam até a vaporizar as rochas da superfície terrestre. Com a energia liberada nesse choque, os **METEORITOS** derretiam e, assim, iam adicionando massa ao nosso planeta em crescimento. Obviamente, o clima da época era extremamente inóspito à vida. Qualquer forma de vida que, porventura, tivesse se formado durante essa época teria sido imediatamente destruída pelo imenso calor.

A energia em forma de calor era suficientemente grande para transformar toda a água de superfície em vapor. Portanto, a Terra primitiva não tinha água em estado líquido devido às suas altas temperaturas. Sabemos hoje que a água líquida é um composto primordial para a vida, pois ela é o meio pelo qual os organismos podem adquirir nutrientes e dispensar os dejetos metabólicos. Conseqüentemente, na Terra primitiva não existiam condições ambientais que permitissem a vida.

#### METEORÓIDES

São corpos de pequenas dimensões que se movem pelo espaço cósmico e se tornam incandescentes ao entrar na atmosfera terrestre. Meteoros são os fenômenos luminosos resultantes do atrito dos meteoróides com gases da atmosfera terrestre, ou seja, são o que conseguimos distinguir visualmente dos meteoróides.

#### METEORITOS

São os corpos celestes que caíram na superfície terrestre depois de produzirem meteoros.

A gravidade, oriunda da massa crescente do planeta, fazia uma separação de elementos pelo seu peso nas diferentes camadas. Os elementos químicos mais pesados, como ferro, acumulavam-se no centro do núcleo terrestre. Outros, um pouco mais leves, como sílica, magnésio e alumínio, flutuavam até a superfície do novo planeta. E alguns, mais leves ainda, como hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e carbono, eram lançados na atmosfera terrestre.

### Atmosfera primitiva

Já por volta da década de 20, Alexander Oparin, na Rússia, e J.B.S. Haldane, na Inglaterra, concluíram que os compostos orgânicos necessários à vida não poderiam ser formados numa atmosfera semelhante à de hoje, rica em oxigênio livre. Isso porque o oxigênio tem a propriedade de roubar átomos de hidrogênio de compostos orgânicos e transformá-los em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Assim, esse elemento impede (ou dificulta) as reações químicas de polimerização, que dependem do hidrogênio, para transformar moléculas orgânicas simples nas moléculas orgânicas complexas necessárias à vida (veja a Aula 6).

A maior parte dos pesquisadores atuais acredita que a atmosfera primitiva tinha composição de  $\text{H}_2\text{O}$  (vapor d'água),  $\text{CO}_2$  (gás carbônico),  $\text{N}_2$  (nitrogênio),  $\text{CH}_4$  (metano) e  $\text{NH}_3$  (amônia).

Quando a Terra começou a esfriar, por volta de 3,9 bilhões de anos atrás, o vapor d'água gradualmente se transformou em água líquida, formando os imensos oceanos primitivos. Esses oceanos se misturavam aos compostos da atmosfera, formando a chamada **SOPA PRIMORDIAL**.

#### **SOPA PRIMORDIAL**

É o oceano primitivo de água líquida rico em compostos químicos redutores (ou seja, ricos em hidrogênio – metano, amônia, sulfeto de hidrogênio)

### Carbono

Entre os elementos mais comuns na sopa primordial estava o carbono. Examinando os organismos vivos hoje em dia, sabemos que o carbono é o centro da vida, é fundamentalmente indispensável a ela. Apenas átomos de carbono podem se agrupar em anéis e cadeias, ligar-se a outros átomos de carbono e, assim, formar toda a gama de compostos orgânicos.

No nosso corpo, o carbono está presente nos alimentos que ingerimos, no DNA, nas unhas das mãos e em cerca de 99% do nosso corpo.

O carbono, abundante na Terra primitiva, não era proveniente apenas da erupção de gases do interior do planeta. Boa parte do carbono terrestre se deve ao bombardeamento de meteoróides e cometas na superfície do globo. Na realidade, os condritos carbonáceos fazem parte de uma classe abundante de meteoróides que, quando colidiam com a Terra, contribuíam com boa parte do carbono aqui encontrado. O conteúdo carbônico desses asteróides inclui não somente o elemento carbono em si, mas também seus compostos simples.

## SILÍCIO E CARBONO

Somente o elemento silício é tão versátil quanto o carbono. O carbono e o silício estão na mesma família na Tabela Periódica, ambos possuem quatro elétrons para compartilhar na sua camada mais externa. O silício é o único elemento que também pode se ligar a outros átomos de silício. Entretanto, no caso do silício, as ligações são bem menos estáveis e se rompem mais facilmente. Além disso, o fato de o elemento silício ser abundante no espaço sideral leva-nos a pensar na possibilidade de formas de vida em outras galáxias baseadas em silício. Atualmente, a tecnologia de *chips* de computador de silicone (silício) explora as propriedades desse material. Não é mera coincidência que a inteligência de silicone seja o único rival em potencial do nosso cérebro baseado em carbono.

## Primeiros aminoácidos

Realmente, há cerca de 3,8 bilhões de anos, a Terra passou a ter condições ambientais um pouco mais favoráveis à vida. O planeta já não era tão quente e os bombardeamentos de meteoróides tinham diminuído intensamente. Tanto o elemento carbono quanto seus compostos simples eram relativamente abundantes.

Mas como podemos, a partir dessas evidências, explicar o aparecimento das macromoléculas fundamentais para a vida, as proteínas e os ácidos nucleicos?

No início dos anos 50, o cientista americano Stanley Miller desenhou um experimento para testar a hipótese formulada por Oparin e Haldane, que ficou conhecida como a sopa primordial, como vimos anteriormente. A hipótese de Miller era que a partir de compostos simples e energia, compostos orgânicos poderiam ser formados espontaneamente. A **Figura 7.4** detalha o experimento de Miller num sistema de um frasco fechado. O sistema possui duas fontes de energia. Em A, o fogo aquece a sopa primordial. O fogo simula o aquecimento da superfície devido a bombardeios de meteoróides ou em regiões próximas a vulcões.

Em B, a atmosfera primitiva é bombardeada por descargas elétricas que simulam os relâmpagos. Essas duas fontes de energia foram capazes de transformar os gases da atmosfera primitiva em moléculas orgânicas simples, incluindo alguns aminoácidos simples em poucos dias. A importância dessa descoberta é a formação espontânea de moléculas orgânicas a partir de compostos inorgânicos simples com fontes de energia que provavelmente presentes na atmosfera primitiva. Através desse tipo de experimento, 13 dos 20 aminoácidos necessários à vida hoje podem ser formados espontaneamente.



**Figura 7.4:** O experimento de Miller.

## Atividade ótica

Uma particularidade dos aminoácidos encontrados até hoje nos seres vivos é serem eles opticamente ativos. Cada um dos 20 tipos de aminoácidos conhecidos possui duas formas diferentes (Figura 7.5).

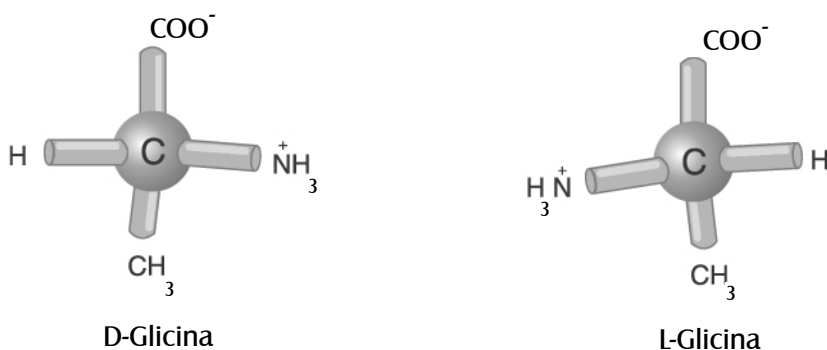


Figura 7.5: Enantiômeros da glicina. D-glicina e L-glicina.

Os L-aminoácidos rotacionam o plano da luz polarizada para a esquerda, enquanto os D-aminoácidos rotacionam o plano para a direita. Esse tipo de molécula, opticamente ativa, possui uma assimetria tal que não é sobreponível, da mesma forma que a mão direita e a esquerda não são sobreponíveis. Uma molécula opticamente ativa é a imagem especular de outra. Essas moléculas são chamadas de enantiômeros.

Os enantiômeros possuem propriedades bioquímicas idênticas, com exceção do desvio da luz polarizada para a direita ou para a esquerda. Por essa razão, estranhamos o fato de todos os aminoácidos constituintes de proteínas dos seres vivos serem L-aminoácidos. Apesar de encontrarmos aminoácidos D e L na Terra e fora dela, nos seres vivos existem apenas os L-aminoácidos. Até o presente momento não sabemos a razão desse desvio. Alguns pesquisadores sugerem que certas enzimas, como aquelas que manipulam cadeias polipeptídicas, são específicas para um tipo de aminoácidos, naturalmente o tipo L-aminoácido. Isso significaria, que as enzimas que catalisam reações com peptídeos em nosso organismo não seriam capazes de catalisá-las com D-aminoácidos. Infelizmente, isso ainda não nos aponta a razão de todas as nossas enzimas serem L-enzimas. Falaremos um pouco mais sobre isso na próxima aula.

De qualquer forma, o fato de, nos seres vivos da Terra, só serem encontrados L-aminoácidos motivou a realização de um teste para comprovar ou não a presença de vida em meteoritos, rochas extraterrestres, rochas da Terra primitiva etc. Mesmo tendo extraído aminoácidos de meteoritos carbonáceos, uma análise mais profunda sempre mostra que existem aminoácidos D e L nesses asteróides, sugerindo uma origem química e não biológica de tais compostos.

### **Outros compostos**

Experimentos de simulação semelhantes ao de Miller comprovaram também a formação da base nitrogenada adenina, a partir de HCN (cianeto). Essa formação é de extrema importância, porque é um dos componentes do DNA e do RNA. Entretanto, a formação de outras bases nitrogenadas dos ácidos nucleicos ocorre em escala bem menor, ou não ocorre nesse tipo de experimento.

Outros compostos importantes não são encontrados em quantidades expressivas nos experimentos de simulação. Por exemplo, a ribose, que forma a coluna vertebral da molécula de DNA e RNA (veja Aula 6), foi encontrada apenas em pequenas quantidades. As grandes cadeias de ácidos graxos que formam a membrana celular são completamente ausentes em estudos de simulação. Elas possuem um papel fundamental para assegurar a entrada de compostos não solúveis em água através da membrana celular.

### **Polimerização**

Além de explicar o aparecimento de monômeros simples das moléculas fundamentais nos processos biológicos, precisamos também explicar de que maneira os monômeros se agruparam em compostos maiores e mais complexos. A argila, componente inorgânico, é fundamental nesse processo de polimerização. Seus componentes minerais são agrupados frouxamente e arranjados em folhas. Entre eles, átomos de outros elementos podem se agrupar e acumular, e assim concentrados podem vir a reagir formando moléculas mais complexas.

A argila, portanto, provê uma fábrica natural para aumentar o tamanho e a complexidade de moléculas orgânicas, como proteínas e ácidos nucleicos.

Outras simulações evidenciaram que pequenos polipeptídeos foram formados em condições de temperatura muito alta ( $120^{\circ}\text{C}$ ), e mesmo oxidantes. Isso seria um indício, para alguns cientistas, de que a atmosfera primitiva pode não ter sido tão redutora, como afirmamos anteriormente. A Terra primitiva poderia ter sido capaz de formar compostos mais complexos em regiões de temperatura alta, como aquelas próximas a vulcões, ou em regiões em que a crosta terrestre teria sido mais fina.

Na próxima aula veremos como essas moléculas podem ter se arranjado em uma entidade que chamamos vida.

## RESUMO

De acordo com algumas teorias, os elementos que provavelmente compunham a atmosfera primitiva eram  $\text{H}_2\text{O}$  (vapor d'água),  $\text{CO}_2$  (gás carbônico),  $\text{N}_2$  (nitrogênio),  $\text{CH}_4$  (metano) e  $\text{NH}_3$  (amônia). A partir desses compostos, adicionando descargas elétricas e calor, estudos de simulações conseguiram formar espontaneamente aminoácidos simples, a base nitrogenada adenina, a ribose etc. A argila provavelmente foi uma substância importante na origem da complexidade. Devido à sua estrutura, ela pode servir de suporte para reações de formação de outros compostos e de reações de polimerização de proteínas e ácidos nucleicos.

## EXERCÍCIOS

1. O que é vida?
2. Por que temos que perceber evolução de características complexas através da compreensão da evolução de características intermediárias?
3. Qual a importância do experimento de Miller para a compreensão da origem da vida?
4. Qual a contribuição da argila na formação de moléculas mais complexas?





# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Familiarizar-se com o “mundo do RNA”.
- Compreender a cooperação entre moléculas e sua importância na origem dos organismos.
- Distinguir cenários possíveis para evolução da síntese de proteínas.

## **Pré-requisito**

Você deverá estar bem familiarizado com as Aulas 3, 5, 6 e 7.

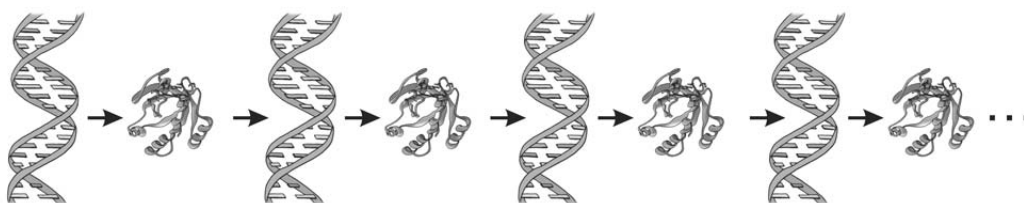
## INTRODUÇÃO

Na aula passada estudamos o aparecimento espontâneo de moléculas simples como os aminoácidos e os nucleotídeos. Além disso, mencionamos que alguns catalisadores naturais, como a argila, poderiam ter auxiliado nas reações de polimerização, transformando moléculas simples em complexas, tais como os aminoácidos e as bases nitrogenadas. Podemos dizer que os experimentos de simulação deram um grande passo na compreensão da origem da vida; no entanto, ainda temos um grande caminho pela frente. Como explicar o surgimento das longas cadeias polipeptídicas (proteínas) e dos ácidos nucléicos?

## Dilema

Na resolução dessa questão, deparamo-nos com um dilema. Toda célula viva precisa de proteínas (enzimas) para catalisar reações do metabolismo. No entanto, a seqüência de aminoácidos de todas as proteínas é determinada com base nos ácidos nucléicos, como vimos na Aula 6. Tais ácidos nucléicos funcionam como um molde para a fabricação das proteínas. Um segmento de DNA, por exemplo, com a seqüência ATG-CTT-AAT, irá necessariamente produzir um tripeptídeo Metionina-Leucina-Asparagina.

Da mesma forma, os ácidos nucléicos também são necessários para armazenar informações hereditárias e passá-las de geração a geração através da reprodução. Como o próprio nome indica, a replicação do DNA é o processo que o reproduz, permitindo a perpetuação dessa molécula em molécula- filhas. Esse processo envolve uma série de enzimas, ou seja, de proteínas, usadas para abrir, girar, polimerizar e colar o DNA. Resumindo: as proteínas necessitam de DNA para serem fabricadas; o DNA necessita de proteínas para se replicar; organismos vivos requerem ambas as moléculas para suas funções vitais, como mostra a **Figura 8.1**.



