



Fundação

**CECIERJ**

Consórcio **cederj**

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

## **Diversidade dos Seres Vivos**

**Volume Único • 4ª Edição**

Claudia Augusta de Moraes Russo



**SECRETARIA DE CIÊNCIA,  
TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E  
DESENVOLVIMENTO SOCIAL**

**UNIVERSIDADE  
ABERTA DO BRASIL**

**MINISTÉRIO DA  
EDUCAÇÃO**



Apoio:



# Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

www.cederj.edu.br

## Presidente

Carlos Eduardo Bielschowsky

## Vice-presidente

Marilvia Dansa de Alencar

## Coordenação do Curso de Biologia

UENF – Marilvia Dansa de Alencar Petretski

UERJ – Celly Cristina Alves do Nascimento Saba

UFRJ – Benedita Aglai Oliveira da Silva

## Material Didático

### Elaboração de Conteúdo

Claudia Augusta de Moraes Russo

### Diretoria de Material Didático

Cristine Costa Barreto

### Coordenação de Design

#### Instrucional

Bruno José Peixoto

Flávia Busnardo da Cunha

Paulo Vasques de Miranda

### Biblioteca

Raquel Cristina da Silva Tiellet

Simone da Cruz Correa de Souza

Vera Vani Alves de Pinho

### Diretoria de Material Impresso

Marianna Bernstein

### Revisão Linguística e Tipográfica

José Meyohas

### Ilustração

Equipe Cederj

### Capa

Equipe Cederj

### Programação Visual

Núbia Roma

### Produção Gráfica

Fábio Rapello Alencar

Ulisses Schnaider

### Créditos imagens capa:

Chimpanzé por Thomas Lersch - Own work, CC BY 2.5,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1001910>

Cianobactérias por Matthewjparker - Own work, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24119070>

Planta por Jon Sullivan  
<http://pdphoto.org/PictureDetail.php?mat=pdef&pg=8203>, Public Domain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=493751>

Fungo por Cas Liber - Obra do próprio, CC BY-SA 2.5,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2036005>

Archaeopteryx por H. Raab (User: Vesta) - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8066320>

Arara de garganta azul por Greg Hume (Greg5030) - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14683669>

DNA nucleotídeos por Yikrazuul - Obra do próprio, Domínio público,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5141568>

Copyright © 2018 Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

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

R958d

Russo, Claudia Augusta de Moraes.

Diversidade dos seres vivos. Volume Único / Claudia Augusta de Moraes Russo. – 4. ed. – Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2018.

262p.; 19 x 26,5 cm.

ISBN: 978-85-458-0116-0

1. Biologia. 2. Diversidade biológica. Título.

CDD: 574

# Governo do Estado do Rio de Janeiro

## Governador

Luiz Fernando de Souza Pezão

## Secretário de Estado de Ciência, Tecnologia, Inovação e Desenvolvimento Social

Gabriell Carvalho Neves Franco dos Santos

## Instituições Consorciadas

### CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Diretor-geral: Carlos Henrique Figueiredo Alves

### FAETEC - Fundação de Apoio à Escola Técnica

Presidente: Alexandre Sérgio Alves Vieira

### IFF - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Reitor: Jefferson Manhães de Azevedo

### UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Reitor: Luis César Passoni

### UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Reitor: Ruy Garcia Marques

### UFF - Universidade Federal Fluminense

Reitor: Sidney Luiz de Matos Mello

### UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Reitor: Roberto Leher

### UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Reitor: Ricardo Luiz Louro Berbara

### UNIRIO - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Reitor: Luiz Pedro San Gil Jutuca



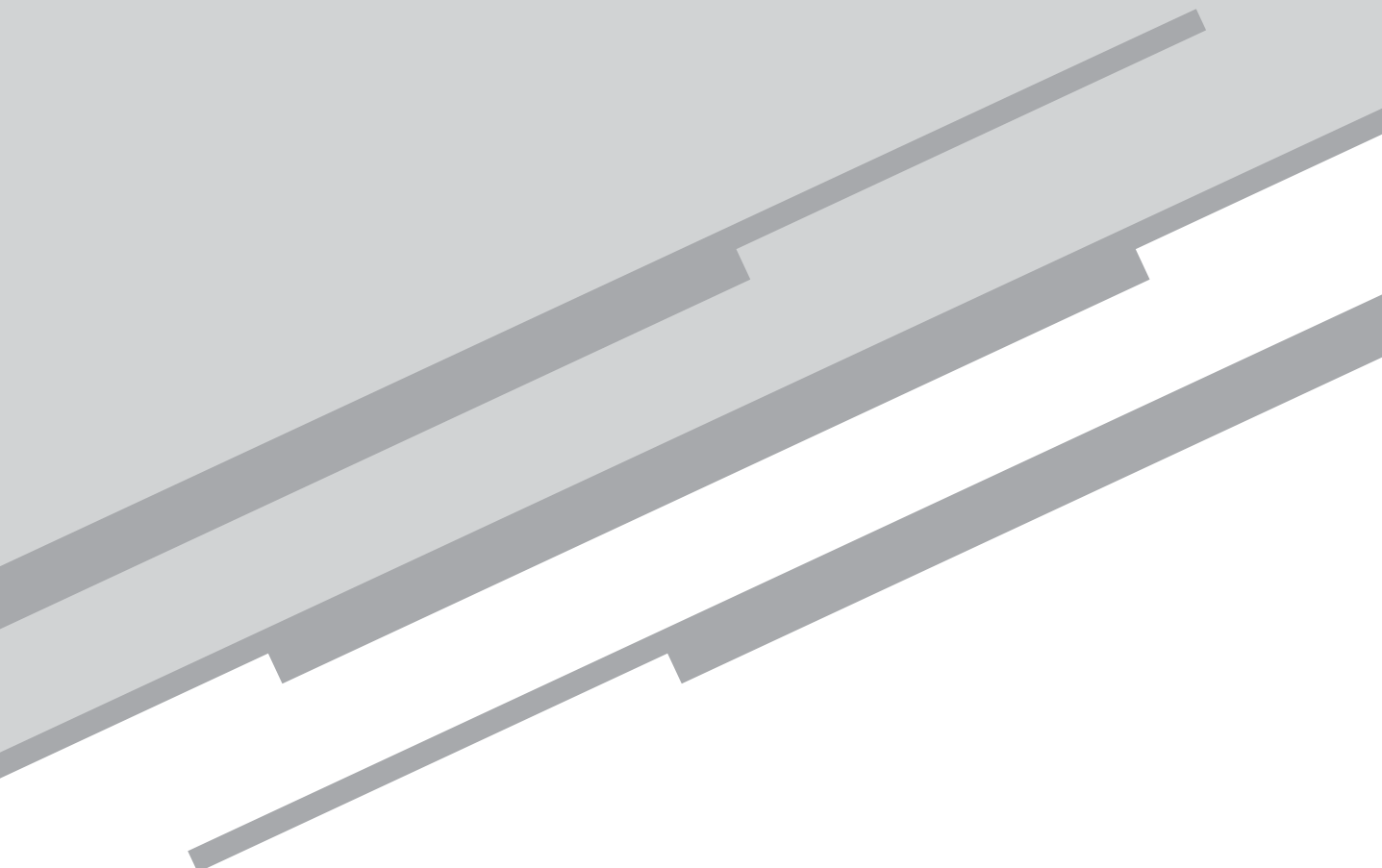
# Sumário

<b>Aula 1 • Nós e a diversidade biológica .....</b>	<b>7</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 2 • Espécies biológicas .....</b>	<b>23</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 3 • Seleção Natural .....</b>	<b>41</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 4 • Um ancestral em comum para todos .....</b>	<b>59</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 5 • A árvore e os arbustos da vida .....</b>	<b>77</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 6 • Classificações biológicas e sistemática filogenética .....</b>	<b>93</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 7 • Fósseis e evolução no Pré-Cambriano .....</b>	<b>109</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 8 • Células e material genético .....</b>	<b>129</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 9 • De um tão simples começo .....</b>	<b>145</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 10 • Tudo se transforma .....</b>	<b>161</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 11 • Complexidade .....</b>	<b>177</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 12 • Evolução do Paleozoico e Mesozoico .....</b>	<b>195</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 13 • Evolução humana .....</b>	<b>219</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	
<b>Aula 14 • Sobrevive o mais adaptável .....</b>	<b>239</b>
<i>Claudia Augusta de Moraes Russo</i>	



# Aula 01

Nós e a diversidade biológica



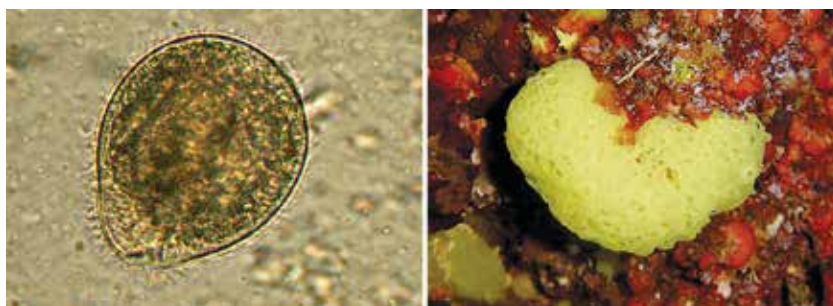
*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Você está começando a estudar a disciplina Diversidade dos Seres Vivos, que trata da diversidade da vida na Terra. Nesta disciplina, vamos falar sobre as diferenças e as semelhanças entre os seres vivos que habitam ou que já habitaram nosso planeta. Falaremos de aspectos que são compartilhados por todos os organismos, como, por exemplo, a presença de células. O corpo de todos os organismos é formado por uma ou mais **células**.

### Célula

Unidade funcional e estrutural dos organismos



**Figura 1:** Todos os organismos são constituídos por uma ou mais células. O ciliado *Balantidium* é um exemplo de organismo unicelular (esquerda), enquanto a esponja marinha *Clathrina* é exemplo de um multicelular (direita).

Por outro lado, neste curso, iremos conversar também sobre as particularidades de grupos de organismos. Assim, também estaremos discutindo características únicas ou que são compartilhadas por um pequeno número de organismos que os difere dos demais. Entre as particularidades, também vamos abordar aquelas relacionadas à nossa espécie, *Homo sapiens*. Assim, como ocorre nos demais seres vivos, os seres humanos também apresentam muitas características compartilhadas com outras espécies. Por exemplo, nós somos mamíferos, como as baleias, os cavalos, os morcegos e muitos outros. Somos vertebrados, como outros mamíferos, como aves e como as tartarugas. Nós, humanos, também apresentamos características únicas, exclusivas de nossa espécie.

Repare no cartaz abaixo, que ilustra uma mulher grávida dando à luz o seu filho, com auxílio de parteiras. Hoje em dia, a maior parte dos partos é realizada, pelo menos em cidades, por médicos. Estes profissionais estudaram durante anos e receberam um rigoroso treinamento para conseguir realizar esta tarefa, minimizando os riscos para as pacientes e seus bebês. No campo, por outro lado, o parto com auxílio de parteiras é ainda hoje comum. Seja com parteiras ou com médicos, todas as mu-



lheres grávidas precisam de ajuda neste momento difícil e excepcionalmente bonito, que é o nascimento do seu filho.

**Rosergarten**  
**Das vierd Capitel sagt wie**  
 sich ein yede fraw/in/vor/vnd nach der geburt halre soll  
 vnd wie man ir in harter geburt zū hilff kommen soll.



**Figura 2:** Uma mulher dando à luz em uma cadeira especial, auxiliada por parteiras.

Agora, vamos imaginar o parto em uma perspectiva mais biológica. Você já presenciou um parto de animal? Imagino que você já deva ter visto na televisão um vídeo de uma égua dando à luz em um estábulo e, até mesmo, uma cadela parindo seus filhotinhos na sua casa. Nesses casos, não tinha nenhuma égua ou cachorrinha parteiras uniformizadas, auxiliando as fêmeas antes de os filhotinhos nascerem, não é mesmo? Rapidamente e, aparentemente, com pouco esforço, as fêmeas grávidas de outras espécies dão à luz seus filhotes.

Então, reflita sobre isso.



**Figura 3:** Fêmea de um inseto afídeo dando à luz seu filhote, sem necessidade de auxílio de parteiras.

### Peculiar

Característica própria de algo ou alguém.

### Andar bipedal

Modo de andar sobre duas patas (ou pernas, dependendo do caso).

### Pré-História

Período antes da origem da palavra escrita.

Dentre todos os organismos vivos, o ser humano é o único cuja mãe necessita de ajuda para conseguir dar à luz seus filhos. Necessidade de auxílio no parto, portanto, é uma característica peculiar e única dos seres humanos, dentre toda a diversidade dos seres vivos. Mas isso nem sempre foi assim. Ao longo da história exclusivamente humana, houve um momento em que, por conta de hábitos **peculiares** e de características exclusivas, as humanas grávidas passaram a necessitar do auxílio de outras pessoas nesse momento importante da vida.

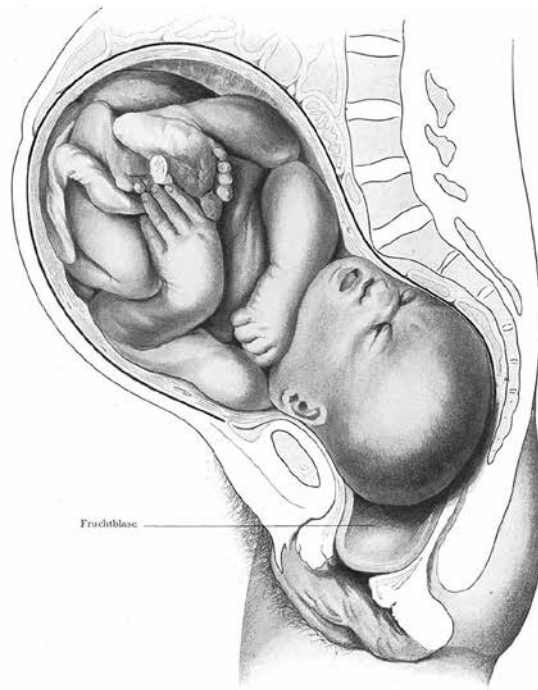
Esse momento esteve relacionado a mudanças radicais nos hábitos de vida de nossos ancestrais. Por exemplo, uma mudança importante foi quando passamos de um hábito arborícola para um hábito terrestre. Além de passar a viver no chão, começamos a usar apenas duas pernas para locomoção, quer dizer, mudamos de um hábito quadrupedal para um hábito bipedal. Entretanto, o **andar bipedal** é mais eficiente energeticamente, quando o quadril fica mais estreito. De fato, você pode perceber que não é muito confortável andar, muito menos correr, com as pernas afastadas uma da outra. Assim, ao longo da nossa história, nosso quadril foi ficando mais estreito – o que tornou nossa locomoção mais eficiente em termos energéticos.



**Figura 4:** As cabras e seus filhotes têm hábito terrestre e quadrupedal.

Entretanto, as mudanças que aconteceram durante a história exclusivamente humana não se restringiram ao hábito de locomoção. Um exemplo importante foi o aumento do tamanho do nosso crânio (e do cérebro), que também fez parte de nossa história. Humanos que nasciam com um cérebro maior tinham maiores chances de sobreviver do que os humanos que nasciam com cérebro menor, aumentando, assim, a sua chance de lidar com problemas do cotidiano, tais como buscar abrigo, procurar comida, enfrentar predadores.... Assim, os ancestrais humanos bipedais, ao longo das gerações, foram desenvolvendo cérebros maiores.

Agora, imagine mães de quadris cada vez mais estreitos dando à luz bebês com cérebros cada vez maiores. Certamente, agora você consegue perceber como essa combinação tornou o parto mais complicado na nossa espécie. Assim, tais modificações nos fizeram a única espécie - dentre todos os seres vivos - em que a fêmea necessita de auxílio no momento do parto dos filhotes.



**Figura 5:** O bebê humano, ao nascer, passa por canais estreitos que dificultam o parto.

Essas modificações em hábito e em características modificaram o curso da história biológica, que é exclusivamente humana, acarretando modificações sociais igualmente profundas. Tal temática é a nossa história, que iremos tratar nas últimas aulas desta disciplina. Mas, por agora, vamos imaginar apenas que cada uma das espécies apresenta características únicas (como os humanos apresentam o parto), e outras, compartilhadas com outros organismos (como a presença de células). Tais características estão relacionadas aos eventos que aconteceram no passado da espécie e de seu grupo. O estudo de todos os organismos e de suas características únicas e compartilhadas faz parte da diversidade dos seres vivos.

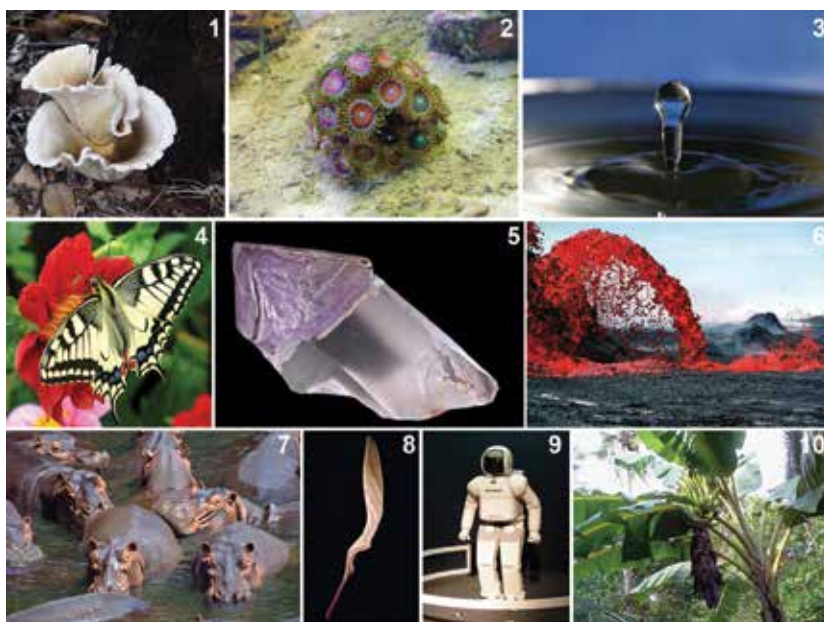
Ao longo do tempo, as características dos organismos vão se modificando, mas esse processo de mudança é longo, muito longo. Milhares ou milhões de anos são necessários para tais mudanças. Nesta disciplina, vamos discutir sobre o processo histórico de transformação das características biológicas ao longo do tempo. Aqui, iremos entender um pouco sobre como surgem e quais são as semelhanças compartilhadas e as peculiaridades exclusivas que observamos quando comparamos os seres vivos, incluindo, é claro, os humanos.

## Objetivos

1. Entender as características que fazem um organismo vivo diferente da matéria não viva;
2. Conceituar diversidade e biodiversidade, associando-os com um exemplo cotidiano;
3. Identificar as restrições temporal e espacial que o conceito de biodiversidade pode assumir.

## Seção 1: Um primeiro olhar sobre os seres vivos

Para começarmos nossa disciplina sobre os seres vivos, é importante que você entenda o que é um ser vivo. Qual a diferença entre um ser vivo e a matéria não viva? Vamos pensar com mais cuidado sobre as características que todos os seres vivos têm, mas os objetos não vivos não apresentam.



**Figura 6:** A diversidade dos seres vivos e da matéria não viva dificulta a definição clara e inequívoca de vida, que é o objeto de estudo da Biologia. Quais fotografias retratam seres vivos?

Uma característica que muitas pessoas associam com a vida é o movimento. Porém, olhando para essas fotos, percebemos que a lava,



a água e o robô podem se movimentar, mas não são vivos. Então, claramente, movimento não é uma boa escolha, pois não diferencia os seres vivos da matéria não viva.

Outras duas características, normalmente associadas aos seres vivos, são o metabolismo e a reprodução, ou seja, organismos vivos conseguem converter substâncias em energia, como conseguimos transformar alimento em energia. Além disso, os seres vivos se reproduzem, dando origem a outros seres vivos semelhantes a eles.

Se a gente pensar com cuidado, essas duas últimas características também não são exclusivas dos seres vivos, pois elas também estão presentes em um elemento natural não vivo. De certa maneira, podemos considerar esse elemento como o mais vivo dentre toda a matéria não viva. Será que você adivinha qual elemento não vivo também tem essas propriedades? Não é fácil; então, vou dar mais algumas pistas.

Há muitos milênios, esse elemento é usado diariamente pelos humanos, desde o tempo em que habitávamos cavernas. Esse elemento fez uma transformação profunda em nosso cotidiano e representou uma mudança qualitativa de poder quando conseguimos dominá-lo. Até hoje, se quisermos iluminar um lugar ou nos esquentar, o elemento pode ajudar. Adivinhou? O elemento é o fogo!

Está certo: dizer que o fogo é o mais vivo dentre a matéria não viva é quase um exagero! Quase. Vamos pensar melhor sobre a combustão, que é a reação química que gera o calor do fogo. A combustão é uma reação entre um gás (comburente) e uma substância (combustível). Em geral, esse gás comburente é o oxigênio presente no ar e, a partir do oxigênio, a reação química gera gás carbônico. Você já reparou em bombeiros apagando o fogo ao cobrir o local com um cobertor? Pois é; neste caso, o bombeiro está querendo cortar a fonte de oxigênio da reação que gera a combustão. Como o metabolismo é a transformação de uma substância em outra, podemos dizer que o fogo também tem metabolismo, de certa maneira, pois transforma o gás oxigênio em gás carbônico.

Além disso, o fogo também se reproduz. Bem; mais uma vez, não é como os seres vivos, pois essa reprodução não envolve enzimas proteicas, nem material genético, nem divisão celular. Entretanto, se você pode fazer um incêndio a partir de um fósforo aceso, então, o fogo também consegue, de alguma forma, produzir cópias de si mesmo, como o processo de reprodução dos seres vivos.

Parece que estamos chegando perto de uma definição de vida, pois agora temos duas características compartilhadas por todos os seres vivos e pelo fogo. Então, vamos pensar em mais detalhes sobre como a produção de cópias do fogo difere da reprodução dos seres vivos. Para começar, o fogo tem uma estrutura diferente dos seres vivos, pois não existem unidades de fogo. Não é uma unidade de fogo que dá origem a duas unidades de fogo, duas unidades dão origem a quatro... O fogo vai se alastrando em uma área cada vez maior em um fogaréu contínuo. Então, uma primeira diferença é que o fogo não é individualizado como os seres vivos.



**Figura 7:** O fogo é o fenômeno não biológico que apresenta mais características em comum com os seres vivos, tais como metabolismo e reprodução.

Outro ponto importante está focado na variação encontrada nos seres vivos e aquela encontrada no fogo. O fogo também apresenta variações em sua cor, pois existem chamas de cores diferentes, tais como verde, azul, amarela, laranja... Se você já observou com cuidado uma fogueira, ou mesmo a boca acesa do fogão da sua casa, você pôde perceber essas cores. Assim, a simples variação não é uma diferença entre o fogo e os seres vivos.

Entretanto, os seres vivos, além de serem diferentes uns dos outros, quando se reproduzem, geram filhotes semelhantes a eles. Por exemplo, humanos se reproduzem e nascem bebês humanos; de lobos nascem filhotes de lobo, e de micro-organismos são gerados novos micro-organismos. Na reprodução biológica, um organismo vivo origina novos organismos com as mesmas características, ou seja, pela reprodução,

existe transmissão das características ancestrais para os descendentes. A diferença, portanto, está aí. A cor do fogo depende de características da reação de combustão, e não do fogo que o originou. Assim, o fogo de cor amarela (como o de fósforo aceso) pode dar origem a um fogo de cor verde, se um gás for acendido com o fósforo aceso.

Então, aqui reside uma profunda diferença entre o fogo e os organismos vivos. O tipo (isto é, a cor) de fogo depende apenas do que acontece no momento da combustão e não de sua origem. No caso dos seres vivos, o tipo (isto é, o conjunto das características) depende da origem, ou seja, dos ancestrais que deram origem aos descendentes. A essa transmissão de características biológicas dos organismos ancestrais para seus descendentes, chamamos herança ou **herdabilidade**. Então, vimos três propriedades importantes de todos os seres vivos: metabolismo, reprodução e herança. Repare que apenas uma dessas propriedades não é suficiente para definir vida; precisamos das três para isso.

### Herdabilidade

Propriedade pela qual um organismo ancestral passa para seus descendentes suas próprias características. Por esta propriedade, os filhotes nascem semelhantes a seus pais.

## Seção 2: O que é biodiversidade?

Agora que já temos uma primeira definição de seres vivos, podemos começar a estudá-los. O estudo dos seres vivos está relacionado com um tema constante em manchetes de jornais e na televisão – a biodiversidade. Mas, o que a biologia tem a ver com a biodiversidade? Se a palavra *biologia* for decomposta, reconhecemos o radical *bio*, que tem origem na língua grega, significando *vida*. Assim, biologia é o estudo da vida, pois, *logos* significa *estudo*. Da mesma forma, o termo *diversidade*, por sua vez, diz respeito ao número de tipos do objeto variável e à quantidade relativa de cada tipo. Portanto, o termo biodiversidade trata da diversidade da vida, da diversidade biológica ou da diversidade dos seres vivos, que são termos equivalentes.

A palavra diversidade pode ser associada a grupos particulares de seres vivos. Desta forma, podemos falar sobre a diversidade de insetos, a diversidade de plantas, e até sobre a diversidade em uma única espécie, como a cor de cabelos em humanos.

Para entendermos melhor o que é a biodiversidade, vamos conversar um pouco sobre o termo diversidade em nosso cotidiano. Vamos usar o seu armário. As unidades em seu armário são cada uma das peças de roupa que você guarda ali dentro. Essas roupas podem ser separadas por categorias; e você pode usar diversas formas de categorias para organizar suas roupas:



- a) por tipo,
- b) por cor,
- c) por tecido,
- d) por marca.

Separe suas roupas, por exemplo, por tipo, e cada peça será inserida em um dos grupamentos a seguir:

- *shorts*.
- bermudas,
- calças compridas,
- camisas,
- camisetas,
- roupas de baixo.

Agora, de acordo com o critério tipo de roupa: quantos grupamentos diferentes de tipo de roupa você tem no seu armário? Quanto maior for o número da resposta, maior será a diversidade de roupas do seu armário. Vestidos e saias estarão presentes para uns, cuja diversidade de roupas, a princípio, será maior em relação aos que não apresentam tais categorias.

Além desses números absolutos, uma distribuição **equivalente** da quantidade de peças entre os grupamentos também aumenta a diversidade de roupas. Por exemplo, um armário com uma calça, um *short*, um par de meias, uma camisa social e 45 camisetas terá uma diversidade menor do que um com 10 calças, 10 *shorts*, 10 pares de meia, 10 camisas sociais e 10 camisetas. Neste caso, os dois conjuntos apresentam o mesmo número de peças e o mesmo número de grupamentos, mas o segundo armário tem as peças mais bem distribuídas e, portanto, sua diversidade será maior.

O ponto importante aqui é que a diversidade aumenta com:

- o aumento da quantidade total de peças únicas;
- o aumento do número de grupamentos em que tais peças são inseridas;
- uma melhor distribuição das peças entre os grupamentos.

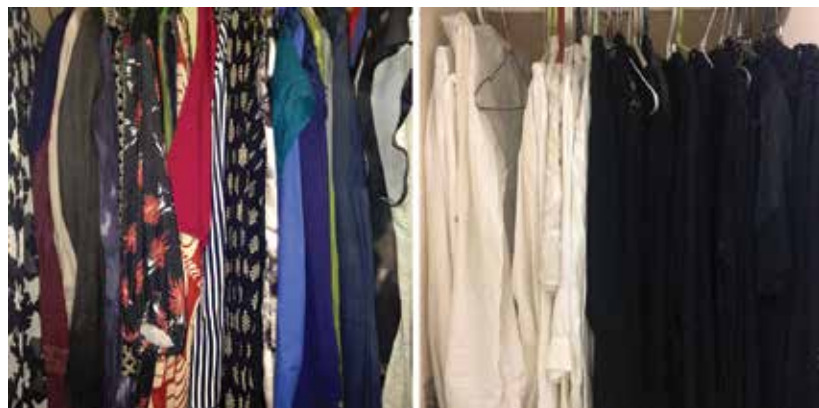
Podemos separar nossas roupas de acordo com outros critérios. Vamos pensar no critério cor. Esse critério cor pode ser um critério alternativo ao tipo, o que significaria que iríamos juntar todos os tipos de

### **Equivalente**

De igual valor ou com o mesmo peso.

roupas e agrupá-las por cada uma das cores. Assim, estaríamos juntando no grupamento azul as calças, vestidos e blusas azuis, e no grupamento vermelho as calças, *shorts* e camisetas vermelhas.

Entretanto, podemos usar dois critérios diferentes. Repare que, neste caso, os grupamentos serão influenciados pela ordem de escolha do critério. Por exemplo, vamos escolher primeiro o critério tipos e, em seguida, em cada um dos tipos, separamos por cor. Assim, inicialmente, separamos as roupas por tipos. E agora, nos dois armários ilustrados na figura a seguir, todas as blusas foram separadas por cores. Em um dos armários, a diversidade de cores é maior do que no outro armário, que só apresenta as cores branca e preta.



**Figura 8:** Podemos separar roupas pela diversidade de cores. Armário com alta diversidade de cores (à esquerda) apresenta blusas de muitas cores. Armário com baixa diversidade de cores (à direita) tem blusas das cores branca e preta.

Repare que, mesmo nas roupas, podemos pensar em muitos critérios diferentes, separando as roupas por marca, por tecido, por data de compra, por tamanho, por localização da loja... Agora, que já consideramos a diversidade em nosso contexto social, você está preparado para inserir esse conceito no mundo biológico?

Então, a diversidade biológica também pode ser dividida de acordo com vários critérios. Por exemplo, podemos dividir a diversidade biológica em organismos macroscópicos, que incluem os organismos visíveis a olho nu, e organismos microscópicos, para os quais precisamos de microscópios para conseguirmos enxergar.

Podemos estabelecer no critério nutrição. Assim, dividimos a diversidade em organismos heterotróficos, que se alimentam de outros orga-

nismos, como os animais, e organismos autotróficos, que produzem seu próprio alimento, como as plantas. Nesta disciplina, iremos conversar muito sobre os critérios possíveis e aqueles que usamos na classificação biológica. Vamos falar também das grandes transformações que ocorreram ao longo do tempo, que mudaram o modo de vida de nossos ancestrais, da mesma forma que o andar bípedal e o cérebro grande mudaram a rotina dos ancestrais humanos.

## Seção 4: A biodiversidade está ameaçada

Num último ponto desta aula, é importante frisar que o conceito de biodiversidade apresenta restrições de espaço (onde) e de tempo (quando). Isso pode ser compreendido, pois a biodiversidade varia dependendo do local e pode aumentar ou diminuir ao longo do tempo. Observe esta frase: *O Brasil é um país que apresenta uma biodiversidade muito rica, mas extremamente ameaçada.*

Nesse caso, a **restrição espacial** é o Brasil, ou seja, estamos falando da diversidade dos seres vivos presentes no território brasileiro. Mais especificamente, a frase trata dos grupamentos de seres vivos (como aves, insetos, sapos, plantas, micro-organismos) que habitam nosso país. Da mesma forma que a biodiversidade mundial inclui a biodiversidade brasileira, a biodiversidade brasileira inclui a biodiversidade da Mata Atlântica, do Sertão, do Estado do Rio de Janeiro, etc. Assim, quando falamos em biodiversidade, devemos ter claro que a palavra exige uma restrição espacial.

Na frase, estamos dizendo ainda que a biodiversidade brasileira é rica, ou seja, o Brasil apresenta uma alta diversidade de seres vivos. Imagine que algumas estimativas indicam que o Brasil é o país que apresenta a maior quantidade de espécies, comparado a todos os outros países do planeta! Repare que a frase não apenas especifica o local, mas também determina a fatia de tempo a que o autor está se referindo. Nesse caso, a **restrição temporal** é o presente, ou seja, a frase trata da biodiversidade brasileira atual, pois está no tempo verbal presente.

O final da frase (“extremamente ameaçada”) indica ainda que, a cada ano, menos espécies habitam o território brasileiro do que aquelas que já habitaram um dia. O ponto do autor da frase é que a devastação dos ambientes naturais brasileiros, florestas, recifes de coral, cerrado, está levando espécies de animais e plantas à extinção, o que diminui a biodiversidade brasileira com o tempo.

### Restrição espacial da biodiversidade

O termo biodiversidade se aplica apenas a área geográfica especificada na frase. Exemplo: Biodiversidade da região norte do Brasil.

### Restrição temporal da biodiversidade

O termo biodiversidade se aplica apenas ao período de tempo especificado na frase. Exemplo: Atualmente, o Brasil tem a maior biodiversidade do planeta.



## Brasil megadiverso

Se o nosso país tem uma rica diversidade, podemos considerá-lo um país megadiverso. Dessa forma, todos os brasileiros são responsáveis, têm o direito e o dever de cuidar da tão preciosa biodiversidade brasileira. Pense agora com cuidado: você está fazendo a sua parte, para garantir a sobrevivência das espécies brasileiras? Aqui vão algumas dicas: 1) usar sempre trilhas, e não fazer atalhos na mata; 2) diminuir a velocidade de direção, evitando atropelamentos da fauna nas estradas; 3) não comprar nem usar material originário de espécies ameaçadas, como penas e couros; 4) obedecer ao período oficial de defeso das espécies comercializadas. Estas são importantes dicas para a gente garantir uma melhor proteção para a biodiversidade brasileira.

Lembre-se de que as espécies dependem de todo o ambiente para poderem sobreviver. Portanto, não adianta preservarmos uma única espécie, se o ambiente natural dela está seriamente ameaçado. Hoje em dia, muitos já se preocupam com a preservação da Natureza, mas é preciso agir, atuando ativamente, pois a **extinção** é para sempre.

### Extinção

Desaparecimento de uma espécie em um determinado local por motivos naturais ou causados pelo ser humano.

### Defeso

Período de reprodução da espécie. Durante esse período, a pesca e a comercialização do organismo fresco dessa espécie é proibida.



**Figura 9:** (À esquerda) Biodiversidade de um recife de coral. A grande quantidade de espécies que habitam os recifes de coral torna esses ambientes uns dos mais ricos em biodiversidade. (À direita) A arara tem o nome científico de *Ara macao*, e é uma das espécies que incrementa a biodiversidade da Amazônia brasileira. Tanto os recifes de coral como a Amazônia são regiões que sofrem com a destruição humana dos ambientes naturais.

## Resumo

- Seres vivos são variados e se reproduzem, dando origem a seres vivos semelhantes aos ancestrais, pelo processo de herança ou herdabilidade.
- O fogo apresenta algumas semelhanças com os seres vivos, mas não apresenta herança;
- Diversidade é um conceito que trata da quantificação da variação, mais especificamente, do número de tipos e do equilíbrio entre a quantidade de objetos entre os tipos;
- Biodiversidade é um conceito que associa diversidade e seres vivos, ou seja, quantos tipos de organismos existem e o equilíbrio entre a quantidade de organismos em cada tipo;
- O conceito de biodiversidade demanda restrições geográficas e temporais.

## Referências para as figuras

1. *Balantidium*: Por Euthman – Photo by Euthman, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1697051>

*Clathrina*: By The original uploader was Elapied at French Wikipedia - Transferred from fr.wikipedia to Commons by Padawane using CommonsHelper., CC BY-SA 2.0 fr, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4174448>

2. Parto: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Eucharius\\_Rößlin\\_Rosgarten\\_Childbirth.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Eucharius_Rößlin_Rosgarten_Childbirth.jpg)

Fonte: Domínio público US.

3. Afídeo: Autor: MedievalRich. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Aphid-giving-birth.jpg>

4. Cabra e seus filhotes By Taken byfir0002 | flagstaffotos.com.auCanon 20D + Canon 70-200mm f/2.8 L - Own work, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1917731>

5. Feto dentro da mãe. Fonte: domínio público. Autores: Grundriss zum Studium der Geburtshülfe 1902. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bumm\\_158\\_lg.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bumm_158_lg.jpg)

6. Fungo Por Cas Liber - Obra do próprio, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2036005>

Borboleta By fesoj - Otakárek fenyklový [Papilio machaon]Uploaded by ComputerHotline, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7263187>

Água By Taken byfir0002 | flagstaffotos.com.auCanon 20D + Tamron 28-75mm f/2.8 - Own work, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=729941>

Zoantídeo By Kazvorpál - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25557636>

Ametista By Didier Descouens - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9052730>

Lava By J.D. Griggs edit by User:Mbz1 - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3970854>

Bananeira By ARUNKUMAR P.R - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20981988>

Robo CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=140450>

Trypanosoma brucei By Zephyris - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10769382>

Hipos By Paul Maritz - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=825233>

7. Fogo. By Awesomoman - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8060468>

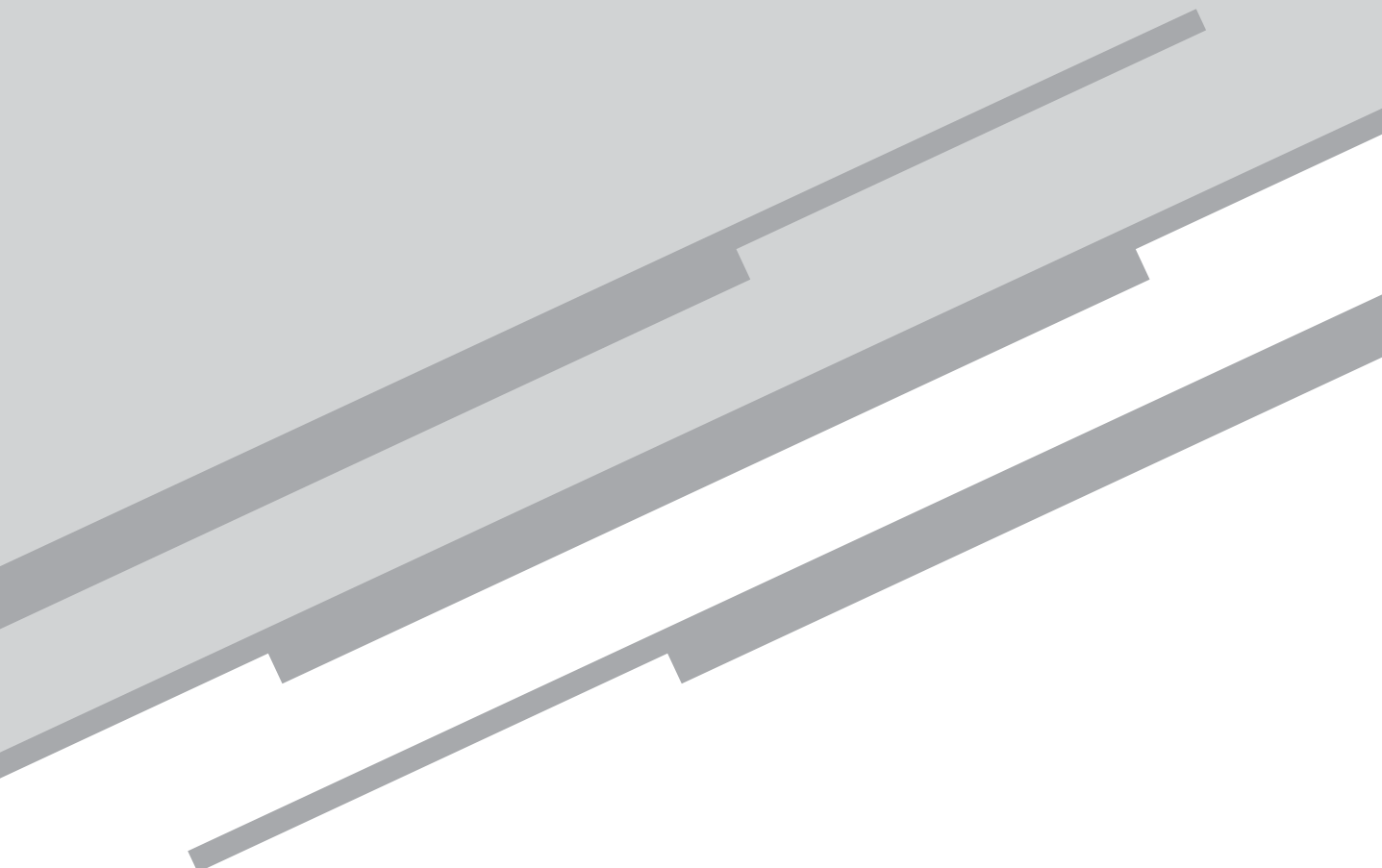
9. Arara e Recife de coral.

Por Copyright (c) 2004 Richard Ling, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=78275>

Por Matthew Romack - Originally posted to Flickr as Parrots., CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4320411>

# Aula 02

Espécies biológicas



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para começo de conversa...

Na Aula 1, falamos sobre vida, diversidade de modo geral e sobre diversidade dos seres vivos. Da mesma forma que as peças de roupa são as unidades que você percebe em seu armário, as unidades da diversidade biológica são os indivíduos e, como as roupas, os indivíduos também podem ser agrupados em tipos. O menos inclusivo de todos os agrupamentos da diversidade biológica é a espécie. Assim, podemos dizer que a biodiversidade é dividida em espécies. Apesar de não ser a única divisão na classificação dos seres vivos, a divisão em espécies é muito importante.

Uma espécie pode abrigar milhões ou até mesmo bilhões de indivíduos. A nossa espécie humana há pouco ultrapassou a marca de sete bilhões de pessoas. Entre os pesquisadores, nossa espécie é conhecida pelo nome científico que o pesquisador Lineu atribuiu em 1758: *Homo sapiens*, que significa “o homem que pensa”.



**Figura 1:** Distribuição geográfica e densidade populacional da espécie humana *Homo sapiens*. Quanto mais denso o vermelho, mais populosa é a área. Em praticamente todos os pontos do planeta, encontramos humanos.

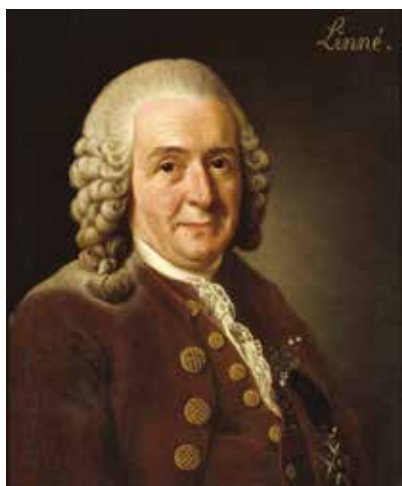


## Lineu

Carl von Linné (mais conhecido como Lineu) nasceu na Suécia em 1707. Ele é considerado o pai da taxonomia moderna, tendo concebido o sistema de nomenclatura científica que usamos



até hoje. O próprio Lineu, além de propor o sistema de classificação moderno, descreveu mais de doze mil espécies, incluindo a espécie humana. Seu trabalho *Systema Naturae* é considerado como o início da nomenclatura biológica. Como, em taxonomia, os nomes são em latim, o próprio Lineu latinizou seu nome para Carolus Linnaeus. Repare na legenda da figura que o nome da espécie está formalmente associado ao pesquisador que descreveu originalmente a espécie (Linnaeus) e ao ano de descrição (1758).



Carlos Lineu numa pintura do artista Alexander Roslin, de 1775, e a mosca comum *Musca domestica* Linnaeus 1758, descrita por Lineu.

---

Para descrever uma espécie, o pesquisador que a descobriu na Natureza irá inventar um nome científico para ela. Este nome é um binômio em latim, que deve sempre vir destacado no texto, geralmente em itálico. Assim, nos referimos à nossa espécie formalmente como *Homo sapiens*.

O primeiro nome inicia com letra maiúscula e se refere ao gênero, enquanto o segundo nome inicia em letra minúscula e define a espécie. Lembre-se que o nome da espécie é constituído dessas duas partes, e não apenas do segundo nome.

O nome da espécie pode indicar alguma característica da espécie, como o local onde ela ocorre (a esponja *Clathrina brasiliensis*), alguma característica marcante (a abelha *Apis melifera*), pode prestar uma homenagem (a vespa *Cephalonomia pinkfloydi* ou o fungo *Spongiforma squarepantsii*, em homenagem ao Bob Esponja). No caso dos humanos, ao dizer que nós somos os “que pensam”, Lineu quis dizer que outras espécies não pensam.