**Figura 8.1:** A relação entre DNA e proteínas. Um necessita do outro para existir. Portanto, quem surgiu primeiro?

Os ácidos nucleicos e as proteínas são moléculas complexas e, portanto, fica quase impossível imaginar que elas apareceram no mesmo momento geológico. Além disso, se uma dessas macromoléculas apareceu espontaneamente antes da outra, é provável que não tenha conseguido sobreviver durante muito tempo fora de um sistema biológico que assegurasse a sua perpetuação.

Em vista disso, cabe a pergunta: Quem veio primeiro? As proteínas? Ou os ácidos nucleicos? Qual molécula poderia ser responsável pelo funcionamento, ainda que precário, de uma entidade viva? Lembre-se de que aqui definimos vida como uma entidade capaz de se replicar (reprodutibilidade), de passar informação genética para a próxima geração (herdabilidade) e de sofrer mutações (mutabilidade). Mas que tipo de molécula poderia ter essas três propriedades? Os ácidos nucleicos carregam informações hereditárias e podem sofrer mutações. Entretanto, eles só se replicam na presença de enzimas (proteínas). Por outro lado, as proteínas podem catalisar reações como as de replicação, mas não armazenam informação genética que pode ser passada para a próxima geração.

## Mundo do RNA

No final da década de 1960, vários pesquisadores, independentemente, lançaram ao mundo científico uma teoria para resolver tal questão. Essa teoria é hoje chamada de “mundo do RNA”, que considera factível um sistema biológico apenas com moléculas de RNA. Nesse cenário hipotético, as funções dessa molécula inicial incluiriam a de carreadora de informação (como os ácidos nucleicos atuais) e a de catalisadora de reações (como as proteínas atuais). Algumas evidências sugerem que o RNA apareceu primeiro:

1- O RNA tem uma diversidade de funções celulares: RNA-mensageiro, RNA-transportador e RNA-ribossomal. Isso indica uma especialização, possivelmente devido à antiguidade da molécula;

2- O RNA atua nos processos celulares mais antigos, como a síntese de proteínas;

#### **VÍRUS DE RNA**

São vírus que possuem RNA como material genético.

3-A ribose (açúcar presente no RNA) pode ser formada espontaneamente a partir da polimerização de formaldeído, mas a desoxirribose (açúcar presente no DNA) não;

4- O RNA pode servir de material hereditário. Alguns vírus, os chamados **VÍRUS DE RNA** — o vírus Influenza que causa a gripe e o vírus HIV que causa AIDS — possuem RNA, em vez de DNA, como material hereditário;

5- O DNA é mais estável que o RNA, e, portanto, uma substituição de um pelo outro, ou seja, o do RNA pelo DNA, seria naturalmente favorecida mais tarde pela seleção natural, originando o material genético da maior parte dos organismos vivos hoje em dia;

6- E, finalmente, a molécula de RNA possui uma série de atividades catalíticas já descritas pelos cientistas.

Esse último ponto é extremamente interessante. Realmente, alguns estudos comprovaram que moléculas de RNA podem catalisar reações químicas, função que pensávamos anteriormente ser restrita a enzimas. Vários exemplos desse tipo de atividade em RNA já foram também demonstrados, inclusive a auto-replicação das moléculas, porém numa escala bem menor. Algumas evidências indicam que, na verdade, é o próprio RNA-ribossomal o responsável pela catálise das ligações peptídicas, formadoras das cadeias polipeptídicas que ocorrem no ribossomo. As enzimas de RNA são chamadas ribozimas.

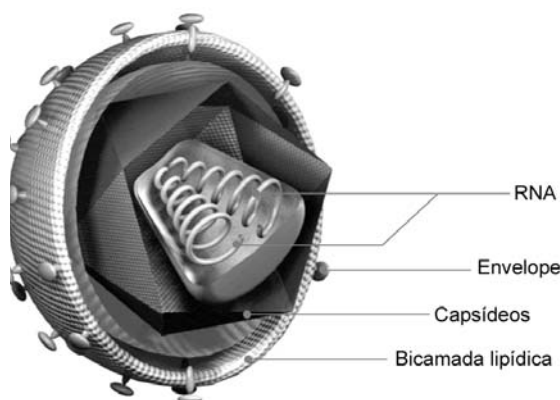
Portanto, o RNA foi chamado de “a solução” do principal dilema para explicar a origem da vida: quem surgiu primeiro, a Genética ou o metabolismo? No mundo do RNA apenas o RNA é necessário, ele era o material hereditário, auto-replicante e suscetível às mutações que estávamos procurando. Nesse ambiente primitivo, eventualmente poderemos imaginar que outras moléculas complexas entraram no processo e, aos poucos, foram se especializando. Entretanto, a base de todos os sistemas biológicos já estava lá. No entanto, devemos lembrar que o fato de um “mundo” ser conceptível apenas com RNA não é evidência de que aconteceu dessa forma.

## Mundo do DNA?

Recentemente, foi proposta a idéia de que o DNA também possui atividade catalítica. Pergunta-se: essa seria a hora para uma nova teoria sobre o “mundo do DNA”? Dentro de uma perspectiva pré-biótica, o RNA é uma molécula frágil, instável e difícil de sintetizar. Além do mais, ainda está para ser demonstrado que tal molécula pode ser formada pelos monômeros presentes na Terra primitiva e que esses RNA possuem atividade catalítica.

Por outro lado, numa perspectiva bioquímica, o RNA está presente nos processos mais antigos do metabolismo celular, como a síntese protéica, conforme mencionamos anteriormente. Podemos observar ainda que o DNA é mais estável do que o RNA, porque seu pareamento de bases é mais preciso e ocorre com menores taxas de erros. Por essa razão, é mais plausível supormos que o DNA veio a substituir eventualmente o RNA como material genético nos organismos e que o RNA tenha assumido o seu papel na síntese de proteínas, como foi descrito na Aula 6.

Os únicos organismos que não possuem DNA como material genético são os vírus de RNA, como já vimos (Figura 8.2).



**Figura 8.2:** Um vírus de RNA, o HIV, que causa a AIDS.

Esses vírus têm um **TEMPO DE GERAÇÃO** muito curto e uma taxa de mutação altíssima que são, na realidade, alguns motivos pelos quais se torna difícil o desenvolvimento de vacinas contra as infecções causadas por eles. Com essa alta taxa de reprodução e de mutação, eles mudam suas características de uma forma extremamente rápida e assim, as vacinas desenvolvidas se tornam logo obsoletas.

### TEMPO DE GERAÇÃO

É o tempo desde o nascimento até a reprodução do organismo.

Dentre os vírus de RNA, apenas nos chamados retrovírus, o DNA assume o papel (do RNA) na síntese de proteínas descrita na Aula 6. Nesse cenário, a substituição do RNA pelo DNA como material genético ocorreu após a divergência dos vírus de RNA com os outros organismos.

### **Proteínas num mundo de RNA**

Resumindo o nosso cenário primitivo até a seção anterior: numa sopa primordial, cheia de moléculas complexas e aminoácidos, temos moléculas de RNA se replicando, mutando e passando suas informações genéticas para a próxima geração. No entanto, ainda estamos muito longe de um organismo simples. E qual seria o próximo passo para formar um organismo simples?

A primeira e mais importante molécula seria o RNA, como vimos, pois sozinho ele já possui as três propriedades dos sistemas biológicos que são: reprodutibilidade, herdabilidade e mutabilidade. O próximo passo natural é a introdução das proteínas no nosso cenário. A concepção de proteínas em si é razoavelmente simples, porque já mostramos que aminoácidos eram abundantes nos oceanos primitivos (ver Aula 7). Mas a introdução das proteínas vai gerar uma nova e importante propriedade do nosso sistema, que é a cooperação entre moléculas. Ou seja, mais de uma molécula trabalhando em conjunto para garantir a sobrevivência das duas, no caso os ácidos nucleicos e as proteínas.

Esse tipo de cooperação só funciona se o sistema assegurar a perpetuação dos dois tipos de moléculas, e não apenas daquela que carrega o material genético. Nesse sentido, a síntese de proteínas provê a “cola” necessária para juntar ácidos nucleicos e proteínas num sistema que garante a replicação das duas moléculas. Na Aula 6 apresentamos uma breve revisão sobre a síntese de proteínas e o papel fundamental do RNA. Se você não está com a síntese de proteínas fresca na memória, retorne àquela aula e leia-a outra vez. Agora vamos tentar ilustrar como ocorreu a evolução desse processo.

## Síntese de proteínas

O passo crucial na síntese de proteínas foi o acoplamento de aminoácidos específicos a segmentos de RNA específicos, como acontece nas células com os RNA-transportadores. Os RNA-transportadores têm um papel de carreadores de aminoácidos e no ribossomo ocorre a síntese com um RNA-mensageiro como molde. Já vimos também que o oceano primitivo deveria ser rico em aminoácidos, de acordo com o experimento de Miller (Aula 7). Assim, falta de aminoácidos não seria o problema. Mas como poderíamos conceber esse acoplamento de forma a se tornar vantajoso para o sistema? Uma maneira seria o aminoácido se acoplar às ribozimas do sistema apenas como **CO-FATOR**, auxiliando-as nas reações do metabolismo.

Devemos lembrar que várias enzimas atuais se valem do auxílio de co-fatores para desempenhar suas funções. Ora, enzimas não usam aminoácidos como co-fatores, porque elas já os possuem em sua cadeia primária. Mas imagine uma ribozima primitiva com apenas quatro bases nitrogenadas diferentes alternadas. A constância de apenas quatro bases diferentes

reduz drasticamente o número de reações possíveis para aquela ribozima, quando comparada a uma enzima moderna formada por um conjunto de 20 aminoácidos diferentes. Assim, um aminoácido acoplado a essa ribozima poderia aumentar a amplitude e a especificidade das reações catalisadas. Isso seria extremamente vantajoso para o sistema. Da mesma forma, dois aminoácidos funcionando como co-fatores poderiam auxiliar ainda mais essas reações.

Realmente, é mais fácil assumir que a evolução de enzimas protéicas ocorreu a partir das ribozimas. Por exemplo, uma série de ribozimas com um, dois, três aminoácidos, que formariam uma série de estados intermediários em que as ribozimas com aminoácidos seriam gradualmente transformadas em proteínas.



**Figura 8.3:** Estrutura de uma proteína.

### CO-FATOR

É uma molécula ou um íon que auxilia as enzimas na catálise de reações químicas.

Apesar de não estar claro ainda como ocorreu o pareamento específico, sabemos que ele deve ter surgido, no início, quando as primeiras cadeias polipeptídicas se formaram. Isso porque o códon de terminação atualmente é um códon sem um anticódon equivalente no RNA-transportador, que é acoplado a um aminoácido. Ou seja, o sinal para terminar a cadeia polipeptídica é um códon sem anticódon equivalente. Caso não houvesse especificidade — se para todos os códons qualquer tipo de aminoácido poderia se encaixar — as cadeias nunca seriam terminadas, pois um aminoácido sempre poderia se encaixar na posição seguinte.

### **Código genético**

Uma hipótese antiga sobre a evolução do código genético é imaginar que o códon original tinha apenas uma letra ou duas. Ou seja, com quatro bases nitrogenadas possíveis e um códon de uma letra, quatro aminoácidos poderiam fazer parte do metabolismo dos primeiros organismos. Um códon de duas letras seria o suficiente para 16 aminoácidos. Será que esse cenário é viável?

Um dos problemas mais graves com essa hipótese é imaginar que cada mudança no número de bases para gerar um aminoácido deve significar a mudança radical de todos os componentes sintetizados anteriormente. Isso porque a sequência AU CG UU AG CG GG determinaria aminoácidos completamente diferentes de AUC GUU AGC GGG. Mudanças radicais como essa na estrutura primária de todas as proteínas provavelmente seriam letais ao organismo portador. Consequentemente, podemos descartar essa hipótese.

Alguns pesquisadores, por essa razão, sugerem que o código genético seria lido de três em três bases desde o seu início. Outros consideram ainda que o código poderia ser lido de dois em dois, mas com espaçadores de nucleotídeos. Esses espaçadores seriam nucleotídeos entre os dupletes que, originalmente, não apresentavam qualquer função, mas evoluiriam mais tarde como a terceira posição do códon.



Essa teoria faz sentido. Três nucleotídeos formam um pareamento mais estável entre o códon e o anticódon do que apenas dois o fariam, enquanto um códon com quatro nucleotídeos tornariam a síntese protéica muito lenta. Uma outra evidência é o fato de que, para alguns aminoácidos, o nucleotídeo na terceira posição do códon é irrelevante. Como exemplo, podemos citar o aminoácido treonina, que é determinado por qualquer um dos seguintes códons: ACA, ACG, ACC e ACT.

Na próxima aula veremos a evolução da delimitação do indivíduo pela membrana periférica e a evolução da complexidade celular.

### UNIVERSALIDADE DO CÓDIGO GENÉTICO

Um dado importante com algumas conseqüências interessantes é o fato de o código genético ser universal, ou seja, todos os organismos possuem exatamente o mesmo código de transformação de códons em aminoácidos. Na realidade, qualquer mudança nesse código, mesmo que pequena, significaria mudanças estruturais grandes na estrutura primária de todas as proteínas do organismo. Isso seria provavelmente letal para o organismo mutante. Como já mencionamos, mutações deletérias (principalmente as letais) são eliminadas imediatamente pela seleção natural e, por essa razão, não as concebemos como passos intermediários em nossos estudos evolutivos. Realmente, as possibilidades de código genético de 20 aminoácidos e 64 códons são da ordem de 1070!!! Alguns teóricos sugerem que em um determinado momento vários códigos genéticos estavam operando nos seres vivos da época. Entretanto, apenas uma dessas linhagens sobreviveu para formar toda essa diversidade de vida que temos hoje em dia. Isso é chamado de “acidente de congelamento”. Um desses acidentes pode explicar também o fato de só existirem L-aminoácidos nos seres vivos atualmente, como comentado na última aula.

## RESUMO

Nesta aula vimos que o RNA pode assumir o primeiro papel fundamental na evolução dos seres vivos; pode ser chamado de primeira entidade viva, já que ele assume as funções de material genético e de catalisador de sua replicação, segundo a teoria do “mundo do RNA”. Num “mundo do RNA”, o RNA carrega informação genética e é passível de sofrer mutações. Além disso, alguns tipos de RNA, como as ribozimas, possuem atividade catalítica que poderia ter catalisado sua própria replicação. Portanto, a molécula de RNA é uma candidata a primeira entidade viva, com as propriedades de herdabilidade, mutabilidade e reprodutibilidade.

No cenário seguinte, as proteínas entram no sistema. A princípio, as ribozimas devem ter usado aminoácidos como simples co-fatores para aumentar a eficiência das reações. Cada aminoácido acoplado poderia ser específico para cada tipo de ribozima, num precursor do RNA-transportador. Em seguida, outros aminoácidos foram se acoplando até que as proteínas assumiram seu lugar como catalisadores na célula. O código genético, responsável pela tradução de códons em aminoácidos, evoluiu provavelmente de duas posições do códon com um espaçador de nucleotídeos para o código atual, com três posições.