### Antropocentrismo

Pensamento que associa o ser humano ao centro de tudo.

Hoje percebemos que essa definição é claramente **antropocêntrica**. Muitas pesquisas com animais indicam que muitos deles pensam e resolvem problemas como os humanos. Entretanto, a nossa espécie permanece com esse nome, apesar da mudança de entendimento sobre a nossa posição na diversidade biológica. A conservação do nome científico é importante para que os pesquisadores consigam trocar informações mais facilmente sobre as espécies, por exemplo, em congressos e em publicações científicas.

Assim, a espécie humana é atualmente uma das espécies da biodiversidade do nosso planeta. Além dos humanos e da mosca, uma grande parte das espécies que Lineu descreveu em 1758 ainda são conhecidas pelo mesmo nome científico até os dias de hoje. O cientista que descobriu a nova espécie irá também descrevê-la detalhadamente em uma publicação científica. Esta primeira descrição original deve descrever tanto a diversidade observada dentro da nova espécie como também detalhar as características desta espécie que diferem das demais espécies já descritas.

Além de dar nome, descrever os tipos e a espécie, o pesquisador ainda irá depositar um indivíduo tipo em uma coleção de uma instituição depositária. A instituição de localização do tipo também vai estar incluída na descrição. Este tipo funciona como um organismo “modelo” da espécie que, geralmente, é depositado em uma coleção oficial de museu. Assim, com a descrição detalhada e com a disponibilidade dos tipos, outros pesquisadores podem estudar e até debater a proposta do pesquisador de que se trata de uma nova espécie para a diversidade.

Com mais de sete bilhões de indivíduos em todo o mundo, nossa espécie humana apresenta características únicas, particulares. A presença de

duas mãos, dois olhos, cinco dedos em cada membro, um coração com quatro cavidades que bombeia o sangue pelo corpo e um cérebro grande estão entre as características morfológicas que são compartilhadas por todos os indivíduos da nossa espécie humana, mas não são encontradas juntas em outras espécies de seres vivos.

Assim, tais características são chamadas de características diagnósticas, pois permitem a identificação ou a diagnose da espécie humana. Nesta segunda aula, estaremos focando neste ponto central no estudo das Ciências Biológicas, que são as espécies biológicas, incluindo *Homo sapiens*.

## Objetivos

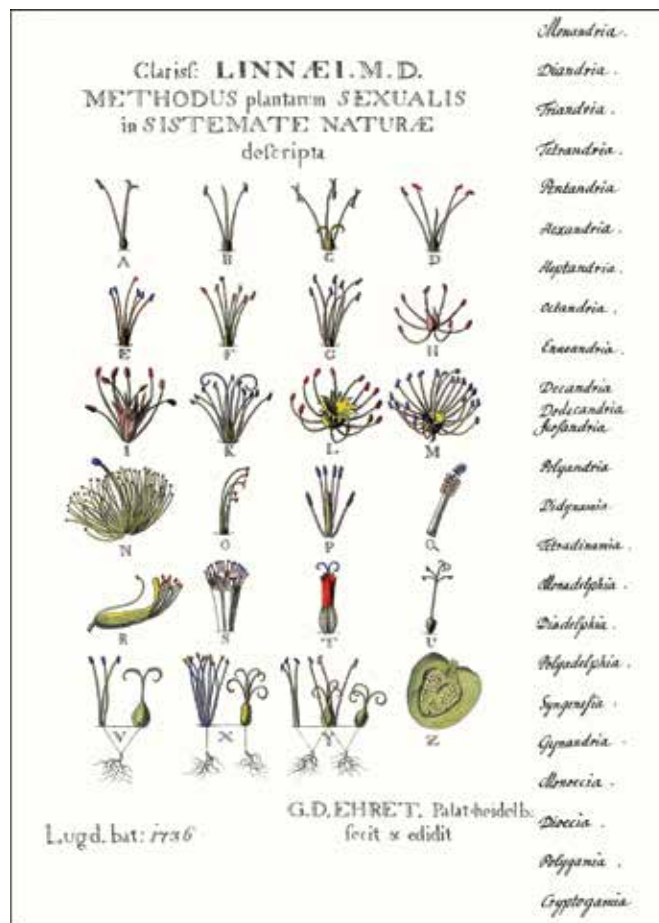
1. Estabelecer a importância das espécies, caracterizando-as como unidades da biodiversidade;
2. Definir e apresentar a propriedade central das espécies biológicas;
3. Reconhecer a variabilidade menor encontrada dentro de uma espécie quando comparada àquela encontrada entre espécies biológicas;
4. Indicar a causa dessa distribuição não equilibrada da diversidade dentro e entre espécies biológicas.

## Seção 1: Espécies são unidades da biodiversidade

Além da espécie *Homo sapiens*, Lineu e muito outros pesquisadores desde aquela época já nomearam e descreveram dois milhões de espécies! A associação entre características e espécies torna claro a importância de termos nomes específicos para cada uma das espécies. A ciência Biologia não seria possível, se tivéssemos que usar as palavras de cada língua para nos referirmos à diversidade biológica.

Esse foi um outro ponto importante da proposta de Lineu, que decidiu manter o latim como a língua única da classificação biológica. Para começar, as palavras no português e em outras línguas seriam diferentes, como a palavra *besouro* que, em inglês, é *beetle*. Imagine em um congresso com 200 pesquisadores de 50 países diferentes como eles iriam se comunicar? Todos teriam que saber as traduções em todas as línguas para poderem conversar sobre os animais. Imagine que loucura seria isso! O latim, portanto, é a língua da classificação que é comum a to-

dos os pesquisadores, independentemente de sua origem e de sua língua materna. Uma outra vantagem do latim é que, como já não é mais usada há muitos séculos, não haveria as reformas gramaticais ou ortográficas que ocorrem em uma língua com o tempo.



**Figura 2:** Uma ilustração da publicação de Lineu, mostrando o sistema de classificação desse cientista, que incluía a separação em grupamentos de espécies com base nas estruturas reprodutivas das flores.

### Características morfológicas

Características observáveis em uma espécie que são detalhadas pelo pesquisador que a descreveu em uma publicação científica.

Outro problema em usar besouros é que esta palavra significa um número grande de formas, cores e modos de vida. Assim, mesmo que, para o público leigo, esta palavra venha a suprir suas necessidades de comunicação sobre as espécies, um biólogo precisa de mais detalhamento. Então, precisamos de grupamentos que abriguem uma menor diversidade. Vamos pensar um pouco mais sobre isso.

Se possível, tire seu sapato. Agora, compare o formato da planta do

seu pé com aquele mostrado na imagem abaixo. A imagem mostra um filhote de chimpanzé, e você pode notar como o pé dele tem uma anatomia diferente do seu. Note que, mesmo sem conhecer o seu pé, posso ter certeza de que o seu pé é mais semelhante ao do seu vizinho do que ao pé do chimpanzé. E a mesma coisa funciona para os chimpanzés, pois os pés de dois chimpanzés são mais semelhantes do que quando comparados aos pés de qualquer outra espécie.



**Figura 3:** O polegar opositor do pé do chimpanzé é uma característica de espécies com o hábito arborícola, enquanto o nosso polegar voltado para a frente é uma característica de espécies com o hábito terrestre e bipedal. Você consegue entender por quê?

Então, podemos concluir que os membros de uma mesma espécie têm partes do corpo mais semelhantes entre si do que quando comparados com outras espécies. De fato, existe uma tendência de que indivíduos de uma mesma espécie sejam mais semelhantes morfologicamente do que indivíduos de espécies diferentes. Mas, o que explica esse padrão?

Essa maior similaridade está relacionada com uma propriedade primordial das espécies, que é a capacidade reprodutiva. Durante a reprodução sexuada, as características do pai e da mãe são combinadas para

gerar o filhote. Se o filhote for fértil, ou seja, se ele próprio tem a capacidade de se reproduzir e passar suas características a seus descendentes, então o pai e a mãe podem ser considerados a mesma espécie.

Alguns pesquisadores até definem espécies como um grupo de indivíduos capazes de se reproduzir e dar origem a indivíduos férteis. Mas por que existe a necessidade de os filhotes serem férteis? Simples. Caso os filhotes não sejam férteis, não existe mistura de fato das características dos parentais. Neste caso, as características misturadas das duas espécies irão desaparecer com a morte do filhote infértil, pois este nunca as passará a seus descendentes.



**Figura 4:** Zebroide é um termo genérico usado para o filhote do cruzamento entre a zebra e o cavalo ou entre a zebra e o jumento, como é o caso da foto. Isso significa que as características dos jumentos e das zebras não se misturam de fato, pois o zebroide é estéril.

Portanto, a capacidade reprodutiva dos seres vivos é limitada aos membros da mesma espécie biológica. Dois indivíduos se reproduzem, passando parte de suas características para seus descendentes. Ao se reproduzirem, ocorre uma homogeneização das características dos indivíduos parentais ao longo do tempo. Esses descendentes também se cruzam com os descendentes de outros casais e, assim, pela mistura, acontece a homogeneização das características em uma espécie.

Assim, os pesquisadores classificam os humanos como membros da espécie *Homo sapiens*, enquanto os chimpanzés são membros de outra espécie, *Pan troglodytes*. Por isso, mesmo sem ter visto seu pé, eu sei



que ele vai se parecer mais com a figura do pé humano do que com a do pé do chimpanzé! O pé do chimpanzé apresenta diferenças marcantes, como o dedão do pé opositor, típico de uma espécie com hábito arborícola que usa os pés (e as mãos) para agarrar os troncos das árvores. O formato do nosso pé, por outro lado, caracteriza uma espécie que tem hábito terrestre e andar bipedal, como já mencionei na aula passada. Repare que o pé do chimpanzé também apresenta outras características similares ao pé humano, como a presença de unhas, de cinco dedos com formatos semelhantes.

Assim, podemos dizer que o nosso dedão é uma característica morfológica útil ao hábito bipedal humano, pois ele funciona como uma alavanca para o próximo passo bipedal. Se você já teve uma unha encravada, sabe como é difícil andar sem a alavanca do dedão para o próximo passo. Experimente andar sem tocar o dedão no chão e você poderá comprovar porque nossos ancestrais que tinham essa característica (dedão voltado para a frente) aumentaram suas chances de sobrevivência em relação aos ancestrais que não tinham essa característica.

Características morfológicas úteis para uma determinada função ou hábito são chamadas pelos pesquisadores de adaptações. O dedão não opositor e voltado para a frente nos pés é uma adaptação exclusiva dos humanos ao hábito bipedal.

## Adaptações

Características observáveis que são úteis para uma determinada função ou para um hábito dessa espécie.

## Seção 2: Adaptações são herdadas pelos filhotes

Cada espécie viva apresenta adaptações aos hábitos que possui. Tais adaptações são passadas para os (filhotes) descendentes pela reprodução. Da mesma forma que nós passamos nossas características a nossos filhos (olho escuro, cabelo claro, pele morena...), os cactos também passam as suas características a seus descendentes. Por exemplo, algumas plantas típicas da nossa caatinga apresentam adaptações que economizam água, tornando a vida em um ambiente árido (seco) mais simples (ou menos complicada...).

O fato de os cactos da caatinga não apresentarem folhas, por exemplo, é uma adaptação que evita a perda de água, pois a evaporação da água acontece principalmente na superfície foliar. Uma planta sem folhas terá menores taxas de evaporação e, portanto, a perda de água dela será menor. Tal adaptação permite aos cactos sobreviverem em ambien-

tes com pouca água. Ao reproduzirem, os adultos produzem pequenos cactos que já nascem com essas adaptações. Essa transmissão de características que já vimos é uma das propriedades que diferencia os seres vivos e o fogo, que é a herança.



**Figura 5:** Detalhe do cacto xique-xique (*Pilosocereus polygonus*), com espinhos e sem folhas, o que minimiza a perda de água. Esta espécie é comestível e já salvou muitos de morrerem de sede na árida Caatinga, porque armazena água em seu interior.

Esse é um outro conceito importante na diversidade dos seres vivos: os pais passam as suas adaptações a seus descendentes, os quais também estarão adaptados ao ambiente desde o momento em que nascem. As adaptações são resultado de um processo de seleção natural que foi descrito pela primeira vez por Charles Darwin em 1859. Em seus estudos, Darwin propôs um mecanismo natural que explica as adaptações dos seres vivos. Esta teoria é chamada de seleção natural.

O primeiro ponto importante para a gente entender o processo de adaptação é que mais organismos nascem do que aqueles que conseguem sobreviver. Por exemplo, fêmeas do sapo *Alytes obstetricans* produzem até 150 ovos de girinos por ano. Curiosamente, nessa espécie, são os machos que carregam os ovos nas patinhas traseiras até eles estarem prontos para eclodirem. Quando os ovinhos estão prontos, o macho os libera na água doce, e eles se tornam girinos.





**Figura 6:** O macho desta espécie de sapos carrega os ovos fecundados em suas patas traseiras até a liberação dos girinos na água doce. Deste hábito, vem o nome comum (sapo-parteiro) e o nome científico (*Alytes obstetricans*) da espécie.

Agora, imagine que um único casal de sapinhos produz 150 girinos por ano. Se cada casal se reproduz seis vezes ao longo da vida, esse casal iria produzir 900 girinos filhos em toda sua vida. Cada um destes 900 girinos filhos, ao se desenvolverem em adultos, dariam origem a 900 girinos netos do casal original. Por sua vez, cada um dos netos iria produzir 900 girinos bisnetos, e cada um destes 900 girinos tataranetos. Se todos esses girinos sobrevivessem, seriam mais de seiscentos bilhões de sapinhos na quinta geração. Repare que esse número astronômico seria gerado considerando apenas um casal original, de apenas uma espécie, em apenas cinco gerações. Basicamente, estaríamos andando sobre sapinhos em qualquer lugar do planeta...

Então, Darwin pensou, claramente, que nem todos os filhotes sobrevivem. Sim, claro! A fome mata muitos, pois nem todos conseguem comida. A predação também elimina uma boa quantidade, pois muitos não conseguem fugir de seus predadores. Além destes problemas, doenças também afetam a sobrevivência dos sapinhos. Certo; essa era a explicação da época. Mas Darwin, não ficou satisfeito com essa explicação; ele começou a refletir em mais detalhes: quais sapos morrem e quais sapos sobrevivem, será que há algum padrão aqui?

Então, Darwin começou a observar os indivíduos de uma espécie, buscando detalhes que diferenciavam uns dos outros. Isso não é tão simples, mas ele, depois de longas observações e muito detalhamento,

percebeu que em todas as espécies havia diferenças entre os indivíduos. Essas diferenças eram pequenas, mas existiam. Assim, o segundo ponto importante para entender o processo de adaptação é que, mesmo dentro de uma espécie, os indivíduos não são idênticos, ou seja, existe variação dentro de uma mesma espécie.

Esse ponto também é simples de entendermos. Pense na sua família. Você não recebe dos seus pais apenas o sobrenome, não é mesmo? Os membros de uma família apresentam características em comum que são recebidas pela herança e que estão ausentes em outras famílias. Assim, parte dessa variação morfológica entre humanos também passa de pais para filhos. Claro! Cor dos olhos, sorriso, formato do nariz, aquela covinha no queixo, altura, são apenas alguns exemplos.



**Figura 7:** Uma família brasileira. Alguns membros de uma família se parecem mais com uns do que com outros. Alguns traços são característicos de uma família, como os olhos, a boca ou o nariz. Pegue fotos de sua família e faça a comparação.

Mas, por que as onças pintadas da Mata Atlântica nos parecem tão semelhantes entre si? Por que os peixes são tão semelhantes?

Não observamos as diferenças individuais nas outras espécies, pois não estamos acostumados a olhar para os animais e tentar lembrar dos nomes de cada um deles! Mas, isso não significa que as outras espécies não possuam diferenças individuais. Tal percepção é uma questão de treino que, geralmente, não adquirimos naturalmente, mas isso não

## Vocalizações

Emissão de sons por humanos ou outros animais.

significa que a variação entre os indivíduos não esteja lá. Muitos pesquisadores que seguem grupos de animais por muito tempo conseguem identificar cada um dos membros do grupo por pequenas diferenças morfológicas, pelo jeito, por suas vocalizações, etc.

Repare que a necessidade de distinguir os organismos por características visuais é uma necessidade humana. Como temos uma visão aguçada e um olfato pouco desenvolvido, estamos mais acostumados a descrever características visuais do que a reconhecer objetos e organismos pelo cheiro. Inventamos microscópios e telescópios para conseguirmos ver além da capacidade visual dos nossos olhos. Entretanto, outras espécies usam outros sentidos.

Cachorros, por exemplo, usam muito mais o olfato do que a visão. (Na Aula 12, você vai entender melhor a razão para essa diferença entre humanos e cachorros.) Todos os cachorros e os lobos são membros de uma única espécie *Canis lupus*. A diferença morfológica entre as raças não é importante para eles, pois não é através do reconhecimento visual que um macho e uma fêmea de *Canis lupus* se reconhecem para fins de reprodução.

As diferenças morfológicas entre um labrador e um chihuahua não fazem a menor diferença para eles e, assim, nascem os vira-latas, gerados pelos cruzamentos entre raças. Isso é um problema apenas para os taxonomistas desse grupo. Espécies muito semelhantes visualmente são chamadas de espécies crípticas, enquanto uma espécie pode incluir linhagens com tantas diferenças que chamamos de subespécies. O lobo e o cachorro são duas subespécies diferentes, *Canis lupus lupus* e *Canis lupus familiaris*.

Então, já vimos que mais filhotes nascem do que podem sobreviver, e que os indivíduos, mesmo os filhotes, de uma espécie apresentam características particulares. O ponto final do processo de adaptação é que a sobrevivência dos filhotes está diretamente relacionada com a presença de adaptações, ou seja, de características úteis à sobrevivência. Tais adaptações dão aos filhotes maiores chances de sobrevivência do que os filhotes que não as possuem. Assim, na próxima geração, a proporção de indivíduos com a característica adaptativa será maior. Se a vantagem continuar, na terceira geração, a proporção será maior ainda. Eventualmente, em uma determinada geração futura, todos os organismos da espécie irão apresentar a adaptação, como todos humanos apresentam os dedões dos pés virados para frente.

## Subespécie

Subespécies são membros de uma determinada espécie que acumularam algumas diferenças morfológicas entre eles, mas, ao cruzarem, produzem indivíduos férteis.

## Seção 4: Como ocorre o processo de adaptação?

Agora, vamos dar um exemplo de como ocorre o processo de adaptação. A espécie de molusco *Donax variabilis*, como o nome científico da espécie já diz, apresenta variabilidade específica.



**Figura 8:** Variação individual em uma espécie de molusco, *Donax variabilis*. Algumas dessas características podem ser melhores e darem mais chances para aquele indivíduo sobreviver e passar essas características para seus descendentes.

Neste caso, a variabilidade é tão óbvia que mesmo nós, que não somos taxonomistas de moluscos, conseguimos distinguir um variante do outro. Naturalmente, essa diferença é visual. Essa espécie é marinha e vive em praias com fundo de areia na costa leste dos Estados Unidos. Ela tem o hábito de filtrar a água do mar para conseguir o seu alimento e também serve de alimento para peixes. Repare agora nas diferenças morfológicas das conchas dos indivíduos dessa espécie. Se a areia da praia for cinza, qual será a concha que mais se destaca na areia? As conchas de cor bege. Lembre-se de que as conchas que mais se destacam se tornam automaticamente alvo dos peixes predadores. E as que menos se destacam? As conchas de cor cinza, ou seja, a mesma cor da areia da praia. Essas conchas serão praticamente ignoradas pelos predadores, pelo menos enquanto tiverem outras conchas bege que se destaquem.

Basicamente, em um fundo cinza, a visibilidade das conchas com tonalidade bege vai aumentar as chances de o predador enxergar o animal que vai servir de alimento para ele. Isso vai diminuir as chances dos indivíduos de coloração mais bege sobreviverem até a idade de repro-

duzir. Se eles não se reproduzem, na próxima geração a proporção deles vai diminuir, diminuindo também a variabilidade da espécie, que vai tender a ficar mais e mais cinza. Pelo menos, nesta praia de fundo cinza.

Os descendentes dos sobreviventes (cor cinza da concha) já irão nascer com adaptações ao seu ambiente (praia de fundo cinza) e terão mais chances de sobreviver e de se reproduzirem, passando para seus descendentes essas adaptações (cor cinza da concha). Assim, gradualmente, a proporção da variação benéfica (cor cinza da concha) aumenta até que vai chegar uma geração em que todos os descendentes tenham a cor cinza da concha. Assim, ocorre este processo de adaptação. Neste caso, a alta variabilidade intraespecífica nessa espécie de molusco pode indicar que ela esteja presente em muitas praias com tonalidades diferentes de areia.

Em outros casos, a adaptação pode permitir à presa fugir mais rapidamente de seu predador, como no caso de um organismo que consegue atingir uma velocidade de corrida maior do que outros membros de sua população. Essa seria uma adaptação boa para uma zebra que foge dos leopardos e de outros grandes predadores nas savanas africanas. Em outros casos, a característica vantajosa pode permitir a esse organismo enxergar seu predador de maior distância. Isso também vai dar a ele maior chance de escapar do predador e, passando pela reprodução, essa vantagem a seus descendentes.



**Figura 9:** Processo que gera adaptações pode ter vários ângulos. Neste caso, a vantagem adaptativa está em ser diferente do alimento preferido de seu predador. A seleção natural é o processo que gera adaptações nas espécies.

Repare também que a seleção natural não é um evento, mas é um processo longo, contínuo e sem fim. Assim, não podemos dizer que as espécies estão adaptadas, pois iria parecer que a seleção natural não estaria atuando mais nelas. A seleção natural está e estará sempre atuando até hoje em dia e no futuro também. Isso porque novas variações benéficas podem surgir, e assim o processo continua. Por exemplo, uma população em que todos os membros apresentem uma visão que permite definir um objeto a 50 metros de distância. Esta característica fornece uma vantagem adaptativa em relação à característica ancestral de que a definição era limitada a 20 metros. Por outro lado, elas apresentam uma desvantagem em relação àquela com definição de 100 metros. Se a adaptação de 100 metros surge, a característica que era a mais vantajosa (50 m) passa a ser desvantajosa.

Além disso, o ambiente pode modificar e, assim, o que era uma característica vantajosa pode não ser mais. Por exemplo, um rio que tenha areia mais clara no fundo, por causa de uma tempestade, passa a ter areia mais escura. Assim, a característica que era vantajosa (coloração mais clara), agora não será mais. A partir da tempestade, a vantagem estará com os indivíduos mais escuros, que tinham uma desvantagem antes da tempestade.

Finalmente, a relação com outras espécies também pode mudar, uma espécie competidora pode ser extinta ou um predador pode chegar àquele local, e tudo isso pode modificar o grau de vantagem de uma característica com o tempo. Por isso, dizemos que todas as espécies estão em constante processo de adaptação.

## Resumo

- As espécies são as unidades da biodiversidade. Membros de uma espécie podem se reproduzir e produzir descendentes férteis que apresentam uma mistura das características de ambos os pais. Por isso, membros de uma mesma espécie são mais semelhantes do que membros de espécies diferentes;
- Quando um pesquisador descreve uma espécie, ele associa uma descrição detalhada das características morfológicas exclusivas com um nome científico, pelo qual a espécie será reconhecida, e com um organismo-modelo depositado em uma coleção de museu;



- Algumas características são favoráveis no cotidiano da espécie, ajudando o organismo portador na sua sobrevivência. Tais características são denominadas adaptações;
- O processo que gera as adaptações é denominado seleção natural:
  1. mais indivíduos são produzidos pelos pais do que os que podem sobreviver;
  2. os indivíduos descendentes diferem em suas características;
  3. características benéficas para a sobrevivência aumentam as chances de sobrevivência e, portanto, de passar tais características a seus descendentes, aumentando sua frequência ao longo das gerações.

## Referências para as figuras

### 1 Distribuição geográfica e densidade populacional humana

By <https://www.reddit.com/user/daysleeperrr> - [https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/1vhxtp/i\\_couldnt\\_find\\_one\\_so\\_i\\_just\\_created\\_an\\_extreme/](https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/1vhxtp/i_couldnt_find_one_so_i_just_created_an_extreme/), CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41876704>

### Box

Lineu Por Alexander Roslin - Nationalmuseum press photo, cropped with colors slightly adjusted, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=320864>

Mosca Por Muhammad Mahdi Karim - Obra do próprio, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7672794>

2 Capa de trabalho de Lineu By Georg Dionysius Ehret - World Picdatabase Gallery 483049, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2480980>

3 Chimp Von Ikiwaner - Eigenes Werk, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11343974>

### 4 Zebroid

CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=209265>

5 Xique xique

Por HighJay - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31012788>

6 família.

CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=225603>

7 Sapo-parteiro. By Christian Fischer, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7344145>

8 Donax By Debivort - Own work by Author, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1626674>

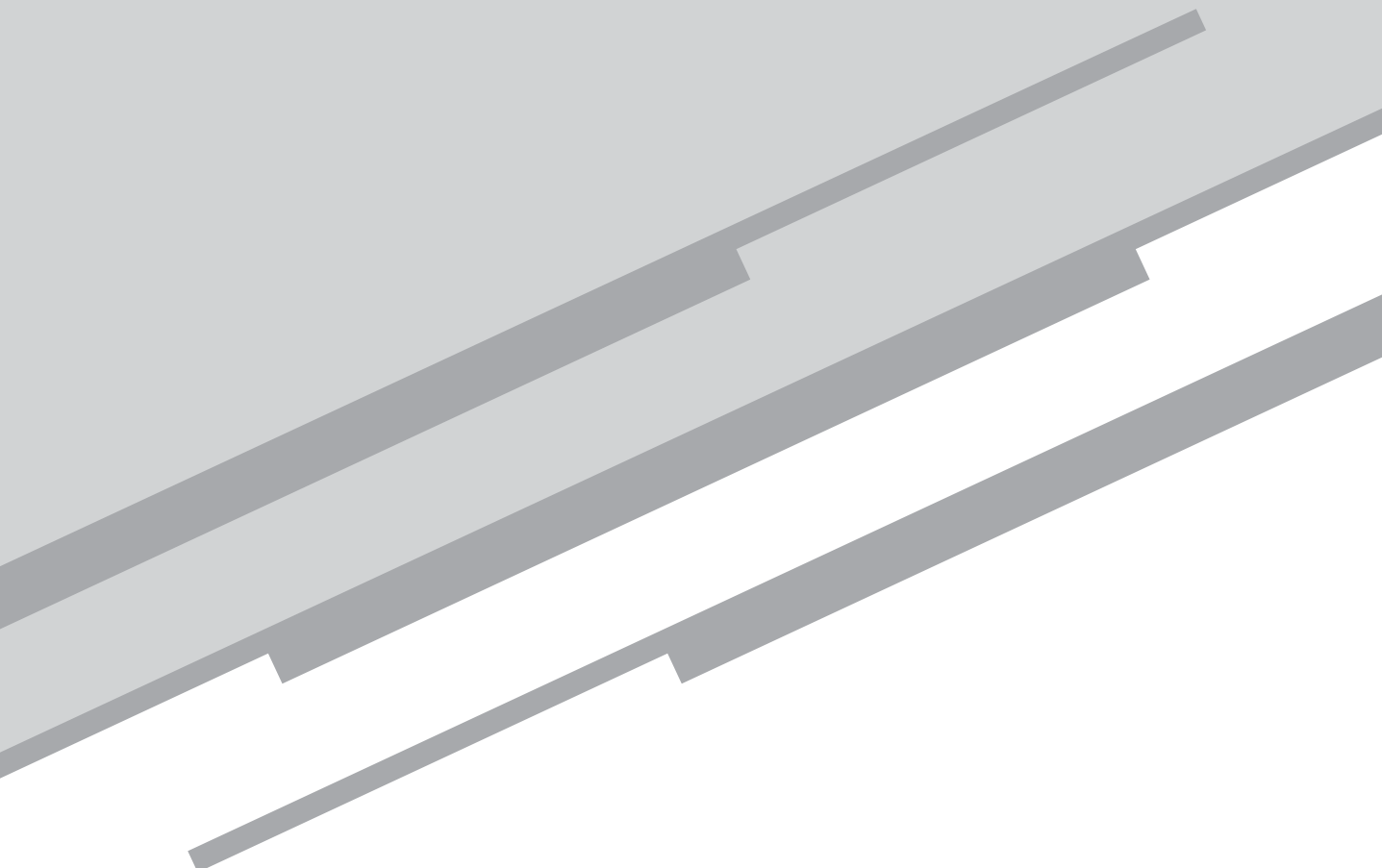
9 Seleção natural University of California Museum of Paleontology's Understanding Evolution <http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/search/imagelibrary.php>

(Search our image library for images from Understanding Evolution to use in your lessons, handouts and presentations.)



# Aula 03

Seleção Natural



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Na última aula, vimos que a reprodução mistura as características dos pais nos descendentes e, pelas gerações, isso promove uma homogeneização das características. Esta homogeneização é típica dos membros de uma espécie. Vimos também um processo fundamental na diversidade biológica que é a seleção natural. Por este processo, os organismos portadores de características vantajosas apresentam maiores chances de sobreviver e de se reproduzir, passando essas características a seus descendentes. Pela herdabilidade, os descendentes já nascem com tais vantagens, e a proporção de organismos com a característica vantajosa aumenta de geração a geração.

Agora, vamos pensar numa analogia. Imagine uma sala com 40 alunos que estão discutindo sua preferência por dois times de futebol. Destes, 30 alunos torcem para o Bragança Futebol Clube, enquanto 10 alunos preferem o Cupertino Futebol Clube.



**Figura 1:** Jogadoras do Bragança (Vermelho) e do Cupertino (Branco) numa partida de futebol.

Porém, ficamos sabendo, neste momento, que o total de alunos desta turma não é 40, mas 41, pois um aluno faltou. Não sabemos para qual time ele torce, mas conhecemos a turma dele. O que podemos inferir sobre o aluno faltoso, conhecendo os dados dos demais alunos da turma?

Certeza mesmo, só poderemos ter se perguntarmos ao aluno faltoso. Entretanto, o conhecimento humano não é só sobre certezas. Aliás, uma parte pequena do conhecimento humano é sobre certezas. Então, vamos olhar para os dados da turma de novo. Será que a gente não consegue nem uma ideia do time de futebol que ele torce, olhando *apenas* para os dados da turma dele? Sim, conseguimos.

Saber estimar essa previsão é uma das tarefas da Estatística. Baseados nos dados da turma, podemos dizer que a maior chance é que o aluno faltoso torça para o Bragança, pois a maior parte dos alunos presentes na turma do aluno faltoso torcem para esse time. Estimamos essa chance ou, mais tecnicamente, essa probabilidade, estimando a frequência de torcedores para cada time. A probabilidade de o aluno faltoso torcer para o Bragança ( $P_B$ ) é igual ao número de torcedores do Bragança ( $N_B$ ) na turma dividido pelo número total de alunos ( $N_A$ ):

$$P_B = \frac{N_B}{N_A}$$

Ou seja, a probabilidade de o aluno torcer para o Bragança é de 0,75 (30 divididos por 40), o que é equivalente a 75%. Isso porque o número total de alunos é 40, e o número de torcedores do Bragança é 30. Esta é a chance de o 41º aluno da turma torcer pelo Bragança. O cálculo da probabilidade de o aluno faltoso torcer para o Cupertino ( $P_C$ ) segue o mesmo raciocínio:

$$P_C = \frac{N_C}{N_A}$$

Equivalendo a uma probabilidade de 0,25 (10 divididos por 40), ou 25% de o 41º aluno da turma ser Cupertino. A frequência de alunos torcedores do Bragança é de 75%, enquanto a frequência de torcedores do Cupertino é de 25% nesta turma. Então, mesmo sem conhecer o aluno faltoso e muito menos saber por qual time ele torce, baseados nos dados da turma dele, temos uma ideia de que a probabilidade de ele torcer para o Bragança é de 75%, e para o Cupertino, é de 25%, totalizando uma probabilidade de 100%.

Entretanto, realmente pode ser que o faltoso seja de um terceiro time, mas essas probabilidades descritas acima representam a melhor aproximação sobre o assunto, antes de perguntar ao faltoso por qual time ele torce. A previsibilidade é a capacidade que temos de prever acontecimentos futuros com base em análises detalhadas feitas no presente.

A previsibilidade é a base da ciência. Vamos conversar sobre isso mais adiante na disciplina.

Esse conceito de probabilidade baseada em dados reais está associado ao termo frequência, que é muito importante na Biologia, pois percebemos e entendemos a seleção natural através das mudanças nas frequências das características.

## Objetivos

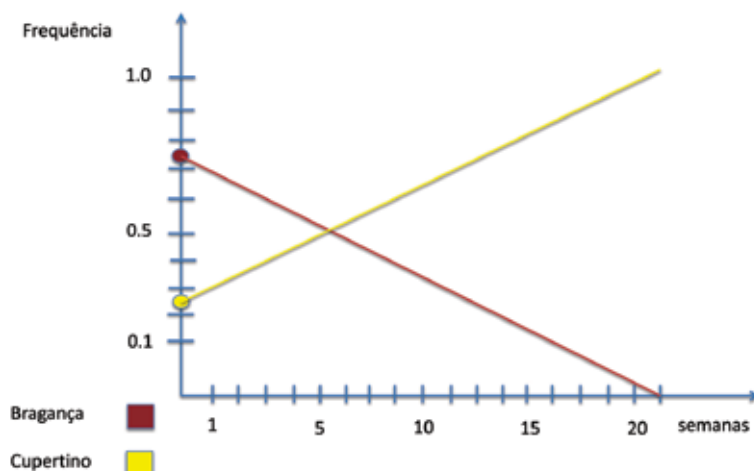
1. Apresentar a ideia de frequência e o conceito de previsibilidade;
2. Relacionar a mudança das frequências das características ao conceito de seleção natural;
3. Caracterizar a força da seleção natural como dependente dos fatores do ambiente em um determinado momento;
4. Contextualizar historicamente a proposição da teoria de seleção natural por Charles Darwin, identificando os principais trabalhos que deram suporte à proposta de Darwin;
5. Associar o processo de seleção natural com a seleção artificial usada há milênios em agricultura e pecuária;
6. Estabelecer a importância da interrupção do cruzamento como determinante para a diferenciação das linhagens nas populações.

## Seção 1: Futebol, frequências e seleção natural

Imagine agora que a escola foi comprada, e que o novo dono da escola seja um torcedor fanático do Cupertino. Em todo recreio, ele discursa sobre como esse time é maravilhoso; em todo lugar na escola existem cartazes sobre as vitórias do time; são distribuídos panfletos sobre como os jogadores são legais, como a equipe técnica é competente e sobre como esse time merece ganhar todos os jogos. O que você acha que vai acontecer com a frequência de alunos torcedores do Cupertino? Ela deverá aumentar, não é?

Então, veja o gráfico a seguir.

As frequências de 0.75 e 0.25 começam a mudar com a pressão para o time Cupertino



**Figura 2:** Mudança na frequência de torcedores do Bragantino, com a pressão da escola depois de sua venda. As bolinhas coloridas representam as frequências dos torcedores de cada time quando a escola foi vendida.

As bolinhas coloridas ilustram a frequência inicial de alunos torcedores de cada time no momento da venda da escola. As retas coloridas mostram a mudança na frequência dos torcedores ao longo das semanas. Repare que o aumento da frequência de torcedores do Cupertino está diretamente associado à diminuição na frequência de torcedores do Bragança. Isso porque, quando um aluno muda de Bragança para Cupertino, ele aumenta o número de torcedores do Cupertino e, ao mesmo tempo, diminui o número de torcedores do Bragança. Como esses são os únicos times de futebol da cidade, a soma das frequências dos torcedores dos dois times é igual a um (100%) em qualquer momento.

Essa mudança na frequência, como resultado de uma pressão, também é a ideia básica da seleção natural. Também equivalente é o fato de que o aumento de frequência de uma característica vantajosa implica automaticamente a diminuição da característica desvantajosa. Entretanto, não é apenas um fator que determina a mudança das frequências das características dos organismos. No ambiente natural, muitos fatores reunidos vão influenciar as mudanças, e estes fatores mudam de local para local, de momento para momento, e até de espécie para espécie.

Por exemplo, uma espécie de gafanhoto com 100 indivíduos habita uma planície. Vamos imaginar que, nessa planície, não existam predadores dessa espécie e a disponibilidade de alimento é muito grande. O que vai acontecer com os gafanhotos na próxima geração?



**Figura 3:** Um gafanhoto apresenta adaptações a seus hábitos particulares. Repare como a cor das patas é uma adaptação, assim como a cor do corpo é outra adaptação ao hábito de viver em galhos de árvores com folhas verdes. Este é um membro da espécie *Aiolopus thalassinus*, fotografado na Alemanha.

Repare que, da mesma forma que podemos inferir, sem conhecer, o time do aluno faltoso, podemos inferir o que vai acontecer na população, ao analisarmos cuidadosamente a população atual. Assim, sem predadores e com muito alimento, a pressão da seleção natural seria fraca. Desta forma, a expectativa é de que todos ou, pelo menos, grande parte dos descendentes desses indivíduos irá sobreviver e se reproduzir. A população deverá aumentar de tamanho na próxima geração.

Vamos imaginar que a população original produziu 1.000 indivíduos para a segunda geração. Agora, vamos reavaliar as condições. Existe alimento para esses 1.000 indivíduos? Se a resposta for sim, e não tiver aparecido algum predador, a pressão seletiva ainda deve ser muito fraquinha. Basicamente, todo mundo sobrevive, todo mundo se reproduz, e as frequências das características não mudam. Os indivíduos da segunda geração vão produzir 10.000 indivíduos para a terceira geração. Reavaliando novamente, será que ainda existirá alimento suficiente para todos os indivíduos da terceira geração?

Digamos que, na terceira geração, ainda exista alimento para todos os descendentes; todavia, nesta geração, chega à planície uma espécie de gavião predador que adora gafanhotos. Repare que a pressão seletiva para conseguir alimento continuará fraquinha (pois existe alimento

suficiente disponível), mas agora a pressão seletiva para sobreviver ao ataque dos predadores aumentou. A partir desse momento, a pressão da seleção natural vai aumentar e vai selecionar os indivíduos que se camuflam melhor no ambiente ou que conseguem fugir do gavião. Desta forma, a frequência dos que se **camuflam** melhor vai aumentar de geração para geração. Assim, os filhotes que nascerem com esta característica vantajosa vão aumentar suas chances de sobrevivência. Por outro lado, a frequência dos que conseguem enxergar seu alimento a uma distância maior não vai ter variação substancial, pois a comida não é um fator limitante para aquela população.

Assim como o dono da escola pressiona para os alunos torcerem para o time Cupertino, os indivíduos com melhores características tendem a reproduzir, e seus filhotes, com as mesmas características, aumentam a frequência da característica vantajosa ao longo das gerações. Agora, não importa se o indivíduo tem maior ou menor habilidade de encontrar comida, já que o alimento não é um fator limitante. O determinante para a sobrevivência neste local e neste momento é escapar da predação; assim, são características ligadas a esse aspecto limitante para a sobrevivência que irão aumentar de frequência.

### Camuflagem

Adaptação relacionada ao fato de que a coloração do indivíduo é semelhante à cor do ambiente, escondendo-o de ataque de predadores.

## Seção 2: Darwin e o contexto histórico da seleção natural

A teoria de seleção natural foi proposta por Charles Darwin, que nasceu em 12 de fevereiro de 1809, na Inglaterra. De acordo com essa teoria, as espécies naturalmente se adaptam a seus ambientes, pois a chance de sobrevivência depende das características do indivíduo. Em sua juventude, Darwin foi convidado a viajar num navio que daria a volta ao mundo, refazendo mapas para a marinha britânica. Ao aceitar o convite, Darwin passou cinco anos coletando plantas, animais, **fósseis** e solo nos mais distantes cantos do planeta.



**Figura 4:** Pintura retratando o navio H.M.S.Beagle na Austrália, pelo artista Owen Stanley, em 1841.

### Fósseis

São restos ou vestígios da existência de seres vivos que habitaram o planeta.

Depois da viagem do Beagle, Darwin passou mais 30 anos coletando evidências para a sua teoria de seleção natural. No alto das montanhas dos Andes, por exemplo, ele encontrou **fósseis** de organismos marinhos já extintos. Este fato deu a ele a pista de que o relevo sofre mudanças drásticas que podem afetar a vida dos seres vivos no local.



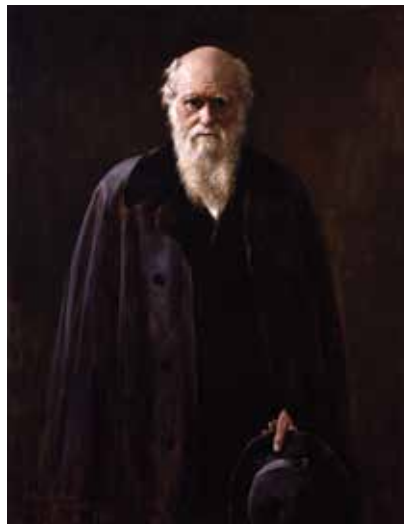
## Progressões e crescimento populacional

Um ponto importante que contribuiu para que Darwin formulasse sua teoria de seleção natural foi quando ele associou o que acontece nas populações humanas com o que acontece nas populações naturais. No livro *Um Ensaio Sobre o Princípio das Populações*, Thomas Malthus detalhou um cenário desconcertante para a população humana. Ele analisou cálculos sobre a população humana e concluiu que ela aumenta a uma velocidade maior do que o aumento da produção de alimentos. Assim, sua principal conclusão é que a fome seria inevitável. Darwin associou esse conceito às populações naturais e ao processo de seleção natural.



Os fósseis que Darwin achou eram claramente de organismos marinhos. Mas como eles foram parar no alto das montanhas? Certamente, pensou Darwin, o que é montanha hoje era mar antigamente. Um geólogo e amigo de Darwin, Charles Lyell, já tinha proposto sua teoria do uniformitarianismo. Segundo essa teoria, os processos geológicos que ocorrem no planeta hoje são os mesmos que sempre ocorreram. Para Lyell, mudanças pequenas, sutis, se acumulavam e resultariam nas diferenças marcantes que observamos hoje em dia, por exemplo, entre o mar e a montanha.

Aquilo fez todo o sentido para Darwin. Ele juntou a fome inevitável de Malthus e o uniformitarianismo de Lyell com um monte de ideias brilhantes próprias para formar a teoria de seleção natural. Mudanças pequenas e sutis, como as que encontramos dentro de uma espécie, quando acumuladas, podem resultar nas grandes modificações que observamos entre as linhagens de aves e mamíferos, por exemplo.

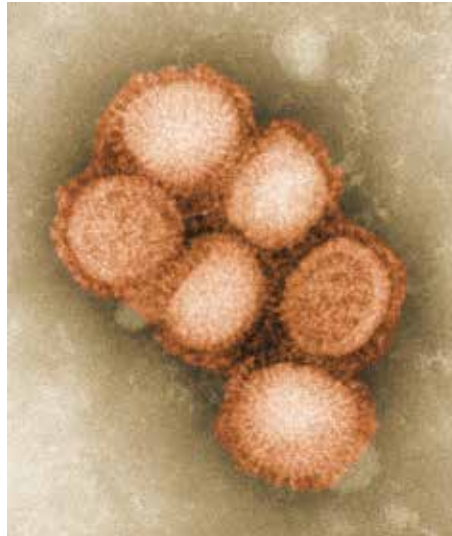


**Figura 5:** Charles Robert Darwin - quadro pintado por John Collier em 1882.

## Seção 4: Seleção natural observável

A modificação de características por seleção natural é um processo que leva muitos anos, em geral. Em outros casos, esse tempo é tão curto que conseguimos observar o processo de seleção natural descrito por Darwin. Por exemplo, em organismos que se reproduzem a uma velocidade muito rápida, as mudanças podem ser percebidas em déca-

das e até em anos. Os vírus são um bom exemplo. Repare que Darwin desconhecia os vírus quando propôs a teoria de seleção natural, mas é um fato que a seleção natural atua nos vírus. Essa também é uma característica fundamental das grandes teorias científicas: elas devem ter uma abrangência maior do que aquela que foi usada para propor a ideia pela primeira vez.