## EXERCÍCIOS

1. O que é o mundo do RNA? Por que o mundo do RNA é uma hipótese mais e provável do que a do mundo do DNA?
2. Qual é a importância da teoria do mundo do RNA, na compreensão da origem da vida?
3. Por que dizemos que é improvável o código ter evoluído de uma letra, um aminoácido, depois para duas e somente depois para ser lido de três em três letras, um aminoácido como acontece hoje em dia? Qual a alternativa mais provável?
4. Cite uma explicação para o fato de todos os organismos possuírem o mesmo código genético universal. Explique.

## Primeiros organismos

AULA

9

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Compreender individualidade e sua importância.
- Localizar as prováveis características das primeiras células e as primeiras evidências fósseis de organismos.

### Pré-requisitos

Você deverá saber os conceitos das Aulas 5, 6, 7 e 8.

Na aula passada vimos a origem dos dois tipos mais importantes de moléculas para a vida: os ácidos nucleicos e as proteínas. Além disso, vimos também um mecanismo pelo qual essas duas moléculas juntas se perpetuariam (a síntese de proteínas) e conseguiriam estabelecer um sistema vivo. Nesta aula veremos como de uma simples cooperação entre moléculas poderemos chegar aos primeiros organismos.

Quando pensamos em primeiros organismos, estamos nos referindo ao LUCA. LUCA é uma abreviatura do nome completo dado ao último ancestral comum a todos os seres vivos (do inglês, *last universal common ancestor*). Pois então, que características o LUCA tinha? Obviamente, o LUCA era um organismo unicelular que deu origem a toda a diversidade biológica unicelular e multicelular. Algumas características comuns a todos os seres vivos nos indicam esse tipo de afirmação. Por exemplo, a linguagem universal de toda a diversidade biológica é o código genético. Você sabia que o gene que codifica a proteína insulina nos humanos, por exemplo, pode ser inserido no genoma da bactéria através de técnicas de genética molecular? Essa bactéria, com o gene humano inserido, irá produzir exatamente a mesma insulina que nós humanos produzimos devido à identidade dos códigos genéticos! Esse tipo de experimento permite a fabricação de insulina comercialmente para pacientes **DIABÉTICOS** que a produzem em reduzidas quantidades.

#### DIABÉTICOS

São pessoas que sofrem da doença diabetes. Essa doença é caracterizada por uma quantidade exagerada de açúcar no sangue. Os sintomas incluem sede, urinação em excesso, cansaço e perda de peso.

Mas além do código e da presença de proteínas e ácidos nucleicos, o que podemos inferir sobre o LUCA? Por exemplo, dissemos que o LUCA era unicelular. Isto porque os seres unicelulares são mais simples, não envolvem diferenciação, nem comunicação, nem cooperação entre células ou tecidos. Portanto, é mais fácil assumirmos que eles vieram antes e essas complicações surgiram mais tarde.

#### PROTOCÉLULAS

São células primitivas que apresentam apenas os componentes mínimos para garantir a manutenção da individualidade e da auto-suficiência do organismo.

O passo inicial para explicar o desenvolvimento de um desses organismos seria a formação de uma célula, de um primeiro sistema biológico fechado, isto é, de uma **PROTOCÉLULA** do LUCA. Mas como isso aconteceu? A palavra-chave nesse caso é o indivíduo, ou seja, o aparecimento de uma membrana periférica promovendo a delimitação entre o exterior e o interior do indivíduo.

## Protocélulas

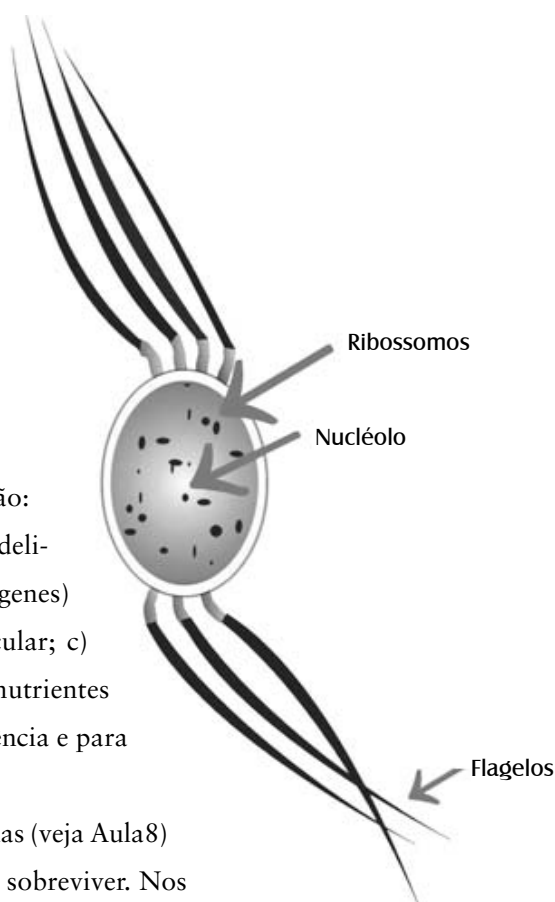
Entretanto, quais seriam os elementos básicos para o organismo mais simples funcionar? O funcionamento da bactéria ilustra a organização de moléculas em um organismo limitado e isolado em relação ao ambiente. A **Figura 9.1** mostra esquematicamente uma célula de bactéria que nos sugere algumas questões.

Os elementos básicos de uma bactéria são:

a) membrana celular semipermeável, também delimitadora do indivíduo; b) material genético (genes) organizado na forma de um cromossoma circular; c) proteínas e enzimas para adquirir energia e nutrientes necessários para seu funcionamento e sobrevivência e para eliminar seus resíduos.

As moléculas de ácidos nucléicos e proteínas (veja Aula8) soltas em um oceano teriam poucas chances de sobreviver. Nos imensos oceanos primitivos, poderia haver uma enorme quantidade de moléculas formadas espontaneamente ao longo de milhões de anos. Assim, qualquer sistema que fosse minimamente isolado (fechado) em relação ao ambiente e que protegesse uma única molécula da degradação seria selecionado naturalmente. A esse sistema fechado denominaremos protocélula.

Portanto, uma protocélula é um sistema delimitado por algum tipo de membrana, contendo em seu interior macromoléculas com capacidade de catálise (como as proteínas) e de auto-replicação (como o RNA). O sistema também possui capacidade de absorver matéria-prima do meio externo e, assim, obter energia para suas atividades metabólicas. Para tal, a membrana delimitadora deve ser semipermeável, ou seja, a membrana deve ser suficientemente permeável para permitir a passagem de nutrientes para o seu interior e impermeável suficiente a macromoléculas, como proteínas e RNA, para assegurar sua manutenção no interior da célula.



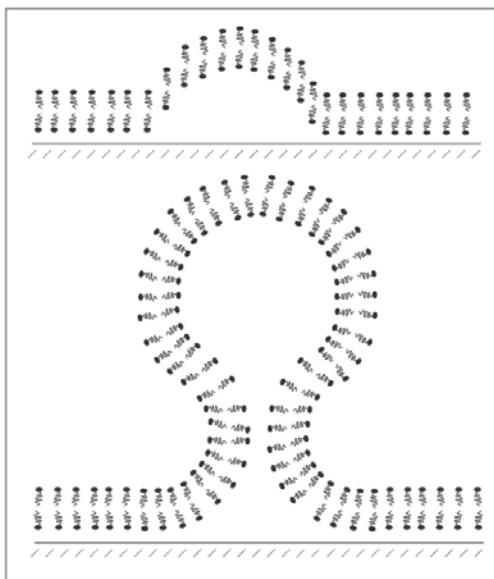
**Figura 9.1:** Esquema de uma bactéria.

## Membrana celular

A membrana celular no proto-organismo permite a compartimentalização e define o interior e o exterior, isto é, define os limites do indivíduo. A individualidade, por sua vez, estabelece um sistema de cooperação único entre suas moléculas. Como mencionamos, esse esquema só é viável porque o sistema da bactéria garante a perpetuação de todas as moléculas e não somente aquelas carreadoras do material genético celular.

Portanto, o surgimento da membrana celular é um ponto crucial na evolução do primeiro organismo. Membranas celulares modernas são formadas por lipídios e proteínas. Proteínas seriam abundantes em nosso cenário anterior e ácidos nucleicos são encontrados também como vimos em aulas passadas; mas e os lipídios?

A idéia da formação espontânea de lipídios é complicada. A bicamada lipídica que encontramos nas membranas de hoje é formada por grandes cadeias de ácidos graxos. Um ácido graxo, por sua vez, é uma molécula linear com uma parte hidrofóbica e outra hidrofílica. A parte hidrofóbica nunca se mistura com água, como no caso do azeite e dos óleos em geral. A terminação hidrofílica dos ácidos graxos é a região que permite o contato com a água.



**Figura 9.2:** Bicamada lipídica se forma espontaneamente, como membrana e como organela.

Devido a essas propriedades, se as moléculas de ácidos graxos fossem despejadas em água, a bicamada lipídica seria formada espontaneamente, como mostra a **Figura 9.2**. A formação colocaria os ácidos graxos enfileirados com as porções hidrofílicas voltadas para fora e em contato com a água, e as porções hidrofóbicas ficariam voltadas umas para as outras, isoladas do contato com a água. Note que as membranas de organelas ou de vesículas também podem ser formadas espontaneamente dessa forma.

Portanto, a princípio a formação de células parece simples devido à espontaneidade de formação da configuração da membrana.

Mas a questão se torna um pouco mais complicada. Isso porque os ácidos graxos, principais componentes de membranas celulares, não são formados em experimentos de simulação semelhantes aos de Stanley Miller (ver Aula 7).

Nesse caso, a única alternativa seria a formação desses compostos por meio de reações na argila. Como descrevemos na Aula 7, a argila funciona como uma “fábrica” de transformação de moléculas simples em complexas, e poderia ser responsável pela “fabricação” de ácidos graxos. No entanto, seriam necessários mais estudos para testar com maior rigor essa possibilidade.

## **Cromossomos**

O arranjo de genes em cromossomos também foi um passo importante na evolução dos primeiros organismos. Imaginemos uma célula na qual os genes estejam espalhados no seu interior de maneira não organizada. Como essa célula pode assegurar que todos esses genes estarão presentes em todos os seus descendentes? Uma maneira simples seria o agrupamento linear de todos os genes em um cromossoma que se duplicaria e cada um de seus cromossomas descendentes seria passado para as células-filhas. Assim, o organismo garantiria a passagem de todo o material genético a todos os seus descendentes. Entretanto, como teria acontecido esse agrupamento de uma maneira espontânea?

Vamos imaginar dois genes (A e B) presentes em cada célula. Em algumas, os genes estão ligados e em outras, eles estão soltos. Naturalmente, as células com genes soltos iriam se reproduzir mais rapidamente. A velocidade da reprodução é certamente uma vantagem adaptativa, pois um maior número de descendentes seria formado num determinado intervalo de tempo. Lembre-se que seleção natural é reprodução diferencial. Por outro lado, células com genes ligados garantem que todos os seus descendentes possuem os dois genes e, portanto, aumentam a chance de sobrevivência de todos os outros descendentes, o que também caracteriza uma vantagem adaptativa. Portanto, que tipo de células sairia ganhando dessa disputa? Com genes ligados ou com genes soltos?

Está claro que se todos os genes do indivíduo são fundamentais para seu funcionamento, células com genes ligados em um cromossoma têm uma enorme vantagem. Um grande número de descendentes produzidos rapidamente de nada adiantaria caso nenhum deles sobrevivesse pela falta de um ou mais genes!

Na realidade, os genes ligados apresentam duas vantagens. A primeira refere-se à duplicação, ao mesmo tempo, de todos os genes. Um gene não irá produzir mais cópias do que outros. A segunda vantagem permite que a célula parental garanta a todos os seus descendentes receber uma cópia de cada um dos genes que permitiram à célula sobreviver e se reproduzir. Depois da ligação de dois genes, fica fácil imaginar a ligação de mais genes (C, D, E...) ao cromossoma. Eventualmente, no entanto, a velocidade de reprodução fica tão lenta, devido ao grande número de genes, que passa a se tornar uma desvantagem.

Nos organismos atuais, o material genético está sempre organizado em cromossomos, mas eles possuem uma maneira de contornar a reduzida velocidade de replicação. A replicação do DNA se dá simultaneamente em vários pontos do cromossoma, com vários focos de DNA-polimerase agilizando muito o processo replicativo.

## Energia

Então, já vimos nesta aula como uma membrana pode ser formada e como o arranjo dos genes em um cromossomo linear é provável de ter acontecido. O que está faltando para termos um organismo completo? O metabolismo, mais especificamente a obtenção de energia. Os organismos atuais obtêm energia das maneiras mais diversas. Uma breve revisão dessas maneiras irá nos auxiliar a entender como procedeu a evolução das vias de obtenção de energia nos primeiros organismos.

O primeiro grupo de organismos é constituído dos chamados heterotróficos, e eles obtêm energia de três maneiras diferentes. Podem se alimentar de animais (os carnívoros), de plantas (os herbívoros) ou de organismos ou produtos em decomposição (os decompositores). Nós humanos somos chamados de omnívoros. Isso significa que podemos nos alimentar de animais, de plantas e até mesmo de fungos, como os cogumelos. Em todos os casos, os organismos heterotróficos dependem de moléculas orgânicas pré-formadas que não conseguem fabricar por si mesmos. Nesses organismos, a obtenção de energia para o funcionamento da célula é obtida por meio da quebra da molécula de glicose (proveniente da alimentação), com auxílio do oxigênio



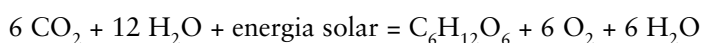
(proveniente da respiração). Essa reação química, na qual a glicose é quebrada com o oxigênio, resulta na liberação de dióxido de carbono e na produção de água e energia para a célula, da seguinte forma:



O segundo grupo de organismos engloba os chamados **FOTOSSINTÉTICOS**, que obtêm energia diretamente através da luz solar. A fotossíntese é o único processo na natureza de fabricação de matéria orgânica. Todos os outros organismos heterotróficos se aproveitam direta (herbívoros que se alimentam das plantas) ou indiretamente (carnívoros que se alimentam dos herbívoros os quais se alimentam das plantas) desse processo. Mesmo os raios de Sol de pouca intensidade podem ser absorvidos por pigmentos especiais presentes nos organismos fotossintéticos que capturam energia. Essa energia pode vir a ser usada para romper as ligações do hidrogênio de compostos simples e uni-lo com dióxido de carbono para formar os carboidratos, da seguinte forma:

**FOTOSSINTÉTICOS**

São organismos que fabricam sua matéria orgânica durante a fotossíntese.



Na Terra primitiva, havia pouco ou nenhum oxigênio livre; portanto, os organismos não poderiam ser heterotróficos. Por outro lado, a fotossíntese envolve pigmentos complexos e de difícil síntese com os compostos simples que estavam disponíveis na Terra primitiva. Como, então, esses primeiros organismos adquiriam energia?

Algumas bactérias, hoje em dia, encontraram fontes de energia química diferentes do oxigênio e são chamadas quimiotróficas. Outras podem viver em compostos sulfídricos, respirando sulfeto de hidrogênio para extrair energia química. Há ainda as que vivem do nitrogênio de compostos orgânicos, e outras, da fermentação de moléculas orgânicas.

#### ARQUEBACTÉRIAS

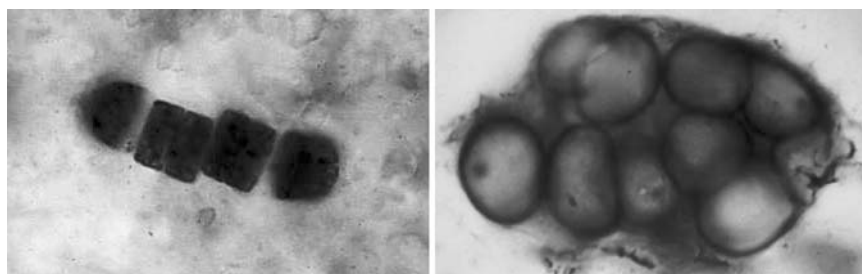
São bactérias que vivem em lugares extremos. Você irá estudar melhor esses organismos na próxima aula.

A descoberta de **ARQUEBACTÉRIAS**, que vivem hoje em fontes hidrotermais, permitiu-nos compreender melhor a fisiologia e a biologia dos primeiros habitantes da Terra. Isso porque esses organismos vivem em ambientes com pouco ou mesmo nenhum oxigênio, semelhantes àqueles da atmosfera primitiva.

Como as bactérias modernas, as primitivas não usavam água como fonte de hidrogênio. As complexas moléculas de carbono desses organismos primitivos provavelmente se quebrariam na presença de oxigênio livre. Portanto, como fonte de hidrogênio, as bactérias primitivas usavam sulfeto de hidrogênio e, assim, evitavam o contato com o oxigênio livre, resultante da quebra de moléculas de água. Respirando sulfeto de hidrogênio, as bactérias primitivas liberavam compostos sulfídricos na atmosfera.

#### Vida na Terra, enfim

Até poucos anos, toda evidência que tínhamos do início da vida na Terra eram os restos de cianobactérias que viveram há 3,45 bilhões de anos em rochas sedimentares na Austrália. No entanto, esses microfósseis são estruturalmente complexos, como mostra a **Figura 9.3**. Se assumirmos que essa complexidade levou algum tempo para ser adquirida, as primeiras formas do que hoje chamamos vida poderiam ser muito anteriores. Recentemente, dados isotópicos indicam pistas com carbono elemental leve, na Groenlândia, que elevam essa data a 3,85 bilhões de anos.



**Figura 9.3:** Fósseis de cianobactérias de 3,45 bilhões de anos descritos por Bill Schopf. Na realidade, existe ainda hoje uma controvérsia a respeito desses fósseis. Alguns autores, como Martin Brasier, sugerem que podem se tratar de processos naturais de rochas e não evidências dos primeiros organismos. Para saber mais sobre essa controvérsia leia o artigo de revisão publicado na importante revista *Nature*, no volume 417, nas páginas 782-784 em 2002.

A técnica usada para esse tipo de teste é razoavelmente simples. O carbono possui dois isótopos estáveis,  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ , sendo o primeiro mais leve do que o segundo. Quando organismos vivos absorvem carbono, eles tendem a selecionar o isótopo mais leve, que gasta menos energia para ser absorvido. Portanto, quando em rochas sedimentares são encontrados locais com uma razão maior do que a usual de  $^{12}\text{C}$  para  $^{13}\text{C}$ , significa que alguma forma de vida já habitou o local e alterou o balanço.

Entretanto, existem algumas explicações alternativas para esse desequilíbrio. Por exemplo, alterações isotópicas do material podem ocorrer simplesmente devido a descargas elétricas de raios de chuva nas rochas. A explicação mais plausível, entretanto, é que alguma forma de vida tenha alterado o balanço entre os dois isótopos de carbono.

Evidências sobre vida na Terra há 3,85 bilhões de anos têm como consequência importante o fato de os microorganismos conseguirem sobreviver ao clima da época. Como vimos na Aula 7, impactos de grandes meteoros na Terra devem ter sido comuns naquele período e a taxa permaneceu alta até 3,85 bilhões de anos. Sabemos disso já que podemos estimar o impacto de meteoros na Lua até essa data como intenso. A Lua, neste caso, serve de modelo, pois pela ausência de solo, de vegetação, de vulcões (que renovam a crosta terrestre) ou mesmo de atmosfera esse tipo de evento é registrado mais precisamente.

Portanto, o impacto de meteoros na Terra deve ter ocorrido com a mesma intensidade naquela época.

Pode-se dizer que a recente evidência de vida na Terra há 3,85 bilhões de anos sugere que nossos ancestrais eram resistentes a alterações de clima. Uma outra alternativa é que a vida pode ter surgido mais de uma vez, ou seja, naquela época de instabilidade climática e muita energia sendo descarregada na superfície do nosso planeta, formas simples de vida como as que descrevemos nas últimas aulas eram formadas, morriam logo em seguida, mas deixavam suas marcas. Eventualmente, um tipo de organismo mais resistente conseguiu sobreviver e dar origem à diversidade dos seres que conhecemos hoje em dia.

## Vida em outros planetas

Quando pensamos em vida em outro planeta, invariavelmente a mídia nos leva a imaginar criaturinhas (de preferência verdes) dotadas de inteligência extrema e uma face que em muito lembra a nossa. Entretanto, a probabilidade de, ao nos depararmos com um indivíduo extraterrestre, essa descrição ser precisa é extremamente pequena. Realmente, para buscar vida em outros planetas, devemos começar procurando aqui na Terra. Isso porque nosso planeta é o único conhecido com vida e, portanto, só podemos usá-lo para entender quais condições são necessárias para que haja vida em outros lugares. Quando tais condições são levadas em conta, devemos pensar se elas podem ser extrapoladas para outros locais ou se são aplicadas exclusivamente à Terra. Entretanto, dificilmente a evolução em outro lugar do mundo levaria a um caminho muito parecido com o nosso. O registro geológico indica que a vida na Terra começou logo após a existência de vida ser possível. O último bombardeamento esterilizante na Terra ocorreu há mais de quatro bilhões de anos e a vida na Terra pode ter em torno de 3,85 bilhões de anos. Esse curto espaço de tempo, de *apenas* 150 milhões de anos, mostra que a origem da vida verificou-se num processo relativamente rápido e isso poderia indicar que a vida foi uma consequência natural das reações químicas que ocorreram num ambiente geologicamente ativo. Mas como seria a vida em outros planetas? Como vimos na Aula 7, o silício é uma alternativa ao carbono como elemento base da vida. No entanto, dada a abundância do elemento carbono em todo o Universo, ao contrário do silício, a probabilidade do surgimento de vida em outros planetas com base em carbono é muito superior àquela do silício. Podemos assumir também que a água em estado líquido é necessária como meio de captura de nutrientes e descarga de dejetos. Obviamente, uma fonte de energia também seria necessária para desencadear o desequilíbrio químico, que é o catalisador das reações necessárias para os sistemas vivos. Na Terra, atualmente quase toda a energia da vida vem do Sol, através do processo da fotossíntese. Entretanto, a fonte de energia pode ser química como na Terra primitiva, quando o processo de fotossíntese ainda não tinha surgido. Percorrendo nosso sistema solar vemos que existem dois corpos celestes que mostram fortes evidências de terem condições ambientais adequadas à origem da vida em algum ponto de sua história: o planeta Marte e a lua Europa, satélite de Júpiter.

## Vida em Marte

O clima em Marte é atualmente inóspito à vida, pois a temperatura média diária está bem abaixo da temperatura de congelamento da água e já vimos que água em estado líquido é indispensável à vida. Apesar disso, muitas evidências apontam para a existência de água líquida em algum ponto na história de Marte. Por exemplo, alguns veios nas superfícies mais antigas se parecem com os formados na Terra por água corrente. Uma outra evidência é a aparente erosão de crateras marcianas que parecem ter sido erodidas por água líquida. Outras evidências indicam que a crosta planetária continha muita água. Com base nessas evidências, água líquida deve ter existido alguns quilômetros abaixo da crosta marciana, onde o aquecimento geotérmico aumentaria a temperatura da água o suficiente para o ponto de fusão do gelo. Uma outra questão importante além de água em estado líquido é energia necessária para promover ligações químicas. Em termos de fontes de energia, Marte tinha várias durante sua história. O vulcanismo ofereceu calor desde o início do surgimento do planeta até recentemente. Energia também poderia ser capturada com o desgaste de rochas vulcânicas. Por exemplo, a oxidação do ferro no basalto libera energia que organismos podem usar para suprir suas necessidades metabólicas. A abundância de elementos biogênicos em Marte completa os requerimentos para a vida. Marte pode muito bem ter originado a vida de uma maneira independente da Terra. Ou ainda, meteoritos marcianos podem ter trazido alguma forma de vida, ou compostos orgânicos, e assim contribuído para o surgimento ou para o desenvolvimento da vida na Terra. Ou vice-versa. Ainda existe a possibilidade de Marte abrigar vida hoje em dia, uma forma de vida solitária e isolada em um ambiente rico em energia e água líquida, possivelmente em torno de vulcões ou sistemas hidrotermais submarcianos. A análise de meteoritos vindos de Marte pode nos dar mais pistas sobre possibilidades reais de vida naquele planeta. Na realidade, a descoberta de um meteorito marciano com menos de 2 quilos encontrado em 1984, na Antártica, abriga a mais forte evidência de vida microbiana no *planeta vermelho*. Entretanto, a evidência biológica não é unanimidade entre os cientistas. Alguns deles argumentam que processos não biológicos podem ser responsáveis pelos padrões encontrados.

## RESUMO

Nesta aula vimos que uma protocélula é um sistema biológico, delimitado por uma membrana, com moléculas capazes de cooperação. A membrana é essencial, já que determina os limites do indivíduo. Nos seres vivos, ela é formada por uma bicamada lipídica, com ácidos graxos. Mas a formação de ácidos graxos em ambientes simulando condições primitivas não acontece espontaneamente. A argila pode ter tido um papel fundamental nesse caso. As bactérias mais primitivas não usavam água, tão abundante na Terra primitiva, como fonte de hidrogênio, mas sim sulfeto de hidrogênio. Dessa forma, evitariam o contato com o oxigênio livre, venenoso às células. Depois de uma série de mutações, algumas bactérias (cianobactérias) adquiriam a capacidade de transportar oxigênio para fora da célula com segurança e podiam usar água como fonte de hidrogênio. No processo, elas liberavam oxigênio na atmosfera. Com esse aumento de oxigênio, organismos que não conseguiam manipulá-lo tiveram que se confinar em lugares sem oxigênio.

Os indícios claros de vida na Terra são cianobactérias fósseis que datam de 3,45 bilhões de anos. Entretanto, esses fósseis são razoavelmente complexos e indicam que a vida pode ser bem mais antiga. Algumas evidências isotópicas sugerem que a vida na Terra tem cerca de 3,85 bilhões de anos.

## EXERCÍCIOS

1. Por que dizemos que um dos passos mais importantes na evolução dos organismos foi a individualização?
2. Qual a vantagem adaptativa que cromossomos conferem?
3. Por que sabemos que os primeiros organismos não eram fotossintéticos ou heterotróficos?
4. Vá a biblioteca mais próxima da sua casa ou consulta na web ([www.google.com.br](http://www.google.com.br)) sobre o planeta Marte. Estude a formação, a geologia do planeta e principalmente sobre a possibilidade de vida em Marte. Agora descreva detalhadamente (reprodução, digestão, excreção, organização do corpo) de uma espécie hipotética de marciano que você imagina possível habitar esse planeta. Encaminhe sua resposta para o e-mail [biodiversidade@biologia.ufrj.br](mailto:biodiversidade@biologia.ufrj.br)

## Diversidade de procariontes

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Distinguir os grandes grupos de organismos.
- Familiarizar-se com a diversidade das arqueas.

### **Pré-requisito**

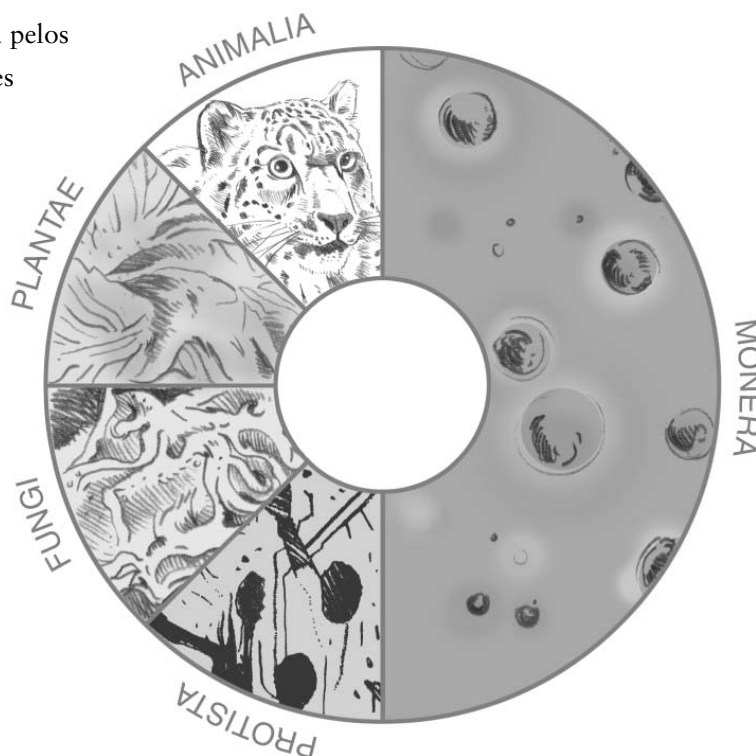
Você precisa estar bem familiarizado com o conteúdo das Aulas 3 e 4.

## DOMÍNIOS

Devido ao tamanho do nosso corpo, estamos acostumados a perceber apenas a diversidade biológica que engloba os organismos maiores. Entretanto, se atentarmos para os pequenos organismos, iremos notar um novo mundo ainda muito mais diverso daquele que nos salta aos olhos. Por exemplo, caminhando por uma floresta e observando atentamente, poderemos perceber pequenos cogumelos, insetos, líquens, que numa caminhada mais rápida nos escapariam à vista. No entanto, apesar de toda atenção durante a caminhada, nos passaria despercebida a totalidade das grandes divisões da diversidade biológica; a primeira delas se refere à celular, imperceptível a olho nu. Atualmente, essa primeira grande divisão dos organismos está salientada no nível hierárquico chamado Domínio, o primeiro e, portanto, o mais abrangente dos níveis do sistema hierárquico de Lineu, que vimos na Aula 4.

Entretanto, o Domínio é um nível hierárquico relativamente recente que foi proposto só em 1990, por **CARL WOESE**. Vamos falar um pouco sobre como era dividida a diversidade biológica antes de Carl Woese, para entendermos a importância do trabalho desse cientista.

Até 1990, a vida era dividida pelos sistematas em cinco reinos diferentes (**Figura 10.1**): Reino Monera (bactérias), Reino Protista (protozoários), Reino Animalia (animais), Reino Fungi (fungos) e Reino Plantae (plantas). A divisão primária da vida em cinco reinos sugere que todos eles são hierarquicamente equivalentes. Isso significa que animais, fungos, plantas, protistas e bactérias possuiriam diferenças equivalentes, quando comparados par a par.