**Figura 6:** Uma fotografia tirada em microscópio (micrografia) de uma variedade de vírus da gripe, responsável pela Gripe Espanhola, no início do século XX. Essa variedade apresentava características próprias que aumentavam a taxa de mortalidade dos doentes.

Você já se perguntou por que algumas vacinas que usamos para nos proteger de doenças só têm validade de um ano? Um exemplo é a vacina contra gripe, que tem que ser desenvolvida todo ano. Por quê? A explicação é porque os vírus da gripe que estão atualmente contaminando as pessoas são os que sobreviveram à aplicação da vacina no ano passado. Assim, os vírus sobreviventes apresentam naturalmente resistência à vacina do ano passado. Por isso, uma nova vacina tem que ser desenvolvida para essa nova linhagem de vírus, pois a vacina anterior não funcionaria nos vírus sobreviventes.

Essa necessidade de novas vacinas a cada ano é resultado direto da teoria da seleção natural de Charles Darwin. Se não houvesse adaptação ao ambiente, uma única vacina seria suficiente para todos os anos. Um

outro exemplo de seleção natural observável é o caso dos antibióticos. Quando uma pessoa está com uma infecção crítica, se sentindo mal, ela toma antibióticos. O médico prescreve uma receita, e ela deve tomar a medicação durante 7 dias, mas, com 5 dias, ela já está se sentindo bem melhor. Nesse ponto, ela pensa: eu não preciso mais de remédio, já estou bem. Ela resolve interromper o tratamento no quinto dia.

Entretanto, apesar de a dosagem de sete dias ser suficiente para matar todas as bactérias que estavam infectando o paciente, a de cinco dias não é. Qual tipo de bactéria você acha que vai sobreviver aos cinco dias de antibiótico, a mais fraquinha ou a mais resistente? Claramente, a mais resistente vai sobreviver. Assim, com a interrupção do tratamento, a pessoa vai ajudar a desenvolver em seu corpo uma nova linhagem de bactérias de resistência a antibióticos.

Dentro dessa linhagem já resistente, uma nova variedade pode surgir com uma resistência ainda maior, e um novo antibiótico ainda mais forte deverá ser administrado por mais tempo ainda. Caso a medicação seja interrompida, outra linhagem ainda mais resistente poderá surgir. Isso não é novidade, isso não é obscuro, isso não é complicado. Isso é seleção natural, e ela acontece o tempo todo. Pergunte ao seu médico por que o antibiótico deve ser administrado por todo o período recomendado. Esses pontos demonstram que a seleção natural é fato.



**Figura 7:** Uma fotografia de um hospital nos EUA com vítimas da Gripe Espanhola. Em decorrência da alta virulência dessa variedade de vírus da gripe, mais de 40 milhões de doentes morreram, incluindo o presidente brasileiro Rodrigues Alves. Esta foi considerada como a pior epidemia de todos os tempos, pelo menos até aquele momento.

## Seção 5: Seleção artificial

Para Darwin, a seleção natural que ele estava propondo nada mais era do que o mesmo mecanismo usado há milênios para criar artificialmente variedades de plantas, animais e outros organismos explorados comercialmente. Fazendeiros, agricultores e criadores de animais usam há muito tempo a *seleção artificial*. Neste tipo de seleção, é o ser humano que determina a característica a ser selecionada; por isso, chamamos de seleção artificial; mas, no resto, os processos são idênticos.



**Figura 8:** Cenouras são a raiz da planta *Daucus carota*. Cenouras possuem cor de laranja, certo? Errado! Olhe para cima! Por seleção artificial, muitas variedades de cenouras podem ser criadas a partir da mesma espécie.

A figura acima mostra a variação de cor em cenouras. No caso de fazendeiros e agricultores, as melhores características, claro, são as que dão maiores lucros. Ou seja, geralmente aquelas que aumentam o tamanho, melhoram o sabor e refinam a aparência ou incrementam o valor nutricional dos alimentos que consumimos diariamente. A seleção artificial, da mesma forma que a natural, só funciona se a variação for herdável. Ou seja, o processo de selecionar a cor de cenouras ao longo das gerações só funciona se cenouras de cor amarela produzirem descendentes com essa cor, e assim por diante. Outras características não herdáveis não funcionariam neste processo seletivo, da mesma forma que o cruzamento de pessoas de cabelo pintado não serviria para gerar crianças de cabelo pintado.

A seleção artificial, entretanto, pode ir muito além de mudanças na cor da raiz, como no caso da cor da cenoura. Você sabia que o nome científico do repolho é *Brassica oleracea*? E o nome científico da couve-flor? *Brassica oleracea*. E do brócolis? *Brassica oleracea*. E da couve-de-bruxelas? *Brassica oleracea*.



**Figura 9:** Variedades diferentes de *Brassica oleracea* que foram selecionadas artificialmente para características diferentes. A característica selecionada do repolho foi a folha, no século I, tanto do brócolis como da couve-flor, a seleção ocorreu para aumento da flor, no século XVI, e da couve-de-bruxelas, os brotos laterais, no século XVIII.

Pois, como essas verduras tão diferentes pertencem à mesma espécie? É difícil de acreditar. Como isso acontece, então? Longe das fazendas, não existe repolho, nem couve-flor, nem couve-de-bruxelas, só uma mostarda selvagem pouco usada em cozinha. Na realidade, essas verduras que compramos no mercado são variedades diferentes de uma mesma espécie que foram selecionadas pelo fazendeiro para características distintas.

Assim, as variedades de *B. oleracea* foram selecionadas artificialmente pelos agricultores para aumentar o tamanho da folha (como o repolho), o tamanho da flor (como a couve-flor e o brócolis) ou o número de brotos laterais (como a couve-de-bruxelas). Cruzando duas plantas com flores grandes, por exemplo, eles conseguiam produzir plantas com flores ainda maiores. Assim, as variedades foram se tornando mais e mais diferentes. Como o tamanho da flor é uma característica herdável, com o passar das gerações, os cruzamentos selecionados a cada geração deram origem a plantas com flores maiores e maiores, até que surgiu a couve-flor.

Percebendo o potencial dessas novas variedades, os fazendeiros trataram de promover o cultivo, evitando o cruzamento entre as linhagens. Ah, sim, a seleção artificial só funciona se, com o passar das gerações, os agricultores prevenirem o cruzamento entre as diferentes variedades que estão sendo selecionadas. Assim, eles interromperiam o processo de homogeneização que ocorre naturalmente em uma espécie pela capacidade reprodutiva de seus membros. Ou seja, o cruzamento deve ocorrer

dentro das variedades, mas não entre as variedades, para garantir a diferenciação das linhagens.

## Seção 6: Isolamento reprodutivo



**Figura 10:** Uma fotografia mostrando duas raças de cachorro muito diferentes: chihuahua (pequeno, de pelagem escura) e o dogue alemão (grande, de pelagem clara). Esses membros da espécie *Canis lupus* não podem cruzar, por causa da quantidade de diferenças acumuladas.

Um outro exemplo de como a seleção artificial cria variedades muito diferentes é o que inclui as raças de cachorro. Apesar de serem biologicamente a mesma espécie, *Canis lupus*, algumas raças são tão diferentes que a habilidade de cruzamento não existe mais entre elas (repare na imagem anterior). Com a impossibilidade de cruzamento, a tendência é que, com o tempo, mais mudanças marcantes se acumulem entre as diferentes raças.

Entretanto, se as modificações em uma espécie não se acumulam, pois as características se misturam nos descendentes férteis, como acontece a diferenciação real como a que ocorre entre aves e mamíferos? Nas fazendas, os fazendeiros previnem, pois eles controlam os cruzamentos dos animais e das plantas que eles comercializam. Entretanto, será que existe um mecanismo natural que interrompa o cruzamento entre membros de uma mesma espécie ancestral, sem intervenção humana? Se existir, essa poderia ser a explicação para a diversidade de espécies que encontramos na Natureza.



Vamos ver o exemplo do esquilo *Sciurus aberti*, que apresenta duas subespécies: *Sciurus aberti aberti* e *Sciurus aberti kaibabensis*. As duas subespécies estão isoladas geograficamente, pois cada uma está de um lado do Grand Canyon, no sudoeste dos Estados Unidos. Como os esquilos não conseguem descer o cânion, atravessar o rio e subir para o outro lado, o cânion funciona como uma barreira para esses esquilos. Assim, essas duas populações interromperam o processo de homogeneização que ocorre dentro de cada espécie.

Repare que aqui a interrupção do cruzamento ocorreu naturalmente, o que é diferente do caso das raças de cachorro ou da *Brassica oleracea*, em que os humanos preveniram o cruzamento. No caso dos esquilos, o isolamento ocorre porque a barreira geográfica natural impede a reprodução. Por isso, esse isolamento é chamado de isolamento geográfico.



**Figura 11:** Esquilo da subespécie *Sciurus aberti kaibabensis*, que ocorre em um lado do Grand Canyon. O cânion é uma enorme barreira geográfica que isola geograficamente e interrompe a homogeneização entre essa subespécie com a *Sciurus aberti aberti*. Assim, elas vão acumulando diferenças e, em pouco tempo, podem se tornar duas espécies.

A partir do momento em que acontece o isolamento geográfico, as variedades começam a acumular diferenças com o tempo, pois as adaptações não são mais misturadas. Como a reprodução está interrompida entre elas, os membros de cada uma delas vão continuar a se reproduzir e se homogeneizar, mas a homogeneização não vai mais acontecer entre elas. A população de um lado vai acumular algumas adaptações, dependendo das condições desse lado do cânion, e a população do outro lado vai acumular outras adaptações que dependem das condições do outro

lado. De fato, o esquilo *Sciurus aberti kaibabensis* tem o abdome escuro, enquanto o *Sciurus aberti* tem o abdome claro.

## Resumo

- A frequência é a proporção de organismos (ou objetos) de um determinado tipo dividido pelo número total de organismos (ou objetos) comparados;
- Charles Darwin propôs a teoria de seleção natural no século XIX após análise do material coletado durante sua viagem ao redor do mundo e com base nos trabalhos de Charles Lyell e de Thomas Malthus;
- Um processo semelhante à seleção natural, mediado pelo ser humano, acontece no melhoramento vegetal ou animal em fazendas, denominado de seleção artificial;
- O isolamento é crucial para que as diferenças possam se acumular entre as linhagens criadas artificialmente;
- O isolamento geográfico pode acontecer naturalmente.

## Referências para as figuras

Figura 1 jogo de futebol

Por Sem fonte automaticamente legível. Presume-se que a autoria seja de Hedavid, baseando-se nas informações sobre direito autoral. - Sem fonte automaticamente legível. Presume-se que seja obra própria, baseando-se nas informações sobre direito autoral., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=162891>

Figura 2 autora

Figura 3 gafanhoto

CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=179362>

Figura 4 beagle

Por Owen Stanley, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=393600>

Figura 5 Darwin



Por John Collier - National Portrait Gallery: NPG 1024 While Commons policy accepts the use of this media, one or more third parties have made copyright claims against Wikimedia Commons in relation to the work from which this is sourced or a purely mechanical reproduction thereof. This may be due to recognition of the “sweat of the brow” doctrine, allowing works to be eligible for protection through skill and labour, and not purely by originality as is the case in the United States (where this website is hosted). These claims may or may not be valid in all jurisdictions. As such, use of this image in the jurisdiction of the claimant or other countries may be regarded as copyright infringement. Please see Commons:When to use the PD-Art tag for more information. See User:Dcoetzee/NPG legal threat for original threat and National Portrait Gallery and Wikimedia Foundation copyright dispute for more information. Esta marcação não indica o status de direito autoral da obra aqui mostrada. Uma marcação normal de direitos autorais ainda é necessária. Veja Commons:Licenciamento para mais informações., Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6363689>

Figura 6 cenouras

By Stephen Ausmus - This image was released by the Agricultural Research Service, the research agency of the United States Department of Agriculture, with the ID K11611-1 (next). This tag does not indicate the copyright status of the attached work. A normal copyright tag is still required. See Commons:Licensing for more information. English | français | македонски | +/-, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=545126>

Figura 7 Repolho By Forest & Kim Starr, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6178248>

Couve de bruxelas By Eric Hunt - Own work, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1318818>

Brocolis By Coyau / Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31365778>

Cove flor By Coyau / Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31366420>

Figura 8 Virus da gripe Por Photo Credit: C. S. Goldsmith and A. Balish, CDC - <http://www.cdc.gov/media/subtopic/library/diseases.htm> (Original .tif), Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index>

php?curid=6689828

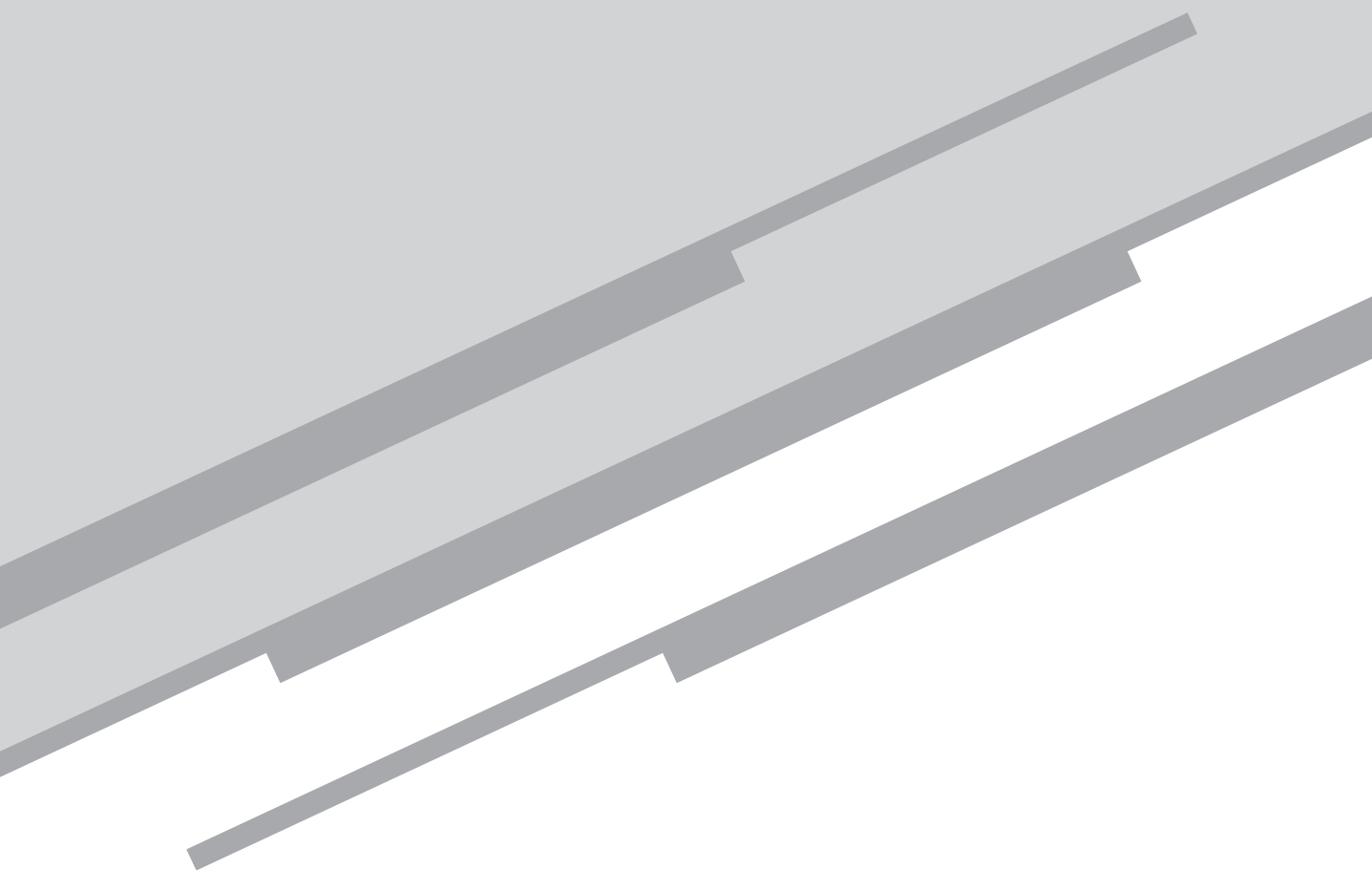
Figura 9 Hospital americano Por U.S. Army photographer - Army.mil  
<http://www.army.mil/-images/2008/09/24/22729/army.mil-2008-09-25-103608.jpg>, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9913432>

Figura 10 Dog breed By Ellen Levy Finch / en:User:Elf (uploaded by TBjornstad 14:51, 17 August 2006 (UTC)) - [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:IMG013biglittledogFX\\_wb.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:IMG013biglittledogFX_wb.jpg), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1063919>

Figura 11 Esquilo By Azhikerdude - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7256628>

# Aula 04

Um ancestral em comum para todos



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Na última aula, estávamos conversando sobre os esquilos que vivem em lados diferentes do Grand Canyon. Agora, repare que a chave para entendermos esse processo que isolou os dois grupos teria sido observar como os dois esquilos foram parar em lados opostos do cânion. Entretanto, este evento já se passou, e não havia ninguém anotando ou gravando o momento da separação. Por outro lado, da mesma forma que podemos ter uma ideia sobre o time de futebol do aluno faltoso sem perguntar a ele diretamente, podemos, através de análise cuidadosa, ter uma ideia do que ocorreu no passado dos organismos, analisando dados das populações atuais.

Por exemplo, ao analisarmos a cor da pelagem dos esquilos, percebemos que o *Sciurus aberti aberti* tem o abdome mais claro, enquanto o *Sciurus aberti kaibabensis* tem essa região com pelagem mais escura. Repare que o isolamento geográfico que separa as duas subespécies de esquilo é o que permite que esta diferença clara e diagnóstica venha a surgir entre as subespécies. Com a impossibilidade de cruzamento em decorrência do cânion, as duas populações estão isoladas e não conseguem se homogeneizar mais entre si. As adaptações que venham a aparecer em uma subespécie não serão passadas para a outra subespécie. Por outro lado, caso apareça uma ponte unindo os dois lados do cânion, elas provavelmente voltarão a se reproduzir. Neste caso, as subespécies produziriam filhotes férteis com pelagem de coloração intermediária. Com isso, elas voltariam a se homogeneizar, misturando as características nas gerações descendentes através da reprodução.

Mas será que conseguimos saber em mais detalhes o que pode ter acontecido com os esquilos para ficarem isolados? Os geólogos que estudaram o Grand Canyon viram que a formação do cânion é muito antiga, de milhões de anos atrás. Isso significaria que a formação é mais antiga do que as diferenças sutis dos esquilos podem explicar. Ou seja, a similaridade morfológica entre os esquilos não é compatível com a hipótese de que o surgimento do Grand Canyon os tenha separado. Uma vez que uma hipótese é descartada, os pesquisadores tiveram que pensar em outra explicação.

Segundo essa nova ideia, há dez mil anos, houve uma era glacial, e o mundo ficou muito mais frio do que ele é hoje. Se você já viu o filme *A Era do Gelo*, sabe bem do que eu estou falando. Assim, uma camada de gelo teria formado uma ponte que levou a população ancestral do *Sciurus*

*rus aberti* a poder passar de um lado a outro do cânion sem problemas. Quando o planeta esquentou, o gelo derreteu e a ponte se desfez, isolando as duas populações de *Sciurus aberti* que estariam, dali em diante, impedidas de se cruzarem. Nesta aula, vamos discutir um pouco mais sobre o passado das espécies atuais, como os esquilos, e como esse passado influencia as características atuais.



**Figura 1:** O Grand Canyon é hoje a barreira que impede a homogeneização entre as duas subespécies de *Sciurus aberti*.

## Objetivos

1. Estabelecer a Biologia como ciência histórica;
2. Relacionar o processo de isolamento entre populações ao processo de diferenciação das populações em espécies diferentes;
3. Associar a hierarquia das diferenças entre as espécies à taxonomia hierárquica proposta por Lineu;
4. Relacionar a similaridade entre duas espécies ao tempo desde o último ancestral comum entre elas.

## Seção 1: Isolamento reprodutivo e a história da diversidade

A História é a ciência que estuda as transformações e as permanências das sociedades humanas, que explica os aspectos políticos, econômicos e sociais da nossa sociedade atual. Como as sociedades, as espécies também se transformam, adquirindo adaptações que seus ancestrais não possuíam. Nesse sentido, o pesquisador alemão Ernst Mayr define Biologia como uma ciência histórica. Segundo Mayr, a Biologia atual é um reflexo direto da Biologia de ontem e, assim, as pistas para entendermos as características biológicas estão na história biológica das espécies que as possuem.



**Figura 2:** Ernst Mayr, com 90 anos de idade, recebendo um prêmio por suas inúmeras contribuições à Biologia. Mayr foi um dos primeiros a colocar a Biologia como uma ciência histórica, enaltecendo a história da Biologia como chave para a compreensão da Biologia atual.

Já sabemos que o isolamento geográfico inibe o processo de homogeneização entre as subespécies de esquilos, tanto que cada uma apresenta características morfológicas claramente diferentes. Entretanto, quando comparamos duas espécies diferentes hoje, mesmo habitando a mesma localidade e sem intervenção humana, como no caso de *Brassica oleracea*, elas não se cruzam nem geram filhotes férteis. Portanto, fica claro que, além do isolamento geográfico, algum outro processo inibe biologicamente o processo de homogeneização natural entre elas. O isolamento, neste caso, seria determinado não pela distância ou por uma barreira, mas pela incompatibilidade biológica do cruzamento. A esse tipo de isolamento biologicamente determinado chamamos de isolamento reprodutivo.

Se existem espécies diferentes hoje e existem organismos compatíveis reprodutivamente, será que o isolamento reprodutivo poderia surgir naturalmente, por exemplo, entre as subespécies de esquilos? Mais fácil do que tentar imaginar um futuro é pensar sobre o passado. O que esperaríamos encontrar na diversidade biológica, se essa incompatibilidade reprodutiva já tivesse surgido naturalmente? Vamos pensar mais um pouco sobre isso. Esperaríamos encontrar tanto espécies isoladas reprodutivamente umas das outras como grupos de organismos em plena capacidade de cruzamento. Bem, isso é claro que temos. Entretanto, esperaríamos encontrar também populações com algum tipo de isolamento, mas não perfeitamente isoladas reprodutivamente. Essas populações estariam no processo natural de isolamento reprodutivo.

Pois bem; isso também observamos! Os esquilos *Sciurus demonstrates* estar no processo de se tornarem isolados. Porém, além de populações que estão no início do processo de isolamento reprodutivo, como os esquilos, também esperaríamos encontrar outras que já estão mais avançadas neste processo. Sim, também temos exemplos desse caso.

Também é o caso da mula, que é o resultado do cruzamento entre a égua (*Equus caballus*) e o jumento (*Equus africanus asinus*). Então, podemos pensar que essas duas espécies de *Equus* estão mais avançadas no processo de especiação do que os esquilos. O processo só estará completo quando o cruzamento de fato não acontecer mais. Assim, o processo de especiação, a origem de duas espécies descendentes a partir de uma espécie ancestral, estará completo.



**Figura 3:** A mula é o resultado do cruzamento entre duas espécies diferentes: uma égua e um jumento. Como a mula não consegue cruzar, ela não deixa suas características misturadas para seus descendentes.

## Especiação

Origem de duas espécies descendentes isoladas reprodutivamente a partir de uma espécie intercruzante ancestral.

Ainda não está convencido? Então, vamos pensar pelo outro lado. Se as espécies surgiram no planeta exatamente da forma que elas são hoje, o que esperaríamos encontrar? Além de não fazer sentido encontrarmos esse isolamento parcial (como o dos esquilos e o da mula), esperaríamos encontrar todas as espécies com diferenças equivalentes. Por exemplo, ou todas elas possuiriam o mesmo tipo de esqueleto ou todas elas teriam tipos distintos de esqueleto. Todas com o mesmo tipo de organização do corpo, ou todas com modelos diferentes de organização do corpo.

Opa; certamente, não é isso que observamos! Temos espécies muito semelhantes, como duas espécies de micos que apresentam não apenas o mesmo tipo de esqueleto, mas também de organização do corpo, glândulas mamárias, polegar opositor e muitas outras características em comum. Ao mesmo tempo, temos espécies tão diferentes, como são as pinheiros e bactérias, que têm pouco além da presença de células como característica comum.

Vamos começar analisando duas espécies bem semelhantes. Você sabia que existem duas espécies de chimpanzé? Bem, mais ou menos, pois uma das espécies não é denominada de chimpanzé, mas sim de bonobo. De qualquer forma, são duas espécies do gênero *Pan*, denominadas *Pan paniscus* (o bonobo) e *Pan troglodytes* (o chimpanzé comum). A distribuição dessas duas espécies no continente africano, é mostrada no mapa a seguir.



**Figura 4:** Distribuição geográfica de *Pan troglodytes* (chimpanzé, distribuição em azul) e *Pan paniscus* (bonobo, distribuição em vermelho).

Repare que a parte noroeste da distribuição vermelha é separada da distribuição azul pelo Rio Congo, um rio enorme e intransponível para



essas espécies. Na parte norte da distribuição vermelha, a barreira geográfica também é um rio, um afluente menor do rio Congo, mas ainda intransponível para as duas espécies. Com esse dado, podemos começar a refletir sobre o que aconteceu na história do gênero *Pan*.

Uma espécie ancestral de *Pan* (que não era nem *Pan paniscus* nem *Pan troglodytes*) vivia na parte central do continente africano. A população ancestral vivia nos dois lados de um pequeno riacho facilmente transponível por todos esses ancestrais. Após uma mudança brusca no ambiente, o riacho se tornou um rio, impedindo os ancestrais de cruzarem o rio. A partir daí, os que estavam de um lado do rio não conseguiam mais chegar ao outro lado por causa da nova barreira geográfica. Essa mudança no ambiente pode ter sido causada pelo aumento da vazão do rio, com o aumento de chuvas, ou um terremoto pode ter provocado uma mudança no curso do rio.

Com o isolamento geográfico, o cruzamento foi impedido naturalmente entre as duas populações, que eram inicialmente muito semelhantes. As novas adaptações que apareciam nas populações nos dois lados do rio seriam diferentes. A princípio, tais mudanças eram sutis, mas foram acumulando aos poucos, pois o rio impedia a homogeneização típica de membros de uma mesma espécie.

Nos dias de hoje, mesmo se um macho bonobo estiver no mesmo local com uma fêmea chimpanzé, eles não se cruzam. Dê uma olhada nestas duas espécies na figura a seguir; perceba quanto semelhantes elas são morfologicamente. Tão semelhantes que dizemos que chimpanzés e bonobos são espécies irmãs. Apesar da semelhança, elas são tão isoladas reprodutivamente como um sapo e uma planta. O que poderia explicar tal semelhança do bonobo e do chimpanzé?



**Figura 5:** Fotografias tiradas em zoológicos do chimpanzé (*Pan troglodytes*), à esquerda, e de uma fêmea bonobo com seu filhote (*Pan paniscus*). Repare nas características semelhantes e nas diferenças entre as duas espécies irmãs do gênero *Pan*.

Essa similaridade entre as duas espécies indica claramente que a classificação biológica entre membros da mesma espécie ou membros de espécies diferentes não é suficiente. Isso porque existem espécies que são bem similares, como o chimpanzé e o bonobo, e outras que são muito diferentes, como um gorila e uma perereca, como mostra a figura a seguir. Então, precisamos de uma classificação mais complexa.

Vamos pensar um pouco mais sobre a classificação biológica. Já vimos que os nomes servem ao propósito de trocar informações sobre os objetos nomeados. Por exemplo: a palavra mesa significa “tábua equilibrada em cima de um ou mais pés”; por isso eu posso pedir uma mesa em uma loja de móveis e, o atendente, que sabe o significado de mesa, saberá para onde me levar. Entretanto, mais do que conversar sobre as espécies e os grupamentos das espécies, queremos uma classificação que faça sentido biológico. Queremos uma classificação que torne o processo de acumular conhecimento biológico mais fácil.



**Figura 6:** Compare duas espécies muito diferentes: o gorila (*Gorilla gorilla*) e uma perereca (*Agalychnis callidryas*). Repare que a perereca apresenta adaptações, em seus dedos, ao hábito de andar em ambientes molhados e escorregadios.

Então, vamos partir do início. Da mesma forma que não existem dois indivíduos idênticos, não existem dois indivíduos absolutamente diferentes. Cada par de organismos apresenta similaridades e diferenças, e estas podem ser colocadas em uma escala. Numa ponta da escala, temos gêmeos idênticos, que apresentam praticamente todas as características observáveis idênticas. Na outra ponta, temos espécies tão diferentes, quando comparamos uma baleia a uma bactéria, que apresentam poucas características em comum.



**Figura 7:** Escala linear ilustrando as diferenças observáveis entre pares de organismos. No lado esquerdo da escala, temos entidades biológicas muito similares; do lado direito, a comparação entre espécies muito diferentes.

## Seção 2: A hierarquia histórica

Apesar de mais diferentes do que as duas espécies de *Pan*, o gorila e a perereca também apresentam características em comum; por exemplo, o fato de apresentarem quatro patas, coluna vertebral. Lineu, o pai da taxonomia, também percebeu isso. Por isso, ele criou ranques taxonômicos acima das espécies. Estes ranques serviriam para agrupar as espécies. O primeiro ranque taxonômico acima das espécies é o gênero.

Se duas espécies são muito próximas, ou seja, apresentam muitas características comuns e poucas diferentes, elas são reunidas em um único grupo, como no caso do chimpanzé e do bonobo, que são do mesmo gênero *Pan*. Se elas são mais distantes, são incluídas em gêneros diferentes, como o gorila (gênero *Gorilla*) e a perereca (gênero *Agalychnis*).

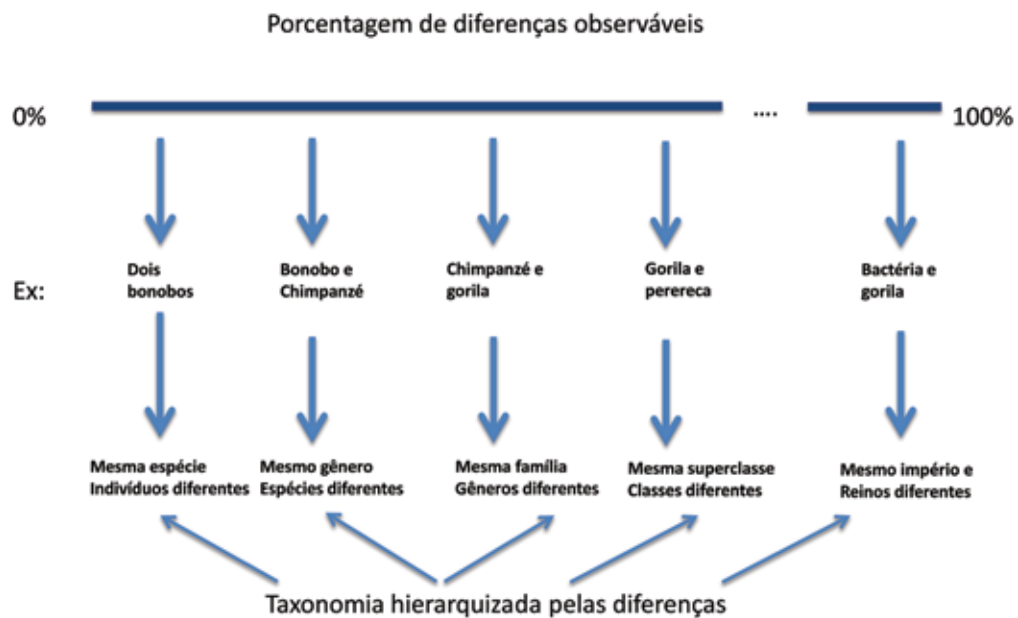
Entretanto, também existem gêneros que são muito semelhantes e gêneros que são muito diferentes. Por isso, logo acima do gênero está a família. Gêneros muito próximos são colocados na mesma família; gêneros mais diferentes são colocados em famílias diferentes. Retornando à analogia do armário, da mesma forma que duas saias muito semelhantes serão agrupadas nos mesmos critérios de tipo de roupa, de cor e de tecido.

### Teoria celular

Uma das teorias centrais em Biologia. Todos os organismos são constituídos por células. O tamanho dos organismos é diretamente proporcional ao número de células, e não ao tamanho delas.

Se eles pertencem à mesma família, eles necessariamente pertencem à mesma ordem, que é o ranque superior à família. Isso porque o ranque de família é inferior ao ranque de ordem - da mesma forma que, se duas pessoas vivem na mesma rua, elas necessariamente vivem no mesmo bairro, pois os itens do endereço são também hierárquicos.

Acima da família, temos a ordem, a classe, o filo, o reino, o domínio e, por fim, o império, nessa ordem de hierarquia. Assim, cada uma dos dois milhões de espécies é também classificada em gênero, família e em todos os ranques taxonômicos pelo descritor. Espécies com mais características em comum são colocadas nos mesmos ranques taxonômicos; com menos, em ranques taxonômicos diferentes. Veja o quadro com as classificações completas da arara-vermelha, da mosca comum, do feijão, do shiitake e da bactéria colérica.



**Figura 8:** Associação entre a similaridade de duas entidades biológicas e sua posição taxonômica. No lado esquerdo da escala, temos entidades biológicas muito similares; do lado direito, a comparação entre espécies muito diferentes. A classificação biológica é hierárquica.

Nome comum	Arara vermelha	Mosca	Feijão	Shiitake	Bacteria colérica
Domínio	Eukarya	Eukarya	Eukarya	Eukarya	Bacteria
Reino	Animalia	Animalia	Plantae	Fungi	Monera
Filo	Chordata	Arthropoda	Magnoliophyta	Basidiomycota	Proteobacteria
Classe	Aves	Insecta	Magnoliopsida	Homobasidiomycetes	Gammaproteobacteria
Ordem	Psittaciformes	Diptera	Fabales	Agaricales	Enterobacterales
Família	Psittacidae	Muscidae	Fabaceae	Marasmiaceae	Enterobacteriaceae
Gênero	<i>Ara</i>	<i>Musca</i>	<i>Phaseolus</i>	<i>Lentinula</i>	<i>Escherichia</i>
Espécie	<i>Ara chloropterus</i>	<i>Musca domestica</i>	<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Lentinula edodes</i>	<i>Escherichia coli</i>

### Seção 3: A história é filogenética

No gênero *Pan*, existem apenas duas espécies, mas outros gêneros podem ter muitas espécies. Na figura a seguir, estão apresentadas quatro espécies do gênero *Ara*.



**Figura 9:** Quatro das espécies do gênero *Ara*: Arara de garganta azul (*Ara glaucogularis*), arara canindé (*Ara ararauna*), Arara vermelha (*Ara chloropterus*) e Arara militar (*Ara militaris*) (da esquerda para direita).

Agora, compare as espécies de *Ara* com os gêneros *Psitacella* e *Myiagra*, na figura a seguir. Você consegue adivinhar qual desses dois gêneros é incluído na mesma família de *Ara*? Repare no formato do bico. Ah! sim, tanto o gênero *Ara* como o gênero *Psitacella* pertencem à família Psittacidae. Então, o bico arredondado e curvado para baixo faz parte das características da família Psittacidae, que inclui os papagaios e as araras, que compartilham o mesmo formato de bico, como os mamíferos compartilham glândulas mamárias. Mas como espécies isoladas reprodutivamente, que não se misturam, apresentam uma mesma característica?



**Figura 10:** Para fins comparativos, a foto à esquerda mostra *Psitacella brehmii*, um membro da família das araras, mas que pertence a um gênero diferente do gênero *Ara*. A foto à direita mostra outra ave, *Myiagra inquieta*.



Lembre-se que o binômio específico é composto pelo nome do gênero, no caso, *Psitacella*, e pelo epíteto específico, no caso, *brehmii*.

As diferenças que observamos entre as espécies seguem regras mais complexas do que uma simples escala linear. Por exemplo, sabemos que não existe mamífero que não seja vertebrado, e sabemos que não há planta com flores que não tenha capacidade de fazer fotossíntese. Não existe ser vivo que não tenha célula. Portanto, notamos que as características dos seres vivos não estão distribuídas aleatoriamente; caso contrário, não existiriam tais padrões. Ora, mas se existe essa lógica em como as características se distribuem na diversidade biológica, este deve ser o ponto mais fundamental em Biologia. Se a lógica funcionar, nós poderemos entender de fato a Biologia.



Vamos retornar a pensar sobre *Ara*, *Psittacula*, *Myiagra*. Se *Ara* e *Psittacula* são mais semelhantes do que qualquer uma delas com *Myiagra*, o que isso sugere sobre o isolamento dessas três linhagens? O que isso tem a ver com o bico compartilhado entre *Ara* e *Psittacula*?

A esse isolamento que surge dentro de uma espécie ancestral formando duas espécies isoladas descendentes, chamamos de especiação. Se as duas espécies descendentes apresentam uma mesma característica, isso significa que o ancestral comum delas já tinha a característica. Desta forma, características compartilhadas entre espécies diferentes foram adaptações que apareceram antes dos eventos que isolaram geograficamente a população ancestral em duas descendentes.

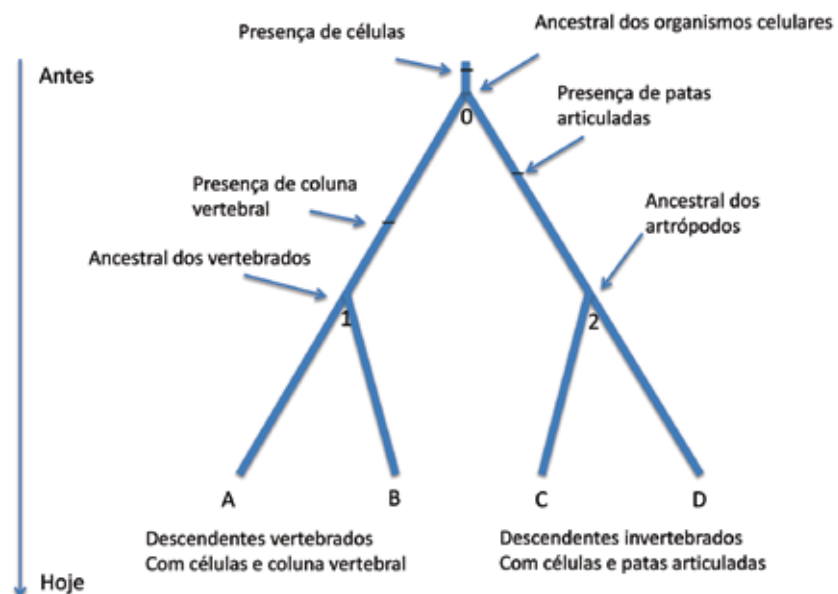
O ancestral comum dos mamíferos já tinha glândulas mamárias; por isso, todas as espécies de mamíferos apresentam essa adaptação. O ancestral comum dos seres vivos já tinha células; por isso, todas as espécies as apresentam. Assim, a similaridade entre as características de duas espécies hoje é inversamente proporcional ao tempo desde a especiação delas. Quanto mais antigo tiver sido o isolamento, há mais tempo cada uma delas está acumulando diferenças do ancestral comum e se diferenciando, como é o caso do gorila e da perereca por exemplo.

Repare que, mesmo o gorila e a perereca compartilham características, como a coluna vertebral, a presença de células, a presença de quatro patas, etc. Assim, a coluna vertebral foi adquirida quando o gorila e a perereca ainda eram uma única espécie, ancestral, se homogeneizando através da reprodução e passando a característica coluna vertebral para todos os membros dessa espécie. Quando o primeiro evento de especiação ocorreu nesta espécie ancestral, ambas espécies descendentes já tinham a coluna vertebral; por isso, a característica hoje aparece em espécies isoladas reprodutivamente.



**Figura 11:** Esqueleto de um vertebrado dinossauro *Diplodocus carnegii*, que apresenta essa característica (coluna vertebral) que também está presente nos mamíferos. Todos os dinossauros são seres celulares também, como as bactérias.

Tudo bem até aí? Por outro lado, a presença de vértebras é uma característica menos abrangente, ou seja, está presente em uma parcela menor da diversidade biológica. Isso significa que ela foi adquirida por um ancestral mais recente que passou também a todos os seus descendentes. Como todos os vertebrados também possuem células, podemos inferir que o ancestral que adquiriu pela primeira vez a coluna vertebral era um dos descendentes do ancestral que tinha um corpo composto por células. Por isso, todos os vertebrados apresentam células, mas a maior parte dos organismos celulares não possuem coluna vertebral.



**Figura 12:** Esquema de processos sequenciais de isolamento de ancestrais, dando origem a descendentes com características diferentes e características compartilhadas. O tempo corre de cima (antes) para baixo (hoje). Os eventos 0, 1 e 2 ilustram os momentos de especiação, ou seja, quando duas partes da população ancestral foram isoladas reprodutivamente uma da outra.

A questão principal é que essa lógica não vale apenas para uma ou duas características mais óbvias; elas valem para outras características menos evidentes também. Isso vale até para características que ainda não conhecemos, como vamos ver nas próximas aulas. Assim, o ponto mais fundamental da distribuição das características na diversidade biológica se completa. Os vertebrados apresentam muitas características em comum, pois o ancestral deles passou não apenas uma ou duas, mas todas as suas características para seus descendentes. Mas por que todos os descendentes, isto é, todos os vertebrados não são idênticos? Porque



os descendentes desses grupos ancestrais também passaram por eventos mais recentes de especiação e isolamento, e estes grupos menos inclusivos também sofreram modificações mais recentes.

## **Resumo**

- Como usamos a História para entender nosso presente em seus aspectos políticos, econômicos e sociais, as pistas para entender a Biologia estão em nossa história biológica;
- Não estamos no final do processo histórico que gerou a diversidade biológica; estamos no meio dele. Este é um processo que só acaba na extinção;
- Seres vivos não são iguais ou diferentes, mas apresentam suas diferenças em uma escala. Duas espécies diferentes apresentam níveis distintos de diferenciação. Numa ponta da escala, temos gêmeos idênticos e, na outra ponta, espécies muito diferentes, quando comparamos uma baleia a uma bactéria;
- Lineu, o pai da taxonomia, desenvolveu uma taxonomia hierárquica, criando ranques taxonômicos acima das espécies. O primeiro ranque taxonômico acima das espécies é o gênero, depois, a família e a ordem, a classe, o filo, o reino, o domínio e, por fim, o império, nessa ordem de hierarquia;
- As características dos seres vivos não estão distribuídas aleatoriamente pelos grupos da diversidade biológica. Existe uma lógica complexa, e as pistas para ela estão na história biológica do grupo;
- Características compartilhadas foram adquiridas no ancestral comum do grupo que as passou para todos os seus descendentes. Esses descendentes também passaram por eventos mais recentes de isolamento, e os ancestrais destes grupos menos inclusivos também sofreram modificações;
- Outras linhagens não possuem tais características, pois seus ancestrais já estavam isolados reprodutivamente dos ancestrais que as adquiriram.