### CARL WOESE

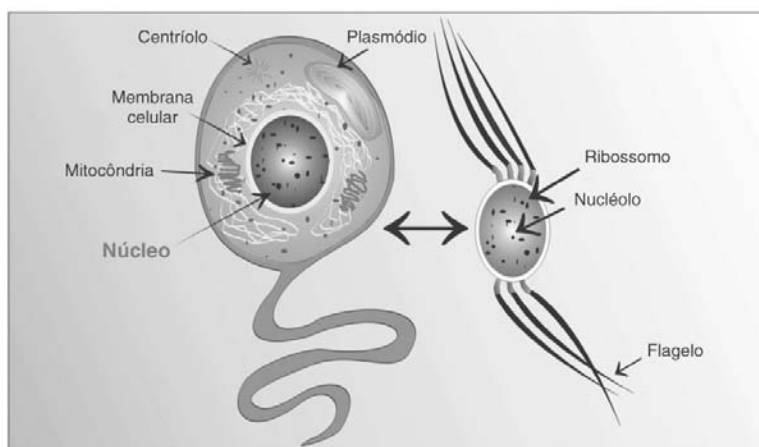
É um microbiologista, isto é, ele estuda organismos microscópicos como bactérias e protistas. Saiba mais sobre Carl Woese e seus trabalhos com bactérias e arqueas (arqueobactérias) acessando a página <http://www.life.uiuc.edu/micro/woese.html>

**Figura 10.1:** Grandes grupos da vida, a antiga divisão primária da vida nos cinco reinos.



Será que animais e protistas são tão diferentes quanto plantas e bactérias? Vamos pensar mais um pouco sobre o assunto. Obviamente, se as bactérias e os protistas são organismos unicelulares, devemos nos basear no nível celular para tal afirmação.

Observando cuidadosamente as células desses organismos, entretanto, podemos perceber claramente que isso não é verdade. As células de animais, por exemplo, são muito mais complexas que as de bactérias. Os animais, junto com plantas, fungos e protistas, pertencem a um grupo denominado eucariontes (do grego, *eu* = verdadeiro e *karya* = núcleo, i.e., organismos com núcleo verdadeiro). Todas as bactérias são chamadas procariontes (*pro* = anterior e *karya* = núcleo: organismos anteriores ao aparecimento do núcleo). A **Figura 10.2** ilustra uma célula eucarionte e uma célula procarionte. Por essa figura podemos perceber que a célula procarionte não possui organelas celulares, nem mesmo um núcleo definido que deveria isolar o material genético do citoplasma.



**Figura 10.2:** A célula eucarionte e a célula procarionte com núcleo.

Se os organismos procariontes e eucariontes são tão diferentes, a classificação da vida também deve seguir essa perspectiva. Ou seja, num nível hierárquico acima de reinos, a primeira divisão dos organismos os dividiria em procariontes e eucariontes. No entanto, mesmo essa divisão não reflete a diversidade real dos organismos. Isso porque existem dois grandes grupos de bactérias, as arquebactérias e as eubactérias. Tais grupos possuem diferenças fisiológicas tão grandes quanto procariontes e eucariontes.

Para refletir essas diferenças, Carl Woese propôs a criação de um novo nível hierárquico, o Domínio, que divide a diversidade da vida em três grupos: Eukarya (eucariontes), Archea (arqueas) e Bacteria (bactérias). Nesse novo sistema, o Domínio Eukarya possui quatro dos antigos reinos (Protista, Fungi, Animalia e Plantae). Seguiremos, daqui por diante, a classificação proposta por Woese e, portanto, iremos nos referir da seguinte forma:

**Bactérias** = antigas eubactérias do Reino Monera

**Arqueas** = antigas arqueobactérias do Reino Monera

**Procariontes** = bactérias + arqueas = antigo Reino Monera

## Procariontes

Quando os microorganismos foram descobertos no final do século XVII, eles foram considerados pequenos animais ou plantas. O próprio Lineu (ver Aula 2) colocou todos os microorganismos em um único e diverso gênero que denominou apropriadamente, em 1759, Chaos, em uma referência à falta de organização aparente desse grupo de organismos.

Um organismo **PATOGÊNICO** é um organismo que prejudica a saúde humana de alguma forma. Atualmente, quando falamos de bactérias em nosso cotidiano, na maior parte das vezes estamos nos referindo a bactérias patogênicas, como as que causam sífilis, tétano, cólera, tuberculose, gonorréia etc. No entanto, esses tipos de bactérias compõem apenas uma pequena fração dos procariontes que habitam nosso planeta. Atualmente, existem mais de quatro mil espécies descritas, mas alguns especialistas acreditam que o número real pode ser 100 ou 1.000 vezes maior.

Esse número já indica que os procariontes são organismos de imenso sucesso evolutivo. Isso se deve a dois fatos independentes. O primeiro é a possibilidade de esses organismos ficarem dormentes por algum tempo. Com isso, mediante condições ambientais adversas, eles podem ficar “esperando” as condições melhorarem.

O segundo é o fato de eles terem uma grande diversidade metabólica, ou seja, eles conseguem energia das mais variadas formas.

### **PATOGÊNICO**

Um organismo patogênico é um organismo que prejudica a saúde humana de alguma forma.

Assim, como consequência, podem ser encontrados nos mais diversos e inóspitos ambientes, como no fundo de oceanos, nas rochas congeladas da Antártica, no trato digestivo de animais, no Mar Morto etc.

Uma dificuldade no estudo de procariontes é a simplicidade morfológica desses organismos, que dificulta enormemente a classificação e, portanto, a organização natural de sua diversidade. Ao longo dos anos, alguns esquemas de classificação de procariontes foram descritos.

Por exemplo, os procariontes podem ser classificados em três grupos distintos, baseados na relação com o gás oxigênio. Os aeróbicos requerem oxigênio para seu desenvolvimento e para sua existência. Há procariontes anaeróbicos estritos que não conseguem tolerar oxigênio e morrem na presença desse elemento, como a bactéria que causa o tétano. Outros ainda são anaeróbicos facultativos, preferem viver com oxigênio, mas também podem sobreviver sem ele.

Outra maneira de classificá-los é baseada na forma pela qual eles obtêm energia. Vamos primeiro lembrar que os organismos eucariontes apresentam apenas duas formas de obtenção de energia. Os heterotróficos, que quebram matéria orgânica (animal, vegetal ou em decomposição, como já mencionamos na aula passada), e os autotróficos, que usam a energia solar para formar compostos orgânicos. Procariontes podem obter energia como heterotróficos ou como autotróficos.

Além dessas, outras formas de obtenção de energia são encontradas nos procariontes, como os metanogênicos, que produzem o gás metano, e os fermentadores, que quebram compostos orgânicos produzindo compostos simples e energia. Outro tipo de procariontes reduz moléculas orgânicas pelo sulfato, produzindo energia: são os chamados redutores de sulfato. Muitas outras formas de obtenção de energia são encontradas no mundo procariótico, como as que usam nitrogênio, enxofre ou, ainda, oxidam metais para garantir sua sobrevivência.

### **BACTÉRIAS ANTIGAS TRAZIDAS DE VOLTA À VIDA**

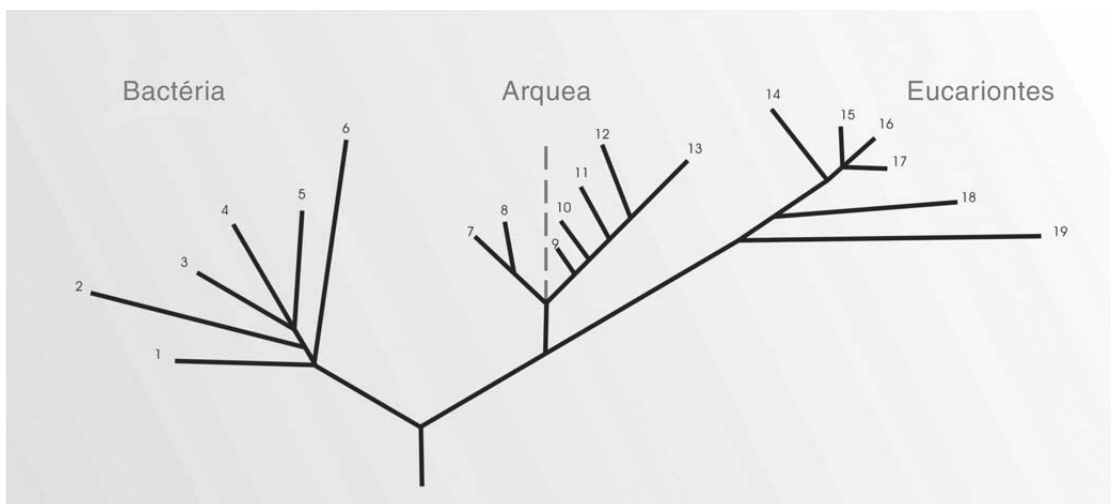
O microbiologista Raul Cano descobriu recentemente que bactérias de milhões de anos podem ser trazidas de volta à vida. Esse pesquisador conseguiu reviver bactérias e outros organismos unicelulares com até 135 milhões de anos de idade! “Nós descobrimos uma fonte inteiramente nova de organismos que podem produzir produtos farmacêuticos ou de uso em processos industriais”, diz Cano. Cano reviveu a primeira bactéria antiga em 1991 e outros três anos foram necessários para averiguar a veracidade da descoberta. Através de estudos de filogenia molecular, Cano comprovou que a bactéria isolada era muito diferente de qualquer outra atual. Todas as bactérias revividas estavam como esporos, que é a forma dormente de bactéria, mergulhada em âmbar. (O âmbar é uma resina excretada de um certo tipo de planta que solidifica em contato com o ar, envolvendo organismos vivos em geral que viveram no passado.) O mais impressionante do âmbar é que, ao contrário da fossilização, ele preserva e isola o organismo do ar, desidratando-o e protegendo-o de qualquer dano físico. Além disso, tecidos moles são freqüentemente recuperáveis em âmbar, tornando possível inclusive o estudo de DNA desses organismos antigos.

### **Archea x Bacteria x Eukarya**

A classificação mais aceita entre os especialistas é a proposta por Carl Woese. Nesse esquema de classificação, todos os procariontes são divididos em dois grandes grupos distintos, como vimos anteriormente: o primeiro é o grupo das arqueas e o segundo, das bactérias.

A filogenia a seguir mostra que as arqueobactérias são mais próximas filogeneticamente dos eucariontes que das bactérias (**Figura 10.3**).

A princípio, isso pode nos parecer estranho. Como pode uma arquea (assim como as bactérias, unicelulares e sem núcleo definido) ser mais próxima filogeneticamente de um mamífero do que das bactérias?



**Figura 10.3:** Filogenia dos grandes domínios baseada em comparações de seqüências de RNA-ribossomal. Por essa filogenia, podemos perceber que as arqueas e os eucariontes possuem um ancestral comum não compartilhado com as bactérias.

A resposta, nesse caso, é que as bactérias e as arqueas preservaram sua morfologia externa de uma maneira semelhante ao ancestral, enquanto a linhagem dos eucariontes se modificou profundamente. Realmente, esses três organismos são tão diferentes em sua organização de corpo que caracteres morfológicos não podem ser usados para resolver essa questão, pois não conseguimos distinguir homologias. Esse tipo de afirmativa sobre relações filogenéticas tem por base dados moleculares. Na comparação das seqüências de RNA-ribossomal desses três grupos, notamos que existe uma maior afinidade entre as seqüências de arqueas e de eucariontes. Nesse caso, o que aconteceu foi que dois organismos preservaram as características procarióticas originais (arquea e bactéria) enquanto uma linhagem se tornou eucariótica (eucariontes) e sofreu uma transformação e diversificação morfológica estupenda.

Realmente, outras características mostram a mesma tendência, ou seja, agrupam as arqueas e os eucariontes, tais como:

1- Nem eucariontes nem arqueas possuem peptidoglicanos em suas paredes celulares, como as bactérias. Eucariontes possuem celulose ou quitina, enquanto as arqueas constroem suas paredes com pseudomureína;

2- Tanto eucariontes como arqueas possuem vários tipos de RNA- polimerase, enquanto bactérias possuem apenas um tipo;

3- Tanto eucariontes como arqueas usam metionina como iniciador da síntese de proteínas, ao passo que bactérias usam formil-metionina;

4- Bactérias são os únicos organismos sensíveis aos antibióticos estreptomicina e cloranfenicol; membros dos outros dois grupos não são afetados por eles;

5- Alguns genes de arqueas possuem introns; introns são ausentes em bactérias, enquanto a maior parte dos genes eucarióticos apresenta introns.

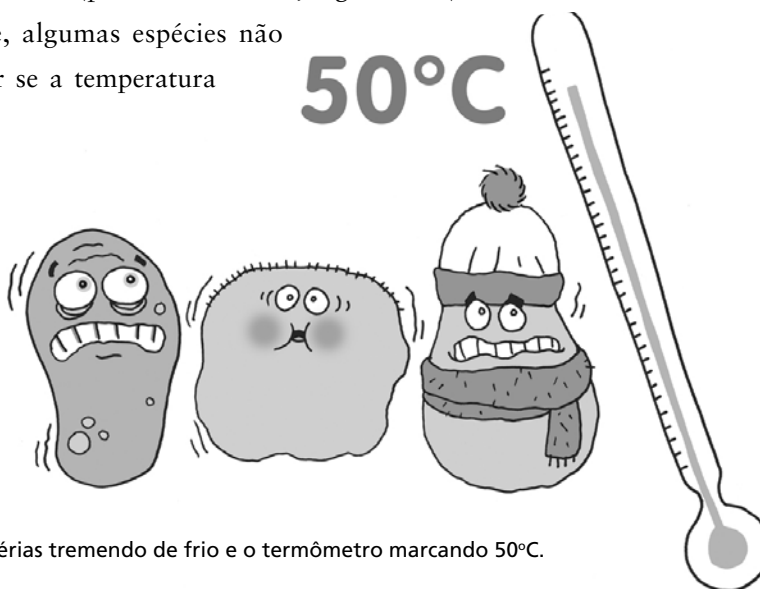
### **Arqueas**

As arqueas são classificadas em três subgrupos distintos, de acordo com o ambiente em que vivem e seus modos de obter energia: metanogênicas, halófitas e termoacidófilas. As arqueas metanogênicas constituem a família Methanobacteriacea. Esses organismos são anaeróbicos estritos, ou seja, eles não sobrevivem na presença de oxigênio. Para obter energia, os metanogênicos usam hidrogênio para reduzir dióxido de carbono em metano e assim mantêm seu metabolismo. A atividade desses organismos pode ser observada em pântanos com baixos níveis de oxigênio, onde a ocorrência de bolhas no fundo indica a presença deles.

Metanogênicos estão presentes no trato intestinal de alguns animais, auxiliando na digestão da celulose. Eles também já foram usados por humanos, como biodigestores anaeróbicos em esgotos e depósitos de lixo. Ali, esses organismos auxiliam na reciclagem de lixo, convertendo-o em metano, que, por sua vez, pode ser usado como combustível.

O segundo grupo de arqueas são as chamadas halófitas, constituindo a família Halobacteriaceae. Esses organismos são aeróbicos heterotróficos e uma de suas peculiaridades é a capacidade de sobreviver em ambientes extremamente salinos, como o Mar Morto ou o Grande Lago Salgado.