## Referências para as figuras

Ernst Mayr

By University of Konstanz - Meyer A. (2005). "On the Importance of Being Ernst Mayr". PLoS Biology 3 (5): e152. DOI:10.1371/journal.pbio.0030152., CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1381910>

Gran canyon Por Tuxyso / Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28507310>

Figura 3 Mula Por Sogospelman em Wikipédia em inglês, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6902661>

Mapa distribuição Pan

By CPiGuy - Put together by the author using the base map by User:Alphathon, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=49009029>

Chimpanzé

By Thomas Lersch - Own work, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1001910>

Bonobo

CC BY 4.0, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=50736382>

Gorila Por Brocken Inaglory - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7283971>

Perereca

By Careyjamesbalboa (Carey James Balboa) - Transferred from en.wikipedia to Commons by Natox., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4381169>

Arara militar

Por neiljs - London zooUploaded by Snowmanradio, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7593257>

Arara candindé

Por Benjamint444 - Obra do próprio, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9746657>

Arara vermelha

Por Arjan Haverkamp - originally posted to Flickr as 2008-04-12-16h05m20.IMG\_5216e, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/>

[index.php?curid=9433330](#)

Arara de garganta azul

Por Photo by Greg Hume (Greg5030) - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14683669>

Papagaio-tigre de Brehm

By markaharper1 - Brehm's Tiger-Parrot, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6435228>

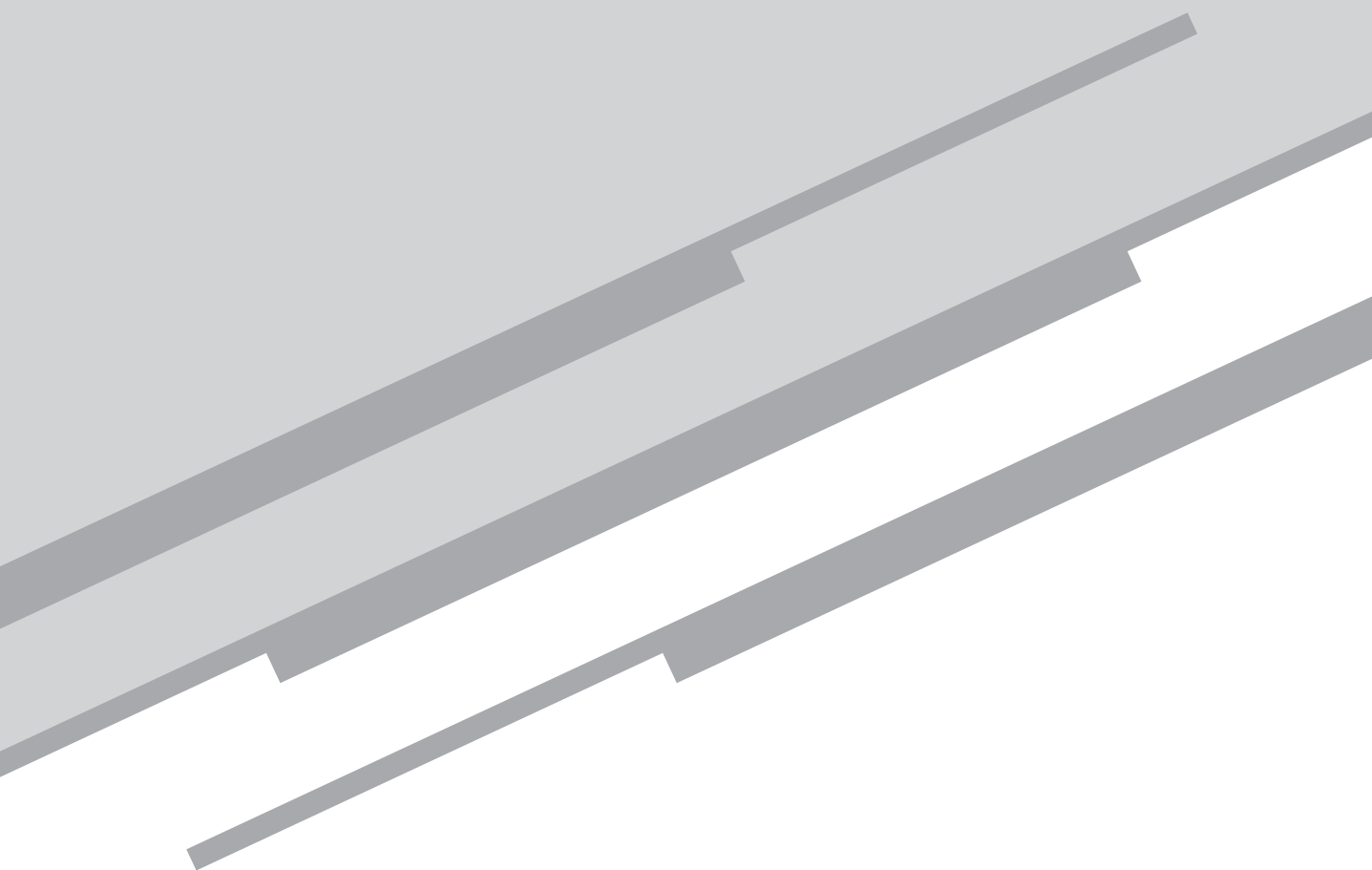
Dinossauro

By © Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 (via Wikimedia Commons), CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2461706>



# Aula 05

A árvore e os arbustos da vida



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

As diferenças e as semelhanças entre quaisquer dois organismos estão alinhadas em uma escala que varia de quase 0% a quase 100% de diferenças. A localização em tal escala é consequência direta de quando a reprodução foi interrompida pelo isolamento natural que ocorreu entre essas duas linhagens. Uma idade recente do ancestral comum faz com que as espécies sejam mais semelhantes, pois as características morfológicas não tiveram muito tempo para serem modificadas nos descendentes. Por outro lado, se esse ancestral comum for muito antigo, as características já se modificaram e os descendentes desse grupo devem ser bastante diferentes uns dos outros.

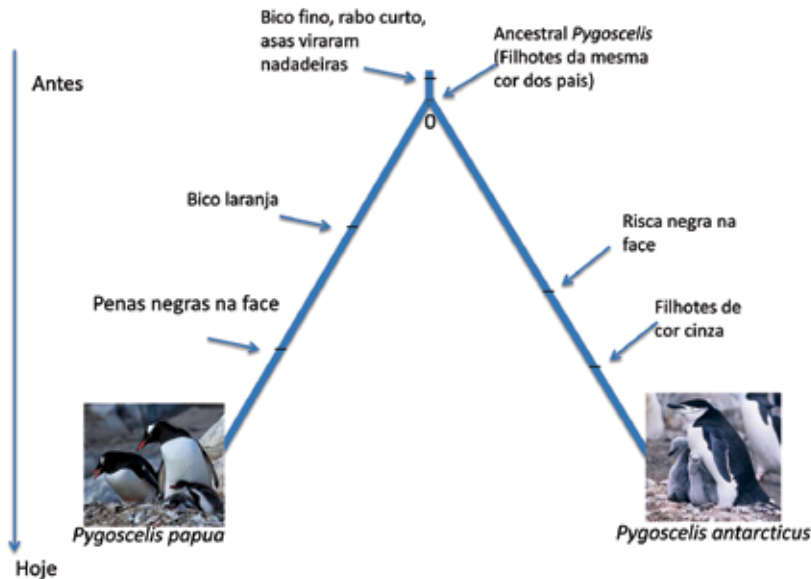
De maneira mais formal, nos referimos a esse isolamento de linhagens como especiação, que é a formação de duas espécies descendentes a partir de uma espécie ancestral. Um ponto fundamental para esse processo chamado especiação, como já falamos, é o isolamento geográfico que leva as duas populações, inicialmente idênticas, a acumularem diferenças, pois não estão mais se homogeneizando pela reprodução.

Vamos pensar em um exemplo. Duas espécies de pinguins, *Pygoscelis papua* e *Pygoscelis antarcticus*, estão ilustradas na Figura 1. Reparem que algumas características em comum entre elas são comuns aos pinguins (asas adaptadas para nadar, bicos finos, rabo curto) e já estavam presentes na espécie ancestral antes do isolamento originar as duas espécies descendentes e atuais. Por outro lado, as características diferentes entre elas (ex.: cor dos bicos, presença de faixa negra na face) foram adquiridas independentemente, depois do isolamento que deu origem às duas linhagens que hoje são incompatíveis reprodutivamente.



**Figura 1:** Duas espécies de pinguins do gênero *Pygoscelis*, *P. papua* (esquerda) e *P. antarcticus* (direita). O bico de cor laranja em *P. papua* apareceu depois do isolamento do ancestral dessas duas espécies, enquanto a asa modificada para nadadeira apareceu antes.

As características que os pinguins compartilham não apareceram nas duas linhagens independentemente, mas já estavam na espécie ancestral que deu origem às duas espécies de pinguim. Assim, como membros dessa espécie ancestral, seus indivíduos estavam se reproduzindo e compartilhando todas as suas características, incluindo aquelas características diagnósticas do gênero *Pygoscelis*.



**Figura 2:** Modelo de especiação das duas espécies de pinguins do gênero *Pygoscelis*, *P. papua* (esquerda) e *P. antarcticus* (direita). (0) marca o momento de especiação de um ancestral *Pygoscelis*, que deu origem às duas espécies descendentes que vivem até hoje. O tempo corre de cima (ancestral dos pinguins) para baixo (seus descendentes), como mostra a seta na lateral esquerda.

Note que as espécies de pinguins vão continuar se diferenciando e podem até chegar a outros eventos de especiação. Assim, o que podemos dizer dos descendentes de *P. papua*? Podemos dizer que as espécies descendentes deles terão bico cor laranja. E o que podemos dizer dos descendentes de *P. antarcticus*? Repare que os filhotes dessa espécie apresentam pelagem bem diferente da dos pais. Isso mostra que mudanças nas características podem ocorrer também nos filhotes. E estas características também são herdáveis. Assim, podemos dizer que as espécies descendentes dessa espécie também terão filhotes de cor cinza, além da faixa negra abaixo do bico.

Nesta aula, iremos entender como e por que a história biológica da vida em nosso planeta pode ser contada por meio de uma fascinante árvore

filogenética da vida. Os galhos e ramos compartilhados nessa árvore mostram as características semelhantes e diferentes entre as espécies e servem de alicerce para a construção do conhecimento biológico.

## **Objetivos**

1. Associar diretamente a idade de um ancestral comum de duas linhagens com as diferenças e semelhanças que seus descendentes apresentam hoje;
2. Interpretar corretamente uma árvore filogenética nomeando e caracterizando seus itens componentes;
3. Caracterizar todas as árvores filogenéticas como incompletas, cuja diversidade retrata apenas uma seleção de espécies pelo autor;
4. Definir os processos de evolução e de desenvolvimento;
5. Relacionar mudanças evolutivas a determinadas etapas do desenvolvimento.

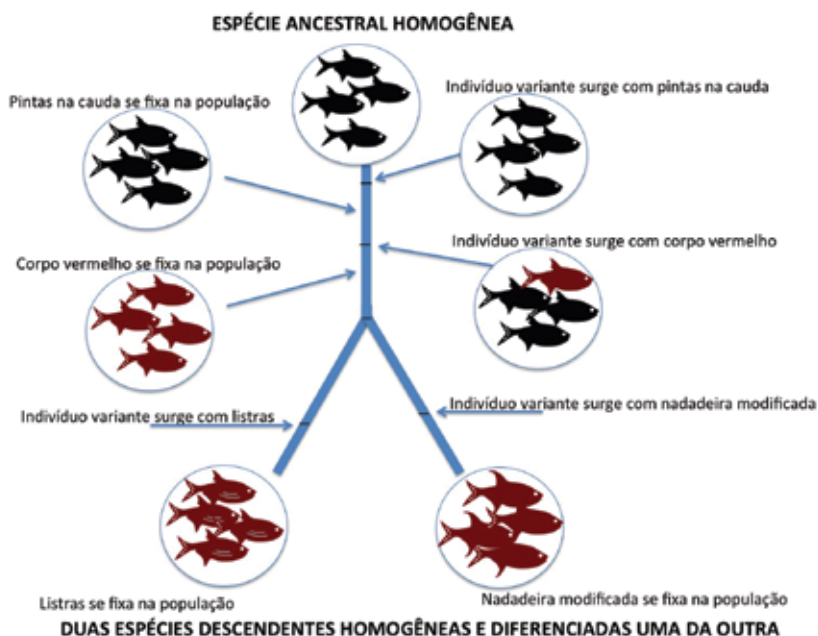
## **Seção 1: A idade do ancestral comum determina a proporção de diferenças**

Esses eventos de especiação não são isolados e nem restritos ao passado recente. Eles acontecem continuamente. Assim, ao longo da história de uma linhagem, um ciclo acontece. Nesse ciclo, a linhagem alterna períodos de homogeneização pela reprodução, quando membros têm a capacidade de cruzamento (uma espécie), com momentos de ruptura da capacidade reprodutiva (especiação), que é o que gera a diversidade biológica real. Repare que, a partir do momento da especiação, a homogeneização fica confinada a cada uma das espécies descendentes, mas as duas linhagens estão isoladas uma da outra. Esse é um dos conceitos biológicos mais fundamentais. É a partir destes ciclos que podemos nomear, distinguir e estudar os grupos taxonômicos da diversidade biológica e entender quais as características que cada um dos grupos possui.

Ao estudar a coluna vertebral de uma ave, estamos conhecendo também um pouco da coluna vertebral de um anfíbio. Se todas as espécies fossem completamente diferentes, a Biologia não seria uma ciência possível. Se todas as espécies fossem perfeitamente iguais, a Biologia não seria uma ciência necessária. Na figura abaixo, temos um evento de



especiação, ilustrando o que acontece em cada passo, desde a espécie ancestral até as duas espécies descendentes.



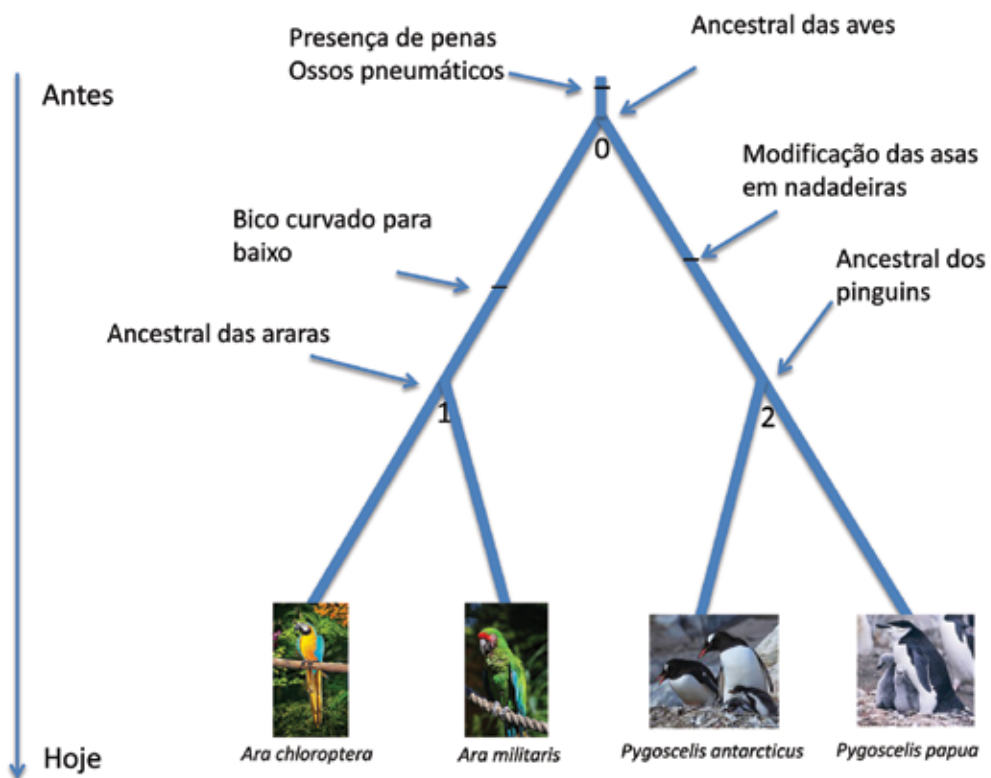
**Figura 3:** Modelo de especiação de uma espécie homogênea ancestral em duas espécies de peixe homogêneas, mas diferentes uma da outra. O modelo ilustra a relação entre a especiação (linhas grossas) e o que está ocorrendo nas populações durante esse processo de especiação (círculos). A fixação de uma característica na população significa que todos os indivíduos a possuem neste momento.

Repare que, cada uma das espécies descendentes também é homogênea, mas elas se diferenciam uma da outra ao longo do tempo. Neste caso, foram duas variações que surgiram antes da especiação: pintas na cauda e corpo vermelho. Essas duas variações aparecem em um indivíduo e se espalharam pela população pela homogeneização. Claro que esse espalhamento levou gerações para acontecer, mas pela reprodução isso é possível com o tempo. Assim, o ancestral comum das duas espécies tinha pintas na cauda e corpo vermelho - características que ela passou para as duas espécies descendentes.

Entretanto, como as duas populações se tornaram espécies diferentes, a homogeneização não acontece mais; por isso, as outras variações: listras no corpo e nadadeiras modificadas não estão presentes nas duas populações. Quando essas variações surgiram pela primeira vez em cada população, os descendentes já eram duas espécies isoladas que se modificam de modo independente uma da outra. Note agora que a homo-

geneização ainda ocorre, mas apenas dentro de cada uma das espécies. Essa homogeneização é que faz com que, em cada espécie descendente, haja também a fixação dessas variantes que surgiram depois do evento de especiação que isolou as duas espécies.

Na figura abaixo, o primeiro evento de especiação aconteceu no ancestral das aves. Este evento deu origem às linhagens de araras e de pinguins, descendentes do ancestral das aves. Entretanto, os descendentes da espécie ancestral das aves também sofreram eventos de especiação e, portanto, também são ancestrais, pois eles se especiarão também.



**Figura 4:** Eventos seguidos de especiação formam a árvore filogenética aqui ilustrada. Os eventos de especiação estão numerados e correspondem ao isolamento da população ancestral, originando duas populações descendentes. Com o tempo, elas não cruzam mais, devido ao acúmulo de diferenças, e a diferenciação aumenta com o tempo. O tempo corre de cima (ancestral das aves) para baixo (seus descendentes), como mostra a seta na lateral esquerda.

Por exemplo, o evento (1) indica a especiação do ancestral *Ara* nas duas espécies de araras, e o evento (2) representa a especiação do ancestral *Pygoscelis* nas duas espécies de pinguins. Assim, esse processo de

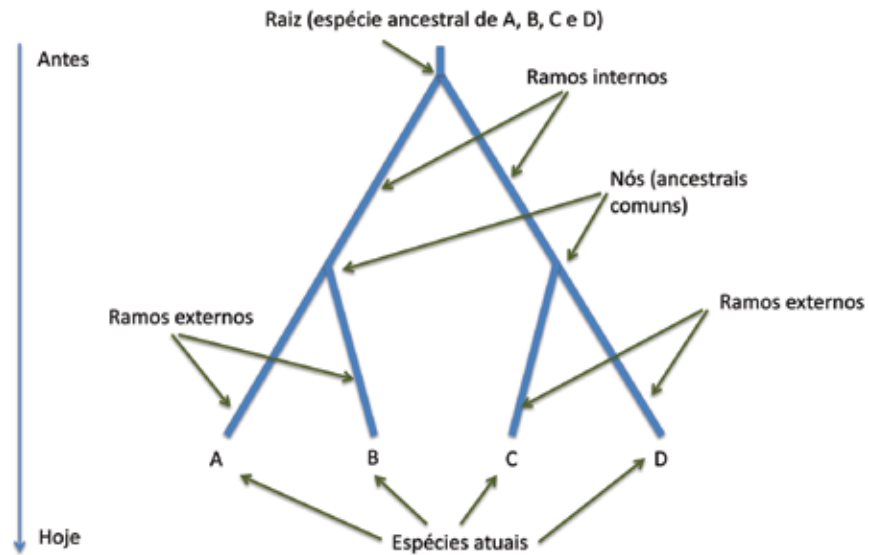
especiação ocorre continuamente, tanto olhando para o passado como também para o futuro. A linhagem dos pinguins deu origem às espécies descendentes do gênero *Pygoscelis*, *P. papua* e *P. antarcticus*, enquanto a linhagem das araras deu origem às espécies descendentes do gênero *Ara*, *Ara chloroptera* e *Ara militaris*.

Um ponto importante é que o evento de especiação marca o momento da independência histórica entre duas linhagens. Antes da especiação, essa linhagem se modificava como um todo, a reprodução sexual dos indivíduos homogeneizava os membros ao longo das gerações. Quando aparecia um indivíduo diferente na população, essa diferença poderia chegar a todos os membros desta espécie em uma futura geração através da reprodução de seus membros. Assim, em uma espécie, não existe diferenciação de fato. A diversidade biológica, então, é gerada pelos eventos de especiação que interrompem a homogeneização e permitem a diferenciação entre as linhagens.



## Como ler uma árvore filogenética

Uma árvore filogenética é um esquema em que entidades biológicas estão conectadas por descendência. Assim, essa árvore ilustra os eventos de especiação em sequência, desde o ancestral comum até seus descendentes vivos até hoje. Iniciamos a leitura da árvore pelo lado oposto ao que aparecem as espécies atuais. Aqui, quatro espécies atuais aparecem embaixo; então, já podemos concluir que o tempo corre de cima para baixo. As linhagens são representadas por ramos (retas) contínuos, e as interseções são os nós (ancestrais comuns). Esses ramos indicam linhagens cujos membros são compatíveis reprodutivamente. Já a bifurcação de uma linhagem ilustra o processo no qual uma espécie ancestral resulta em duas espécies descendentes que, a partir daí, irão se modificar de modo independente, pois não haverá reprodução. Os nós representam tais eventos de especiação nos quais aquela espécie ancestral se dividiu em duas espécies descendentes. Um nó especial é a raiz, que indica o ancestral comum a todas as espécies da árvore.



A interpretação correta de uma filogenia está entre os problemas mais difundidos pelos alunos da Biologia. No caso desta árvore, a interpretação correta está no fato de que A e B têm um ancestral comum, exclusivo deles, e, portanto, são mais próximos filogeneticamente entre si do que com C ou com D. Da mesma forma, C e D têm um ancestral comum, exclusivo deles, e também são mais próximos filogeneticamente entre si. Assim, a proximidade filogenética é medida pela idade do ancestral, e não pela proximidade na árvore.

Entre os erros mais comuns, está acreditar que 1) alguns organismos são mais evoluídos ou são superiores a outros, pois todos os organismos vivos são igualmente evoluídos; 2) as espécies B e C são mais próximas filogeneticamente, pois estão localizadas na árvore geograficamente mais próximas (B e C estão tão distantes entre si mais do que A e D, pois o ancestral dos dois pares é o mesmo que está ilustrado pela raiz); 3) espécies atuais são ancestrais de outras espécies atuais porque apresentam características presentes em ancestrais; 4) as mudanças evolutivas aparecem apenas nos nós da árvore.

Analisando a árvore e as espécies vivas de aves hoje em dia, podemos ter uma ideia sobre como era essa espécie ancestral. Mas, como fazer isso? Vamos refletir. Se as características compartilhadas entre muitas espécies isoladas reprodutivamente já estavam no ancestral comum delas, então essas características são a chave para sabermos como era essa espécie ancestral. Neste caso de aves, a presença de penas é uma característica importante e comum a todas as espécies. Outra característica das aves é a presença de **ossos pneumáticos**, que já vimos que é uma adaptação ao voo. Então, o ancestral comum delas tinha penas e seus ossos eram pneumáticos.

### Ossos pneumáticos

Tipos ósseos, característicos das aves, que apresentam cavidades internas e orifícios que permitem a entrada de ar em sua estrutura.

Assim, dentre outras características, tais ossos tornam-se mais leves, facilitando o voo.



**Figura 5:** Diversidade de aves. Todas as dez mil espécies de aves apresentam penas e ossos pneumáticos. Então, a espécie ancestral que deu origem a toda a diversidade também apresentava essas características.

Naturalmente, a história das aves é extremamente rica pela diversidade do grupo e não se resume à diversidade retratada na árvore, pois não existem apenas quatro espécies de aves. Existem mais de 10 mil espécies descritas por pesquisadores que as incluíram na Classe Aves! Isso não significa que a árvore com quatro espécies esteja errada; ela está apenas incompleta. Mas repare que todas as árvores filogenéticas ilustram apenas os eventos de especiação que o autor deseja retratar. Então, o fato de ser incompleta não é defeito de uma árvore, e sim uma escolha. Neste sentido, o autor decide enfatizar, analisar e discutir a diversificação de um grupo ou de outro, dependendo de seu interesse. Imagine que, se para falar de aves, eu tivesse que necessariamente inserir as 10 mil espécies em todas as árvores. Você não iria conseguir entender nada, além de se perder nesta imensa árvore. Então, a escolha é do autor, e é necessária para o entendimento.

Com o conceito de árvore filogenética, concluímos o primeiro grupo de conceitos básicos na história da Biologia. Essa história biológica é denominada evolução. Na história biológica, assim como na humana, as mudanças observadas são o resultado de forças que contribuem para essa modificação. Enquanto na história humana, as forças transformantes são dinheiro, terras e conhecimento, na história biológica, as forças evolutivas são a seleção natural, o surgimento de novas características e o isolamento que promove a especiação. Você irá conhecer essas e outras forças evolutivas em mais detalhes na disciplina Evolução.

Evolução é, portanto, fato. Pois tudo tem uma história. Além disso, também em muitos casos, podemos observar a evolução acontecendo. Um exemplo são os microrganismos que se tornam resistentes a determinadas drogas. Este é um exemplo comum, mas ele coloca que, sem sombra de dúvida, evolução acontece, ou seja, as espécies se modificam ao longo do tempo. Portanto, não há como entender a Biologia hoje sem estudar a evolução das espécies. Da mesma forma que não há como entender as sociedades atuais sem estudarmos a história delas.

Assim, podemos definir evolução como a mudança de uma população ao longo do tempo. Não confunda evolução com desenvolvimento, que também é um processo de mudança ao longo do tempo. As mudanças no corpo que um indivíduo sofre desde a fecundação até a sua morte é chamado de **desenvolvimento** ou **ontogenia**.



**Figura 6:** Indivíduo jovem e adulto da planta *Pinus pinea*. O desenvolvimento é a série de transformações que ocorrem ao longo da vida de um indivíduo e, portanto, é um fenômeno individual. A evolução são transformações que ocorrem nas populações ao longo das gerações e, portanto, é um fenômeno populacional.

Os humanos, por exemplo, após a fecundação de uma célula, se dividem em duas, de duas em quatro, até formar o feto e o embrião. Essas transformações em suas características, que ocorrem dentro do corpo da mãe, também fazem parte do desenvolvimento. Entretanto, o desenvolvimento não para aí; o bebê nasce, cresce se transforma em criança, adolescente, adulto e idoso, e outras transformações acontecem com seu corpo; estas transformações também fazem parte do desenvolvimento humano.

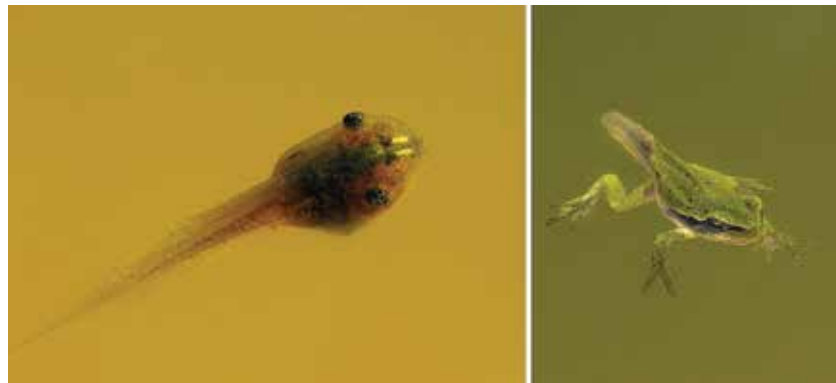
Um indivíduo, portanto, se desenvolve ao longo de sua vida, passando por várias fases do desenvolvimento. Um indivíduo não evolui. Mas uma população evolui, adquirindo novas características nos filhotes ou nos indivíduos adultos. Nesse sentido, o processo evolutivo envolve todas as fases do desenvolvimento. Reveja a Figura 1; nela, uma das modificações da espécie *Pygoscelis papua* foi a mudança de coloração do filhote, que ficou cinza nesta linhagem. Esta foi uma mudança evolutiva que aparece apenas nos indivíduos jovens da espécie. Ela é uma mudança evolutiva, porque passa do ancestral para os descendentes. Assim, os filhotes dos filhotes terão também essa coloração diferenciada.

Todos os organismos passam por mudanças ao longo do seu desenvolvimento; em alguns casos, essas mudanças são sutis, mas, em outros casos, elas são mais drásticas e envolvem até mudanças de hábito. Um



caso deste são as rãs e pererecas, espécies em que os adultos são terrestres com adaptações ao hábito terrestre, e os filhotes (girinos) são aquáticos com adaptações ao hábito dulcícola (de água doce).

De fato, neste caso, algumas adaptações estão relacionadas a apenas uma fase do desenvolvimento, como, por exemplo, a presença de uma cauda, o que só está presente nos girinos. O fator responsável por essa mudança está desligado nos adultos das pererecas, bem como o fator responsável pelos membros (braços e pernas) dos adultos está desligado nos girinos juvenis. Tais modificações entre os jovens e os adultos e todas as características dos jovens foram adquiridas nos ancestrais que passaram essas características a todos os seus descendentes. Como essa modificação entre juvenis e adultos está presente em um grande número de espécies de anfíbios, e como esses animais são bem diferentes entre si, sabemos que essa modificação foi adquirida por um ancestral muito antigo.



**Figura 7:** Indivíduo imaturo (girino, à esquerda) e um jovem (direita) da espécie *Hyla arborea*. Note a cauda remanescente do indivíduo jovem; por isso, não podemos chamar este indivíduo de adulto. Em alguns casos, as mudanças ao longo do desenvolvimento são drásticas, como nos anfíbios.

A evolução biológica é consequência da interação e da combinação de tais processos na diversidade biológica atual. Os processos evolutivos que atuam nas populações irão modificá-las, tornando-as diferentes no futuro. Tais processos podem modificar rapidamente uma espécie ou podem levar muitos e muitos anos para que uma mudança seja perceptível. Assim, podemos dizer que as populações naturais de todas as espécies vivas estão em constante processo evolutivo.

Na próxima aula, iremos ver em mais detalhes como unimos o processo de diversificação das espécies ao longo do tempo e sua relação com a taxonomia.



## Resumo

- O isolamento entre linhagens é chamado de especiação. Tais eventos permitem a diferenciação de fato das linhagens, como observamos hoje em dia entre mamíferos e aves, por exemplo. Depois de um evento de especiação, o processo de homogeneização continua em cada linhagem, mas não entre linhagens;
- A idade do ancestral comum entre duas espécies é diretamente proporcional ao número de características compartilhadas entre elas. Quanto mais antigo for o último ancestral comum, menos características em comum elas terão. Duas espécies de plantas um mesmo gênero terão mais características em comum do que duas espécies de plantas do mesmo filo, pois o ancestral comum das plantas do mesmo gênero é mais recente do que o ancestral comum das plantas do mesmo filo;
- A interpretação correta de uma árvore filogenética está na avaliação da idade do ancestral comum entre cada duas linhagens. Se o ancestral comum é mais antigo, essas linhagens são mais distantes. Se o ancestral comum é mais recente, essas linhagens são mais próximas. Os nós representam os ancestrais comuns e os ramos as linhagens;
- Todas as árvores filogenéticas são incompletas, e a diversidade retrata apenas uma seleção de espécies pelo autor, para fins didáticos;
- Um evento de especiação confina novas modificações nas características à linhagem em que tais modificações apareceram. Assim, os descendentes da linhagem modificada irão herdar tal modificação. A melhor forma de ilustrarmos eventos de especiação sequenciais é por meio de uma árvore filogenética;
- Dois processos envolvem transformação ao longo do tempo em Biologia. O primeiro é a evolução das populações ao longo do tempo. Por este processo, as características se modificam geração a geração. O segundo envolve as modificações no corpo que um indivíduo sofre desde a fecundação até a sua morte, chamado de desenvolvimento ou de ontogenia. Um indivíduo nunca evolui; ele se desenvolve;
- As mudanças evolutivas envolvem mudanças em uma ou mais fases do desenvolvimento.

## Referências para as figuras

### Pinguins com filhotes

Figura 1 By photo from US National Oceanic and Atmospheric Administration - [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov), Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64629> By Liam Quinn from Canada - Gentoo Penguins with chicks at Jougla Point, Antarctica Uploaded by snowmanradio, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16175168>

Figura 2 By photo from US National Oceanic and Atmospheric Administration - [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov), Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64629> By Liam Quinn from Canada - Gentoo Penguins with chicks at Jougla Point, Antarctica Uploaded by snowmanradio, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16175168>

### Arara Canindé

By Benjamint444 - Own work, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9746657>

### Arara militar

By neiljs - London zoo Uploaded by Snowmanradio, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7593257>

Penguins By photo from US National Oceanic and Atmospheric Administration - [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov), Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64629> By Liam Quinn from Canada - Gentoo Penguins with chicks at Jougla Point, Antarctica Uploaded by snowmanradio, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16175168>

### Gorila

Por Brocken Inaglory - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7283971>

### Chimp

By Thomas Lersch - Own work, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1001910>

### Onça

By Charlesjsharp - Own work, from Sharp Photography, sharppho-

tography, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44247651>

Tigre

By Sumeet Moghe - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27952034>

Desenvolvimento embrionário

Por Zephyris - SVG version of ., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10811330>

Gorila

Por Brocken Inaglory - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7283971>

Diversidade de aves

Por Concerto - Made from the following Wikimedia free images (some cropped and/or rotated): Row 1 (left to right) Red-crested Turaco RWD.jpg — Red-crested Turaco (*Tauraco erythrolophus*) Balaeniceps rex - Weltvogelpark Walsrode 09-2010 2.jpg — Shoebill (*Balaeniceps rex*) Phaethon lepturus (Warwick, Bermuda).jpg — White-tailed Tropicbird (*Phaethon lepturus*) Row 2 Haliaeetus pelagicus (Rausu, Japan).jpg — Steller's Sea Eagle (*Haliaeetus pelagicus*) Balearica regulorum (Tarime, Tanzania).jpg — Grey Crowned Crane (*Balearica regulorum*) Pavo cristatus -Castellar Zoo, Castellar de la Frontera, Spain-8a.png — Indian Peafowl (*Pavo cristatus*) Row 3 File:Rock dove - natures pics.jpg — Rock Dove (*Columba livia*) Calypste anna -San Luis Obispo, California, USA -male -flying-8.jpg — Anna's Hummingbird (*Calypste anna*) Puffin L-atrabjarg Iceland.jpg — Atlantic Puffin (*Fratercula arctica*) Row 4 Casuarius casuarius (Carmoo QLD, Australia).jpg — Southern Cassowary (*Casuarius casuarius*) Trichoglossus haematodus (Melbourne, Australia).jpg — Rainbow Lorikeet (*Trichoglossus haematodus moluccanus*) Caribbean flamingo at slimbridge arp.jpg — American Flamingo (*Phoenicopterus ruber*) Row 5 Antarctic, gentoo penguin (js) 16.jpg — Gentoo Penguin (*Pygoscelis papua*) Ardea cinerea 1.JPG — Grey Heron (*Ardea cinerea*) Sula neboxii -Santa Cruz, Galapagos Islands, Ecuador-8 (2).jpg — Blue-footed Booby (*Sula neboxii*) Row 6 Minla strigula - Doi Inthanon.jpg — Bar-throated Minla (*Minla strigula*) Eurasian Eagle-Owl RWD.jpg — Eurasian Eagle-Owl (*Bubo bubo*) Keel-billed toucan woodland.jpg — Keel-billed Toucan (*Ramphastos sulfuratus*), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24849817>

## Pinus

By MPF at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7025025>

## Hyla

By Christian Fischer, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4436627>

# Aula 06

Classificações biológicas e  
sistemática filogenética

*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

O conhecimento biológico tem um formato especial. Em Biologia, o conhecimento é acumulado quando associamos uma parcela da diversidade biológica (um grupo da diversidade) a um padrão (uma característica exclusiva) que foi descoberto para essa parcela. Por exemplo, na Figura 1, vemos uma mãe porca amamentando seus filhotes. O hábito de alimentar seus filhotes está presente em todas as espécies de mamíferos, pois todas elas têm uma adaptação para isso, que são as glândulas produtoras de leite, também chamadas de glândulas mamárias. Assim, o conhecimento biológico associado a essa característica necessita de dois tipos de informações.



**Figura 1:** O conhecimento biológico é acumulado apenas associando grupos da diversidade (ex.: mamíferos) com características (ex.: glândulas mamárias) que sozinhas nada significam.

Em primeiro lugar, precisamos saber o grupo da diversidade que apresenta essa característica; neste caso, os mamíferos. Repare que a palavra mamíferos é fundamental, pois, ao mencioná-la, você sabe a parcela da diversidade biológica à qual estou me referindo. Neste caso, eu estou falando de vacas, baleias, coelhos, gambás, macacos e porcos também. Você sabe também a parcela da diversidade biológica que NÃO está sendo incluída nesta palavra “mamíferos”; eu não estou falando de aves, nem lagartos, nem insetos, nem plantas... Desta forma, se a minha definição de mamífero for igual à sua, poderemos trocar informações sobre

esse grupo. Podemos compartilhar informações biológicas sobre esse grupo. Então, uma questão importante é que a classificação biológica seja estável, de forma que os nomes dos grupos e a parcela da diversidade biológica inserida neles não variem com frequência.

Em segundo lugar, precisamos mencionar a característica que está presente neste grupo da diversidade; neste caso, glândulas mamárias. Assim, quando eu quero passar essa informação biológica para outra pessoa, eu digo: “mamíferos tem glândulas mamárias”. Repare que apenas a palavra “mamíferos” ou apenas a expressão “glândulas mamárias” não acumulam conhecimento biológico. Precisamos dos dois tipos de informação associados para passar o conhecimento biológico adiante. Nomear grupos, como os mamíferos, e incluir ou excluir espécies de tais grupos é o objetivo central da taxonomia, temática desta aula.

## Objetivos

1. Estabelecer que a associação entre classificação biológica e os caracteres é a base para a construção do conhecimento biológico;
2. Tecer um histórico sobre classificação biológica;
3. Diferenciar taxonomia e sistemática;
4. Reiterar o papel crucial da sistemática filogenética como ferramenta-chave no conhecimento biológico.

## Seção 1: A classificação biológica

Vimos, então, que a classificação dos seres vivos funciona para estudar e para passar adiante conhecimento sobre a diversidade biológica. Assim, a classificação é um código no qual a palavra “mamíferos” significa o grupo da diversidade composto por coelhos, gambás, ornitorrincos, focas, cavalos, ratos.. Se eu e você usamos o mesmo código, podemos usá-lo para trocar informações sobre essa parcela da diversidade.

Além disso, a taxonomia também associa características dos grupos aos nomes. No caso dos mamíferos, eles são definidos pela presença de glândulas mamárias. Mas é só isso que os caracteriza? Não; claro que não! Nós, mamíferos, apresentamos muitas outras características, como a presença da coluna vertebral e um corpo composto por células, por exemplo. Entretanto, essas duas características não são exclusivas dos

mamíferos, pois as compartilhamos com outros vertebrados e com outros organismos celulares, respectivamente. Assim, para fazermos taxonomia, usamos as características exclusivas dos membros, para definir um grupo.

De certa maneira, a taxonomia pode ser percebida como a linguagem da biodiversidade. Da mesma forma, se eu falar a palavra “carro”, você sabe que eu estou falando de um “veículo automóvel de quatro rodas”, pois, na nossa língua portuguesa, essa é a palavra para esse objeto. Quando eu falo a palavra “insetos”, você também sabe que ela significa “organismos invertebrados com seis patas, dois pares de asas e duas antenas”.



**Figura 2:** Diversidade de insetos: mosca da dança (*Empis livida*), gorgojo do nariz grande (*Rhinotia hemistictus*), barbeiro (Subfamília *Harpactocorinae*), grilo toupeira (*Gryllotalpa brachyptera*), mariposa do imperador (*Opodiphthera eucalypti*), e vespa europeia (*Vespula germanica*).

Nossa espécie humana, *Homo sapiens*, foi descrita como a espécie de *Homo* que pensa (por isso, *sapiens*). Apesar de não sermos a única espécie que pensa, nem provavelmente a única espécie desse gênero que pensava, nossa espécie apresenta um intelecto diferenciado do resto da diversidade biológica. Vamos conversar mais sobre isso na última aula deste curso. Mas nós pensamos mais profundamente e em mais coisas



do que podemos perceber dos outros organismos. Isso pode justificar o nome que Lineu nos deu. Assim, esse nosso binômio está associado à diversidade humana e às nossas características exclusivas, como o pensamento profundo e a necessidade de ajuda no parto. Porém, esse estilo de classificação nem sempre foi assim.

## Seção 2: Histórico da classificação biológica

Os nomes das espécies no sistema de classificação da época de Lineu não eram binômios, como são agora. O sistema de classificação que os pesquisadores daquela época tinham de usar era bem complicado. Bom; para começar, os nomes das espécies eram curtas descrições de suas características externas. Assim, de acordo com a complexidade do organismo, seu nome incluía mais e mais palavras.

Imagine que o nome da abelha era *Apis pubescens thorace subgriseo abdomine fusco pedibus posticis glabris utrinque margine ciliatis*, que é uma expressão em latim que significa *abelha madura com tórax cinza abdômen escuro pernas pretas coxas com pelos ao longo de cada borda*. Todas essas palavras eram o nome, e tínhamos de falar todas elas, só para mencionar essa espécie de inseto! Por isso, era uma longa confusão a conversa entre dois especialistas de abelhas naquela época! Vamos ver um outro exemplo para verificar que a confusão não era só com abelhas. O nome da planta da figura a seguir era *Nepeta floribus interrupte spicatis pedunculatis*.



**Figura 3:** Hoje, o nome científico desta planta é *Nepeta cataria*, mas o nome dela já foi *Nepeta floribus interrupte spicatis pedunculatis*.

Nesse sistema de classificação antigo, as palavras do nome representavam apenas as principais características do organismo, e tais palavras eram ordenadas por sua importância; as mais importantes deveriam vir antes. Entretanto, nem sempre os taxonomistas concordavam em quais características eram as mais importantes. Ou seja, mais confusão, só para nomear a diversidade biológica e suas parcelas.

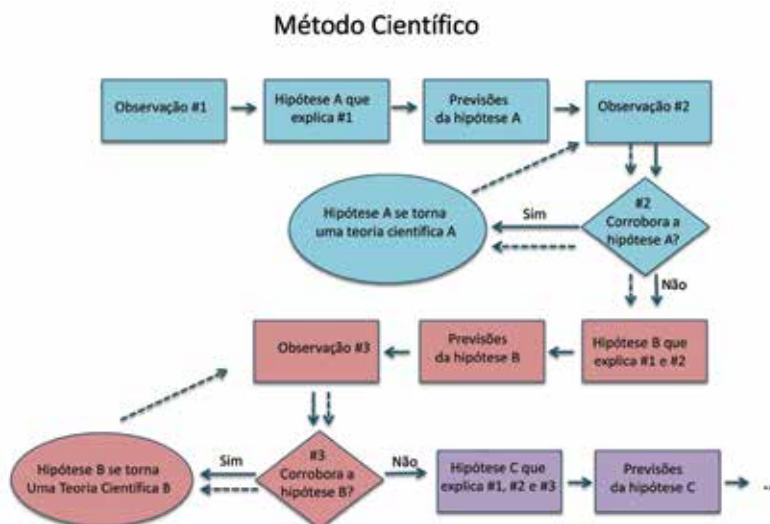
Quando a diversidade biológica ainda era restrita à europeia, esse sistema, apesar de confuso, ainda era possível de ser usado. Porém, quando começaram as grandes navegações da Idade Moderna, o sistema tornou-se rapidamente inviável. Isso porque os navios europeus faziam as viagens aos locais mais remotos, coletavam novos organismos nessas viagens e traziam aos especialistas europeus. Naturalmente, a biodiversidade tropical é muito maior que a europeia; logo, ficou claro que os cientistas precisavam de um novo sistema de classificação. Carl Linné percebeu essa necessidade e inventou o sistema que usamos até hoje, chamado de sistema lineano.

Segundo o sistema lineano, a descrição de uma espécie é publicada em um artigo científico que associa um binômio (ex.: *Homo sapiens*) a um autor (ex.: Carl Linné) e a um tipo, que é depositado num museu. Selecionado pelo autor, o tipo da espécie é um modelo da espécie, que é depositado num museu e fica disponível para qualquer pesquisador estudar, fazer medidas e observações. Assim, qualquer pesquisador poderá verificar as características descritas originalmente pelo autor da espécie e até incluir novas características em uma futura redescritção da espécie.



## O que é ciência?

Nem todo o conhecimento humano faz parte do conhecimento científico. A ciência é uma pequena parcela de tudo que sabemos, e ela é composta por duas partes integradas. A ciência é o conhecimento científico e, além disso, a ciência é a lista de critérios específicos que devemos seguir para chegarmos até o conhecimento científico. À lista completa desses critérios científicos denominamos *método científico*.



Uma hipótese é uma ideia que explica observações (fatos). Se uma hipótese explica mais observações do que as que foram usadas para elaborá-la, ela vai acumulando evidências até se tornar uma teoria científica. Assim, uma teoria é o ponto mais alto que uma ideia pode chegar em ciência. Uma teoria nunca vai virar um fato, as teorias explicam fatos. Uma teoria científica, para ser válida, precisa sobreviver a mais e mais observações.

Note que essa concepção de teoria é diferente da usada no senso comum, em que teoria é equivalente a hipótese. Em ciência, hipótese e teoria têm qualidades bem distintas uma da outra. Se uma teoria antiga não explica uma nova observação, uma nova hipótese deve ser elaborada para explicar essa nova observação, além das anteriores que a teoria antiga explicava. Esta nova hipótese só vira uma teoria quando novas observações não a rejeitarem. Essas novas observações devem fazer parte do rol de previsões da teoria. Assim, a previsibilidade é um critério científico. Teorias científicas devem explicar observações futuras, e não apenas as que foram usadas para elaborá-la.

Com base em experimentos que seguiram os critérios científicos, uma teoria pode ser refutada. Uma vez que isso ocorra, a teoria é descartada e novas hipóteses vão surgir para explicar as observações. Dessa forma, a ciência tem como objetivo central rejeitar hipóteses e teorias erradas, fornecendo novas e melhores explicações para o mundo que nos cerca. A ciência é, portanto, um processo que é autocorretivo, de acúmulo de conhecimento

científico. O método científico é elaborado de forma a tornar a autocorreção parte integrante deste processo.

Um outro critério da ciência é o de reprodutibilidade. De acordo com esse critério, para serem considerados ciência, resultados de experimentos de um pesquisador devem ser reproduzíveis por outros pesquisadores. Assim, o sistema lineano leva isso em consideração; portanto, é ciência. Ao garantir a publicação da descrição detalhada em uma revista e o depósito de um exemplar- tipo em um museu, o sistema garante a reprodutibilidade.

---

### **Seção 3: Taxonomia e Sistemática**

Qualquer pesquisador poderá comparar a descrição e o exemplar-tipo, verificando pessoalmente os critérios que o pesquisador original usou para designar esta uma espécie nova para a ciência. Se ele concordar, ele irá usar o nome e a descrição do autor original; se ele discordar, poderá publicar um outro artigo, comentando suas percepções. Note que o ponto central aqui não é se o novo pesquisador concorda ou discorda do pesquisador original, mas sim o fato de que o pesquisador que descreveu a nova espécie deposita-a em um museu “para ser testada”, para que outros pesquisadores possam discordar da sua proposta. O conhecimento científico é uma pequena parcela de todo o maravilhoso conhecimento humano, que inclui as artes, as religiões, as filosofias. Isso não faz a ciência mais ou menos importante que outras formas de conhecimento humano; isso faz a ciência diferente.

Na classificação biológica, temos dois conceitos fundamentais. O primeiro é a taxonomia, que é a teoria e a prática de dar nomes aos organismos e aos grupos taxonômicos a que eles pertencem, com base em suas características físicas. Nessa prática, estão incluídas as seguintes atribuições: dar nome aos grupos; incluir organismos nesses grupos; indicar as características exclusivas desses grupos. Assim, se um taxonomista descobrir uma nova espécie, ele irá estudar suas características e deverá decidir em qual grupo taxonômico ela será inserida, de acordo com esta área. Se essa espécie tiver glândulas mamárias, ela deverá ser inserida no grupo dos mamíferos, por exemplo. Além disso, como todos

os mamíferos estão inseridos nos grupos dos vertebrados, essa espécie será automaticamente um vertebrado também.

Você pode estar começando a ficar confuso com tantos nomes e tantas características de tantos organismos. Você realmente tem motivos para tanta confusão, pois são muitos nomes e muitas características. Então, vamos voltar um pouco. Você se lembra do exemplo do armário da Aula 1? Lembra-se, então, de que a gente podia agrupar a diversidade de roupas do armário por vários critérios. Se agrupássemos por tipo de roupa, iríamos separar as roupas entre os grupos: saias, camisetas, calças, camisetas... Alternativamente, poderíamos separar as roupas por cor e, nesse caso, nossos grupos seriam brancas, pretas, azuis... Repare que o fato de separarmos por tipo de roupa implica ignorarmos os grupamentos de cor. Se separarmos por cor, implica ignorarmos os grupamentos de tipo. Certo? Bem; mais ou menos.

Podemos definir, por exemplo, que o grupamento de tipo é o mais importante, e usamos o grupamento de cor como grupamento secundário. Neste caso, separamos todas as roupas nos grandes grupamentos de tipo (saias, blusas, calças, etc.) e, dentro de cada um desses grupamentos, separamos em pequenos grupamentos de cor (saias brancas, saias vermelhas, blusas azuis, blusas vermelhas). Mas como decidir entre as duas possibilidades? Qual o grupamento primário? O que é mais importante: a cor ou o tipo?



**Figura 5:** Sistemáticas alternativas para classificar roupas. Repare que, ao usar uma ou outra sistemática, os grupamentos secundários não são idênticos.

Repare que, agora, estamos discutindo mais do que nomes; estamos discutindo os critérios para definirmos os nomes, ou seja, a lógica de nosso sistema de classificação. Assim, neste caso, passamos a uma outra área da classificação biológica, que é a sistemática. Aqui, estabelecemos quais critérios usar. Assim, a sistemática de roupas indica que os grupamentos usados são o de tipo e o de cor, e também determina que o grupamento de tipo tem precedência em relação ao de cor.

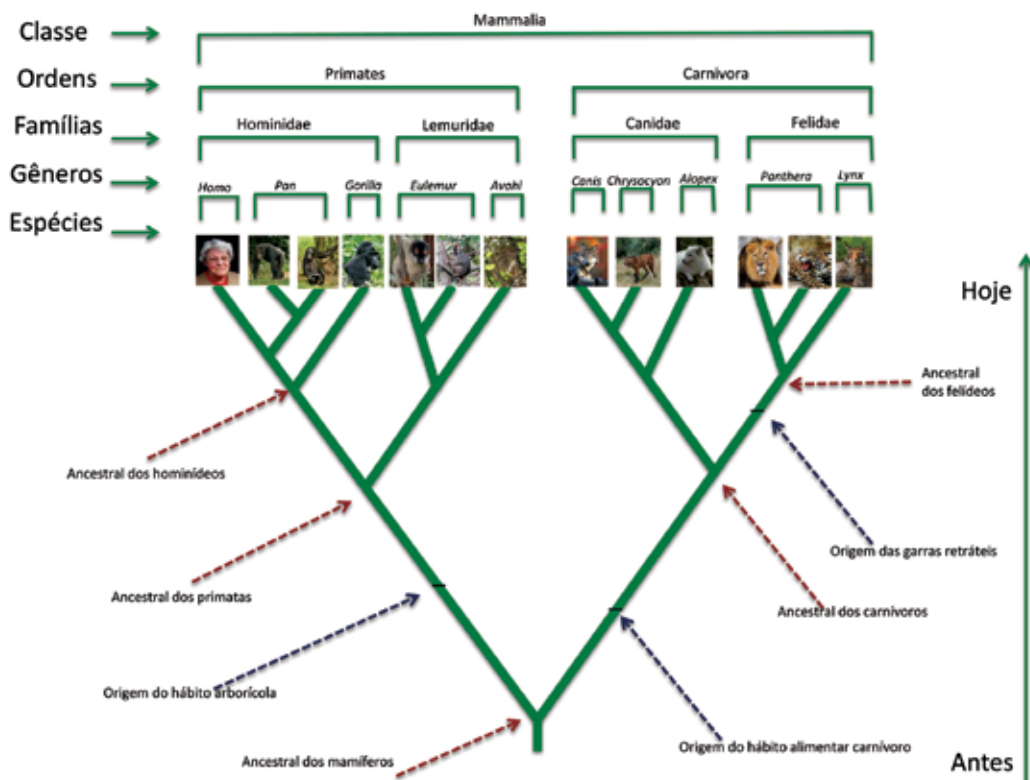
Se nas roupas já é complicado, então, na biodiversidade é um pouco pior, pois não temos apenas dois ou três critérios possíveis de grupamentos; temos milhões de possibilidades... Para começar, são dois milhões de espécies já descritas, cada uma delas com dezenas de características exclusivas e outras centenas de características compartilhadas com outras espécies. As características compartilhadas escolhidas irão refletir em grupamentos secundários distintos, enquanto as características exclusivas de cada espécie servirão para diferenciá-la das outras espécies da diversidade.

Note que, se mudarmos os critérios da sistemática de roupas (em vez de cor e tipo, usarmos tecido e marca) ou mudarmos sua ordem (em vez de cor e tipo, usarmos tipo e cor), todos os grupamentos mudam, porque estamos mudando o sistema de fazer taxonomia. Quais características devemos escolher na seleção primária? Se cada pesquisador achar uma característica mais importante, o que vai acontecer? Vai acontecer uma confusão tão grande como a que tínhamos antes de Lineu. E, aí, como vamos manter a estabilidade necessária da linguagem da diversidade biológica? Será que todos os pesquisadores irão concordar com essa escolha?

## Seção 4: Sistemática filogenética

Vamos começar por partes, então. O que te lembra a figura anterior, com as roupas classificadas? Uma filogenia, não é mesmo? Pois, é. Charles Darwin, em seu livro *Origem das Espécies*, nos forneceu mais do que um mecanismo natural para explicar a adaptação dos organismos a seu ambiente, que é a seleção natural já bem discutida em outras aulas. Esse pesquisador sugeriu que a sistemática da classificação biológica deveria seguir o padrão de ancestralidade comum e descendência de uma árvore filogenética. Assim, um ramo desta árvore seria inserida num grupo taxonômico, outro ramo em outro grupo. E assim, por diante.

Neste caso, cada grupamento da diversidade biológica incluiria um ancestral e todos os seus descendentes, definidos em um dos ramos da árvore filogenética. Repare que, neste caso, teríamos grupamentos de diferentes tamanhos. O maior dos grupamentos incluiria toda a diversidade biológica. Este grupamento maior seria dividido em grupamentos de tamanho mediano, que incluiriam, cada um, uma parte menor da diversidade. Esses últimos também seriam divididos, e assim por diante, até os menores grupamentos, que são as espécies.



**Figura 6:** Modelo filogenético de fazer sistemática, a sistemática filogenética, que dá nomes taxonômicos a grupos de uma árvore filogenética. Setas azuis indicam a origem das novas características que definem os grupos formados pelo próximo ancestral (setas vermelhas) e seus descendentes.

Entretanto, o mais perspicaz dessa proposta de Charles Darwin, em 1859, não foi colocar a confusão para escanteio - de quais características devemos escolher e qual a ordem delas. Vou explicar melhor. Vamos ver um exemplo de um tipo de taxonomia que seria bem simples de ser feita. Repare no grupo que é definido por cor. Como verde em latim é *viridis*, podemos definir um grupo hipotético Viridata, como mostra a Figura 7. Esse tipo de taxonomia é simples e barato. Imagine que



qualquer um poderia fazer classificação biológica; bastaria, para isso, comprar um Atlas de Cores. Poderíamos ter ainda subgrupos, de acordo com os tons de verde, tipo *Viridata clarae* (organismos verde claro) e *Viridata escurae* (organismos verde escuro).

Ora, se o conhecimento biológico é baseado na associação entre grupos da diversidade (ex.: mamíferos) e características (ex.: têm glândulas mamárias), *Viridata* não serve a essa proposta, pois a única característica que une os *Viridata* é o fato de serem verdes. Nunca ninguém vai achar outras características, porque os *Viridata* tiveram ancestrais diferentes que passaram características diferentes para seus descendentes *Viridata*. Ou seja, a Sistemática *Viridata* só serve para a característica Cor Verde; não serve para outras que conhecemos e, principalmente, não serve para o conhecimento que ainda vamos descobrir sobre esses grupos. Isso significa que a Sistemática *Viridata* não é uma forma adequada de fazer ciência, pois só serve para explicar algo que já conhecemos.



**Figura 7:** Grupo hipotético dos *Viridata*, que inclui todos os organismos verdes. Este grupo não funciona para acumular conhecimento biológico porque nenhuma outra característica é compartilhada pelos *Viridata*, a não ser a cor verde, e porque eles pertencem a linhagens evolutivas com ancestrais diferentes.

Mas qual a lógica disso? Como a história evolutiva é o caminho pelo qual as espécies descendentes herdam suas características, ao usar a história evolutiva para dar nomes taxonômicos, tais nomes irão significar

mais caracteres do que aqueles que foram usados para definir os grupos. Ou seja, os nomes vão servir para explicar e acumular conhecimento biológico no futuro, porque os ancestrais passam todas as suas características, e não apenas as que conhecemos, para espécies descendentes pela árvore filogenética. Nesse sentido, o ancestral dos mamíferos forneceu a todos os seus descendentes características marcantes, como glândulas mamárias, e as características sutis, como a presença de um osso intermediário no ouvido, que só os mamíferos têm.

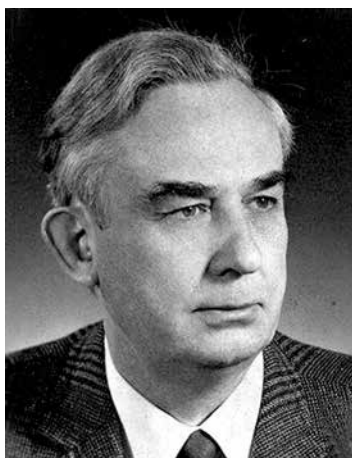
Além disso, da mesma forma como herdamos todas as características de nossos pais, o ancestral dos mamíferos passou para seus descendentes características que ainda iremos descobrir daqui a 10, 15 ou 20 anos. Assim, a lógica filogenética da história evolutiva é o único sistema científico, porque dá poder de previsibilidade à Biologia. Como vimos, a previsibilidade é um dos componentes necessários para uma teoria ser considerada científica. Sem a história evolutiva, o conhecimento biológico é uma enormidade de conhecimentos isolados a serem memorizados, pois sua essência não pode ser compreendida.

## Seção 5: Os pais da Sistemática filogenética

Charles Darwin escreveu, em uma carta a Thomas Huxley, em 1857, que “*Vai existir um momento, embora eu não viverei para presenciá-lo, quando teremos árvores filogenéticas quase verdadeiras para cada um dos grandes reinos da Natureza*”. Pois bem, o sonho de Darwin está sendo concretizado num grande projeto com cientistas de todo o mundo, chamado a Árvore da Vida, ou *Tree of Life* (com a sigla ToL). O projeto tem como objetivo apresentar as filogenias e os dados morfológicos que sustentam tais propostas filogenéticas para cada um dos grupos da diversidade.

Quem nos deu a metodologia para a reconstrução filogenética, entretanto, não foi Darwin, mas sim o entomologista alemão Willi Hennig. A metodologia passa por encontrar as novidades evolutivas e classificar grupos de acordo com as novidades, e não de acordo com as características que já estavam presentes no ancestral. Por exemplo, penas é uma característica que se apresenta em dois estados: presença de penas e ausência de penas. Ou seja, temos organismos com penas e organismos sem penas. Em vertebrados, a presença de penas é uma novidade, porque o ancestral comum dos vertebrados não tinha penas. Assim, a presença de penas pode ser usada para delimitar o grupo de aves, mas a sua ausência não pode ser usada para agrupar os que não

tem penas: mamíferos, crocodilos, anfíbios, etc. Este é o ponto-chave da análise filogenética cladística, que é a reconstrução das árvores filogenéticas, usando características derivas compartilhadas e exclusivas de cada grupo. Portanto, graças a Darwin e Hennig, a sistemática filogenética é objetivo e rotina da maior parte dos taxonomistas.



**Willi Hennig 1913-1976**

## Resumo

- A classificação biológica associa um nome que significa um grupo da diversidade biológica com uma característica, ex.: mamíferos têm pelos, e está estruturada em duas áreas: a taxonomia (dar nomes a grupos taxonômicos, descrevê-los e incluir espécies neles) e a sistemática (critério usado pela taxonomia para dar nomes taxonômicos);
- Os fatos são acontecimentos que observamos no mundo real. Usamos hipóteses e teorias científicas para explicar os fatos sobre o mundo. Uma hipótese que é compatível com as observações iniciais que o pesquisador usou para formulá-la é elevada ao *status* de teoria científica. A cada novo teste, a teoria científica pode ganhar robustez, se confirmada por novas observações, ou ser rejeitada, se incompatível com novas observações. Neste último caso, uma outra hipótese deve ser formulada para explicar as observações;
- As ciências naturais incluem o conhecimento científico e os critérios para chegar até esse conhecimento sobre o mundo natural. Dois critérios científicos são a reprodutibilidade e a previsibilidade. Ou seja, outros pesquisadores devem ser capazes de repetir os experimentos para checar os resultados (repetibilidade) e as teorias científicas de-

vem explicar observações que ainda não foram feitas quando de sua formulação;

- A sistemática filogenética é a única sistemática de classificação biológica que atende aos critérios científicos. Ela usa a história filogenética das linhagens para atribuir nomes aos grupos taxonômicos. Dessa forma, o nome dos grupos significa características que ainda não foram descobertas, como ocorre com todas as teorias científicas.

## Referências para as figuras

### Pigs

Por Marie Richie de Portland, Cascadia - Flickr, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=380072>

### Insetos

Por Bugboy52.40 - Derivative from images uploaded by Fir0002., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8101165>

### Nepeta

By Jon Sullivan - <http://pdphoto.org/PictureDetail.php?mat=pdef&pg=8203>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=493751>

### Ciência

Por Lauro Chieza de Carvalho - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15480489>

### Filogenia Sistemática filogenética

Mulher CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1889576>

Chimpanzé By © Hans Hillewaert /, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16267899>

Bonobo Por © Hans Hillewaert /, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16264708>

Gorilla By Fiver Löcker from Wellington, New Zealand - Gorilla Tracking - 02, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8101455>

*Eulemur fulvus* Por David Dennis - originally posted to Flickr as Brown Lemur in Andasibe, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9002868>

*Eulemur rufus* Por Bernard Gagnon - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3630320>

*Avahi laniger* By Alex Dunkel (Visionholder) - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9920687>

*Panthera leo* Por A.Savin (Wikimedia Commons · WikiPhotoSpace) - Obra do próprio, FAL, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45825652>

*Panthera onca* Por Kairos14 - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32889453>

*Lynx lynx* Por Bernard Landgraf (User:Baerni) - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=217822>

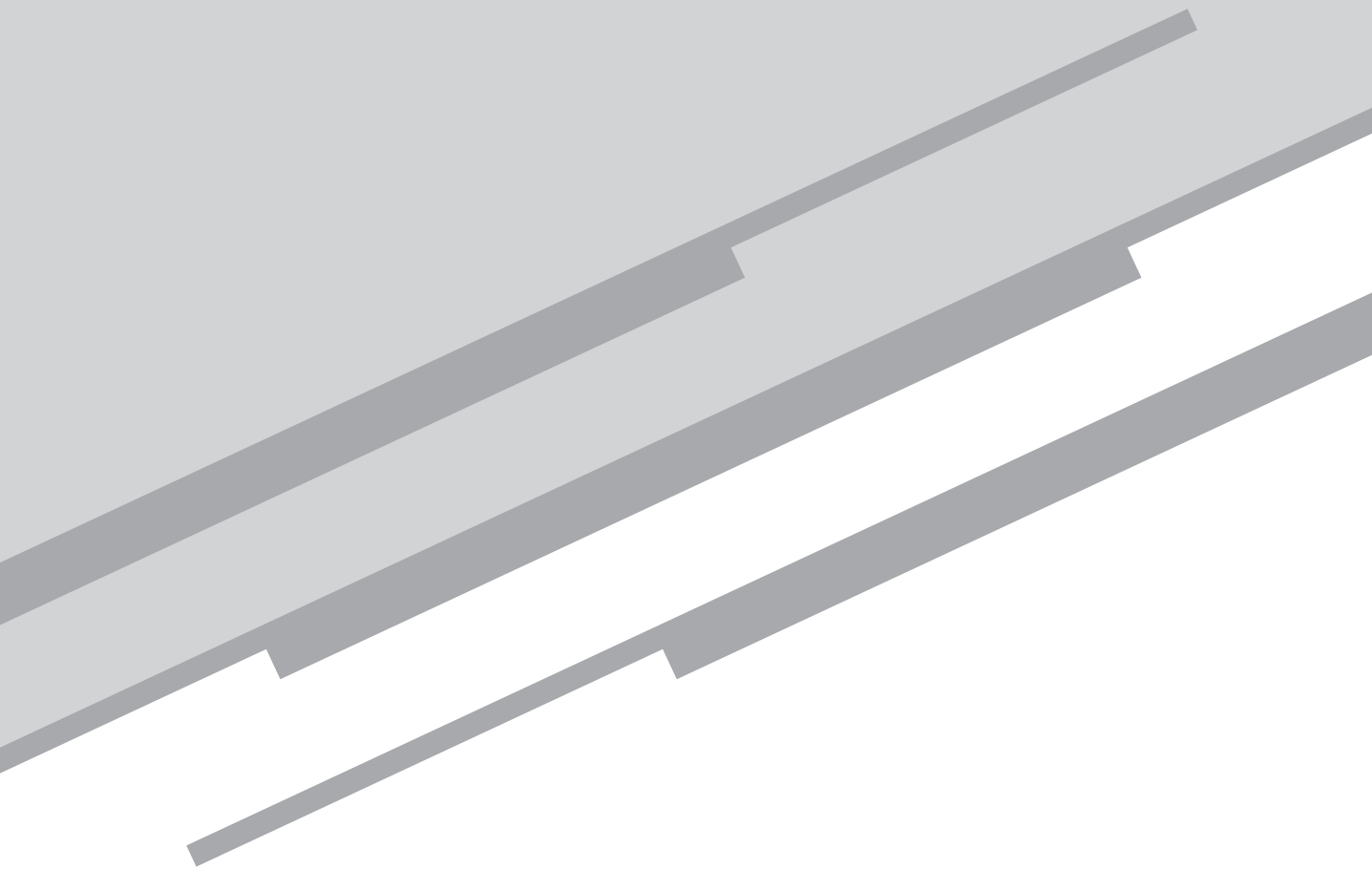
*Chrysocyon brachyurus* Por Aguará - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40357029>

*Canis lupus* Por Gary Kramer - This image originates from the National Digital Library of the United States Fish and Wildlife Service at this page. Esta marcação não indica o status de direito autoral da obra aqui mostrada. Uma marcação normal de direitos autorais ainda é necessária. Veja Commons:Licenciamento para mais informações. See Category:Images from the United States Fish and Wildlife Service., Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30605>

*Alopex lagopus* Por Sem fonte automaticamente legível. Presume-se que a autoria seja de Cele4~commonswiki, baseando-se nas informações sobre direito autoral. - Sem fonte automaticamente legível. Presume-se que seja obra própria, baseando-se nas informações sobre direito autoral., CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=444588>

# Aula 07

Fósseis e evolução no Pré-Cambriano



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

A evolução é o processo que fez do nosso planeta, que era estéril há bilhões de anos, um planeta cheio de vida num processo contínuo de modificação da diversidade biológica ao longo do tempo. Quer um exemplo? Se um professor fosse ensinar Biologia há 100 milhões de anos, a biodiversidade do planeta seria muito diferente do que a que temos hoje. Ele, provavelmente, nem iria mencionar aves ou mamíferos, pois teriam poucas espécies desses grupos. Por outro lado, naquela época, existiam os gigantes répteis marinhos, como mostra a bela reconstrução abaixo do *Tylosaurus*, de uma cena do período Cretáceo.



**Figura 1:** Pintura de um réptil marinho fóssil, o *Tylosaurus proriger*, caçando um peixe fóssil do gênero *Xiphactinus*. A pintura original foi feita por Charles Knight, em 1899, e está atualmente no Museu de História Natural Americano, em Nova Iorque, com o título de “Cavaleiro *Tylosaurus*”.

Essa reconstrução, ilustrando o momento de caça pelo *Tylosaurus proriger*, mostra um pouco da biologia da espécie fóssil. Desse gênero, temos três espécies conhecidas: *Tylosaurus proriger*, *T. nepaeolicus* e *T. pembicensis*, todas fósseis. Essas espécies eram parentes dos atuais lagartos e cobras. Imagine encontrar um desses no mar...



## Objetivos

1. Relacionar o aspecto temporal da biodiversidade com os eventos de extinção e com a possibilidade de surgimento e diversificação de outras linhagens;
2. Identificar os processos mais comuns de fossilização e a condição dos organismos fossilizados nesses processos;
3. Definir e destacar a importância dos lagerstätte;
4. Caracterizar a diversidade fóssil do Pré-Cambriano, contextualizando o surgimento das cianobactérias;
5. Detalhar o evento de oxigenação da atmosfera terrestre do final do Pré-Cambriano.

## Seção 1: O Registro Fóssil

Na figura a seguir, podemos encontrar o fóssil da mesma espécie da pintura, *Tylosaurus proriger*, datado do período geológico Cretáceo, há mais de 66 milhões de anos. O pintor Charles Knight passou muito tempo pesquisando sobre a espécie, para descobrir o que o esqueleto dessa espécie fóssil pode nos dizer sobre a parte carnosa do corpo do animal. A maior parte dos estudos evolutivos trabalha com essa ferramenta poderosa, que é a Biologia comparada, e aqui não foi diferente. O artista estudou espécies atuais para tentar estabelecer um padrão entre o corpo e o esqueleto, para entender o que o esqueleto pode nos dizer sobre a parte do corpo que não é preservada no registro fóssil.

O esqueleto, em ótimo estado de conservação, pode ser observado por visitantes na exibição no Museu Smithsonian, nos Estados Unidos. Você já deve ter percebido que as espécies fósseis também recebem um nome científico que obedece às mesmas regras das espécies viventes: binômio latinizado, destacado do texto e associado a uma descrição detalhada e ao autor. Assim como os dinossauros, esses répteis marinhos também foram extintos há muitos milhões de anos e, por isso, só encontramos seus fósseis, que são os vestígios de sua existência.





## Fósseis

Fósseis são restos (esqueletos, dentes) ou vestígios (pegadas, rastros), preservados como rochas, de um organismo já extinto.

**Figura 2:** O esqueleto fóssil do mesmo réptil marinho *Tylosaurus proriger*. Foi baseado neste e em outros fósseis desta espécie que Charles Knight pintou o quadro da figura anterior.

Observando a figura anterior em maior detalhe, repare na pequena caixa de acrílico ao lado do crânio do réptil. Ela mostra o crânio de um pequeno plesiossauro que foi encontrado em seu estômago (ou onde ficaria o estômago), quando paleontólogos desenterraram o fóssil. Portanto, a análise cuidadosa do fóssil nos fornece evidência não apenas sobre como era o corpo do animal, mas também de seus hábitos.

Enquanto o taxonomista usa armadilhas de captura para coletar os animais vivos, os paleontólogos quebram pedras. Sim, eles são especialistas em revirar, quebrar e polir rochas em busca dos preciosos fósseis, para serem depositados nos museus do mundo. Para você ter uma ideia, só no Museu de História Natural de Londres, são cinco milhões de fósseis, e no Museu de História Natural de Nova Iorque, são sete milhões de fósseis identificados, catalogados e disponíveis para pesquisadores de todo o mundo estudar. Aqui mesmo no Museu Nacional da UFRJ, no Rio de Janeiro, temos centenas de milhares de fósseis catalogados, além daqueles que estão em exposição para o público. Se você nunca foi a esse museu, vale a pena ir; convide seus irmãos pequenos e seus pais, que vai ser um ótimo passeio de família. Lá, você vai encontrar um lindo fóssil de preguiça gigante e ter uma ideia da biodiversidade do Brasil antes de o *Homo sapiens* chegar aqui.



NPS - National Park Service

**Figura 3:** O paleontologista Matt Smith numa escavação com um martelo geológico, para conseguir quebrar as pedras para encontrar os fósseis. Esse procedimento é feito com extremo cuidado, para não danificar o fóssil.

Fonte: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joda\\_paleontologist.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joda_paleontologist.jpg)

A parte carnosa do animal, geralmente, não sobrevive ao processo de fossilização, mas o esqueleto ósseo sim. Neste processo de fossilização, o tecido ósseo, em vez de se decompor, transforma-se em rocha. A sobrevivência do fóssil até os dias atuais segue uma regra, e não é um processo aleatório. Partes duras do corpo, como ossos e dentes, sobrevivem com uma frequência muito maior do que partes moles do corpo, como músculos e pele. Além disso, mesmo entre animais vertebrados, alguns têm ossos mais resistentes do que outros, pois encontramos muito mais fósseis de mamíferos e de répteis do que de aves e de anfíbios nas camadas mais recentes do registro fóssil. A razão é porque as aves apresentam ossos pneumáticos, e anfíbios, ossos mais frágeis, que não sobrevivem tão bem ao processo de fossilização. O processo de fossilização pode acontecer de outras formas, como no caso dos fósseis em âmbar. Neste caso, o âmbar é uma resina secretada por algumas árvores, principalmente pinheiros, que aprisiona alguns animais. Quando o animal é aprisionado nesta resina, ele morre, mas seu corpo fica protegido do ambiente externo; por isso, até as partes moles sobrevivem ao tempo, como no mosquito ilustrado na figura a seguir.



**Figura 4:** Um mosquito (1,2 cm) preservado em âmbar. Esse mosquito viveu no período Neogeno, há cerca de 20 milhões de anos, quando os répteis marinhos, como o *Tylosaurus*, já tinham sido extintos.

Você deve ter visto mais detalhes desse processo de fossilização no filme *O Parque dos Dinossauros*. Como o filme mostra, esse tipo de preservação é extremamente eficiente e, por isso, não apenas as partes moles, como no caso do mosquito da figura, mas também o DNA (material genético) das espécies fósseis é preservado.

Em casos mais raros, ocorre a preservação de tecidos moles também, pois estes ficam moldados em rochas, como mostra a figura abaixo. Esse é um fóssil de *Marella*, um gênero extinto de artrópode que viveu no período Cambriano. Este exemplar é um fóssil do famoso Xisto de Burgess, localidade no Canadá em que as rochas apresentam um padrão especial de sedimentação que preserva as partes moles. *Marella* é o fóssil mais comum nesta localidade. Estas localidades que exibem fósseis em detalhes de preservação fenomenais são chamadas de *lagerstätte* (do alemão, local de armazenamento). Um deles, no Brasil, é a Formação de Santana, com muitos fósseis datados do Período Cretáceo. O dinossauro da figura a seguir tem cerca de 110 milhões de anos, e foi recuperado com vasos sanguíneos e com parte do couro, o que é extremamente raro, mas acontece.



**Figura 5:** Dois exemplares fósseis encontrados no lagerstätte brasileiro: um dinossauro juvenil (1,6 metro) com nome dedicado ao lugar, *Santanaraptor placidus* (esquerda), e um “bicho-pau” *Eoproscopia martilli* (direita). A preservação de partes moles do processo de fossilização é relativamente rara no mundo, mas é comum neste tipo de localidade.

Os eventos de extinção são importantes para a renovação da biodiversidade do planeta. A morte de uma espécie deixa vago um espaço na diversidade biológica, pois o alimento e as necessidades dessa espécie extinta ficam disponíveis para outras espécies que venham a surgir no local por especiação ou por migração. Um exemplo é a extinção dos dinossauros, que permitiu que houvesse espaço no ambiente para a diversificação de nossa linhagem de mamíferos. Assim, com poucas espécies competidoras, os mamíferos foram se espalhando e especiando, iniciando esse processo de diversificação. Analisando o conjunto de fósseis (registro fóssil), é estimado que 99,9% das espécies que já viveram em nosso planeta estão extintas. Assim, você poderá entender e apreciar a enorme variedade e importância de estudarmos as espécies fósseis.

Vamos tomar por exemplo a extinção dos dinossauros. Hoje em dia, dizemos que os dinossauros não foram extintos de verdade. Isso não significa que você vai topor com um *Tyranosaurus rex* em seu caminho para a universidade. O T-rex era carnívoro, isto é, se alimentava exclusivamente de outros animais (não de plantas) e era um predador voraz. Dizemos que uma espécie é um predador quando ele não apenas se alimenta de carne, mas promove uma caçada para se alimentar. Veja a diferença de tamanho de um T-rex para um humano na Figura 6. Agora, veja se você repara algo diferente neste dinossauro.



**Figura 6:** Reconstrução mais moderna do feroz *Tyrannosaurus rex* (ou T-rex) com penas. Temos muitos motivos para aceitar que as aves atuais são descendentes dos dinossauros com penas.

A primeira coisa que notamos é que seu couro é coberto por penas. Apesar de, hoje, as penas terem um papel fundamental no voo das aves, elas também servem a outras funções. Uma delas é a de termorregulação, ou seja, da regulação da temperatura corporal, que imaginamos terem servido também aos dinossauros. Nós, mamíferos, temos pelos e o suor que tem essa função. Além da presença de penas, esses dinossauros são bípedes (hábito de andar sobre as duas patas traseiras) e apresentam também a mesma disposição de três dedos do pé na frente e um atrás, comum nas aves.

Bom; mas se aves e dinossauros são relacionados, por que só agora as reconstruções estão colocando T-rex com penas? As penas, como a cor, não são preservadas no registro fóssil; então, nas reconstruções antigas, as penas não eram incluídas. Entretanto, em alguns fósseis de dinossauros da mesma superfamília (Tyrannosauroidae) do famoso T-rex, os cientistas encontraram penas primitivas. Devido a essa descoberta em seu parente próximo, portanto, é provável que o mais famoso dinossauro também tenha apresentado penas. Por isso, as reconstruções mais novas apresentam essas características.

A evolução apresenta muitos fósseis intermediários, em alguns casos, que parece quase um filme a evolução de dinossauros em aves. A evidência mais famosa é o *Archaeopteryx*, uma transição tão clara entre um dinossauro e uma ave que até um não especialista consegue enxergá-lo como uma espécie de transição.



**Figura 7:** Exemplar de *Archaeopteryx lithographica*, uma espécie de transição entre um dinossauro e uma ave, indicando claramente o parentesco entre esses grupos. Repare que o molde das penas na rocha segue a orientação dos membros superiores.

O *Archaeopteryx* é considerado como a primeira ave. Ele já voava, pois suas penas são assimétricas, dando maior aerodinamismo, que é uma adaptação típica ao voo. O primeiro exemplar desse organismo foi descrito em 1861 - apenas dois anos depois de Charles Darwin publicar o livro *Origem das Espécies*. Podemos dizer que Darwin ficou bem feliz com essa pequena amostra de que sua teoria estava correta. Desde então, outros exemplares dessa espécie e muitos outros de outras espécies ancestrais dos grupos de aves já foram descritos.

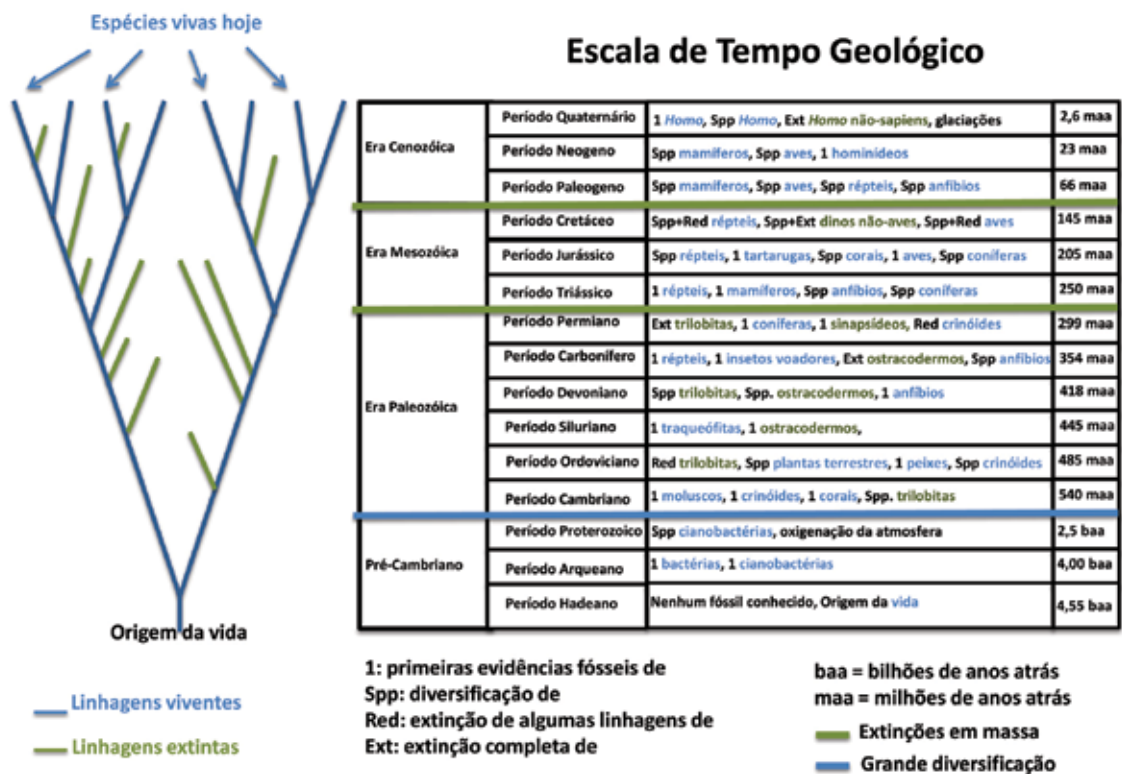
## Seção 2: O Pré-Cambriano

Os geólogos também dividem o tempo em intervalos menores, mas que não são iguais. De fato, mesmo na História humana, a Idade Antiga não tem um número de séculos igual ao da Idade Média. Elas são definidas por grandes eventos na História humana. Assim, o tempo geológico é dividido por grandes eventos evolutivos que modificaram a biodiversidade de uma época para outra. Os eventos mais relevantes, de



um ponto de vista evolutivo, são as grandes extinções, ou extinções em massa, que abrem espaço para a renovação da biodiversidade. Quando observamos o registro fóssil com cuidado, podemos perceber claramente tais eventos, embora a causa da extinção seja mais complexa.

Cada período geológico apresenta um conjunto específico de fósseis que o caracterizam. Portanto, existe um tipo de sucessão nos extratos geológicos: nos extratos mais profundos, estão os organismos mais antigos; como existe uma superposição de extratos com o tempo, nos extratos mais superficiais estão os organismos mais recentes. Vamos entender melhor esse ponto de mudanças na biodiversidade ao longo do tempo. Cada extrato de rocha significa um intervalo de tempo de vida na Terra, denominado período geológico. Vários períodos geológicos formam uma Era. Na figura a seguir, podemos observar uma relação entre história evolutiva das linhagens e o registro fóssil.



**Figura 8:** Filogenia (à esquerda), ilustrando linhagens extintas (verde) e vivas até hoje (azuis), e a cronologia da divisão do tempo geológico, detalhando grandes eventos da história da vida na Terra (à direita).

A última linha da tabela da figura marca a formação do nosso planeta, há 4,55 bilhões de anos, no período Hadeano. Rochas desta época não apresentam fósseis, pois os primeiros fósseis datam do início do Período Arqueano, há cerca de 4 bilhões de anos. Os extratos do Arqueano apresentam alguns poucos fósseis de bactérias e de cianobactérias, organismos que não apresentam núcleo celular, ou seja, **procariontes**. Nestes grupos, o DNA não está compartimentalizado no núcleo celular, mas está solto no citoplasma da célula procariótica. Nenhum animal ou planta fóssil é conhecido de rochas que datam desse período.

No período Proterozoico, já encontramos uma diversidade maior de bactérias e, em particular, de cianobactérias; e na tabela está indicado um evento de oxigenação. Vamos ver como isso ocorreu. Apesar de o oxigênio compor 21% da nossa atmosfera atualmente, nem sempre foi assim. Em extratos, como nos retratados na figura a seguir, podemos inferir os níveis de oxigênio de cada época pela oxidação dos metais de cada extrato. Quanto maior o nível de oxigênio, os metais irão apresentar mais oxidação - também conhecida por ferrugem.

### Procariontes e eucariontes

Seres vivos unicelulares cujo material genético (DNA) está contido em um único cromossomo sem localização especial na célula procarionte.

Em contraste, nos organismos eucariontes, os cromossomos se encontram em uma região particular da célula, chamada de núcleo celular.



**Figura 9:** Rocha na qual podemos distinguir os estratos geológicos. Os extratos mais embaixo apresentam fósseis mais antigos, e os mais acima incluem os fósseis mais recentes.

Pois bem; escavando e analisando os extratos inferiores, sabemos que os metais não ficavam enferrujados nos extratos de mais de 2,5 bilhões de anos. Isso indica claramente que havia pouco ou nenhum oxigênio na atmosfera até essa época. Mas, como era a vida sem oxigênio, se 99% dos organismos precisam do oxigênio para sobreviver atualmente? Para



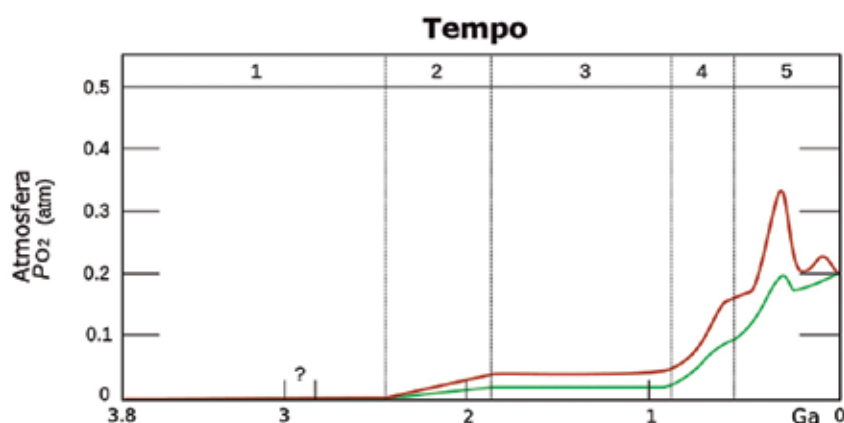
entendermos, podemos procurar como existe vida hoje em locais com baixo teor de oxigênio. São raros, mas existem. Estudando os organismos vivos que hoje habitam tais locais, podemos entender um pouco mais sobre os primeiros habitantes que sobreviviam em nosso planeta.

Ora, os primeiros organismos certamente eram marinhos, pois a vida surgiu nos oceanos primitivos. Os primeiros fósseis de organismos terrestres são do final do Cambriano. O hidrogênio é usado em reações de construção de moléculas nas bactérias atuais. No mar, nada mais abundante, como fonte de hidrogênio, do que a água ( $H_2O$ ) em que viviam. Só que havia um problema sério: se usassem o hidrogênio da água para fabricar suas moléculas, sobraria apenas o oxigênio, que, puro, é um gás altamente tóxico. Assim, as primeiras bactérias usavam o  $H_2S$  como fonte de hidrogênio para suas reações de polimerização. Ainda hoje, existem bactérias, chamadas de sulfurosas, que usam essa fonte de hidrogênio e que estão confinadas a locais que não têm oxigênio disponível. Como elas só podiam usar o raro  $H_2S$ , não diversificaram muito, mesmo naquela época, e eliminavam enxofre em seu metabolismo.

Entretanto, uma dessas bactérias sulfurosas deu uma sorte evolutiva, quando apareceu uma nova adaptação. Essa nova bactéria conseguia, com sua adaptação, transportar o oxigênio e excretá-lo para fora da célula com segurança. Chamamos esse tipo de bactérias de cianobactérias, e elas passaram a usar água disponível em abundância para o seu metabolismo.