O terceiro grupo de arqueas são as chamadas termoacidófilas ou termófilas. Trata-se de um grupo heterogêneo definido pela habilidade de viver em altas temperaturas (pelo menos 60° C, **Figura 10.4**) e em pH ácido. Na realidade, algumas espécies não conseguem se reproduzir se a temperatura cair abaixo de 80°C.



**Figura 10.4:** Bactérias tremendo de frio e o termômetro marcando 50°C.

Os nomes dados aos gêneros desse tipo de organismo deixam clara a sua preferência: *Thermoproteus*, *Thermofilium*, *Pyrobaculum* etc. O gênero *Pyrodicticum*, por exemplo, contém bactérias ainda mais resistentes, cujo ótimo de temperatura fica em torno de 105°C! Estudos de filogenia molecular apontam uma evidência interessante endossando que o clima da Terra primitiva era mais quente que o atual. A árvore filogenética mostra os procariontes termófilos como basais na filogenia da vida, indicando claramente uma tendência a esse tipo de organismo na Terra primitiva.

## RESUMO

As células de animais são muito mais complexas que as células de bactérias. Os animais, junto com plantas, fungos e protistas, pertencem a um grupo denominado eucarionte. Todas as bactérias são chamadas de procariontes. Três grupos se distinguem pelas principais diferenças entre os organismos vivos: arqueas (Domínio Archea, antigas arqueobactérias), eucariontes (Domínio Eukarya) e bactérias (Domínio Bacteria, antigas eubactérias). Baseados em estudos de filogenia molecular, as arqueas e os eucariontes possuem um ancestral comum não compartilhado pelas bactérias. Nem eucariontes nem arqueas possuem peptidoglicanos em suas paredes celulares como as bactérias. Eucariontes possuem celulose ou quitina, enquanto as arqueas constroem suas paredes com pseudomureína. A diversidade das arqueas é dividida em três grandes grupos baseados no ambiente em que vivem e na forma de obtenção de energia. As metanogênicas usam o hidrogênio para reduzir dióxido de carbono em gás metano. As halófitas habitam ambientes com altas concentrações de sal. As termoacidófilas habitam lugares de altas temperaturas (mais de 60°C) e pH ácido.

## EXERCÍCIOS

1. Qual foi a justificativa de Carl Woese para criar um outro nível taxonômico, o Domínio?
2. O que são os organismos quimiotróficos?
3. Por que dizemos que as arqueas e os eucariontes possuem um ancestral comum que não é compartilhado com as bactérias? Cite as evidências que suportam essa hipótese.
4. Quais são os grandes grupos de arqueas? Por que elas são divididas dessa forma?



## Diversidade de bactérias

# objetivos

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Distinguir uma variedade de bactérias e as formas de classificação desses organismos.

### Pré-requisitos

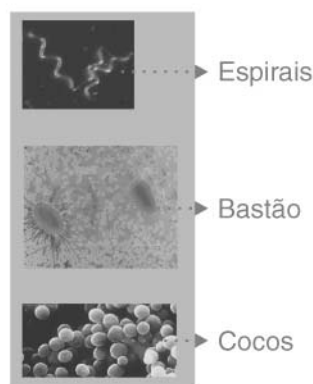
Os conceitos das Aulas 3, 4 e 10 são importantes para você compreender esta aula.

## INTRODUÇÃO

Na última aula, vimos alguns aspectos sobre a diversidade das arqueas, antigas arqueobactérias. Nesta aula vamos estudar o outro grupo de procariontes, as bactérias, antigas eubactérias. Como as arqueas, as bactérias não possuem, pelo menos a nossos olhos, características muito marcantes. Por essa razão, a classificação desses organismos era feita com base em sua forma e em características de coloração que são ainda hoje úteis para a classificação em grandes grupos. No entanto, técnicas mais avançadas em seqüenciamento de DNA nos permitiram uma idéia mais precisa das relações evolutivas entre as diversas linhagens de bactérias. Agora iremos descrever brevemente a diversidade de bactérias e as formas de classificação delas.

### Formatos de bactérias

Existem bactérias com diversos formatos (**Figura 11.1**).



**Figura 11.1:** Formas de bactérias.

#### ENDOSSIMBIONTE

São organismos que vivem no interior de outro organismo. A palavra “simbiose” retrata a relação ecológica, benéfica ou não, entre dois organismos.

Bactérias com formas de bacilos-bastão são as mais comuns. *ESCHERICHIA COLI*, por exemplo, é uma bactéria que vive como **ENDOSSIMBIONTE** no intestino de humanos e de outros mamíferos. Indivíduos dessa espécie são os principais componentes dos famosos coliformes fecais, que águas poluídas apresentam em grandes quantidades.

Outras bactérias com essa forma são *Lactobacillus spp.*, responsáveis pela cárie em nossos dentes e pela formação do iogurte. Entretanto, hoje em dia a bactéria com forma de bacilo-bastão mais famosa é a *Bacillus anthracis*. Esta bactéria patogênica é a causadora do antrax, doença decorrente da ingestão, da inalação ou de contato com tal espécie.

### A IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DAS BACTÉRIAS

Algumas bactérias são chamadas de fixadoras de nitrogênio, como as do gênero *Rhizobium*. Elas habitam as raízes de plantas da Família Fabacea. Esses simbiontes prestam um enorme serviço à comunidade local, convertendo nitrogênio gasoso da atmosfera ( $N_2$ ) em nitrogênio usável pelas plantas como amônia, nitrito e nitrato. Esses compostos de nitrogênio podem ser absorvidos pelas raízes e usados pelas plantas para manufaturar proteínas e ácidos nucleicos. Outras bactérias ainda são fontes de remédios salvadores de vidas. Um exemplo são as bactérias do gênero *Streptomyces*, das quais é extraído um poderoso antibiótico chamado estreptomicina.

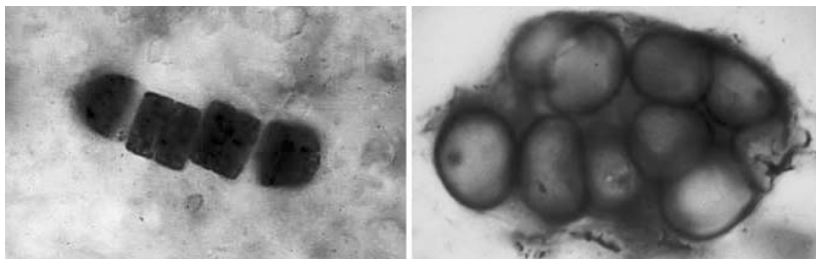
Outra forma de bactéria comum são os cocos esféricos. Bactérias do gênero *Streptococcus* possuem formatos de cocos. Essas bactérias têm habilidade de formar cadeias e são responsáveis, dentre outras coisas, por causarem dor de garganta em humanos. *Staphylococcus* também é um gênero de bactérias em forma de coco. Elas formam grupamentos que parecem pequenos cachos de uvas e são responsáveis pelo gangrenamento do tecido, em machucados não tratados.

## Coloração Gram

### HANS GRAM (1853 - 1938)

Nasceu em Copenhague, na Dinamarca. Ele completou seus estudos em ciências naturais, na Universidade de Copenhague. Começou a trabalhar com plantas, mas seu interesse em farmacologia e no uso do microscópio seria mais marcante durante sua vida. Mais tarde iniciou sua carreira em Medicina e se tornou famoso pelo desenvolvimento do método de coloração Gram.

Além da classificação em formas, uma outra maneira de classificar bactérias é aquela baseada na **COLORAÇÃO GRAM**. Na **Figura 11.2**, a bactéria tem uma parede celular feita de peptidoglicanos e faz parte de um grupo chamado Gram-positivas. O nome vem do fato de algumas bactérias ficarem com a coloração púrpura quando tingidas com o corante violeta-cristal (Gram positivas) e presta homenagem ao bacteriologista dinamarquês que desenvolveu o procedimento de coloração.



**Figura 11.2:** Fósseis de cianobactérias da Austrália, datados de 3,45 bilhões de anos.

A divisão Gram-positivas representa cerca de 25% das bactérias e inclui cocos, bastões e actinomicetos. Estas últimas exibem uma similaridade superficial aos fungos eucarióticos. No entanto, estudos de **FILOGENIA MOLECULAR** indicam que os actinomicetos não têm relação evolutiva próxima com os fungos.

Algumas bactérias possuem células com parede dupla: uma interna mais fina de peptidoglicanos e uma externa mais grossa de carboidratos, proteínas e lipídeos. Estas últimas não ficam tingidas pelo violeta-cristal e são chamadas de Gram-negativas. Cerca de 75% das bactérias fazem parte desse grupo. Elas incluem bactérias espiroquetas, curvadas (os víbrios), espirais, cocos, bastões, clamídias, rickettsias e as fotossintetizantes cianobactérias.

### FILOGENIA MOLECULAR

É um método de reconstrução filogenética que possui como base a comparação entre espécies de seqüências de DNA homólogas.

## Micoplasmas

Os micoplasmas são as menores células vivas já descobertas, e são conhecidas por terem a quantidade mínima de DNA necessária para codificar uma célula funcionante. Eles não possuem parede celular como a maioria das bactérias, nem mesmo a membrana mais rígida das arqueas. A maior parte dos micoplasmas existe como parasitas intracelulares em plantas e animais. Esse tipo de hábito de vida funciona como uma regulação do estresse osmótico com que organismos de vida livre devem cooptar. A penicilina, um antibiótico eficiente contra outros tipos de bactérias, é ineficaz contra os micoplasmas. A penicilina age interferindo na formação da parede celular. Portanto, como os micoplasmas não possuem parede celular, o antibiótico não é eficiente contra eles.

## Joseph Lister e a cirurgia anti-séptica moderna

Joseph Lister (1827-1912) foi um médico inglês educado na University College em Londres. Para entendermos a contribuição de Lister na cirurgia moderna, vamos imaginar um hospital do século XIX na Inglaterra. As mesas operatórias eram um pouco melhores do que as mesas que você tem na sua cozinha. Muito freqüentemente, quando um cirurgião não podia comparecer à cirurgia, um barbeiro fazia a operação em seu lugar. Os instrumentos usados na cirurgia eram colocados na gaveta e nem eram lavados antes da próxima operação. Os médicos operavam com as roupas do dia-a-dia e não tinham hábito de lavarem as mãos nem antes nem depois da cirurgia! Não era de se espantar que a maior parte dos pacientes operados viesse a morrer; não durante a cirurgia, mas no pós-operatório. Depois da intervenção, a região em torno da operação ficava vermelha, o paciente tinha febre e, freqüentemente, morria em poucos dias. Os médicos não eram perversos ou negligentes, eles simplesmente não conectavam as mortes de seus pacientes com a sujeira. Hoje sabemos que os pacientes eram vítimas de infecção bacteriana, mas como saber naquela época? Numa determinada noite, Lister leu alguns trabalhos de Pasteur (ver Aula 7), onde o microbiologista francês dizia que a gangrena não era causada pelo ar, mas por pequenos organismos no ar. Lister refletiu e desenvolveu uma solução para desinfetar as mãos de cirurgiões antes das operações.

Além disso, ele propôs que todos os instrumentos usados na cirurgia deveriam ser fervidos antes de serem usados. Hoje, esses dois procedimentos simples são considerados padrão em hospitais de todo o mundo, mas naquela época causou muito debate. No entanto, nas operações de Lister, poucos pacientes morriam no pós-operatório. Assim, pouco a pouco, outros médicos começaram a se convencer e a proceder dessa forma. Essa mudança de hábito eventualmente causaria uma redução no número de óbitos pós-operatórios na ordem de 90%! Ou seja, cerca de 90 em cada 100 pacientes que morriam após uma operação na época de Lister, morriam de infecção bacteriana e não da causa operatória em si.

### **Cianobactérias**

O grande salto evolutivo dos procariontes ocorreu quando algumas bactérias adquiriram a capacidade de manipular o oxigênio. Lembre-se de que o oxigênio livre é venenoso para as células e, por isso, as bactérias da Terra primitiva não podiam usar a água dos oceanos primitivos como fonte (abundante e altamente disponível) de hidrogênio, pois depois de usar o hidrogênio, elas se viam com o oxigênio venenoso. Por isso, o aparecimento de enzimas específicas, que se acoplavam ao oxigênio e o transportavam para fora da célula com segurança, foi um passo crucial na evolução biológica. Nesse processo, o organismo absorvia  $\text{CO}_2$ , abundante na atmosfera primitiva, e liberava oxigênio livre na atmosfera como produto descartável.

As cianobactérias foram os primeiros organismos que desenvolveram essa capacidade e os primeiros fósseis têm 3,5 bilhões de anos de idade (**Figura 11.2**). A partir daí, o crescimento populacional das cianobactérias ocorreu rapidamente e foi responsável pela drástica mudança na concentração de oxigênio na atmosfera terrestre por volta de 2 bilhões de anos atrás. Alguns estudos sugerem que entre 1,9 e 2,2 bilhões de anos atrás os níveis de oxigênio subiram de menos de 1% até cerca de 15% do nível atmosférico atual.

Como poderia ter ocorrido essa mudança? Imagine primeiro um mundo sem qualquer oxigênio livre. Nossa vida, e a vida da maior parte dos organismos que conhecemos, seria impossível nesse ambiente.

Pois é, assim era nossa Terra há pouco menos de dois bilhões. Imagine agora a primeira célula mutante (i.e., a primeira cianobactéria) exalando uma quantidade ínfima de oxigênio para a atmosfera. Essa primeira célula agora pode usar componentes como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e luz para fabricar energia. A energia tão necessária para o metabolismo da célula pode agora ser conseguida a partir da grande quantidade de compostos no ambiente. Como os compostos necessários são abundantes, a célula mutante tem uma enorme vantagem em relação a outras células normais. Assim, os descendentes da célula mutante tendem a ficar em vantagem em relação aos descendentes das normais. Como consequência, rapidamente ela se replica produzindo duas células, igualmente bem adaptadas. Essas se dividem em quatro outras que, por sua vez, se dividem em oito e assim por diante. Aproveitando componentes abundantes, mas inutilizáveis pelos organismos até então, essas células garantem a própria sobrevivência e a reprodução. Assim, a perpetuação desse processo metabólico também é garantida, exalando oxigênio nele, modificando para sempre o planeta.

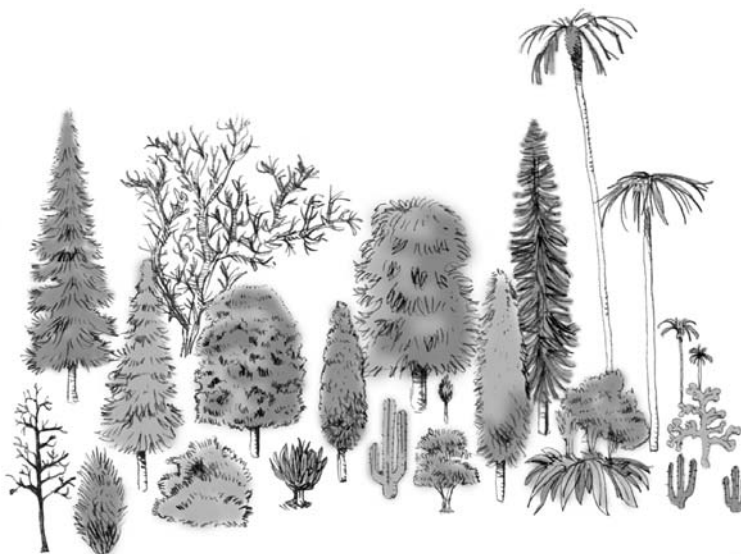
A Terra, por outro lado, tenta remover o oxigênio da atmosfera produzido pelas cianobactérias. Rochas calcáreas capturam o oxigênio na forma de carbonato de cálcio. Minerais, como o ferro, são oxidados e a ferrugem começa a surgir na superfície do planeta. Na verdade, uma das maneiras mais eficientes de medir a quantidade de oxigênio da Terra primitiva se baseia na quantificação de ferro e ferrugem (ferro oxidado) nos estratos sedimentares do período. Assim como o ferro, outros tantos elementos podem ser combinados com o oxigênio, retirando-o da atmosfera antes que atinja uma concentração maior. Como, então, os níveis de oxigênio aumentaram?