Não é necessário dizer que houve uma explosão desses organismos, que passaram a dominar os mares da Terra primitiva. De fato, fósseis de cianobactérias são muito comuns em extratos dessa época. O processo bioquímico que as cianobactérias adquiriram é a fotossíntese. Todos os organismos fotossintéticos, incluindo plantas, algas e cianobactérias, transformam a energia da luz do sol em energia para produzir os compostos orgânicos que necessitam para sobreviver e se reproduzirem. O oxigênio é liberado para a atmosfera depois de seu uso no processo.

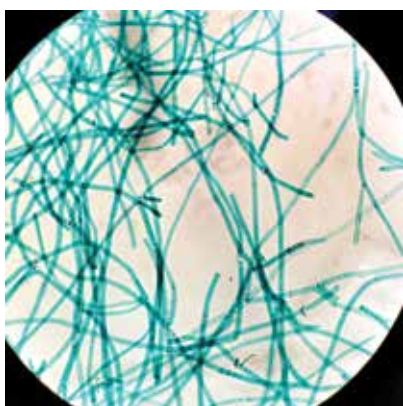
Retornando à primeira cianobactéria com habilidade de manipular o oxigênio, essa primeira cianobactéria tinha uma chance maior de sobreviver e de se reproduzir do que as bactérias sem essa habilidade. Ela sobreviveu, pela alta disponibilidade de  $H_2O$ , e se reproduziu, passando essa habilidade a seus descendentes, que também tinham vantagem em relação aos demais descendentes.



**Figura 10:** Porcentagem de oxigênio na atmosfera do planeta desde 3,8 bilhões de anos atrás até os dias de hoje. Os números acima indicam os estágios distintos de quantidade desse gás. Ga significa bilhões de anos atrás. A linha vermelha seria o limite máximo de oxigênio, e a verde seria o limite mínimo.

Assim, a cada ciclo do metabolismo de cada uma das cianobactérias, um pouquinho de oxigênio era liberado para a atmosfera. Em alguns milhões de anos, aconteceu o que chamamos de Grande Evento de Oxidação (GEO), que mudou para sempre a atmosfera e a biodiversidade do planeta.

Como para o resto da biodiversidade do planeta o oxigênio era tóxico, esse evento possivelmente foi o grande causador de uma grande extinção em massa que dizimou praticamente toda a diversidade biológica até aquela época. As linhagens sobreviventes se confinaram a locais onde não existia oxigênio, como no solo profundo, por exemplo. Na figura a seguir, podemos conhecer as causas dessa extinção, um exemplo de uma cianobactéria atual.



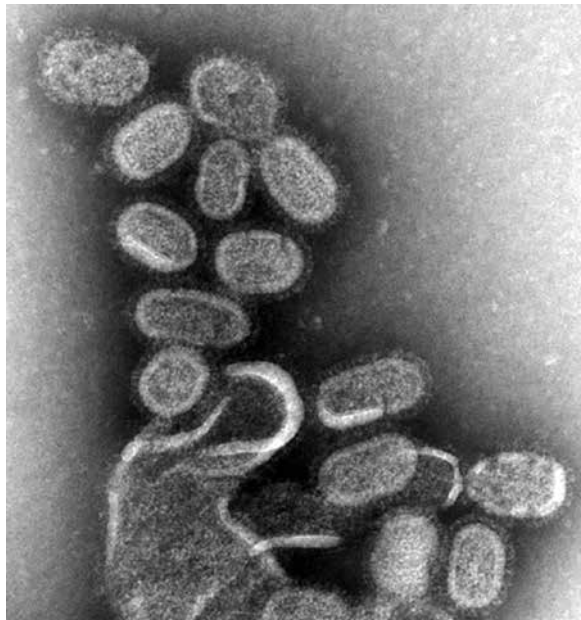
**Figura 11:** Cianobactérias do gênero *Tolypothrix*. Repare em sua coloração, que é resultado da presença de clorofila verde, como nas plantas é a clorofila que dá cor ao indivíduo.

## Seção 3: Diversidade de microrganismos

### Vírus

Quando pensamos em vírus, pensamos em doenças, mas veremos, nesta seção, que isso não faz sentido, pois a maior parte dos vírus é inofensiva ao ser humano. Os vírus estão no ar que respiramos a cada momento; eles estão no sistema digestório, quando ingerimos alimentos. Dentro do nosso corpo, existem representantes desses microrganismos em todos os locais. A maior parte deles é silenciosa e habita nosso organismo sem nos fazer qualquer tipo de mal. Aliás, podemos dizer que nosso corpo, mesmo saudável, é um reservatório de vírus.

Naturalmente, alguns vírus, os mais conhecidos, são causadores de doenças. O vírus da gripe, por exemplo, é um dos mais conhecidos. A cada ano, novas vacinas são desenvolvidas para combater a gripe, como já falamos. Porém, como a capacidade de modificação do vírus da gripe é elevada, cada vacina serve apenas para uma determinada parcela da diversidade do vírus.



**Figura 12:** Fotografia, em microscopia eletrônica, de um vírus *Influenza*, causador da gripe, ampliado 100.000x.

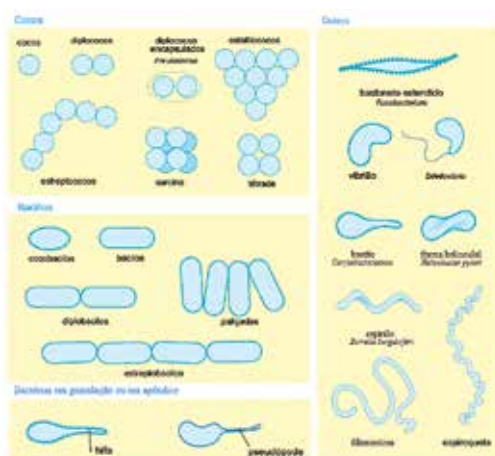
O vírus da gripe e o vírus do resfriado são vírus de RNA, ou seja, o genoma, em vez de estar em moléculas de DNA, como no resto dos

seres vivos, está em moléculas de RNA. Outros vírus apresentam genoma de DNA. Repare no esquema da figura em que, diferentemente de outros organismos, os vírus não apresentam membrana celular, mas sim uma estrutura que chamamos de envelope. Os vírus são tão simples, e o genoma deles é tão pequeno, que os mesmos não possuem nem os genes necessários para garantir a replicação do próprio vírus.

Os vírus são parasitas intracelulares obrigatórios, ou seja, eles não conseguem viver a não ser usando a maquinaria celular de outra célula, que eles parasitam. Por exemplo, para se reproduzirem, eles usam as proteínas e enzimas do hospedeiro. Por esse motivo, alguns cientistas não consideram os vírus organismos vivos, pois precisam de outros organismos para reproduzir.

## Bactérias

As bactérias apresentam uma membrana celular tão rígida que chamamos de parede celular. A parede celular protege a célula desses procariontes, mas as cianobactérias também fazem parte deste grupo. Assim como os vírus, a maior parte das bactérias também não nos faz mal algum. Aliás, esses microrganismos são fundamentais para nossa digestão, por exemplo. A chamada microbiota intestinal nada mais é do que o nosso conjunto pessoal de bactérias, sem o qual não conseguimos digerir muitos alimentos.



**Figura 13:** Tipos morfológicos diferentes de bactérias, mostrando a diversidade desse tipo de microrganismos.

## Arqueias

As arqueias já foram classificadas como bactérias. Entretanto, depois de muitos estudos, os cientistas as classificam separadamente, devido a grandes diferenças entre bactérias e arqueias, como podemos perceber no quadro.

### Extremófilas

Organismos que habitam locais com condições extremas.

As arqueias são chamadas de **extremófilas**, pois são microrganismos que habitam locais que acreditávamos serem inabitados. Algumas arqueias, por exemplo, conseguem sobreviver a temperaturas de mais de 100°C; outras, a uma salinidade altíssima ou nas fossas abissais. Sabendo mais sobre esses organismos, entendemos como a vida pode se adaptar a ambientes que nos parecem hostis.

**Quadro 1:** Comparação dos grandes grupos da diversidade: os domínios.

	Bacteria	Arqueias	Eukarya
<b>Classificação</b>	Procariontes	Procariontes	Eucariontes
Número de células	Uma	Uma	Uma ou mais
DNA (cromossomo)	Solto	Solto	No núcleo
RNA polimerase	Um tipo	Muitos tipos	Muitos tipos
Introns	Raros	Em alguns genes	Em muitos genes
Antibiótico estreptomicina	Não crescem	Crescem	Crescem
Parede celular	Com peptidoglicanos	Sem peptidoglicanos	Sem peptidoglicanos
Espécies com histonas	Nenhuma	Algumas	Todas



## Evolução é ciência, é fato e é teoria

Charles Darwin escreveu seu livro e propôs a teoria evolutiva há mais de 150 anos. Isso foi quando a Biologia era bem diferente do que ela é hoje, antes de descobrirmos a Genética, a Biologia do Desenvolvimento e a Neurobiologia. Um ponto interessante a se ponderar é que Darwin, ao propor o mecanismo pelo qual os seres vivos evoluem, isto é, a seleção natural, desconhecia a Microbiologia. Os microrganismos são seres que não conseguimos

enxergar a olho nu, os vemos apenas com auxílio de microscópio. Hoje, como já vimos, podemos comprovar que esses microrganismos também evoluem; por isso, são necessários antibióticos mais potentes para cepas resistentes de bactérias e novas vacinas desenvolvidas para os vírus que se tornaram resistentes à vacina anterior. Assim, a teoria de Darwin abrange uma diversidade de organismos maior do que aquela que ele usou para desenvolver sua teoria. Assim, a teoria de Darwin tinha poder de previsão, pois é compatível com novos conhecimentos, e não apenas com aqueles que Darwin usou para elaborá-la. Além disso, a teoria dele abrange também campos novos, como a Genética e o Desenvolvimento, que também eram desconhecidos por ele, mas são compatíveis com a sua teoria. Ou seja, a teoria de Darwin já foi e continua sendo diariamente testada por novas observações e, mesmo assim, ela sobrevive. Por isso, a teoria evolutiva é uma das mais sólidas em ciência!

---

## Resumo

- As flutuações na biodiversidade estão relacionadas com os eventos de extinção, surgimento e diversificação de novas linhagens;
- A fossilização é a preservação de partes ou de evidências de organismos fósseis. Dois tipos mais comuns de fossilização são a transformação das partes de um organismo em minerais e a inclusão em âmbar;
- Os *lagerstätte* são regiões do planeta que apresentam uma capacidade incomum de preservação dos restos fósseis. Estudando esses locais, podemos saber mais detalhes sobre os organismos já extintos, incluindo pelagem, partes moles do corpo e até couros;
- A diversidade fóssil do Pré-Cambriano é restrita a organismos procariontes, e o surgimento das cianobactérias provocou um evento de oxigenação da atmosfera terrestre nessa época;
- Os microrganismos estudados nesta aula são divididos em três grupos: os vírus, que são acelulares, e as bactérias e arqueias, que são celulares;

- Dentre os organismos celulares, as bactérias e as arqueias são organismos procariontes, pois não possuem um núcleo diferenciado em suas células. Os organismos eucariontes possuem o DNA inserido em um núcleo que protege o DNA do metabolismo celular nesses organismos;
- A diversidade biológica é dividida em três domínios: dois procariontes (Achaea e Bacteria) e um eucarionte (Eukarya).

## Referências para as figuras

By Charles Robert Knight - <http://www.flickr.com/photos/42132822@N03/4221859741/>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18723607>

Esqueleto

By Ryan Somma - Flickr, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9004614>

Paleontólogo escavando fósseis.

Fonte: WikiMedia Commons. Domínio Público. Autor: National Park Services.

Por Woudloperderivative work: Hardwiggderivative work: Burmeister - File:Geologic Clock with events and periods.svg, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18735478>

Âmbar

By Didier Desouens - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12429826>

Santanaraptor

Por Kabacchi - Santanaraptor - 01Uploaded by FunkMonk, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8385092>

Eoproscopia

Por Sam Heads - Obra do próprio, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6208819>

T rex

By RJPalmerArt - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=50067302>

## Archaeopteryx

Por H. Raab (User: Vesta) - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8066320>

## Rochas

Fonte: Domínio Livre. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Rock\\_Strata.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Rock_Strata.jpg)

## Oxigenação

By Oxygenation-atm.svg: Heinrich D. Hollandderivative work: Loudubewe (talk) - Oxygenation-atm.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12776502>

## Ciano

By Matthewjparker - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24119070>

## Virus

By Photo Credit: Cynthia GoldsmithContent Providers(s): CDC/ Dr. Terrence Tumpey - This media comes from the Centers for Disease Control and Prevention's Public Health Image Library (PHIL), with identification number #8160.Note: Not all PHIL images are public domain; be sure to check copyright status and credit authors and content providers.English | Slovenščina | +/-Originally from en.wikipedia; description page is/was here., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2544046>

## Formatos bactérias

Fonte: Domínio público.

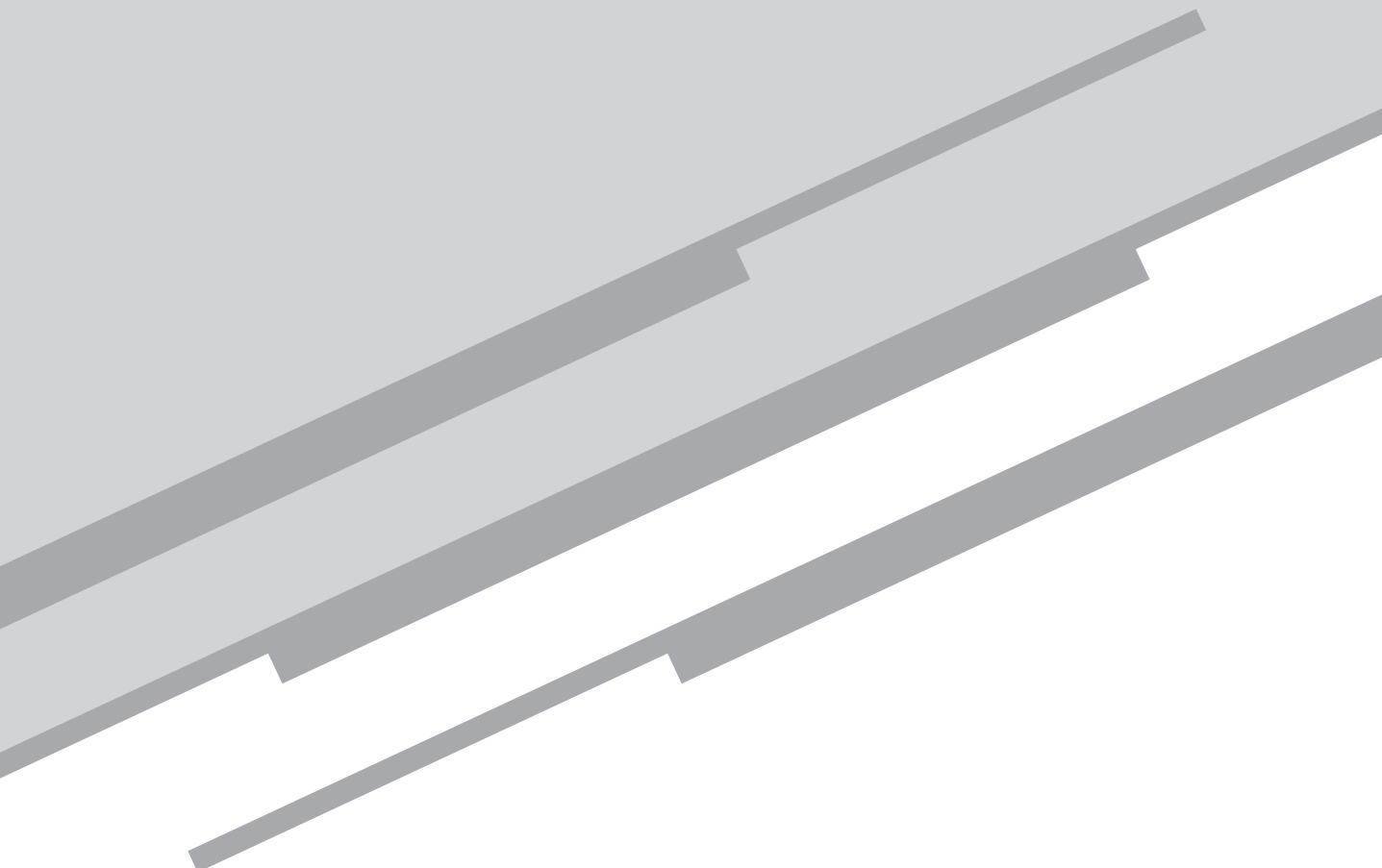
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bacterial\\_morphology\\_diagram\\_pt.svg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bacterial_morphology_diagram_pt.svg)





# Aula 08

Células e material genético

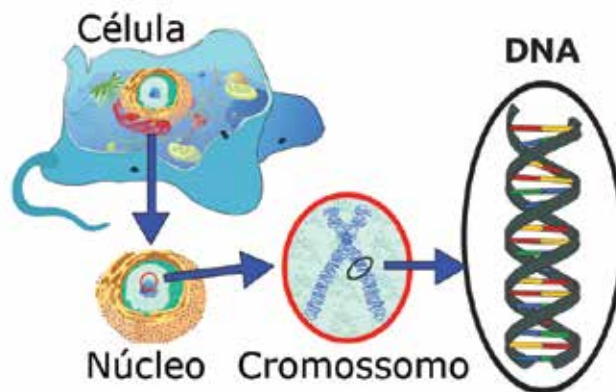


*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Os humanos e todas as outras espécies da diversidade biológica são compostos por células. Isso você já sabia. Mas será que você sabia que a poeira da sua casa é composta, principalmente, pelas suas células mortas e as de seus familiares? A diferença de tamanho observada entre uma espécie de inseto e a espécie humana está basicamente relacionada com o número de células em cada organismo. Os humanos têm muito mais células do que um inseto. Você possui trilhões de células no seu corpo. Outros seres vivos, como bactérias, são compostos por uma única célula, e são chamados de microrganismos e só com auxílio de um microscópio potente conseguimos enxergá-los, pois as células são microscópicas.

Boa parte dos processos necessários para a manutenção do nosso corpo, tais como a respiração, a produção de energia, a digestão de alimentos, ocorrem também no interior das células. Nesse sentido, as células podem ser entendidas como as unidades funcionais de nosso corpo.



**Figura 1:** Esquema ilustrando a relação espacial entre a célula e o material genético (DNA). Em cada uma das células do seu organismo, o material genético é o mesmo. O que torna as células e os tecidos diferentes em nosso corpo é o fato de que diferentes genes estão ligados e diferentes proteínas são sintetizadas.

As células também apresentam uma outra função importante. É no interior dos núcleos das células que está armazenado todo o seu DNA. Cada cromossomo é uma longa molécula de DNA enovelado que contém o material hereditário que você recebeu de seus pais e que é responsável por suas características.

Você foi formado graças à união de uma célula do seu pai, o esperma-

tozoide, com uma célula da sua mãe, o ovócito. Tanto o espermatozoide como o ovócito são células especiais, que chamamos de gametas. A união das características maternas e paternas na reprodução acontece na primeira célula de todas as espécies. A primeira célula é a chamada célula-ovo, formada a partir da fecundação dos gametas de seus pais. Assim, mesmo antes de você ser você, um membro da espécie humana, um estudante, você era um ovócito... e era também um espermatozoide.

Cada um de seus “pais celulares” continha a metade do material genético que iria formar você inteirinho depois da fecundação dos gametas. As características que você compartilha com cada um de seus pais estão nessa metade do material genético que cada um deles te passou. Dependendo da metade do material genético que seus pais passam a você, você vai herdar o nariz da sua mãe, as pernas do seu pai, o gosto pela leitura de sua avó paterna que (passou para seu pai que) passou para você.



**Figura 2:** Um espermatozoide com metade do material genético fecundando o ovócito com outra metade do material genético.

Toda informação biológica que passa de pais para filhos estava presente na metade do material genético que cada um de seus pais passaram para você. Seus pais, por sua vez, adquiriram as características deles do material genético que seus avós passaram a eles pelos gametas. Seus avós adquiririam de seus bisavós, e assim por diante...

## Objetivos

1. Identificar o material genético de organismos de reprodução sexual como a união de duas metades do material genético dos pais;
2. Caracterizar o material genético dos organismos vivos como o DNA e sua replicação;
3. Associar o processo de divisão celular com a origem dos erros de replicação do material genético, as mutações;
4. Estabelecer o papel central das mutações em evolução.

## Seção 1: A soma de metades

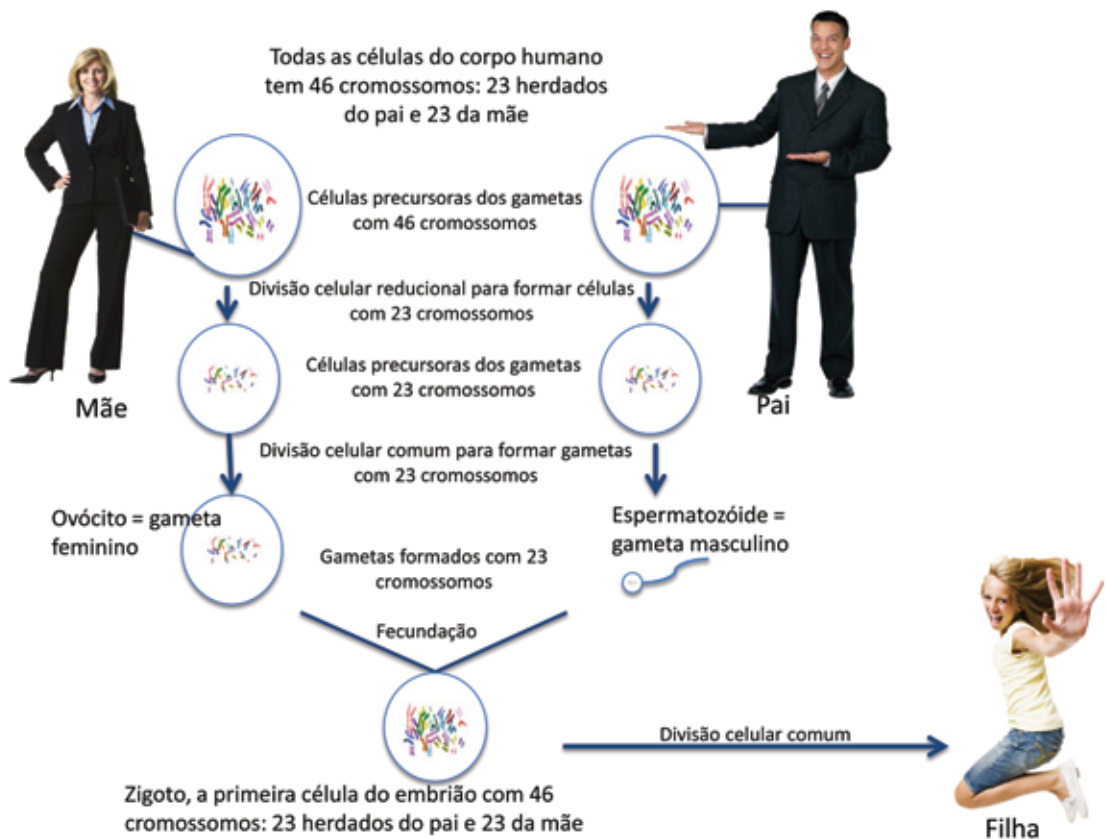
Cada uma dos seus trilhões de células possui cópias exatas do material genético original que estava no zigoto formado na fecundação. A partir desse zigoto, acontece uma sequência longa de duplicações do material genético, de forma a gerar células com a mesma composição do material genético do zigoto. Cada duplicação é seguida por uma divisão celular, e muitos ciclos de “duplicação do material genético/divisão celular” acontecem ainda dentro da barriga da mãe. A cada divisão celular, o material genético duplicado será dividido entre as duas células filhas. Essas duas células irão formar quatro células, que irão formar oito células, dezesseis, trinta e duas... até as trilhões de células que um bebê já tem antes de nascer.



**Figura 3:** Neste protista, a divisão celular gera duas células idênticas, com o mesmo material genético da célula original. Para isso, o material genético deve ser duplicado antes da divisão celular.

Cada célula de nosso corpo possui uma cópia exata do mesmo material genético que tinha no zigoto fecundado. Se os gametas são um tipo celular, como acontece a fecundação? Os filhos deveriam ter o dobro do material genético dos pais, o quádruplo dos avós, certo? Errado! A divisão celular que dá origem aos gametas é especial, chamada divisão celular reducional, pois dá origem a uma célula com metade do material genético da célula original.

Assim, tanto o ovócito como o espermatozoide são formados por esse tipo de divisão celular reducional e, por isso, apresentam apenas a metade (23 cromossomos) do material genético de outras células. Na fecundação do espermatozoide com o ovócito, a quantidade de material genético original é restaurada no zigoto (46 cromossomos), que é a primeira célula do feto.



**Figura 4:** Esquema mostrando a formação de gametas. Existem dois tipos de divisões celulares: a divisão celular reducional gera células com metade do material genético da célula original; a divisão celular comum gera células com a mesma quantidade do material genético da célula original.

Vamos conversar agora sobre como surgem as diferenças entre os membros de uma espécie. Quando a célula-ovo é formada, essa única célula tem que dar origem a todas as outras células do corpo de um ser multicelular, como são os humanos. Para isso, o material genético original da fecundação precisa ser duplicado ou replicado, de forma a garantir que as duas células filhas tenham exatamente o mesmo material genético da célula-ovo.

Durante o processo de multiplicação das células, o material genético deveria ser replicado de maneira perfeita, pois só assim todas as células do organismo possuirão exatamente o mesmo material genético. Entretanto, dentro das células existe uma molécula especial responsável pela duplicação do material genético. Quando a célula está prestes a se dividir, essa enzima inicia o processo de duplicação do material genético. Nesse processo, a molécula replicadora pode cometer erros, que são chamados mutações.

Uma mutação é, portanto, um erro no evento de duplicação do DNA, que irá alterar o material genético em uma célula de um organismo. Repare numa questão importante agora: todas as células descendentes da célula mutante serão mutantes também. Ou seja, se a mutação acontecer muito cedo nas divisões celulares, pode acontecer que boa parte das células do organismo apresente aquela mutação. Mais importante, se a mutação acontecer em um gameta a ser fecundado, o bebê ou o filhote irá apresentar todas as suas células com a mesma mutação, inclusive seus próprios gametas. Assim, quando esse gameta for fecundado, os filhos dos filhotes também irão apresentar a mutação. Neste caso, as mutações serão passadas para as gerações. Assim, surgem as novidades e as novas características das espécies ao longo da evolução.

Note que a espécie humana apresenta um cariótipo de 46 cromossomos, mas outras espécies têm número diferente de cromossomos. Porém, é apenas através da mutação que a variabilidade é inserida na população. Como sem variabilidade não há evolução e nem adaptação, a mutação é, em última análise, o processo responsável pela evolução e diversificação da vida. Lembra-se do time de futebol? Pois é; se na cidade só houvesse um time, não haveria mudança, mesmo com a venda da escola. Se todas as cenouras que nascessem fossem exatamente da mesma cor, não teria havido seleção artificial para as cores diferentes.

O processo de anagênese é a evolução que ocorre ao longo do tempo em uma única espécie, e o processo de cladogênese é a evolução isolando duas linhagens que não irão mais compartilhar seu caminho evolutivo.

vo. Após a especiação, as duas espécies descendentes evoluem independentemente para sempre. O papel fundamental da mutação é o mesmo para todas as espécies.



**Figura 5:** Uma lagosta mutante (à esquerda) e uma lagosta de coloração normal (à direita). Organismos mutantes apresentam a mutação em uma parte de seu corpo ou em todo ele, como no caso da lagosta azul. A mutação é resultado de uma duplicação com erro do material genético.

## Seção 2: Somos todos mutantes

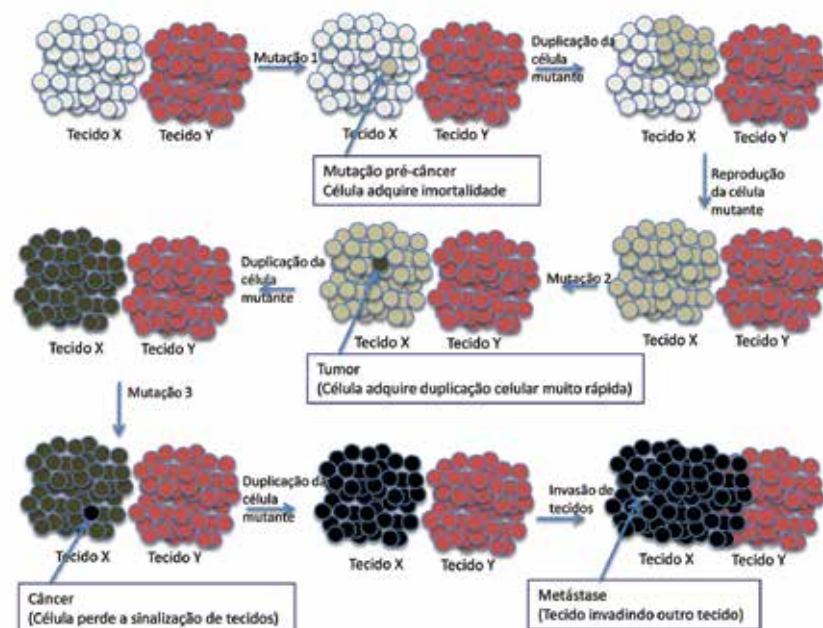
Se a poeira de nossa casa é composta inclusive por células mortas do nosso corpo, logo devemos ter algum mecanismo de compensação, de forma que não fiquemos cada vez menores com o passar dos anos. Realmente, nossas células perdidas no banho, por exemplo, são repostas imediatamente por novas divisões celulares que ocorrem nas camadas inferiores de nossa pele. Entretanto, essa divisão celular não é reducional, como a que gera gametas; ela gera células com a mesma quantidade de material genético da célula que foi duplicada.

Vamos supor que em uma dessas divisões celulares, a molécula replicadora cometeu um erro em uma célula da pontinha do seu dedo. O erro aconteceu quando a molécula estava duplicando a parte do material genético que determina cor de pele. Assim, com a mutação, a célula mutante ficou com uma coloração mais escura. Repare que, de início, você não irá nem perceber a coloração estranha, pois apenas uma célula irá conter a pigmentação diferenciada. Entretanto, todas as células filhas geradas a partir da divisão celular dessa célula mutante ficarão com a mesma coloração estranha. Alguns meses se passam, e você, de repente, nota uma mancha no seu dedo! Pois é, as mutações são tão comuns, aliás, que não devem nos assustar a princípio. É assim que nascem algumas marcas na nossa pele. Entretanto, um ponto importante para se lembrar é que, quando o organismo morrer, a mutação também irá se perder.



Essa não será uma mutação importante para a evolução, pois ela será perdida com a morte do organismo mutante.

Um outro exemplo de mutação que não afeta os descendentes, mas afeta o organismo afetado, é o câncer. Em primeiro lugar, o número de divisões celulares de uma célula é finito; uma vez que ela tenha se dividido nesse número de vezes, a célula entra em processo de morte celular programada. Um exemplo é quando o girino perde a cauda na metamorfose para adulto, pois as células da cauda entram nesse processo. Entretanto, quando essa sinalização do número de vezes é perdida, surge uma linhagem de células imortais, ou seja, que se dividem indefinidamente. Esse é o início de um tumor.



**Figura 6:** O câncer é um exemplo de uma sequência de mutações no corpo que não afetam os descendentes. Toda célula nasce com a capacidade de reconhecer seu próprio tecido e interromper a divisão celular, se encostar em células de tecidos diferentes. Células cancerosas perderam, por mutações, essa habilidade.

Esta linhagem imortal de células acaba acumulando muitas mutações e se torna um câncer. Uma mutação associada ao câncer é a que regula o mecanismo de sinalização que reconhece células do mesmo tecido e células de tecidos diferentes. Quando uma célula de tecido di-

ferente é reconhecida, o processo de divisão celular é interrompido, de forma a evitar a invasão de tecidos. Células cancerosas são células que perderam, por mutações, estes sinais de parada de divisão pelo contato com outros tecidos do corpo. Desta forma, elas se dividem, invadindo outros tecidos do corpo e espalhando o câncer por todo o corpo. A metástase é o ponto do processo cancerígeno no qual as células cancerosas já atingiram o sangue e tem o potencial de atingir todos os pontos do corpo.

### Seção 3: O material genético e sua duplicação

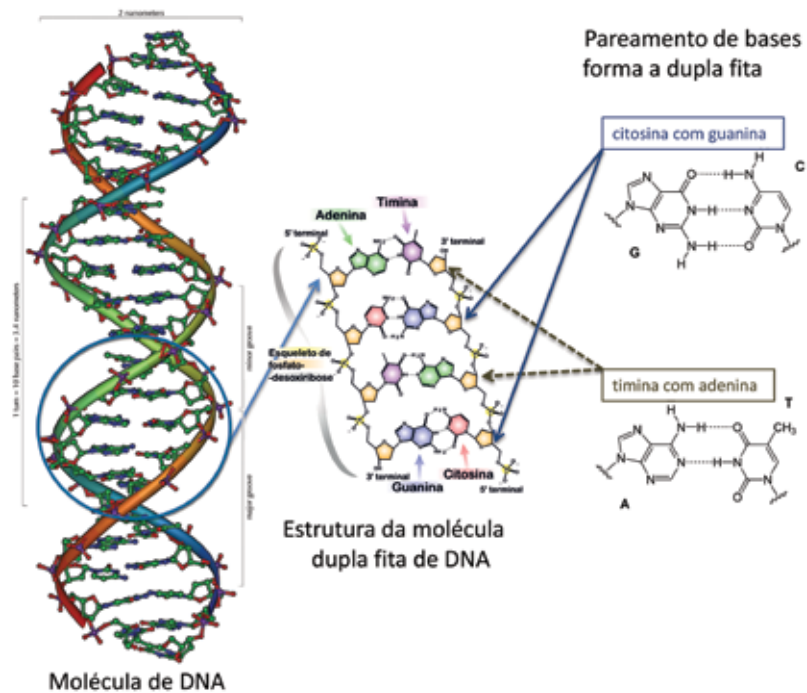
A informação biológica dos seres vivos está na molécula de DNA, que é o nosso material genético. Cada gene tem informação para codificar uma proteína ou um RNA. Cada cromossomo humano apresenta centenas de genes alinhados, um após o outro, cada um destes com uma função diferente. Todas as características herdáveis estão nos genes que passam de ancestrais para descendentes. Em eucariontes, os genes são divididos em porções codificantes de proteínas, que são os exons, e porções não codificantes, que são os íntrons. Os procariontes não possuem íntrons. A chave para a tradução das sequências de DNA nas sequências de proteínas está no código genético.



**Figura 7:** Esquema mostrando um gene em um cromossomo. Cada cromossomo é composto por uma única dupla fita de DNA. As sequências de DNA de um gene estão divididas em exons e íntrons nos eucariontes.

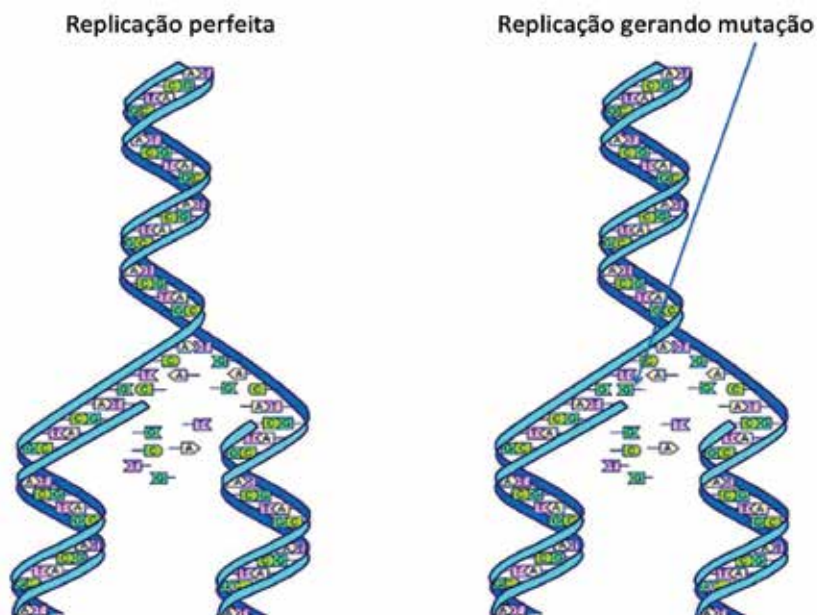
Com exceção de alguns vírus, cujo material genético é constituído da molécula de RNA, todos os organismos eucariontes e procariontes apresentam material genético de DNA. A diferença entre o DNA e o RNA

está na presença de um átomo de hidrogênio (H) no DNA, enquanto o RNA tem uma hidroxila (OH), além das bases nitrogenadas que são diferentes em cada molécula. O DNA tem adenina, timina, guanina e citosina como bases nitrogenadas, enquanto o RNA tem adenina, uracila, guanina e citosina como bases.



**Figura 8:** Esquema mostrando a molécula do DNA em dupla fita e a molécula em mais detalhes. O pareamento de bases une as duas fitas.

A base nitrogenada adenina em uma das cadeias sempre se pareia com timina na outra cadeia através de duas pontes de hidrogênio; a base citosina se pareia com guanina com três pontes de hidrogênio. Esse pareamento de bases é o que permite a duplicação da molécula de DNA. Neste caso, a dupla fita se rompe pela quebra das pontes de hidrogênio, e duas novas fitas são sintetizadas, tendo cada fita da cadeia original como molde. Pelo fato de as novas moléculas de DNA geradas apresentarem uma fita nova e uma fita antiga, a duplicação de DNA é chamada de semiconservativa. Assim, duas moléculas de DNA em dupla fita são formadas - cada uma delas com uma fita original e uma fita recém-sintetizada, como mostra a Figura 9.



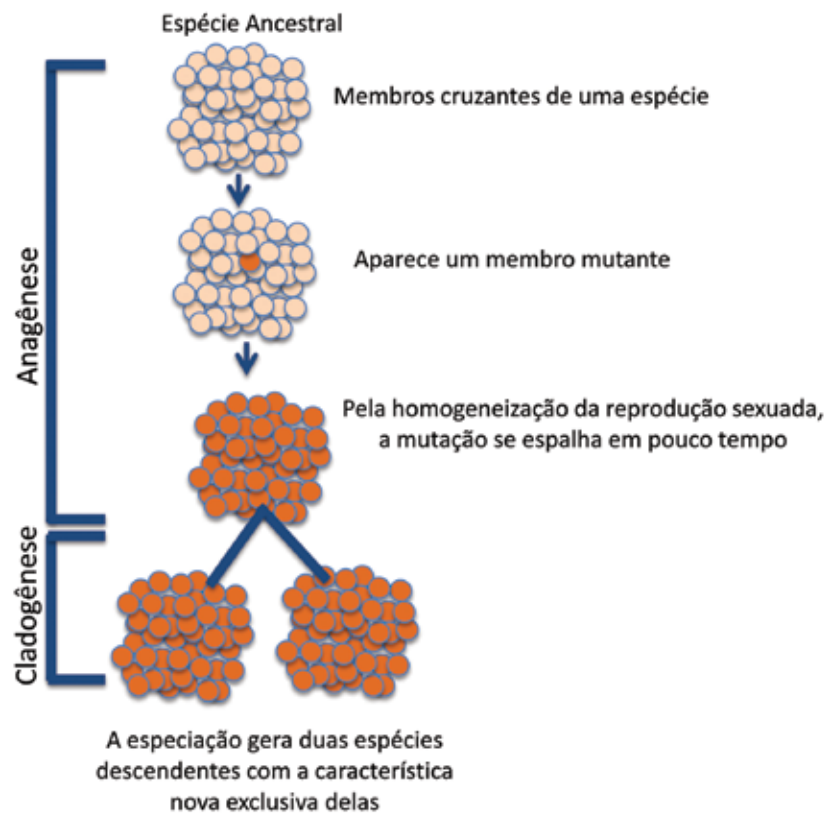
**Figura 9:** Esquema mostrando a duplicação, ou replicação, semiconservativa da molécula do DNA em dupla fita. O pareamento de bases é rompido para o processo. À esquerda, a replicação perfeita; à direita, uma replicação gerando mutação (final da seta), que envolve a troca da base citosina (C), que normalmente pareia com G, para uma guanina (G).

A informação genética que é passada de pais para filhos está na sequência de bases nitrogenadas na cadeia de DNA. Ou seja, as mutações são mudanças nas sequências das bases, transformando um gene em outro. Boa parte das mutações são consertadas pelo sistema natural de reparo da célula logo depois que acontecem, mas as mutações que não são consertadas fornecem a matéria-prima para evolução. A maior parte das sequências de DNA mutantes vão formar proteínas diferentes das originais, pois a síntese de proteínas tem o DNA como molde do processo.

## Seção 4: Erros que deram certo

Por outro lado, se o erro de duplicação acontecer na célula que dará origem a gametas (espermatozoides ou ovócitos), o que irá acontecer? O filhote gerado a partir da fecundação desse gameta apresentará a característica mutante em todas as suas células, incluindo seus próprios gametas. Como a mutação também estará presente em seus gametas, seus filhotes e os filhotes destes também apresentarão a característica mutante. Assim, toda a linhagem descendente deste indivíduo mutante irá apresentar a mutação, ou seja, irá ser diferente.

A mutação pode acarretar em uma modificação na cor, mas também pode ser no cheiro, na quantidade de pelos, na altura, na velocidade, na capacidade de enxergar longe, ou em qualquer outra característica herdável que passe de ancestrais para descendentes por meio do material genético modificado. Os descendentes que receberam o material genético com a mutação irão passá-lo nesta mesma condição a seus próprios descendentes, iniciando uma linhagem diferente das demais da espécie. O filhote irá, portanto, receber o material genético com, por exemplo, a capacidade de enxergar longe antes mesmo de conseguir abrir os olhos. Essa, por exemplo, seria uma mutação favorável que poderia resultar em uma adaptação característica de uma espécie.



**Figura 10:** Esquema ilustrando a formação de uma linhagem mutante e a especiação dessa linhagem. A evolução das espécies é dividida nas mudanças que ocorrem ao longo de uma linhagem (anagênese) e a divisão de uma linhagem ancestral em duas linhagens descendentes (cladogênese), pelo processo de especiação.

Até as adaptações que encontramos em todas as espécies são decorrentes de alguma mutação no material genético de antepassados. Se

as adaptações não estivessem no material genético, elas não passariam para os filhotes do mutante; ela seria perdida com a morte do organismo variante. Nosso dedão do pé, que funciona como uma alavanca para o andar bipedal, é passado para os nossos descendentes porque o gene que determina o dedão humano está no material genético.

Você até pode pensar que a lógica é meio estranha... Como é que um erro na duplicação do material genético no interior de uma única célula irá produzir efeitos benéficos para todo o organismo? Nos seres humanos, a maior parte das mutações gera embriões que não nascem. São os chamados abortos espontâneos, quando a mulher engravida, mas perde o bebê. Muitas vezes, a mulher nem chega a saber que estava grávida, pois o aborto acontece logo depois da fecundação. Mas como um erro pode gerar uma adaptação? Vejamos...

Você sabia que algumas das melhores receitas foram criadas por chefes de cozinha que erraram ao colocar um ingrediente? Em vez de colocar sal, colocou açúcar, e o prato ficou mais gostoso ainda! O *brownie*, por exemplo, foi criado por um cozinheiro que se esqueceu de colocar fermento no bolo de chocolate! Sem admitir o erro, ele serviu a sobremesa “mal feita”, mas os clientes adoraram!