Vamos imaginar que o fóssil mais antigo de cianobactéria fosse a primeira cianobactéria. Esse primeiro organismo lançava uma quantidade mínima de oxigênio na atmosfera há 3,5 bilhões de anos. Para facilitar nosso cálculo, vamos assumir que uma bactéria tem um ciclo de vida de 24 horas, ou seja, em um dia a quantidade de bactérias dobra em relação ao dia anterior. Imagine a primeira cianobactéria se multiplicando e suas filhas também por um período de mais de 1 trilhão de dias (365 bilhões de dias = 1 bilhão de anos).

A cada um desses dias, a quantidade de oxigênio lançado na atmosfera se multiplica. Em pouco tempo, o oxigênio começa a se acumular, ultrapassando rapidamente a quantidade possível de ser removida por elementos como o ferro mencionado acima.

Assim, o oxigênio aumentava e o dióxido de carbono diminuía na atmosfera. Com o aumento de oxigênio, organismos que não conseguiam manipulá-lo tiveram que se confinar em outros lugares. As arqueas, que vivem em fossas hidrotermais, são exemplos de organismos que habitam lugares sem oxigênio livre. Outros organismos desenvolveram adaptações para usá-lo e carregá-lo eficientemente para fora da célula. Esses últimos, os heterotróficos, conseguiam muito mais energia ao quebrar alimentos com o oxigênio, resultando na liberação de água e dióxido de carbono na atmosfera.

A outra grande contribuição das cianobactérias é a origem das plantas (Figura 11.3). Os cloroplastos são, na verdade, cianobactérias que foram incorporadas às células de plantas há muito tempo. Em algum momento, no Proterozóico ou no início do Cambriano, cianobactérias começaram a habitar o interior de células eucarióticas, fornecendo nutrientes ao hospedeiro em troca de um lar. Esse tipo de relação é conhecido como endossimbiose, ou seja, uma relação em que os dois organismos partilhantes (a célula eucarionte e a cianobactéria) se beneficiam e um vive no interior do outro.



**Figura 11.3:** Arbustos, árvores e florestas.

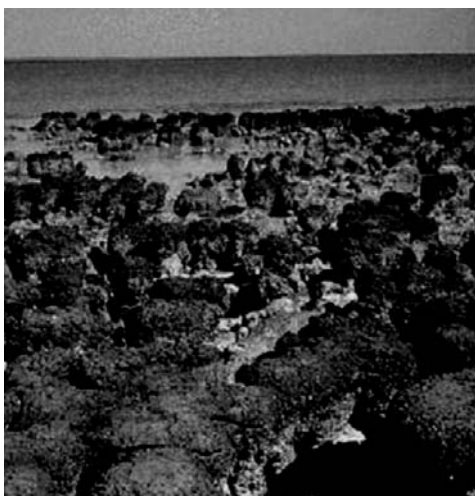


## A IMPORTÂNCIA DA FOTOSSÍNTESE

A fotossíntese tem uma importância fundamental para toda a vida no planeta. Esse processo de transformação de matéria orgânica a partir de matéria inorgânica é o único na natureza. Dessa forma, podemos dizer que os cloroplastos das plantas e as cianobactérias regulam todas as fábricas de matéria orgânica do planeta. A partir dessa produção, todos os organismos heterotróficos (ver Aula 10) podem se alimentar: os herbívoros se alimentam das plantas diretamente, os carnívoros se alimentam dos herbívoros, ou de outros carnívoros e os decompositores se alimentam de restos dos dois.

### Cianobactérias atuais

Hoje em dia, as cianobactérias são abundantes e podem sobreviver nos mais variados ambientes. Podem habitar oceanos, regiões de alta salinidade e podem até sobreviver a longos períodos de seca.



**Figura 11.4:** Estromatólitos atuais da Austrália. Os estromatólitos são camadas de cianobactérias e de carbonato de cálcio. Os estromatólitos habitam nosso planeta há muito tempo. Os mais antigos estão entre os fósseis mais antigos de 3 bilhões de anos.

No deserto de Atacama, no Chile, diversas espécies foram encontradas num local onde nunca foram registradas chuvas. Elas podem resistir à radiação, como deveriam ter resistido no início de sua existência no planeta.

Não raramente, as cianobactérias são encontradas em estruturas chamadas estromatólitos (Figura 11.4). Os estromatólitos são laminados, cada camada é composta por cianobactérias, poeira e argila. Na camada superior acontece a fotossíntese. Uma nova camada é incorporada e se forma em cima da antiga, crescendo camada a camada. Os estromatólitos são encontrados no registro fóssil há mais de 3 bilhões de anos, também contribuindo para a injeção de oxigênio da atmosfera terrestre.

### Outras bactérias importantes

Além das cianobactérias, outros três grupos são importantes no nosso cotidiano: as enterobactérias, as bactérias do ácido lático e as clostrídias.

As enterobactérias formam um grupo de bacilos Gram-negativos que inclui decompositores que vivem em matéria orgânica em decomposição. A mais famosa é a bactéria *Escherichia coli*, que já falamos no início da aula, habita o trato intestinal de humanos e outros animais. Na realidade, *E. coli* é parte da nossa flora intestinal mesmo quando estamos saudáveis. Por exemplo, a ausência dessa bactéria pode causar sérios transtornos e deficiência de vitaminas (principalmente B e K) depois que tomamos antibióticos durante muito tempo.

No entanto, algumas linhagens de *E. coli* são patogênicas. Isso significa que existem alguns indivíduos dessa espécie que são geneticamente diferentes e conseguem atacar nosso organismo. A presença dessas linhagens no corpo humano pode causar diarreia e outros sintomas graves (como hemorragias), principalmente em crianças.

Outras bactérias Gram-positivas são as produtoras de ácido lático, que é o produto final de seu metabolismo de fermentação de açúcares. Essas bactérias estão presentes em matéria vegetal em decomposição, no leite e em seus derivados. O gosto característico do iogurte, do pickles, de azeitonas, é causado por bactérias de ácido lático. Essas bactérias também são comumente encontradas na boca e na vagina humanas.

As bactérias clostrídias afetam nossas vidas de inúmeras maneiras. Uma de suas espécies, *Clostridium tetani*, são bacilos patogênicos responsáveis pelo tétano em humanos. Uma outra espécie desse gênero causa o botulismo, que é *Clostridium botulinum*.

Na Aula 8, vimos que provavelmente os primeiros organismos eram bactérias ou organismos semelhantes a bactérias. Mas como as células de algumas bactérias se tornaram complexas e deram origem aos eucariontes? Na próxima aula iremos estudar como o mundo biológico passou de procarionte para eucarionte.

## RESUMO

A classificação mais comum em bactérias é aquela baseada na coloração Gram. Gram-positivas são chamadas as bactérias que ficam com a coloração púrpura quando tingidas com o corante violeta- cristal. A divisão Gram-positivas representa cerca de 25% das bactérias e inclui cocos, bastões e actinomicetos. Por outro lado, os 75% restantes são Gram-negativas. Elas incluem bactérias, espirais, cocos, bastões e as fotossintetizantes cianobactérias. O grande salto evolutivo dos procariontes ocorreu quando algumas bactérias adquiriam a capacidade de manipular o oxigênio livre, que é letal às células. O aparecimento de enzimas específicas, que se acoplavam ao oxigênio e o transportavam para fora da célula com segurança, foi um passo crucial na evolução biológica. Os primeiros organismos que adquiriram essa capacidade foram as cianobactérias. Seu metabolismo consistia no uso de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , dois componentes abundantes, e assim seu sucesso evolutivo foi imediato.

Em pouco tempo os níveis de oxigênio na atmosfera terrestre saltaram para 15% dos níveis atuais, tornando possível a vida humana e a dos outros organismos heterotróficos. A outra grande contribuição das cianobactérias foi a origem das plantas. Isso porque os cloroplastos das plantas, responsáveis pela fotossíntese, são originalmente cianobactérias endossimbiontes.

## EXERCÍCIOS

1. Por que as bactérias possuem tantos sistemas de classificação? No seu ponto de vista qual é o melhor sistema?
2. Por que dizemos que um dos passos mais importantes para a origem da diversidade biológica foi o aparecimento das cianobactérias?
3. Quem foi Josef Lister e qual a sua importância para a Medicina moderna?
4. O que são os micoplasmas? Qual a importância econômica deles?



## Origem da célula eucarionte

AULA

# 12

## objetivos

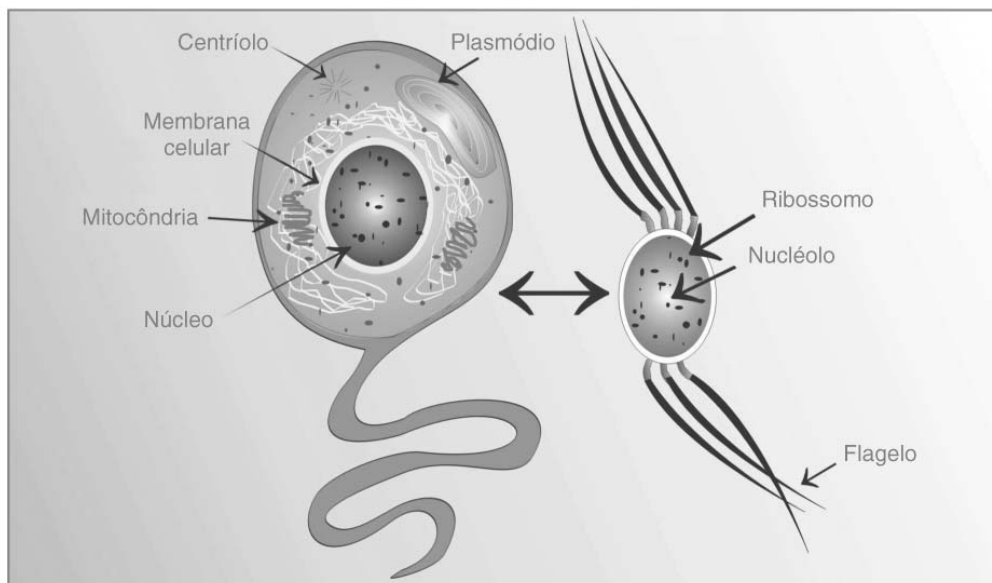
Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Conhecer as características de uma célula eucarionte e a origem da complexidade na célula.

### Pré-requisitos

As Aulas 3, 5, 10 e 11 possuem conceitos importantes para compreensão da presente aula.

Como vimos, as células procariontes de bactérias e de arqueas não possuem núcleo definido. Nelas, o material genético fica no citoplasma, ao contrário das células eucariontes, nas quais o núcleo abriga os cromossomos. Entretanto, muitas outras diferenças separam os dois tipos de células. Por exemplo, a célula procarionte é geralmente menor que a eucarionte, seu genoma está arranjado em um único cromossomo circular solto no citoplasma, e ela não possui organelas nem membranas complexas. A **Figura 12.1** ilustra as principais diferenças entre essas células.

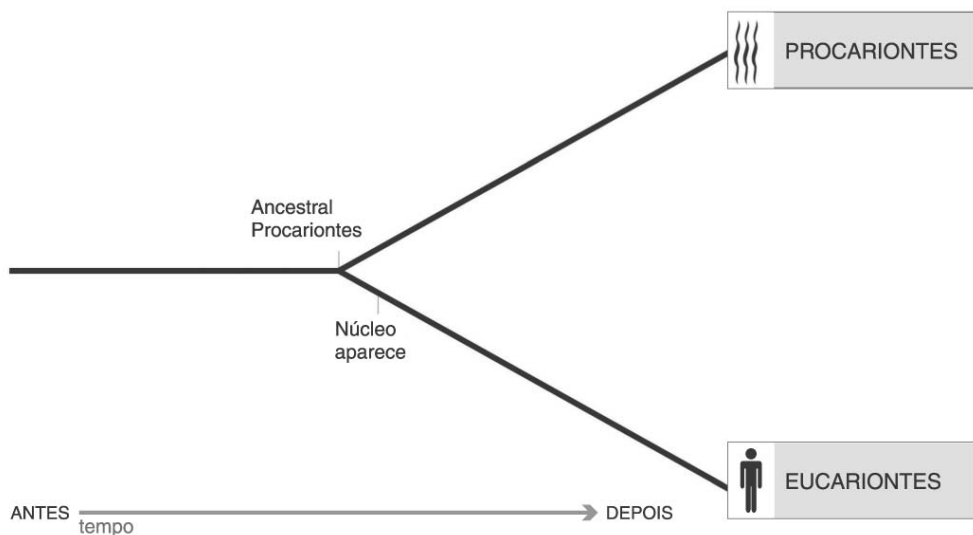


**Figura 12.1:** A célula eucarionte e a célula procarionte.

Vários passos evolutivos separam esses dois tipos de células. Nesta aula iremos discorrer sobre a evolução das estruturas que diferenciam a célula procarionte da eucarionte.

Os primeiros fósseis de eucariontes datam de 1,8 bilhão de anos, enquanto os primeiros procariontes são muito mais antigos, como a cianobactéria de 3,5 bilhões de anos que vimos na aula anterior.

Portanto, obviamente, o sentido da evolução ocorreu de procariontes para eucariontes (Figura 12.2). Mas como isso aconteceu?



**Figura 12.2:** Evolução de procariontes para eucariontes.

A maior parte dos pesquisadores da área acredita que a origem da célula eucarionte se deu através de uma sequência de eventos de endossimbiose. Nesse caso, simbiose pode ser definida como uma associação física de longa duração entre organismos de diferentes espécies. A principal teoria de origem da célula eucarionte é conhecida como endossimbiontista serial (ou SET, derivada do inglês *serial endosymbiosis theory*).

De acordo com essa teoria, as células nucleadas ou eucariontes são derivadas de comunidades de bactérias integradas. Vimos, na aula passada, que em uma relação de endossimbiose um organismo (o endossimbionte) vive no interior do outro. Vamos então tentar explicar a evolução dos eucariontes pela SET.

A teoria endossimbiontista serial diz que três classes de organelas das células eucariontes – cílios e flagelos, mitocôndrias e cloroplastos – originaram de bactérias simbiotes. As células eucariontes teriam evoluído por um processo denominado endossimbiose serial, termo que se refere à aquisição e à integração de bactérias numa sequência determinada.

Quando essa associação se torna permanente e obrigatória chamamos de simbiogênese, e os organismos originais se unem para formar um novo organismo.