**Figura 11:** *Brownie* de chocolate. O erro que deu certo. Uma delícia perpetuada para sempre.

É claro que é mais fácil conhecer os exemplos de erros na cozinha que, no final, deram certo. Ninguém vai ficar comentando sobre o bolo solado ou o feijão no qual o cozinheiro colocou açúcar em vez de sal, e

ninguém quis comer. Esses erros ninguém vai repetir, pelo menos, não de propósito. Na Natureza, como na cozinha, o erro mais comum é o que não deu certo, mas esses erros não serão repetidos. Na Natureza, o mutante que deu errado morre antes da sua reprodução, que perpetuaria o erro nos filhotes, ao passo que, na cozinha, o cozinheiro nem menciona o que deu errado... Já o erro que deu certo, ao contrário, se perpetuará na população, como a receita deliciosa que foi criada por acaso.

Assim, da mesma forma ocorre a evolução: quando o erro melhora alguma característica do indivíduo variante, ele aumenta as chances de esse indivíduo mutante sobreviver e se reproduzir. Ao se reproduzir, o mutante passa a mutação aos descendentes, o que aumenta sua frequência. Quando os descendentes nascem, eles também terão maiores chances de chegar à fase adulta e se reproduzir, gerando ainda mais filhotes com a mutação. Em poucas gerações, a frequência da mutação aumenta tanto que todos os organismos da espécie irão apresentá-la. Essa é a evolução por seleção natural, que gera uma adaptação na espécie. Repare que, em todas as espécies descendentes dessa espécie mutante, a adaptação também será herdada diretamente.

## Resumo

- A fecundação dos gametas paternos gera uma única célula-ovo que, por meio de divisões celulares, dá origem aos trilhões de células de um humano;
- A divisão celular que dá origem aos gametas é especial, pois é uma divisão celular reducional. Assim, tanto o ovócito como o espermatozoide contêm apenas metade do material genético das demais células do corpo e, na fecundação, a quantidade de material genético é restaurada;
- Todo o material genético da célula-ovo deverá ser duplicado para formar duas células filhas. Mais uma vez, o material genético das duas células filhas será duplicado para formar quatro células netas, e assim por diante, até o humano estar formado com seus trilhões de células - cada uma com a mesma quantidade de material genético como da célula-ovo;
- O processo de duplicação do material genético não é perfeito; é passível de erros, chamados mutações;



- Uma célula-ovo mutante dará origem a células filhas também mutantes com gametas que também apresentam a mutação. Se um gameta mutante for fecundado, tal mutação será passada para os descendentes do mutante. Assim, surge a diversidade dentro das espécies biológicas.

## Referências para as figuras

Célula eucariótica e material genético. By MesserWoland and Szczepan1990 - Own work (Inkscape created), CC BY-SA 3.0, By Eukaryote\_DNA.svg: \*Difference\_DNA\_RNA-EN.svg: \*Difference\_DNA\_RNA-DE.svg: Sponk (talk)translation: Sponk (talk)Chromosome.svg: \*derivative work: Tryphon (talk)Chromosome-upright.png: Original version: Magnus Manske, this version with upright chromosome: User:Dietzel65Animal\_cell\_structure\_en.svg: LadyofHats (Mariana Ruiz)derivative work: Radio89derivative work: Radio89 - This file was derived from Eukaryote DNA.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20539140>

### Fecundação

By Unknown - <http://www.pdimages.com/web9.htm>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=392819>

### Citocinese

By TheAlphaWolf - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14940040>

### Cariotipo humano (carótipo reduzido foi modificado desta figura)

By Jane Ades, NHGRI - <http://www.genome.gov/pressDisplay.cfm?photoID=98>, Public Domain, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=24195901>

Lagosta azul Fonte: Autor: Steven G. Johnson. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Blue-lobster.jpg>

Lagosta comum By No machine-readable author provided. DrKjaergaard assumed (based on copyright claims). - No machine-readable source provided. Own work assumed (based on copyright claims)., CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=631360>

### DNA estrutura

Por Lijealso - Obra do próprio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5071986>



DNA molécula Por Michael Ströck (mstroeck) - Created by Michael Ströck.Copied to Commons from en.wikipedia.org., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=694302>

DNa nucleotídeos

Por Yikrazuul - Obra do próprio, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5141577>

Por Yikrazuul - Obra do próprio, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5141568>

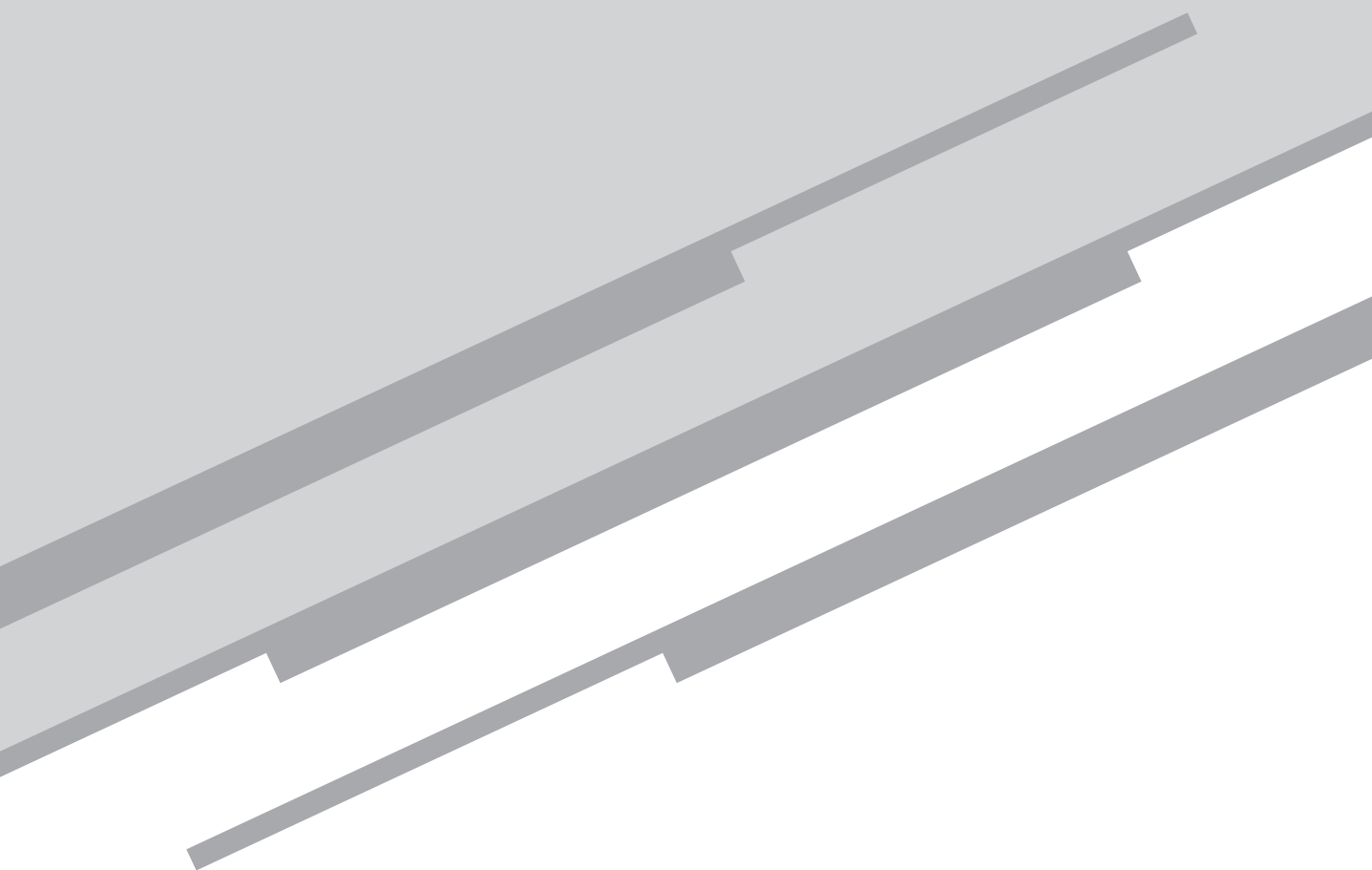
Duplicação do dna

Por US Department of Energy - DOE Human Genome project, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36123>

Brownie CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=596071>

# Aula 09

De um tão simples começo

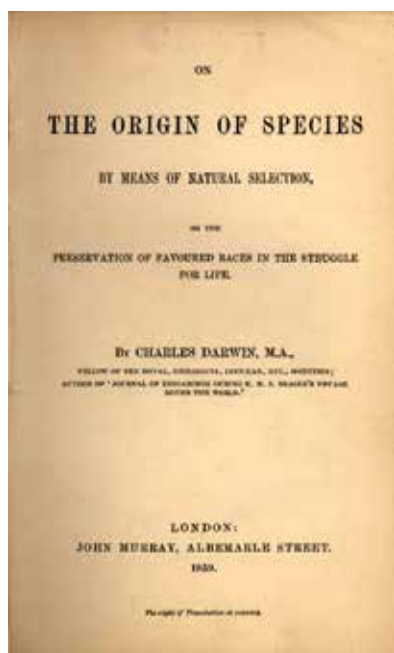


*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

“De um tão simples começo, inúmeras e maravilhosas formas evoluíram e ainda evoluem.”

Essa é a última frase do livro *A Origem das Espécies*, de Charles Darwin. Com essa frase, Darwin conclui que a diversidade biológica não surgiu da forma como a percebemos hoje em dia; ela foi se modificando aos poucos pelos mesmos processos evolutivos. Ao longo do tempo, mutação, seleção natural e a especiação moldaram a diversidade biológica atual e irão moldá-la no futuro.



**Figura 1:** Livro *A origem das Espécies*, de Charles Darwin. A primeira edição foi publicada em 24 de novembro de 1859. Muitos historiadores consideram-no o livro mais importante já escrito, pois explica nossa origem, nossa fisionomia e nosso lugar no mundo biológico.

Nosso início foi simples. A primeira molécula viva foi aquela que adquiriu a capacidade de se reproduzir, passar para seus descendentes suas características, e de sofrer alterações herdáveis em seu material genético. Mas, qual é a probabilidade de a primeira molécula complexa ter tido justamente a função de autoduplicação? Tão pequena, que provavelmente não foi isso o que aconteceu. Porém, a explosão biológica só aconteceu quando surgiu a primeira molécula que *tinha* essa função de duplicação. Pode ter havido muitas outras, milhões ou bilhões de outras moléculas anteriores que, por não terem as características da vida,

perderam suas funções ao serem degradadas. A única molécula que deu origem à diversificação biológica é aquela que conseguiu se reproduzir (reprodutibilidade), adquirindo mutações (mutabilidade) e passando para seus descendentes tais capacidades (herdabilidade). Chamamos as propriedades de básicas pois, uma vez que elas têm como resultado a evolução, todas as características, funções e processos que observamos na diversidade biológica podem evoluir dessa conjunção.

Em evolução, não existem hiatos nem intervalos. Assim, o processo evolutivo é contínuo desde a origem da vida até os dias de hoje. Por isso, faz sentido dizer que todos os organismos vivos são igualmente evoluídos, pois todos evoluímos continuamente desde a origem da vida. Nosso primeiro ancestral comum com o restante da diversidade biológica é a origem da vida. Entretanto, os organismos hoje são muito mais complexos do que as primeiras formas de vida do nosso planeta. Para entender o quão simples foi a primeira vida, precisamos pensar nos seres vivos mais simples **e o que eles têm** em comum com os mais complexos. Nesta aula, vamos entender os passos que levaram a química complexa a se tornar a Biologia simples.

## Objetivos

1. Identificar as propriedades básicas da vida: herdabilidade, mutabilidade e reprodutibilidade;
2. Caracterizar a seleção natural como propriedade emergente dos sistemas vivos;
3. Perceber o paradoxo ligado à origem da síntese de proteínas: “Quem veio primeiro: as proteínas ou os ácidos nucleicos?”;
4. Entender como a teoria do Mundo do RNA propõe uma solução para o paradoxo da origem da vida;
5. Expor teorias alternativas que explicam onde a vida surgiu.

## Seção 1: De um tão simples começo...

Se tivéssemos um meio de enxergar a Terra primitiva há 4,5 bilhões de anos, veríamos um planeta bem diferente daquele em que nós habitamos. Um planeta sem vida, com **meteoros** gigantes se chocando na superfície, esterilizando o planeta como 200 bombas atômicas ex-

## Meteorito e meteoro

Meteorito é um corpo celeste (fragmento de planetas ou estrelas) que cai na superfície terrestre. Ao atingir nossa atmosfera, o meteorito cria um efeito luminoso que podemos perceber no céu à noite (como estrela cadente), como mostra a figura. O efeito luminoso é chamado de meteoro.

plodindo ao mesmo tempo! Um início atribulado teve o nosso planeta. Entretanto, depois de uns 500 milhões de anos, a adolescência passou, e as coisas se acalmaram.

A Terra, que era uma bola de lava, solidificou, formando uma crosta terrestre, e os gases liberados criaram uma atmosfera em nosso planeta primitivo. Os **meteoritos** foram ficando mais raros e, aos poucos, a Terra se tornaria um lugar menos turbulento. Com a estabilidade, as moléculas simples reagem, formando moléculas mais complexas, e estas não eram imediatamente degradadas. Porém, para isso, também seriam necessários um meio aquoso e uma fonte de energia.

Mas isso não era um problema. A atmosfera da Terra primitiva, além de alguns gases inorgânicos (metano, amônia), também continha vapor d'água. Assim, com o resfriamento do planeta, o vapor d'água que evaporava condensava, formando nuvens. Portanto, com a estabilidade do planeta, chuvas intensas formaram os imensos mares primitivos, que proviam um meio aquoso para tais reações. Assim, se iniciava o ciclo da água, fundamental para o aparecimento da complexidade química e da origem biológica. Além disso, água sob a forma de gelo é comum em corpos celestes, inclusive naqueles que caem na superfície terrestre atualmente. Afinal, o hidrogênio e o oxigênio estão entre os elementos mais comuns do universo.

Para formar moléculas complexas a partir de simples, é ainda necessária uma fonte de energia. Os raios que caíam na superfície com as tempestades forneciam energia elétrica. Além disso, a luz solar e os vulcões submarinos proviam a energia térmica necessária para as reações químicas. Mas como moléculas simples podem se tornar complexas sem o auxílio de enzimas proteicas? Leia o box a seguir e descubra.



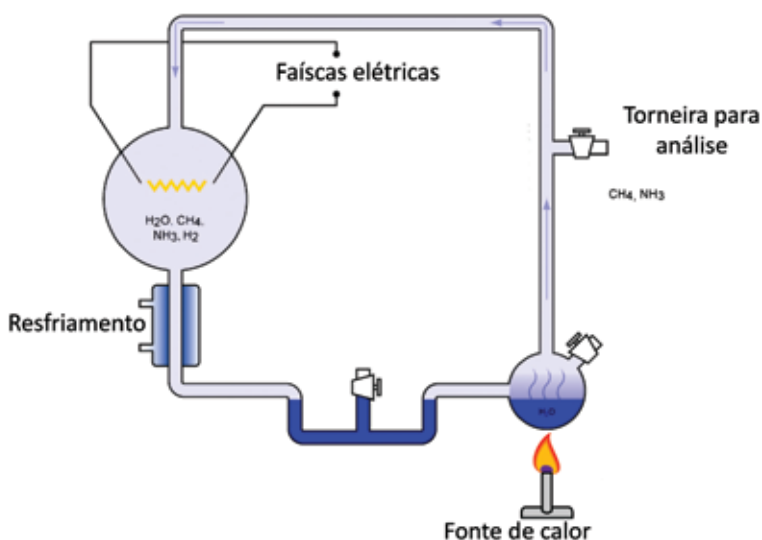
## O experimento de Miller e Urey

Você sabia que encontramos aminoácidos, os mesmos monômeros básicos das proteínas, em meteoritos vindos do espaço? Vamos aproveitar esse momento para formalizar como uma hipótese científica se torna uma teoria. Tudo começa com um fato, ou seja, algo que podemos observar. Lembre-se de que hipóteses e teorias explicam fatos.

*Fato observado:* Aminoácidos são encontrados em meteoritos vindos do espaço que caem na superfície da Terra. O meteorito Murchison apresentava mais de 90 tipos de aminoácidos, 19 deles encontrados em nosso planeta.

*Hipótese:* aminoácidos são formados espontaneamente e, por isso, estão presentes em corpos celestes, como nos meteoritos.

*Experimento:* os cientistas Stanley Miller e Harold Urey, em 1953, na Universidade de Chicago, nos Estados Unidos, desenharam um experimento para testar essa primeira hipótese. Num frasco vedado, compostos inorgânicos (metano, amônia, água) e fontes de energia (eletrodos e calor) simulavam um possível ambiente da Terra primitiva. Os eletrodos simulavam os locais onde raios elétricos caíam no planeta, e a fonte de calor simulava os locais próximos a vulcões. Eles queriam verificar se moléculas simples poderiam reagir e se transformar em outras mais complexas espontaneamente, ou seja, sem auxílio de enzimas ou de outras moléculas orgânicas.



*Resultado:* Qual não foi a surpresa dos cientistas ao perceberem que, em uma semana, aminoácidos apareceram naturalmente nesse frasco vedado.

*Conclusão:* a primeira hipótese não pode ser rejeitada. Aminoácidos são formados espontaneamente e, por isso, estão presentes nesses corpos celestes. Assim, a primeira hipótese continua

cientificamente válida até o próximo experimento que a ponha à prova novamente. Muitos outros testes já chegaram à mesma conclusão de Miller e Urey. Tais experimentos variaram as concentrações e as moléculas usadas originalmente, e algumas combinações conseguiram gerar 20 aminoácidos diferentes de maneira espontânea. Dessa forma, a hipótese se torna uma teoria científica, que é o mais alto grau de confiança científica em uma ideia explicativa de um fato.

---

O conjunto das funções proteicas é o que estrutura, mantém o funcionamento e reproduz o organismo vivo, pois nenhum organismo hoje sobrevive nem tem seu material genético replicado sem proteínas e sem enzimas proteicas, que fazem esse papel de catálise. Assim, a formação de aminoácidos, que são os monômeros que formam as longas proteínas e enzimas proteicas, é um passo crucial para entendermos nosso início. Daí, a importância do experimento de Miller e Urey. Por outro lado, o DNA, e não as proteínas, apresenta a informação herdável e mutável que passa de ancestral para descendentes. A informação da vida está numa sequência dos monômeros do DNA, que são as bases nucleotídicas. São quatro bases possíveis (A, T, C, e G) que funcionam como letras cuja sequência determina a cor do cabelo, o tipo de unha, as propriedades das enzimas digestórias, etc.

Como a vida é um somatório das propriedades de replicação, de herança e de mutação, a chave para a origem da vida passa pela origem da síntese de proteínas que ocorre em todos os organismos vivos. Sem o DNA, o molde para a síntese de proteínas não passa para os descendentes e, sem as proteínas, o DNA não se replica, pois existem enzimas proteicas responsáveis por essa duplicação. Opa, temos um grande problema aqui! Aliás, temos um paradoxo! Como imaginar um processo evolutivo em que a complexidade do sistema biológico vai aumentando gradualmente se, para a síntese de proteínas, precisamos de duas moléculas complexas e dependentes entre si? Mas, não se preocupe, a solução para esse paradoxo está aqui nesta aula.



**Figura 2:** Esquema demonstrando o que é um paradoxo.

### Paradoxo

Algo aparentemente verdadeiro, mas que apresenta uma contradição lógica. Um exemplo de paradoxo famoso é “Quem veio primeiro: o ovo ou a galinha?” É um paradoxo, pois a galinha nasce de um ovo e quem botou o ovo foi uma galinha.

O nucleotídeo adenina é formado em experimentos como o de Muller e Urey, usando o composto cianeto de hidrogênio, mas os outros nucleotídeos são mais complicados. Além disso, da mesma forma que aminoácidos são encontrados em corpos celestes, outros elementos também podem ser trazidos por eles, que, juntos com outros elementos terrestres, poderiam ter contribuído para a formação da primeira molécula viva.

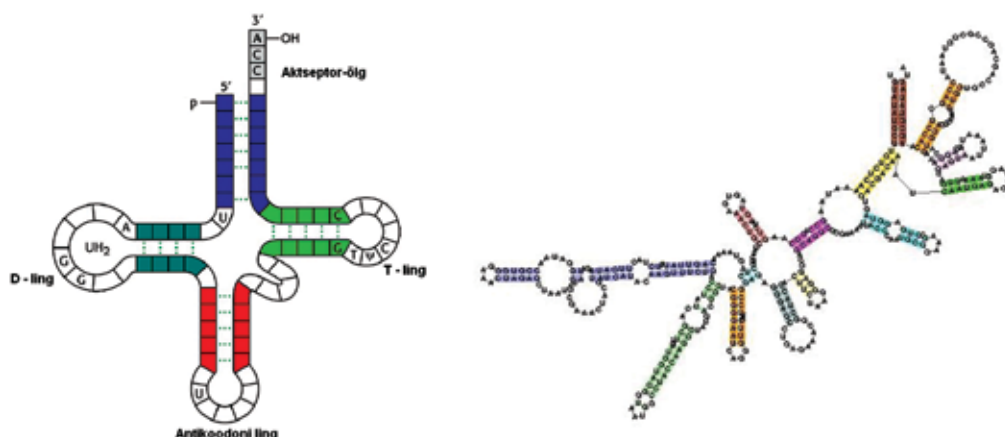
Outros cientistas sugerem que outras bases nitrogenadas poderiam ter sido formadas com a argila, que pode ser considerada uma enzima natural. Por sua porosidade, a argila pode alojar moléculas simples em seus poros. Assim, uma molécula simples próxima à outra aumenta a possibilidade de uma reação química natural (sem enzimas) as transformar em uma molécula complexa. Dessa forma, por intermédio da argila, bases nitrogenadas podem ser formadas espontaneamente a partir de compostos simples. Fósforo, outro elemento importante dos nucleotídeos, é encontrado em abundância na superfície terrestre. O açúcar, último componente dos nucleotídeos, também pode ser formado em experimentos semelhantes aos de Muller e Urey.

## Seção 2: A primeira vida

Entretanto, aminoácidos e nucleotídeos não significa vida, pois a vida está na associação entre proteínas e ácidos nucleicos que é o que resulta nas propriedades da vida. O paradoxo desapareceria, se os primeiros organismos não precisassem de proteínas para duplicarem seu material genético. Isto é o paradoxo da origem da vida; seria solucionado, pois uma única molécula (ácido nucleico) teria todas as propriedades da vida.



Hoje, os ácidos nucleicos não conseguem se replicar sozinhos, mas um dia puderam. Isto foi o que propôs Walter Gilbert, um físico americano, quando sugeriu que o primeiro sistema biológico era uma molécula de RNA. Ele e seus colegas conceberam o que chamamos de teoria do Mundo do RNA, nos anos 70. Segundo sua teoria, o primeiro mundo biológico era um mundo no qual moléculas de RNA formavam o primeiro mundo biológico dos oceanos primitivos. Por que o RNA? Na síntese proteica, o RNA está presente em funções primordiais e diversas: RNA ribossomal (liga os aminoácidos e ancora a síntese), RNA transportador (carrega o aminoácido e o respectivo anticódon), mensageiro (RNA molde do gene em DNA), além de outros RNA menores que foram descobertos recentemente.



**Figura 3:** À esquerda, a estrutura secundária de um RNA transportador; à direita, a de um RNA ribossomal. A capacidade de formar estruturas secundárias deve contribuir para a capacidade de realizar reações químicas desta molécula com as da síntese de proteínas.

Segundo Gilbert, essa molécula apresenta as três propriedades da vida e, por isso, poderia evoluir sozinha por seleção natural, caracterizando um primeiro sistema biológico. O RNA pode ser o material genético, como nos vírus da gripe e no HIV, nos quais os genes estão localizados em fitas de RNA, e não de DNA, como em todos os outros organismos. Assim, o RNA apresenta claramente as propriedades de herdabilidade e mutabilidade. Além disso, em nosso corpo, temos enzimas que não são cadeias de proteína, mas constituídas de fitas de RNA. Essas são chamadas de **ribozimas**, que apresentam funções semelhantes às das enzimas.

## Ribozimas

Enzimas naturais e artificiais formadas por fitas de RNA.

Um grupo de cientistas resolveu testar se seria possível uma ribozima apresentar a propriedade de autorreplicação. Sabemos que não existem ribozimas naturais que apresentem essa função, mas e as ribozimas artificiais? Para testar a hipótese, eles analisaram as propriedades que as moléculas de RNA sintetizadas em laboratório possuíam. Separavam as que apresentavam alguma atividade catalítica e analisavam estas moléculas. Pois, pode se espantar agora, porque uma dessas ribozimas artificiais apresentava a propriedade de autorreplicação! De fato, era uma ribozima pequena, mas conseguia catalisar sua própria replicação e, assim, nasce a Biologia... Segundo os cientistas, as ribozimas naturais que conhecemos hoje seriam um resquício desta época, na qual o RNA tinha um papel central na estrutura da vida.

Assim que a primeira molécula de RNA apresentou a função de auto-replicação, a química complexa se transformou na Biologia simples. Se pensarmos, então, podemos dizer que as regras do pareamento de bases (A parecia com T e C parecia com G) definem o limite entre a química e a Biologia. Ao surgir essa regra, surgem a Biologia, a Genética, a Ecologia, a Bioquímica e a Evolução ao mesmo tempo. Repare que a partir desse organismo primordial, a própria herdabilidade passaria a propriedade de autorreplicação aos descendentes desse primeiro ser biológico. Isso daria início à explosão biológica, pois a capacidade do primeiro ser biológico passaria a seus descendentes, que a passariam também aos seus descendentes.

### **Seção 3: Onde surgiu a vida?**

Uma outra proposta sugerida é que seríamos todos marcianos! Bom, mais ou menos... Esta proposta é a panspermia cósmica. Segundo os proponentes dessa teoria, uma vida bem primitiva teria vindo do espaço por meteoritos. De fato, existem muitos componentes orgânicos, incluindo aminoácidos, que já foram identificados em corpos celestes. Isso seria um suporte a essa teoria. O mais famoso deles seria o meteorito de Murchison, encontrado na Austrália em 1969. Neste meteorito, foram encontrados não apenas aminoácidos, os componentes das proteínas, mas também as bases nitrogenadas uracila e xantina. Apesar disso, alguns pesquisadores indicam que esta profusão de moléculas orgânicas teria sido contaminação terrestre.



**Figura 4:** Tubo de ensaio de vidro contendo fragmentos do meteorito de Murchinson para posterior análise. Já foram identificados 14 mil compostos moleculares neste corpo celeste, dentre eles, aminoácidos, hidrocarbonetos, ácidos e bases nitrogenadas.

Uma outra possibilidade é a de que a vida surgiu tenha surgido aqui mesmo na Terra, mas essa origem teria sido em locais mais remotos. Uma das possibilidades seriam as fontes hidrotermais do fundo submarino que teriam as condições adequadas ao surgimento da atividade biológica em nosso planeta. Estes são locais em que a crosta terrestre é fina e sujeita a ser rompida por descarga de manto terrestre, também conhecida como lava. Assim, as constantes descargas de alta energia formaria um ambiente necessário para que as primeiras reações químicas transformassem moléculas simples em moléculas mais complexas.



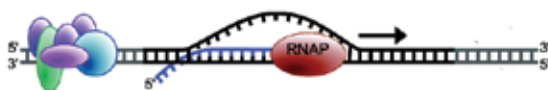
### Fonte hidrotermal

Fissura na crosta terrestre a partir da qual emergem fluidos do manto terrestre.

**Figura 5:** Uma **fonte hidrotermal** no fundo do oceano perto das Ilhas Galápagos mostrando a biodiversidade local. Os tubos de poliquetos da espécie *Riftia pachyptila* são as estruturas em vermelho e branco. Anêmonas brancas e bege também são encontradas nestes locais. Estes locais podem ter sido o berço da vida na Terra.

## Seção 4: Explosão biológica

Onde quer que tenha surgido a vida inicial que deu origem à explosão biológica, em algum momento, o mundo do RNA foi substituído pelo mundo da síntese de proteínas como conhecemos hoje. O RNA é versátil o suficiente mas não é tão eficaz quanto o DNA que é mais estável como material genético nem quanto as proteínas que são catalizadores de reações mais eficientes. Depois de um tempo de mundo biológico só constituído por moléculas de RNA, a associação entre RNA e as proteínas pode ter evoluído gerando o processo de tradução que deu origem às proteínas. De acordo com essa hipótese, o processo de tradução seria anterior à transcrição que é a síntese de RNA a partir de DNA. E este teria sido o Mundo Ribonucleoproteico, com moléculas de RNA associadas a proteínas, que teria substituído o mundo do RNA. Só depois que o DNA entrou na síntese proteica, apareceu o processo de transcrição e o mundo biológico se transforma novamente por evolução. Neste novo mundo, o DNA substituiu o RNA como armazenador de informação e as enzimas proteicas substituíram o RNA na estrutura e nas funções do metabolismo.



**Figura 6:** O processo de transcrição de um gene no DNA (fita dupla preta) em uma fita simples de RNA (fita simples azul). Atualmente, a enzima proteica RNA polimerase (RNAP) é a responsável por este processo. A fita de cima do DNA é chamada fita codificante pois apresenta a mesma sequência de bases do que a fita sintetizada de RNA. A fita de baixo do DNA é chamada de fita molde, pois serve de molde para a síntese de RNA.

Em um organismo, existem milhares de tipos diferentes de enzimas proteicas que são sintetizadas pelas células na medida em que ele precisa executar determinada função. Por exemplo, quando temos um sangramento, uma enzima denominada trombina entra em ação e ativa moléculas que formam um coágulo que irá interromper o sangramento. O gene da trombina está alinhado no cromossomo, quando a trombina é necessária para a manutenção do sistema, a RNA polimerase entra em ação transcrevendo, a partir do DNA do gene da trombina, o RNA que vai servir de molde para a síntese da trombina.

A síntese de proteínas é a transformação da sequência do DNA na sequência de proteínas com base no código genético. Esse processo inicia com a síntese de RNA (figura 6). Após essa etapa, o processo de tradução por meio do código genético é realizado em ribossomos. O código representa a chave para a tradução de cada três bases, um códon, em um aminoácido. Por exemplo, sempre que na fita codificante do DNA tiver a sequência ATG (bases adenina, timina e guanina), a proteína terá um aminoácido Metionina. Sempre que a sequência for AAA, o aminoácido será Lisina. Além dos códons que determinam aminoácidos, alguns códons determinam a parada da síntese de proteínas.

Como são 64 códons possíveis (três bases em um códon e quatro bases possíveis  $3^4 = 64$ ) e apenas 20 aminoácidos, naturalmente alguns aminoácidos são codificados por mais de um códon. Por isso, chamamos o código genético de degenerado. Um ponto curioso que códons mais semelhantes, codificam o mesmo aminoácido. Por exemplo, o aminoácido Prolina é codificado por CCG, CCA, CCC e CCG, ou seja, códons semelhantes codificam o mesmo aminoácido. Isso vale também para aminoácidos com propriedades bioquímicas semelhantes que apresentam códons semelhantes também.

Como toda evolução de característica complexa, devemos pensar no código inicial como mais simples que o atual. Uma hipótese de origem do código genético associa o código genético primitivo a um maior grau de degeneração. Ou seja, menos aminoácidos eram codificados pelos 64 códons e gradualmente novos aminoácidos foram sendo incorporados e os organismos aumentando sua complexidade ao longo da evolução.

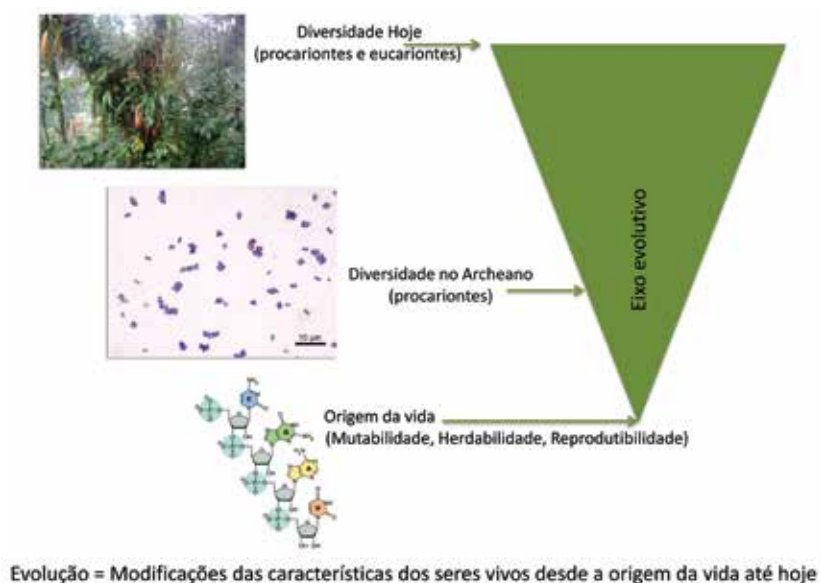
## Seção 5: Evolução biológica

A associação entre moléculas requer a compartimentalização em um ambiente interno delimitado por uma membrana biológica. Isso porque moléculas isoladas no ambiente competem pelos mesmos recursos. Assim, a cooperação entre moléculas (DNA, RNA e proteínas) deve ter evoluído depois do aparecimento da membrana. Quando finalmente o DNA entra em cena, ocorre uma separação clara das propriedades de herdabilidade e mutabilidade (DNA), da propriedade de reprodutibilidade (proteínas).

O primeiro sistema biológico teria dado origem a dois sistemas descendentes que também apresentam as propriedades centrais da vida. Os descendentes teriam dado origem a quatro descendentes e iniciou-se

dessa forma a diversificação dos seres vivos. Neste cenário, a evolução por seleção natural aparece como uma propriedade emergente da vida. Isso significa que um sistema que tenha essas três propriedades, vai necessariamente evoluir por seleção natural.

Da mesma forma, um carro tem a propriedade emergente de se locomover que não é propriedade de nenhuma de suas partes: a roda não se locomove sozinha, nem o volante, nem o motor... A locomoção é uma propriedade que emerge apenas quando um carro é montado. Assim, a seleção natural não é uma quarta propriedade, mas é uma propriedade emergente adquirida automaticamente a partir da conjunção das três primeiras propriedades. A partir daí, descendentes mais complexos foram surgindo, sobrevivendo e deixando descendentes com características cada vez mais complexas.



**Figura 7:** O que chamamos de **Biologia** é apenas uma fotografia instantânea de um eixo dinâmico e em constante transformação que é o eixo evolutivo. A diferença da **Biologia** ao longo do tempo é resultado do processo evolutivo. A origem da vida é representada por uma molécula de DNA.

## Resumo

- As propriedades básicas da vida: herdabilidade, mutabilidade e reprodutibilidade não estão hoje em uma única molécula, o que torna o estudo da origem da vida mais complexo.

- O DNA apresenta as propriedades de herdabilidade e de mutabilidade mas não consegue se reproduzir sozinho e depende de enzimas proteicas. As enzimas proteicas, por outro lado, são expressões das fitas de DNA. Isso cria um paradoxo pois as duas macromoléculas são complexas, interdependentes e ambas são necessárias para as propriedades básicas da vida.
- O paradoxo é quebrado com a teoria do Mundo do RNA, segundo a qual o primeiro mundo biológico foi um mundo de RNA, molécula que poderia ter apresentado as três propriedades da vida.
- Experimentos em laboratórios conseguiram sintetizar aminoácidos a partir de compostos inorgânicos e moléculas artificiais de RNA com capacidade de autoduplicação o que indica que os componentes das moléculas fundamentais à vida poderiam ter sido comuns na Terra primitiva.
- A panspermia é a hipótese que sugere que a vida primordial poderia ter surgido fora do nosso planeta e ter sido trazida por corpos celestes que caíram na Terra primitiva. Outra hipótese sugere que a vida poderia ter surgido próximo a fontes hidrotermais no fundo do oceano.

## Referências para as figuras

Origem das espécies Fonte: Domínio Público.

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Origin\\_of\\_Species\\_title\\_page.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Origin_of_Species_title_page.jpg)

Figura 2: Bactérias Por Y Tambe - Y Tambe, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=49534>

Rna Por Sponk (talk) - Obra do próprio, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9831526>

Diversidade CC BY 1.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=357870>

Miller Domínio Livre. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:MUexperiment.png>

RNA<sub>t</sub> e RNA<sub>r</sub>

Domínio Público. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:RF00177.jpg>

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:TRNA\\_sekundaarstrukt.png](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:TRNA_sekundaarstrukt.png)

Análise do meteorito de Murchison

By United States Department of Energy; uploaded en wikipedia by en:User:CarlHenderson.-[http://www.anl.gov/Media\\_Center/Image\\_Library/images/fermi-dust.jpg](http://www.anl.gov/Media_Center/Image_Library/images/fermi-dust.jpg); en:Image:Murchison-meteorite-ANL.jpg, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1673994>

#### Hidrotermas

By NOAA Okeanos Explorer Program, Galapagos Rift Expedition 2011 - Flickr NOAA Photo Library, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35246911>

#### Dna gene

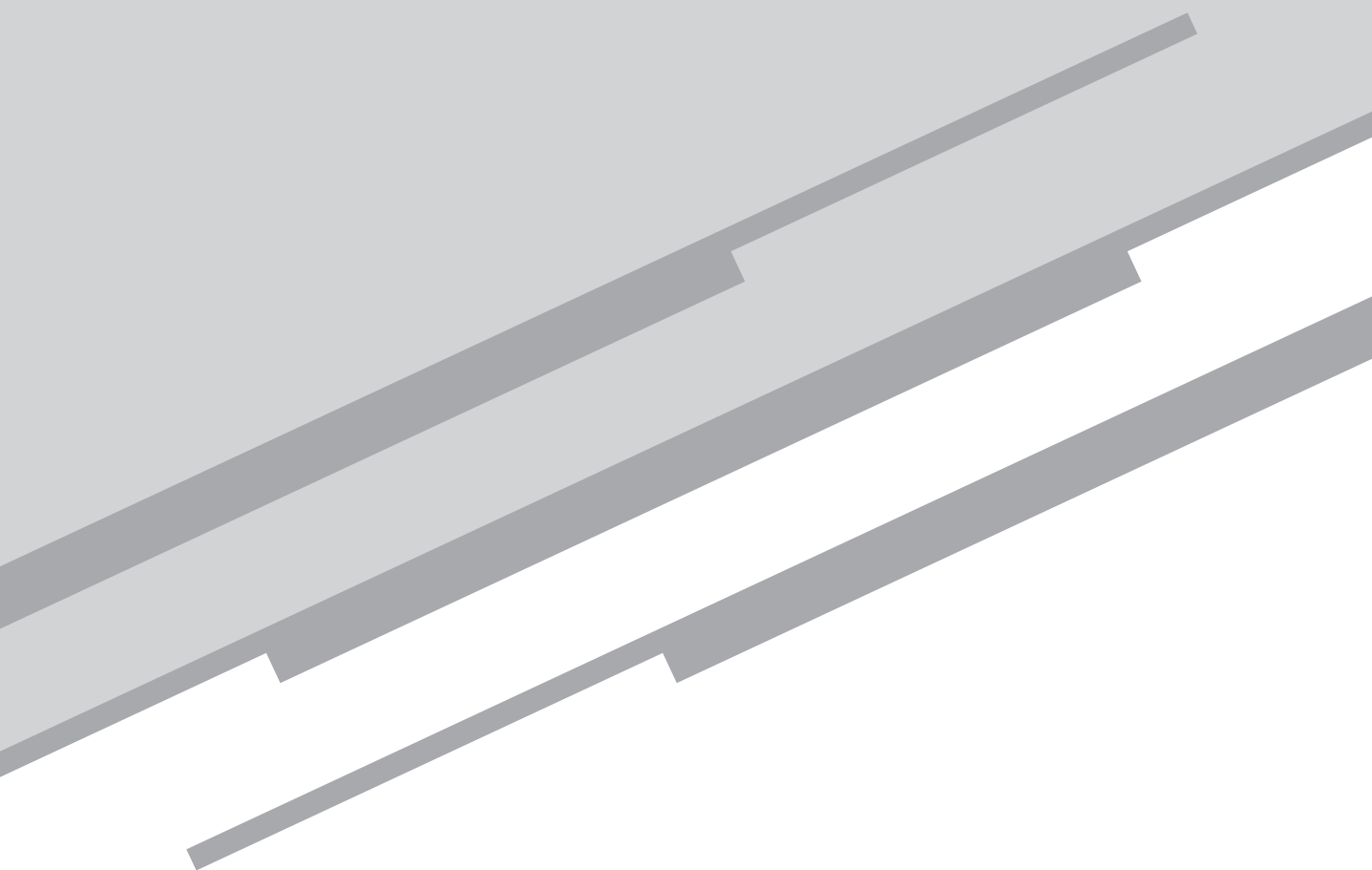
Por Courtesy: National Human Genome Research Institute - [1] (file), Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=212144>





# Aula 10

Tudo se transforma



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Na última aula, vimos que a Biologia nasceu com as primeiras moléculas autor-replicadoras de RNA. Enquanto o DNA passou a ter um papel central na herdabilidade e na mutabilidade, as enzimas proteicas ficaram responsáveis pela manutenção e pela reprodução do sistema biológico todo. De maneira formal, a homeostase também é uma propriedade dos sistemas biológicos, ou seja, dos organismos que regulam o seu ambiente interno, de forma a mantê-lo estável e funcionando. Tal estabilidade é atingida com a ação de enzimas proteicas, que funcionam como as operárias dos sistemas biológicos.

Um organismo requer um fluxo constante de energia para sobreviver e se reproduzir. De um ponto de vista energético, as reações químicas podem ser divididas em dois grupos básicos e complementares: o anabolismo e o catabolismo. Ambos formam o conjunto das reações metabólicas do organismo. As reações do anabolismo são aquelas que unem moléculas pequenas formando moléculas maiores. A ligação de uma molécula em outra é um processo custoso energeticamente, pois existe uma energia necessária para a nova ligação química ocorrer. Ou seja, se, para fabricar moléculas grandes, é necessário energia, de onde vem essa energia?

A energia para as reações anabólicas vem do segundo grupo de reações químicas, que é justamente o catabolismo. O catabolismo inclui todas as reações que promovem a quebra de moléculas grandes em moléculas menores. Com o rompimento da ligação química dessas moléculas, a energia da ligação é liberada e pode ser armazenada para uso nas reações anabólicas. Mas, se o anabolismo e o catabolismo são mutuamente necessários, de onde aparecem as moléculas grandes para serem quebradas no catabolismo? A energia necessária para correr, andar e até pensar vem da quebra do alimento que ingerimos. Os alimentos são as moléculas grandes que as reações catabólicas vão quebrar para conseguir energia para as funções metabólicas.



**Figura 1:** Para correremos, precisamos de energia. A nossa energia vem do processo de respiração celular, que é o processo de quebra dos alimentos com uso do oxigênio e liberação de gás carbônico.

Entretanto, nem todos os seres vivos se alimentam. As plantas, por exemplo, não se alimentam como os animais. Então, como elas conseguem energia para as reações anabólicas? Neste caso, o processo é a fotossíntese, durante a qual a planta fabrica seu próprio alimento e, com a quebra deste alimento produzido, ela consegue energia para crescer e se reproduzir. As plantas e as cianobactérias são exemplos de organismos **fotossintéticos**, que conseguem fabricar moléculas grandes para o metabolismo por meio da energia solar.

Tanto as plantas como os animais quebram o alimento pelo processo específico da respiração celular. Neste caso, chamamos de respiração aeróbica aquela respiração que envolve o gás oxigênio nas reações químicas, enquanto a respiração anaeróbica não usa o oxigênio. Nesta aula, vamos rever os principais processos com os quais os organismos conseguem energia para seu metabolismo.

### **Fotossintético**

Organismo capaz de realizar a fotossíntese. A fotossíntese é a síntese de moléculas complexas usando a luz do sol como fonte de energia.

## Objetivos

1. Definir metabolismo, catabolismo e anabolismo e suas relações com a homeostase;
2. Estabelecer a importância da fotossíntese e do sol como fonte de energia única para a diversidade biológica no planeta;
3. Identificar o papel da molécula de adenosina trifosfato como moeda energética;
4. Descrever os processos de fotossíntese, de respiração celular e de fermentação.