A célula eucarionte é formada por DNA nuclear envolto em uma membrana e pelo citoplasma, externo ao núcleo e rico em ribossomos. A sequência de nucleotídeos do DNA serve de molde para a fabricação do RNA-mensageiro, como vimos na Aula 6. As “mensagens” são lidas nos ribossomos do citoplasma de forma que a sequência da proteína é determinada. O núcleo tem um papel fundamental neste cenário. Sua origem é, portanto, o passo mais importante para a compreensão da origem dos eucariontes.

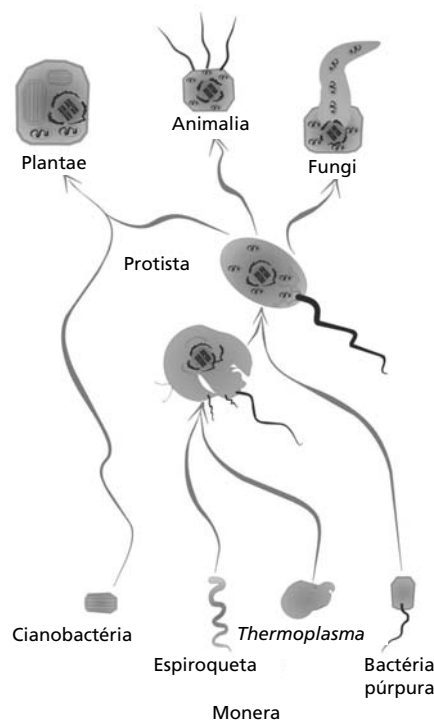


#### LYNN MARGULIS

É uma das principais defensoras da SET. Essa autora discorda da visão de Carl Woese (que vimos na Aula 10), sobre os três domínios. Para ela, apenas dois grandes grupos existem: os procariontes (sem origem simbiótica) e os eucariontes (com origem simbiótica).

LYNN MARGULIS é uma das principais pesquisadoras na área e ela acredita que a célula eucarionte se originou da fusão de uma arquea (*Thermoplasma*) e de uma bactéria (espiroqueta), formando uma célula flagelada, como mostra a **Figura 12.3**.

A própria membrana nuclear pode ter sido consequência também dessa fusão. Na realidade, uma célula eucarionte possui várias membranas, tais como a nuclear, a plasmática, a do retículo endoplasmático etc. Todas elas são contínuas, fluidas e dinâmicas. A autora justifica sua afirmativa dizendo que, na maior parte dos organismos, as membranas tendem a crescer vigorosamente quando a célula sofre uma invasão microbiana. Assim, as membranas intracelulares, incluindo a nuclear, podem ter sido consequência direta da fusão (ou invasão) da bactéria espiroqueta com *Thermoplasma*.

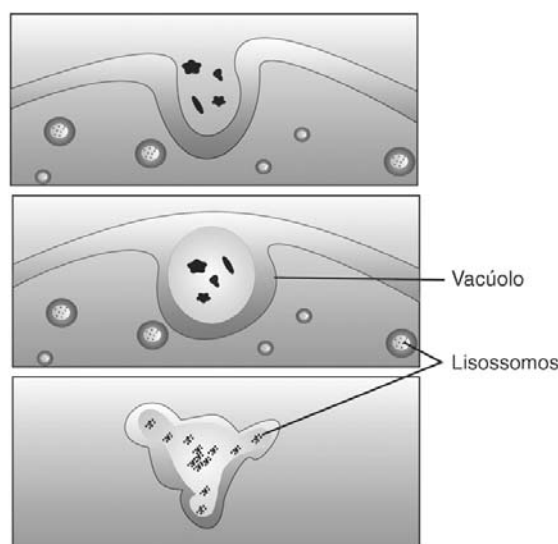


**Figura 12.3:** Fusão de uma arquea *Thermoplasma* e uma bactéria espiroqueta formando uma célula flagelada. O núcleo apareceu como?



Uma outra teoria para explicar o aparecimento do núcleo é a da citose. A citose é um processo celular no qual a membrana celular se dobra internamente formando um vacúolo, como mostra a **Figura 12.4**. Por exemplo, na fagocitose, a célula absorve uma partícula sólida e forma um vacúolo com essa partícula em seu interior. O vacúolo formado se funde com o **LISOSSOMA**. É possível que o núcleo celular tenha se originado de um desses vacúolos.

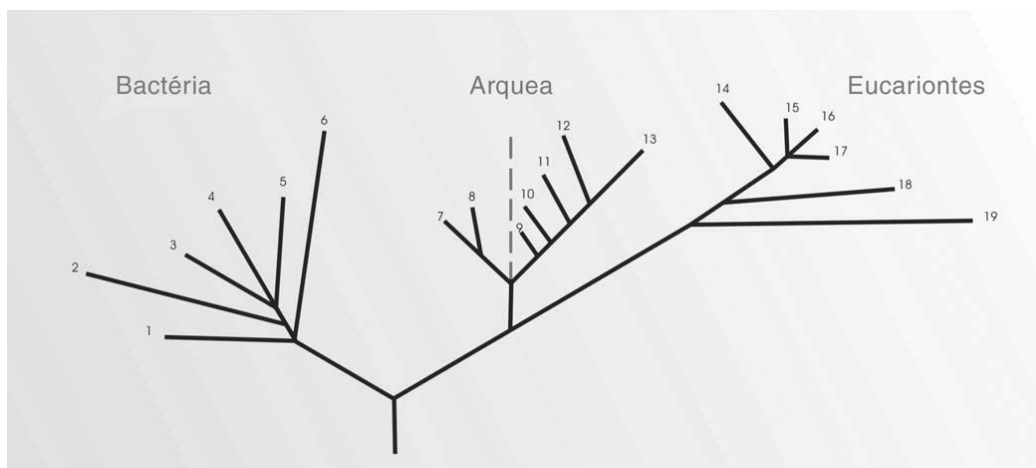
**LISOSSOMA**  
É uma organela celular, caracterizada por um vacúolo com enzimas digestivas em seu interior.



**Figura 12.4:** Fagocitose.

Se esse processo simples de fagocitose é o responsável pelo aparecimento do núcleo, por que o mesmo processo não se deu com as bactérias atuais? Na realidade, as bactérias atuais não fazem fagocitose, porque a membrana que envolve as células de bactérias é muito rígida e não consegue se dobrar para formar um vacúolo. Essa membrana é chamada de parede celular. Como elas não conseguem dobrar a parede celular rígida, para absorver nutrientes, as bactérias devem absorver molécula por molécula pela parede celular. Para se alimentar de objetos sólidos, elas devem secretar enzimas digestivas no meio externo e absorver molécula por molécula do objeto, num processo extremamente dispendioso energeticamente. O outro grande grupo dos procariontes, as arqueas, também possui uma membrana semi-rígida que envolve cada indivíduo. Essa membrana, porém, não é considerada uma parede celular, porque não chega a ser tão rígida como a de bactérias.

Como vimos na aula passada, hoje sabemos que as arqueas e os eucariontes possuem um ancestral comum que não é compartilhado pelas bactérias. Em tal contexto, poderíamos imaginar um cenário mais detalhado do que aquele apresentado na **Figura 12.2**. Neste novo cenário, os primeiros organismos possuíam uma parede celular que além de proteger o interior do organismo, dá sustentação à célula. Depois, essa parede foi perdida nas linhagens que deram origem aos eucariontes e às arqueas (**Figura 12.5**).



**Figura 12.5:** Filogenia de arqueas, bactérias e eucariontes mostrando a perda da parede celular e o ganho do núcleo.

Assim, como um passo aparentemente tão desvantajoso (i.e., perda da parede celular) ao organismo portador poderia ter sido selecionado e mantido na população original? Naturalmente, não podemos pensar no desaparecimento da parede para que a bactéria pudesse ser capaz de fazer fagocitose, porque isso implicaria a previsibilidade da evolução pela seleção natural, o que não acontece. A seleção natural atua no presente do organismo e não no futuro. Ou seja, a reprodução diferencial age sobre o que o organismo é e não sobre o que ele pode ser.

Então, uma possível explicação do desaparecimento da parede celular, sem recorrer à previsibilidade da evolução, seria a seguinte: algumas bactérias antigas adquiriram capacidade antibiótica de bloqueio da síntese da parede celular em outras bactérias.

Bactérias sem parede celular são extremamente frágeis e, portanto, a maior parte delas (sem parede) deve ter sido extinta quase que imediatamente, aumentando a disponibilidade de nutrientes para as secretoras de antibióticos.

Dentre todas as linhagens que perderam a parede, duas delas – ou uma delas, já que as duas são relacionadas –, descobriram uma saída para essa fragilidade. A primeira, a linhagem das arqueas, desenvolveu uma membrana celular rígida inteiramente nova a partir de pseudomureína, e não de peptidoglicanos. A segunda, a linhagem dos eucariontes, desenvolveu um esqueleto molecular interno — o citoesqueleto —, dando sustentação à célula. Um dos pesquisadores mais respeitados nessa área de evolução da vida e da origem da célula eucarionte é **JOHN MAYNARD SMITH**.

### Citoesqueleto e mitose

O citoesqueleto foi um passo fundamental no desenvolvimento dos eucariontes. Nesses organismos, ele é formado por duas classes complementares de moléculas: os filamentos de actina, que resistem a forças que esticam, e os microtúbulos, que resistem a forças que comprimem. Essas duas classes de moléculas permitem à célula manter sua forma, mesmo na ausência de uma parede celular. A mitose, por exemplo, só se tornou possível com o advento do citoesqueleto.

Procariontes não possuem citoesqueleto e, portanto, não se multiplicam pela mitose. A reprodução procariótica acontece por um outro processo, chamado divisão binária. A replicação do material genético da célula procarionte é realizada de maneira semelhante ao processo descrito na Aula 6. O passo fundamental é garantir que todo o material genético passe para cada uma das células-filhas. O único cromossomo procarionte se liga à parede celular. Esta por sua vez vai se estendendo e, assim, separando as duas cópias do cromossomo em lados opostos da célula. A célula finalmente se divide em duas células-filhas idênticas.

Nos eucariontes, a divisão celular, muito mais complexa, é chamada de mitose. O citoesqueleto, além de manter a forma da célula, como descrito anteriormente, pode distorcê-la também.

#### JOHN MAYNARD SMITH

Nasceu em 1920 em Londres. Após uma graduação em engenharia aeronáutica, ele trabalhou nessa profissão de 1941 a 1947. Depois disso, resolveu retornar aos estudos, se formando em Zoologia em 1951. Recipiente de vários prêmios importantes mundialmente, ele se tornou um dos principais pesquisadores e pensadores sobre a origem da vida e a evolução da célula eucarionte e de evolução em geral.

O citoesqueleto ainda é responsável por movimentar elementos e partículas no interior da célula. Seu papel na mitose é crucial. Antes da mitose, os cromossomos são duplicados, mas permanecem unidos pelo centrômero. Durante a mitose, o núcleo desaparece, o citoesqueleto guia os cromossomos já duplicados para o meio da célula e separa, em seguida, as cromátides irmãs.

## Organelas e energia

Existem dois tipos de organelas celulares especiais: as mitocôndrias e os cloroplastos. Essas organelas, únicas entre todos os componentes da célula eucarionte, têm característica de se auto-replicarem e possuem seu próprio material genético. Por essas razões, a teoria mais aceita sobre a origem das organelas entende que as mitocôndrias e os cloroplastos eram bactérias que, através da fagocitose, foram ingeridas mas não digeridas.

Uma vez no interior da célula, uma relação simbiótica estabeleceu-se entre esses organismos e foi tão vantajosa para ambas as partes que, atualmente, a célula não sobrevive sem mitocôndrias e vice-versa. Enquanto a célula hospedeira protege a mitocôndria e provê todo o aparato celular para sua replicação, a mitocôndria é a responsável por boa parte da captação de energia da célula.

Alguns eucariontes atuais não possuem mitocôndrias em seu interior. Desse modo, a invasão das bactérias que originaram as mitocôndrias ocorreu depois de formada a linhagem dos eucariontes. Os eucariontes sem mitocôndria são confinados a locais com lama ou como endossimbiontes de insetos, ou seja, com pouco ou nenhum oxigênio. Foi apenas com a aquisição das bactérias que respiravam oxigênio que o mundo aeróbico se abriu aos eucariontes. Realmente, seqüências de genes ribossomais mostram uma proximidade evolutiva das mitocôndrias com as bactérias roxas e dos cloroplastos com as cianobactérias.

Todas as plantas, os fungos e os animais possuem mitocôndrias em seu interior. Entretanto, apenas algas e plantas possuem cloroplastos. Portanto, as mitocôndrias já estavam presentes nas células quando a bactéria que deu origem aos plastídeos as invadiu. A origem do cloroplasto poderia ter seguido o seguinte esquema: imagine um mundo procarionte, onde os procariontes sobrevivem das mais diversas formas. Alguns absorvem a comida diretamente do ambiente, outros fazem fotossíntese, enquanto outros ainda se alimentam de outros procariontes.

Suponha que uma cianobactéria foi ingerida por um procarionte maior. Imagine agora que ele foi ingerido mas não foi digerido por enzimas lisossomais. A cianobactéria está capturada no maior e consegue sobreviver tempo suficiente para se reproduzir. Foi assim que o primeiro cloroplasto pode ter aparecido.

Esta aula mostrou os passos iniciais que permitiram aos eucariontes atingir a complexidade organismal que eles apresentam. Na próxima, veremos dois fatos que marcaram a evolução da vida eucariótica: sexo e multicelularidade.

## RESUMO

Esta aula trata da origem da célula eucarionte. Ela contém um núcleo definido e organelas diferentes da célula procarionte. Duas teorias principais ditam a origem do núcleo celular. A primeira é a da citose, que é um processo celular pelo qual a membrana celular se dobra internamente, formando um vacúolo, que se torna o núcleo celular. A segunda diz que a própria fusão de uma bactéria e de uma arquea pode ter provocado a invaginação da membrana celular, formando uma célula nucleada. Bactérias não conseguem fazer citose por ser a parede celular muito rígida, não permitindo a invaginação. As organelas podem ter surgido pela citose englobando antigas bactérias. O fato de mitocôndrias e cloroplastos se replicarem, independentemente da célula, e de apresentarem seu próprio material genético, endossa essa teoria. Estudos de filogenia molecular apresentam evidências de que as mitocôndrias surgiram de bactérias roxas e os cloroplastos, de cianobactérias. Essa associação foi tão vantajosa para as antigas bactérias e as células que as incorporaram que, hoje em dia, as células não conseguem sobreviver sem mitocôndrias e vice-versa.

## EXERCÍCIOS

1. Por que as bactérias não fazem fagocitose? Como elas se alimentam?
2. O que é a SET?
3. Se a célula eucarionte pode ser considerada uma célula “frágil”, qual o motivo do sucesso evolutivo dos eucariontes que essa fragilidade proporcionou?
4. Como foram provadas as relações filogenéticas entre cianobactérias e cloroplastos?

Serviço gráfico realizado em parceria com a Fundação Santa Cabrini por intermédio do gerenciamento laborativo e educacional da mão-de-obra de apenados do sistema prisional do Estado do Rio de Janeiro.



Maiores informações: [www.santacabrini.rj.gov.br](http://www.santacabrini.rj.gov.br)





**UENF**  
Universidade Estadual  
do Norte Fluminense



Universidade Federal Fluminense

**UFF**



**UNIRIO**



**GOVERNO DO  
Rio de Janeiro**

SECRETARIA DE  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Ministério  
da Educação