## Seção 1: Fotossíntese, o combustível da biodiversidade

Nosso planeta é vivo, e a fotossíntese é o combustível que mantém a diversidade biológica. A fotossíntese é a responsável por gerar a energia em alguns organismos de forma direta (plantas, algas e cianobactérias), mas, de forma indireta, ela é responsável pela energia de muitos outros organismos que não fazem este processo. Vou explicar isso melhor.

Os animais herbívoros (aqueles que se alimentam de plantas, como a vaca, o cavalo, a girafa), no final das contas, também usam as plantas que comem para construir seu próprio corpo. Os animais carnívoros (os que se alimentam dos animais herbívoros, como a onça e o tigre) usam os herbívoros para isso. Repare, portanto, o quão importante é o processo fotossintético. Sem a fotossíntese, não existiria qualquer um dos organismos que podemos enxergar a olho nu. O nosso planeta seria povoado apenas por alguns tipos de microrganismos. A fotossíntese é responsável ainda pela produção de oxigênio que é usado para conseguir energia pela respiração celular. Como já vimos, é por meio da quebra (catabolismo) de moléculas grandes que os organismos conseguem energia.

Se você tiver um aquário, terá que alimentar seus peixinhos, pois eles precisam de alimento. Mas as plantas, para crescerem, precisam apenas de luz do sol e de água, além de alguns nutrientes que geralmente encontram no solo. Por meio da fotossíntese, as plantas conseguem construir as moléculas grandes que irão ser quebradas pela respiração celular e construir o próprio corpo e se reproduzir. Elas fazem isso usando a energia da luz solar.

A primeira dica para a descoberta dessa via metabólica veio ainda no século XVII. Naquela época, as pessoas acreditavam que as plantas comiam terra. Isso pode parecer bobagem, mas era o que todos acreditavam. Porém, Jan van Helmont (1579-1644), um químico belga, resolveu testar essa ideia. Ele mediu cuidadosamente a massa de uma planta e do solo em que ela se encontrava. Ao longo do tempo, ele adicionava apenas água. Qual não foi a surpresa dele ao perceber que a planta aumentava de tamanho, mas o solo não perdia massa. Então, ele deduziu, corretamente, que o crescimento de uma planta não se dá da mesma forma que o dos animais, ou seja, elas não se alimentam de solo. Mais tarde, outros pesquisadores provaram que o crescimento da planta se devia à transformação da energia luminosa em matéria.



**Figura 2:** A primeira hipótese que tentava explicar como as plantas conseguiam sua energia para crescer e se reproduzir era “As plantas comem terra”. Essa hipótese foi refutada por Jan van Helmont.

Os organismos fotossintéticos conseguem fabricar moléculas grandes por meio de outros tipos de energia; por isso, são chamados de autotróficos. As plantas e as algas verdes são organismos **autotróficos**; mais especificamente, fotoautotróficos, pois necessitam da luz (foto significa luz) solar para conseguirem produzir tais moléculas.

### Autotrófico

Organismos que podem gerar seu próprio alimento. Para isso, tais organismos usam uma fonte de energia alternativa, como o sol. As plantas, as cianobactérias e alguns eucariontes unicelulares são exemplos.

Com a energia captada pela luz do sol, por exemplo, as plantas conseguem sintetizar moléculas grandes. Auto = próprio, trofos = alimento.

### Heterotrófico

Organismo que não possui a capacidade de gerar seu próprio alimento; deve se alimentar para conseguir moléculas grandes. Hetero= diferente, trofos= alimento.

## Seção 2: Fotossíntese e luz

A luz do sol é necessária para que a primeira fase da fotossíntese aconteça. Para entender bem o processo de captura de energia solar, começamos por compreender melhor o que é luz. A luz branca (do sol) é uma mistura de luzes de todas as cores. Se você juntar tintas de todas as cores, o resultado será uma tinta de cor preta, mas se você juntar luzes de todas as cores, o resultado será a luz branca. Para verificar isso, basta observarmos um arco-íris, que é o belo resultado da separação da luz do sol (branca) em todas as luzes componentes, após ter passado por gotículas de vapor d'água presentes na atmosfera em um dia de chuva.



**Figura 3:** A separação da luz branca em todas as cores visíveis ocorre quando a luz do sol passa pelas gotículas de água na atmosfera depois de uma chuva ou em uma cachoeira, como mostra o arco-íris da foto. A luz visível é uma pequena parcela da radiação luminosa que provém do sol.

A luz do sol (fótons) é uma partícula que “caminha” pelo espaço como se fosse uma onda. Essa onda, quando decomposta, apresenta ondas menores de diferentes comprimentos, dependendo de sua energia. Cada cor que vemos no arco-íris, por exemplo, é uma luz de comprimento de onda diferente, sendo o vermelho o menor dentre essas cores, o que significa que essa coloração tem maior energia.

Os fótons, então, penetram nas folhas das plantas em três comprimentos de onda principais: o verde, o vermelho e o azul. Os comprimentos que não são absorvidos pela clorofila são aqueles na faixa do verde e, por isso, eles são refletidos. Esta é a razão pela qual todas as plantas têm cor verde. A casca da maçã vermelha absorve o comprimento de onda azul, mas reflete o vermelho; por isso, vemos a casca desta fruta vermelha.

As plantas conseguem energia absorvendo fótons de certos comprimentos de onda. Dentre os absorvidos, estão o azul (principalmente) e o vermelho. Quanto maior a absorção do comprimento de onda, maior a energia disponível para a planta. Com a absorção, a planta consegue energia para sintetizar as moléculas grandes.



**Figura 4:** Os **cloroplastos** dão a coloração verde das folhas e da planta. É nas folhas das plantas que a maior parte da fotossíntese ocorre. Cada célula vegetal contém de 10 a 100 cloroplastos. Na fotografia de *Plagiomnium affine* ao microscópio, podemos observar os cloroplastos de cada célula.

Como o comprimento de onda verde não é absorvido; é refletido, dando a cor verde às plantas. Assim, os cloroplastos são verdes, pois contém pigmentos que refletem e transmitem luz verde. É exatamente graças às moléculas de clorofila dos cloroplastos que as plantas são verdes. Em países frios, quando começa o outono, a planta diminui a produção de clorofila. Esta é uma adaptação dessas plantas que vivem em locais frios, pois a clorofila é um pigmento caro, energeticamente, de ser produzido. Assim, a baixa incidência solar não iria compensar a produção de clorofila e, no inverno, as plantas de países mais frios praticamente não crescem, por não fazerem fotossíntese.

Dessa forma, apenas outros pigmentos (que refletem luz vermelha ou amarela) persistem nas células das plantas no outono. Só conseguimos observar isso realmente em regiões mais frias, pois, nas regiões mais quentes, a incidência solar é forte durante todo o ano e a produção

### Cloroplastos

Organelas (pequenos compartimentos) presentes no interior de algumas células de plantas e de outros organismos que realizam fotossíntese.



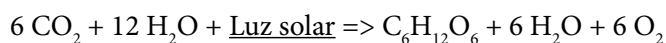
de clorofila não é interrompida. Plantas e algas de outras cores também são reflexos de outros pigmentos, que não a clorofila.



**Figura 5:** Detalhe de vegetação que, no outono, perde a cor verde, pela baixa produção de clorofila quando o clima começa a esfriar.

### Seção 3: Detalhes químicos da fotossíntese

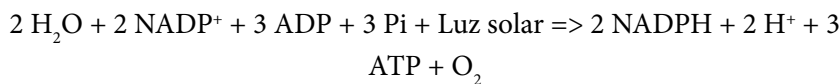
A clorofila é um pigmento que está presente na membrana dos tilacóides dos cloroplastos, exatamente onde a fotossíntese ocorre. Na fotossíntese, seis moléculas do gás carbônico (da atmosfera) e doze moléculas de água (retiradas principalmente do solo; por isso, é importante regar as suas plantinhas) são convertidas em uma molécula de glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) e em seis moléculas de gás oxigênio, as quais são liberadas para a atmosfera. A fórmula de conversão da fotossíntese é a seguinte.



A fotossíntese é um processo metabólico que pode ser dividido em duas fases distintas: (1) a fase fotoquímica, antigamente chamada de fase clara, pois depende da luz para ocorrer, envolve a captura da energia solar e (2) a chamada etapa química, antigamente chamada de fase escura, pois sua ocorrência não depende das condições luminosas.

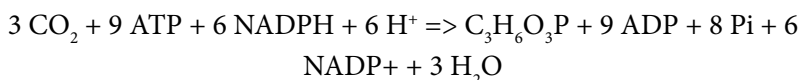
Na primeira etapa, quando uma molécula de clorofila absorve um fóton, ela perde um elétron, para retornar ao estado normal. O elétron é encaminhado para uma **cadeia de transporte de elétrons**. Ao passar pela cadeia, energia suficiente é gerada, formando uma molécula de adenosina trifosfato (**ATP**), adicionando um grupo fosfato a uma molécula de adenosina difosfato (ADP). A molécula de clorofila recupera o elétron perdido a partir de uma molécula de água; para isso, esta molécula de água é quebrada e oxigênio é liberado. É importante você saber que todas essas reações envolvem a participação de enzimas que fazem o papel de aceleradores da reação química.

A etapa fotoquímica da fotossíntese obedece à seguinte fórmula:



Repare que a etapa fotoquímica gera moléculas de ATP, a partir de molécula de ADP com a adição de um fósforo (Pi). A ligação do terceiro fósforo com o ADP (que já tem dois fósforos) requer muita energia para ser feita. Por outro lado, a reação libera muita energia quando for quebrada. Por isso, dizemos que o ATP é a moeda energética dos organismos, uma vez que, quando estão precisando de energia, o ATP é degradado em ADP. Quando temos energia sobrando, moléculas de ATP são formadas.

A etapa química é independente da luz solar e tem a fórmula a seguir:



Nessa etapa, uma enzima chamada de RuBisCo captura  $\text{CO}_2$  da atmosfera e usa o NADPH para formar moléculas orgânicas com três átomos de carbono. Essa conversão de várias moléculas de um carbono ( $\text{CO}_2$ ) em uma molécula grande de três carbonos ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ) é realizada em uma sequência de reações químicas chamada de ciclo de Calvin. Em seguida, moléculas grandes são combinadas para formar moléculas orgânicas ainda maiores, como o amido, a celulose, açúcares, entre outras que as plantas necessitam no dia a dia.

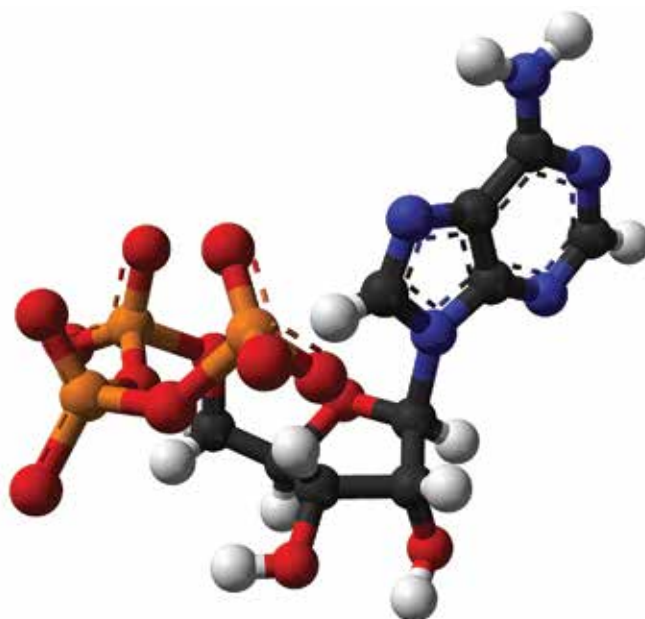
É importante você observar que as moléculas de ATP formadas na etapa fotoquímica da fotossíntese são usadas na etapa seguinte para formar as moléculas orgânicas durante o ciclo de Calvin. Isso significa que não existe formação de energia extra para suas necessidades diárias. O processo que irá fabricar essa energia é a respiração celular, o qual você conhecerá logo a seguir.

### Cadeia de transporte de elétrons

É uma sequência de reações químicas que transferem o elétron de um composto doador para um composto receptor. Um gradiente de prótons (íons  $\text{H}^+$ ), então, é criado para gerar energia na forma de moléculas de ATP.

### ATP

É um nucleotídeo responsável pelo armazenamento de energia entre suas ligações entre os fosfatos. É considerado o reservatório de energia celular.

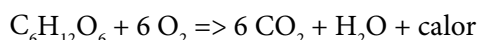


**Figura 6:** Modelo de bolas e tubos de uma molécula de ATP com três átomos de fósforo ligados por reações químicas muito energéticas. Os anéis preto e roxo são a adenina, o anel preto e vermelho é a ribose e os grupos laranja e vermelho são os três grupos fosfato. Por isso, ao liberar um átomo de fósforo, a molécula libera energia para ser usada em outros locais da célula.

## Seção 4: A respiração celular

A respiração celular é um processo em que oxigênio é usado para quebrar o alimento, produzindo gás carbônico, água e a energia que o corpo necessita. Este processo é realizado dentro das células, mais especificamente, em uma organela chamada **mitocôndria**. É fundamental você lembrar que as plantas também fazem a mesma respiração celular para conseguirem energia que os animais. Entretanto, os animais ingerem o alimento a ser quebrado, enquanto as plantas geram as moléculas orgânicas (na fotossíntese) a serem quebradas na respiração celular. Assim, as plantas têm cloroplastos e mitocôndrias em suas células, enquanto os animais e fungos apresentam apenas as mitocôndrias.

O oxigênio da atmosfera é absorvido pelas células pulmonares durante a inspiração, enquanto o gás carbônico é liberado na expiração. Já as plantas podem utilizar o oxigênio que foi produzido na fotossíntese ou absorver este gás da atmosfera. A fórmula geral da respiração celular é:



### Mitocôndria

Uma das organelas (significa órgão pequeno) que aumentam a complexidade de células eucariontes. As mitocôndrias estão presentes apenas nos eucariontes (verifique na figura das células animal e vegetal). Essas organelas tem o tamanho de células de bactérias.

Para quebrar cada molécula de glicose, o organismo deve usar duas moléculas de ATP que já têm de estar formadas anteriormente. A respiração celular acontece em três etapas principais: a glicólise, o ciclo de Krebs e a cadeia respiratória. Por se tratar de uma quebra da molécula de glicose dos alimentos, a primeira etapa é chamada de glicólise e tem como produto final duas moléculas de piruvato. A glicólise tem ainda duas moléculas de ATP de saldo energético, ou seja, ela produz quatro moléculas de ATP, mas gasta duas no início.

Na respiração anaeróbica (sem oxigênio), são gastos os mesmos dois ATP e gerados também apenas quatro para cada molécula de glicose quebrada. Entretanto, estas quatro moléculas de ATP geradas são apenas um quarto da energia que a molécula de glicose contém. Assim, quando o oxigênio está presente, a respiração celular é mais longa, as reações de quebra continuam, e a respiração tem maior saldo energético, ou seja, produz mais energia. Neste caso, as demais etapas vão ocorrer na mitocôndria, que formam o chamado ciclo de Krebs ou ciclo do ácido cítrico.

Esse ciclo se inicia com o piruvato, formado na glicólise, que é transformado em Acetil-Coenzima A. Esta coenzima vai reagir com o oxaloacetato que foi formado no ciclo de Krebs anterior, e mais moléculas de ATP serão produzidas no ciclo de Krebs. Uma longa sequência de reações de transferência de elétrons forma a cadeia respiratória, e a última molécula a receber os elétrons, os transfere ao oxigênio que é o receptor final. Essa transferência de elétrons vai acabar liberando energia e gerando 36 moléculas adicionais de ATP. Ou seja, ao final do processo da respiração celular, são sintetizadas novas 38 moléculas de ATP e foram gastas duas - o que quer dizer que o ganho líquido na respiração celular é de 36 ATP! Estas moléculas serão armazenadas para quando o organismo vier a precisar de energia.

## **Seção 5: A fermentação**

Existe outro processo, além da respiração, que promove a quebra de compostos orgânicos, mas não utiliza oxigênio, que é a fermentação. Este processo não é tão eficiente quanto a respiração aeróbica, mas muitos organismos, como fungos e bactérias, usam-no regularmente. Outros organismos, como os mamíferos, usam o processo apenas quando não têm oxigênio disponível em suas células.

Por exemplo, você sabe o que é ficar ofegante, sentir câimbra ou dor muscular. Todas essas emoções decorrem do processo de fermentação láctica, que ocorre quando nossas células musculares usam todo o suprimento de oxigênio que elas tinham e começam a produzir ácido láctico pelo processo conhecido como fermentação láctica, que tem a seguinte fórmula:



Existe um outro tipo importante de fermentação, que é a fermentação alcoólica. A fórmula da fermentação alcoólica é:



Nos dois tipos de fermentação, as reações iniciam com a quebra da glicose na glicólise, que ocorre da mesma forma já descrita para a respiração celular. A distinção entre a fermentação e a respiração está no que acontece depois que a molécula de glicose é quebrada. A fermentação láctica é usada comercialmente na fabricação de iogurte, usando bactérias (lactobacilos) que fabricam ácido láctico a partir da lactose do leite. Além disso, esse tipo de fermentação também fabrica alguns alimentos de teor ácido, como o *sauerkraut* e o *kimchi*. A fermentação alcoólica também apresenta diversos usos comerciais, como a fabricação de bebidas alcoólicas, de pão, de etanol combustível. Nestes casos, uma bactéria fermentadora específica é usada para a fabricação do produto comercial.



**Figura 7:** O suco de uva é usado para fabricar vinho a partir de reações de fermentação alcoólica. O vinho é, possivelmente, a bebida mais antiga, fora a água, consumida por nossos antepassados desde 6.000 A.C



## Amazônia é o pulmão do mundo?

Na fotossíntese, existe uma troca de gases atmosféricos (gás carbônico entra e oxigênio sai) dentro da planta. No interior de nossos pulmões, essa troca também ocorre. Quando inspiramos, absorvemos ar atmosférico rico em oxigênio; esse gás é incorporado às células pulmonares, que estão saturadas de gás carbônico resultante da respiração celular. E ocorre uma troca: o gás carbônico é liberado na nossa expiração.

Nesse sentido, as plantas, por meio da fotossíntese, funcionariam como a expiração da nossa respiração pulmonar: um pulmão para o planeta, pois o gás carbônico atmosférico é incorporado e o gás oxigênio é liberado. Por isso, algumas pessoas até dizem que a Amazônia é o pulmão do mundo. Mas isso não é verdade.



A Amazônia é um bioma muito importante, pois abriga milhares de espécies endêmicas, ou seja, que habitam somente ali. Além de ser uma floresta linda e de abrigar muitas espécies, o Rio Amazonas é o maior reservatório de água doce no estado líquido do mundo. Aliás, o Brasil também abriga dois dos maiores reservatórios subterrâneos que são o aquífero Alter do Chão na Amazônia e o Aquífero Guarani no sul.

Entretanto, as plantas também fazem a respiração celular, ou seja, elas produzem oxigênio, mas também o consomem, como a gente. Por isso, o pulmão do mundo está, na realidade, nos oceanos, e são as cianobactérias que realmente prestam esse serviço inestimável para a gente.

## Resumo

- As enzimas proteicas são responsáveis pela manutenção (homeostase) e pela reprodução do sistema biológico por meio de reações metabólicas, divididas no anabolismo (união de moléculas pequenas que requer energia) e no catabolismo (quebra de moléculas grandes que libera energia);
- As plantas e as algas verdes são organismos autotróficos, mais especificamente, fotoautotróficos, pois necessitam da luz solar para conseguir produzir tais moléculas. Os animais, por outro lado, precisam se alimentar para conseguirem diretamente as moléculas grandes e, por isso, são chamados de heterotróficos;
- A fotossíntese é o processo responsável pela energia que promove a construção dos organismos de forma direta (plantas, algas e cianobactérias) e de forma indireta (animais que se alimentam de plantas fotossintetizantes e de animais que se alimentam de outros animais que se alimentam de plantas fotossintetizantes);
- A luz do sol é necessária para a primeira fase da fotossíntese. Os raios absorvidos são usados para gerar energia e moléculas construtoras do corpo das plantas. A respiração celular é uma troca em que oxigênio é consumido para quebrar o alimento e produzir gás carbônico e água. A fermentação é um processo que também produz energia para a célula e é amplamente usado para fins comerciais.

## Figuras

### Jogging

Por “Mike” Michael L. Baird, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11219680>

### Plantinha crescendo

By Vlmastra - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5564850>

Yosemite Fonte: Autor Brocken Inaglory. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moonbow\\_at\\_lower\\_Yosemite\\_fall.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moonbow_at_lower_Yosemite_fall.jpg)

Folha e corte com cloroplastos Fonte: Autor GFDL. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plagiomnium\\_affine\\_laminazellen.jpeg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plagiomnium_affine_laminazellen.jpeg)

Fonte: Domínio público. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Leaf\\_1\\_web.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Leaf_1_web.jpg)

Fotossíntese By At09kg - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17219609>

Outono

By Someone35 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15702944>

Fonte: Conteúdo livre. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Anavilha\\_nas1.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Anavilha_nas1.jpg)

Atp By Ben Mills - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3451879>

Uvas

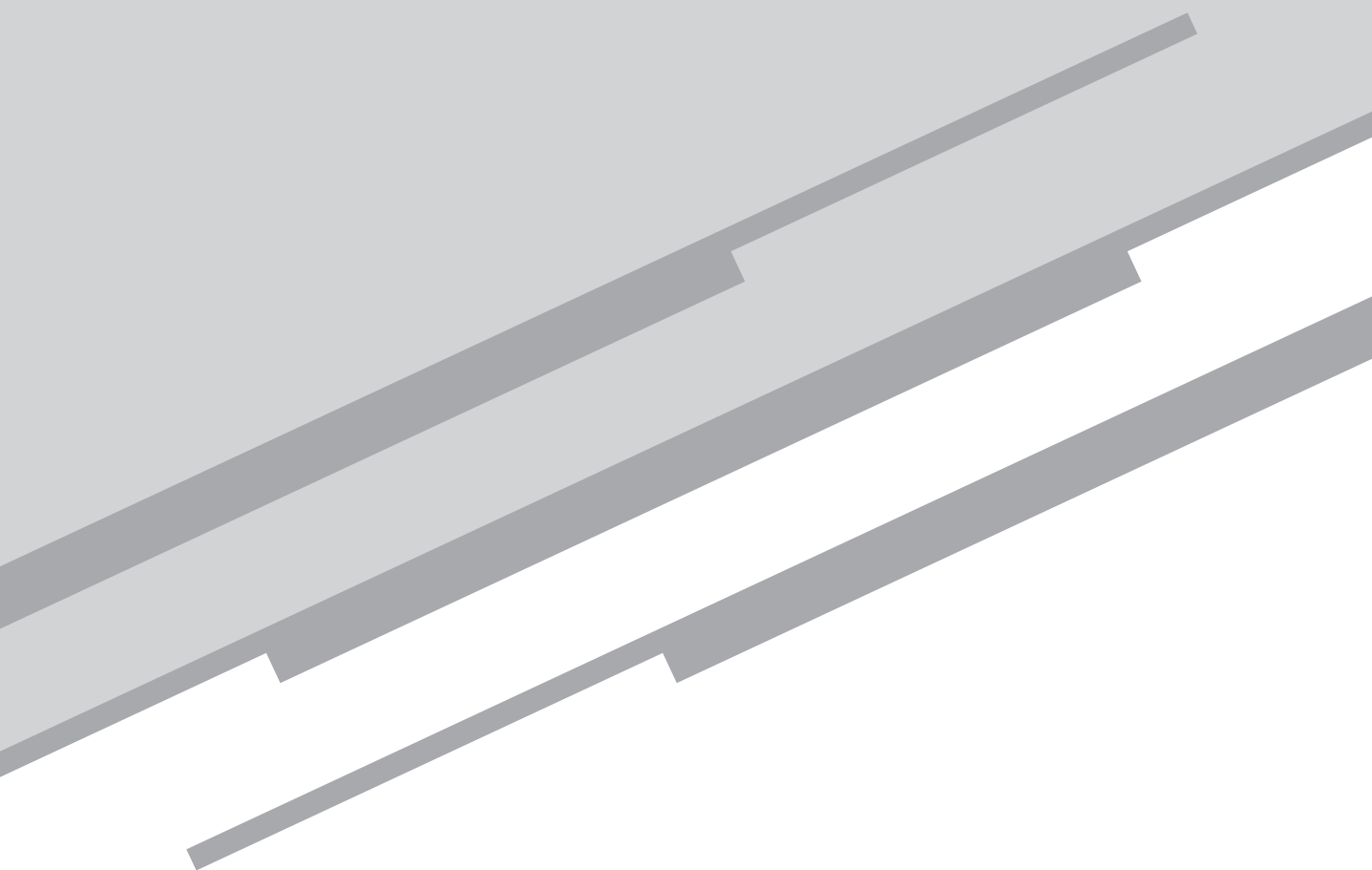
By Fir0002 - Own work, GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=135219>





# Aula 11

Complexidade



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

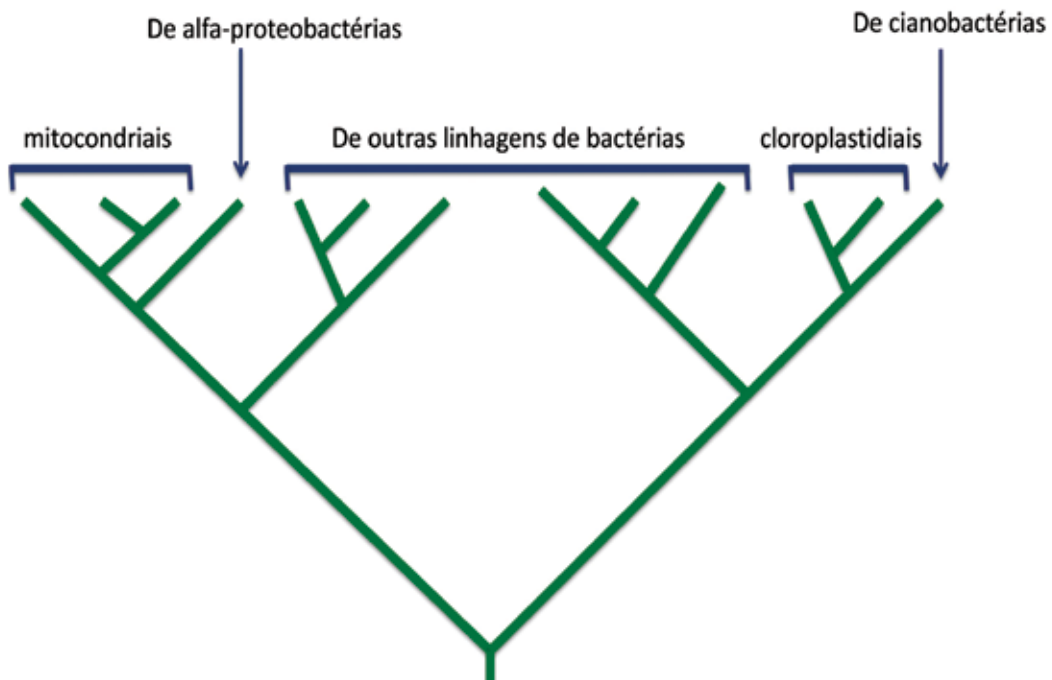
## Para início de conversa...

A cada aula estamos conversando sobre estruturas e processos que tornam alguns seres vivos mais complexos do que outros. Esta aula é dedicada a alguns processos que permitiram que esta complexidade evoluísse. Discutimos, na aula sobre material genético, que você recebe uma parte do seu genoma nuclear do seu pai e outra parte da sua mãe e, por isso, apresenta características dos dois. Entretanto, se você for observar mais a fundo cada uma de suas células, o genoma nuclear não é o único genoma nelas. Em cada célula, existe também um pequeno genoma que está presente no interior das mitocôndrias, organelas responsáveis pela respiração celular.

Neste pequeno genoma, existem genes que codificam os mesmos ribossomos encontrados nos genomas nucleares dos organismos eucariontes e dos genomas procariontes também. Então, como através das mutações as moléculas de DNA também se modificam, podemos estimar filogenias usando os genes ribossomais de mitocôndrias e de organismos eucariontes e procariontes.

Ao fazermos isso, uma coisa impressionante acontece. Todos os genes mitocondriais se agrupam em um único ramo da árvore da vida, que é uma linhagem de um tipo especial de bactérias. E se analisarmos mais a fundo a biologia dessa linhagem, o que descobrimos? Que essa linhagem, chamada de alfa-proteobactérias, tem a habilidade de fazer respiração aeróbica! Opa, o mesmo processo que ocorre no interior das células eucarióticas na organela mitocôndria. Da mesma forma, os genes ribossomais de cloroplasto, organelas responsáveis pela fotossíntese nas plantas, sempre estão agrupados e unidos à linhagem das cianobactérias, que também são fotossintetizantes.

O que será que isso significa? Você vai descobrir nesta aula.



## Filogenia usando genes ribossomais

**Figura 1:** Árvore filogenética mostrando que genes ribossomais de mitocôndrias e de cloroplastos se agrupam com as alfa-proteobactérias e com as cianobactérias, respectivamente.

## Objetivos

1. Caracterizar a teoria de endossimbiose serial de origem dos eucariontes a partir de seres procariontes;
2. Relacionar o surgimento da complexidade dos eucariontes à associação inicial com bactérias aeróbicas que deram origem à respiração celular;
3. Estabelecer a comunicação celular como um dos elementos-chave para o pleno desenvolvimento de organismos multicelulares.

## Seção 1: A teoria de endossimbiose serial

Bom, agora não deve ser mais surpresa que a pesquisadora americana Lynn Margulis (1938 – 2011) formulou sua teoria de endossimbiose serial sobre a origem das mitocôndrias a partir de bactérias aeróbicas e a origem dos cloroplastos a partir de cianobactérias. Segundo esta teoria, os eucariontes surgiram a partir de uma fusão de procariontes. Nesse sentido, o primeiro organismo eucarionte surgiu de uma **relação ecológica de endossimbiose** entre organismos procariontes. Tal como a evolução, a gravidade, a relatividade, entre outras, difícil é achar algum pesquisador que coloque alguma delas em dúvida.

### Relação ecológica

Relação entre dois seres vivos. Dependendo do tipo, a relação pode ser benéfica a ambos (ex.: endossimbiose) ou prejudicial a um deles (ex.: parasitismo).

### Endossimbiose

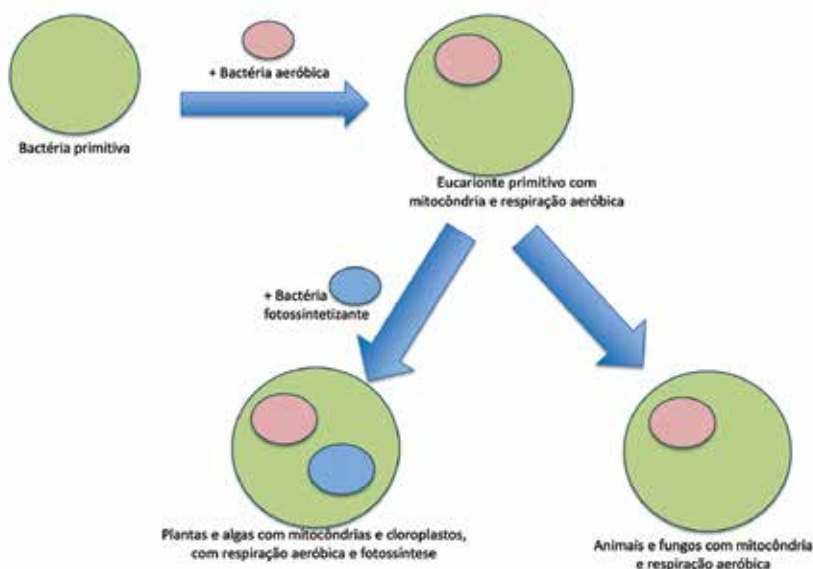
Relação ecológica na qual um organismo vive dentro de outro sem causar prejuízo ao hospedeiro. Muitas vezes, tal relação é benéfica a ambos e será favorecida por seleção natural.



**Figura 2:** Lynn Margulis - pesquisadora americana que propôs a teoria da endossimbiose serial. Ela ganhou a prestigiosa medalha Darwin-Wallace da Sociedade Linneana britânica, que é atribuída, a cada 50 anos, a pesquisadores que se destacaram em estudos evolutivos.

Lynn propôs um cenário para a origem dos eucariontes. Como os procariontes são organismos bem mais simples do que os eucariontes, é natural imaginar que os procariontes surgiram primeiro. Além disso, como vimos em aulas anteriores, os primeiros fósseis encontrados, de fato, são de organismos procariontes. Mas de onde vieram os eucariontes? Lynn sugeriu que os eucariontes foram formados a partir de uma união entre dois ou mais organismos procariontes primitivos.

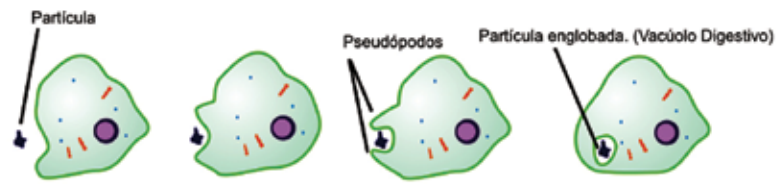
Neste cenário, um determinado tipo de bactérias aeróbicas começou a viver como endossimbionte no interior de outras bactérias maiores. Essa bactéria maior teria ganhado a energia da respiração aeróbica, enquanto a bactéria aeróbica passou a viver protegida dentro desta bactéria maior. Essa associação foi tão proveitosa para ambas as espécies, que elas passaram a depender uma da outra. A bactéria menor foi se transformando em mitocôndria, enquanto a bactéria maior ganhou complexidade com essa fonte de energia disponível. Esses organismos, portanto, tinham a faca (as mitocôndrias) e o queijo (o oxigênio na atmosfera) nas mãos para conseguirem se multiplicar e diversificar do jeito que vemos hoje em dia!



**Figura 3:** Teoria da endossimbiose serial de Lynn Margulis, segundo a qual mitocôndrias e cloroplastos são originados de bactérias primitivas que viraram endossimbiontes de ancestrais unicelulares dos eucariontes e das plantas, respectivamente.

Diferentemente do que muitos pensam erroneamente, as plantas também conseguem energia pela respiração celular que ocorre nas suas mitocôndrias. Entretanto, além das mitocôndrias, existem outras organelas nas células vegetais que também apresentam seu próprio genoma, os cloroplastos, responsáveis por fazer a fotossíntese das algas e das plantas. Como vimos, a sequência do gene ribossomal do cloroplasto de uma planta é mais parecida com o gene ribossomal de cianobactérias do que com o gene ribossomal nuclear da mesma espécie de planta. De fato, ao analisar a estrutura dos cloroplastos, os pesquisadores perceberam que os cloroplastos se parecem muito com cianobactérias! Tanto o tamanho como a forma e o tipo de clorofila são semelhantes entre eles.

Entretanto, existe um problema: a maioria dos eucariontes não tem parede celular; tendo uma membrana maleável celular, esses organismos conseguem fazer fagocitose como mostrado a seguir. Entretanto, as bactérias, hoje em dia, apresentam uma parede celular rígida que não permite que a célula se dobre como no processo de fagocitose. Então, como essas bactérias poderiam ter entrado nesta primeira célula eucarionte?



**Figura 4:** O processo de fagocitose só ocorre em eucariontes que não apresentam parede celular.

A fagocitose dando origem aos eucariontes só poderia ter acontecido se a bactéria que a fagocitou tivesse perdido a parede rígida. Então, vamos à biologia comparada para nossa resposta. Pois bem, encontramos uma pista. Alguns fungos secretam substâncias que inativam a síntese da parede celular de bactérias. Uma dessas substâncias é o antibiótico penicilina, que é amplamente usado no mundo para o combate a infecções bacterianas.

Neste caso, continuamos com a nossa história da origem dos eucariontes. Assim, este primeiro eucarionte perde a parede, perdendo também um pouco da proteção celular, mas ganhando a possibilidade de fazer fagocitose. Com esse novo processo, o primeiro eucarionte adquire a capacidade de colocar para dentro da célula substâncias maiores do que aquelas que conseguiriam passar pelos poros de sua parede. Hoje, na fagocitose, o vacúolo que se forma ao redor da partícula fagocitada se une a um vacúolo com enzimas digestivas que digerem a partícula maior, a ponto de a célula conseguir extrair ATP pela quebra dessas partículas na respiração celular. Assim, o que seria uma desvantagem (perda da proteção) acaba se tornando uma adaptação, pois aumenta as chances desse eucarionte conseguir se alimentar. Muito da evolução é assim: perde de um lado, mas ganha de outro.

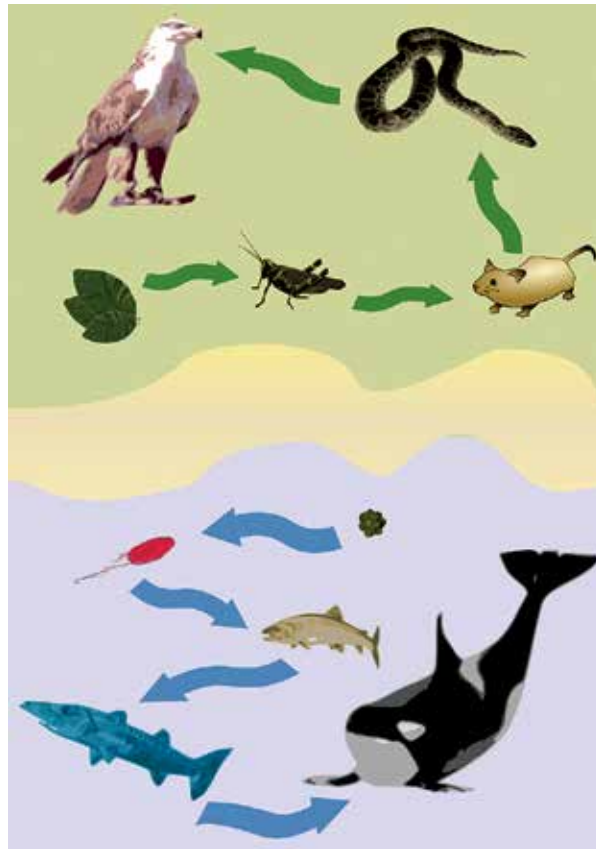
Então, se um dos descendentes desse primeiro organismo sem parede fagocitasse uma bactéria com capacidade de fazer respiração aeróbica, mas não a digerisse, bum! Essa célula iria unir o útil com o muito útil e começaria a se multiplicar pelo planeta. Entretanto, se as mitocôndrias e os cloroplastos são oriundos de processos de fagocitose, poderíamos esperar que estas organelas tivessem uma dupla membrana: uma membrana original da bactéria aeróbica (mitocôndrias) ou fotossintetizante

(cloroplastos) e outra membrana do vacúolo que é formado na fagocitose. De fato, é exatamente isso o que acontece. Tanto as mitocôndrias como os cloroplastos apresentam uma dupla membrana, que é mais uma evidência da teoria da endossimbiose serial. Assim, percebemos que existem muito mais evidências do que as que Lynn se baseou para propor sua hipótese, ou seja, ela é uma das teorias mais bem sustentadas na Biologia.

Assim, a fotossíntese (usando gás carbônico e liberando oxigênio) dos cloroplastos e a respiração celular (usando oxigênio e liberando gás carbônico) das mitocôndrias foram o pontapé inicial para o incrível processo de diversificação que ocorreu nos eucariontes no último bilhão de anos. Essas duas organelas são fábricas de conversão de energia. Enquanto nos cloroplastos a conversão é de energia solar para energia química armazenada em açúcares, como a glicose, nas mitocôndrias, a conversão é a geração de ATP, usando o oxigênio para quebrar os açúcares produzidos na fotossíntese ou ingeridos na alimentação.

Neste sentido, as cianobactérias tiveram um papel crucial não apenas no Grande Evento de Oxidação, mas também dando origem, através dos cloroplastos, à capacidade fotossintetizante no ambiente terrestre pelas plantas. O processo da fotossíntese é central para toda a vida na Terra - não apenas para os organismos fotossintéticos. Esses organismos, também chamados de produtores, conseguem produzir seu próprio alimento usando a energia solar. Os herbívoros, ao comerem os produtores, também tiram vantagem da fotossíntese, pois, sem esse processo, os herbívoros não teriam alimento. Da mesma forma, os carnívoros, que se alimentam dos herbívoros, e os detritívoros, que se alimentam de organismos em decomposição, também fazem uso do processo. A cadeia que liga os organismos a seu alimento é chamada de cadeia alimentar.





**Figura 5:** Exemplos de cadeias alimentares terrestre (acima) e marinha (abaixo). O primeiro elo de todas as cadeias possíveis são sempre os seres autotróficos, fotossintetizantes ou quimiossintetizantes. As setas indicam a transferência de energia do alimento para quem se alimenta dele.

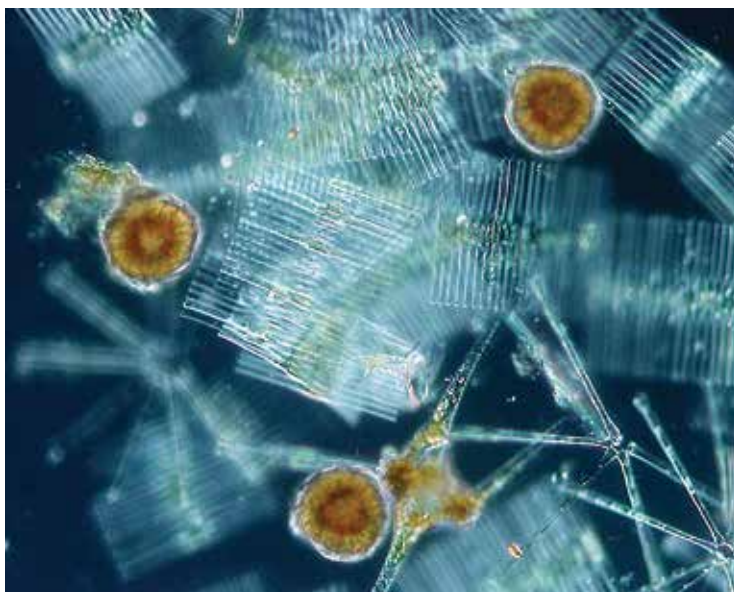
Os organismos autotróficos formam a base das cadeias alimentares no ambiente terrestre, da mesma forma que as algas e as cianobactérias representam no ambiente marinho e dulcícola. Assim, na cadeia alimentar da biodiversidade, quem sustenta a diversidade biológica são os organismos fotossintetizantes. Os organismos herbívoros se alimentam diretamente dos autotróficos, e os carnívoros se alimentam indiretamente deles, pois se alimentam daqueles que construíram seu corpo, comendo os autotróficos.

## Seção 2: Mais do que a soma de suas partes

Como vimos, os organismos eucariontes unicelulares surgiram de uma fusão de procariontes unicelulares. Mas, como os organismos eucariontes multicelulares surgiram? Eles evoluíram a partir de eucariontes

unicelulares com as mesmas características. Aos eucariontes unicelulares chamamos coletivamente de protistas. Por exemplos, existem hoje protistas que são fotossintetizantes, como as diatomáceas. As plantas devem ter evoluído a partir de organismos desse tipo; assim, ao estudar as diatomáceas, podemos ter uma ideia de como as plantas evoluíram. Outros protistas não conseguem produzir seu próprio alimento, ou seja, são heterotróficos, como os animais, e os animais devem ter se originado de ancestrais semelhantes a estes protistas.

Quando começamos a discutir complexidade, a primeira coisa que temos que estabelecer é um cenário coerente no qual um organismo multicelular pode se organizar. Em animais, a questão é relativamente complexa, pois, em muitos casos, envolvem sistemas associados às funções básicas desses organismos. A respiração celular em mamíferos, por exemplo, que em última análise fornece energia, só funciona porque estes organismos apresentam o sistema respiratório que promove a respiração pulmonar, um sistema circulatório que transporta os gases pelo corpo, etc.

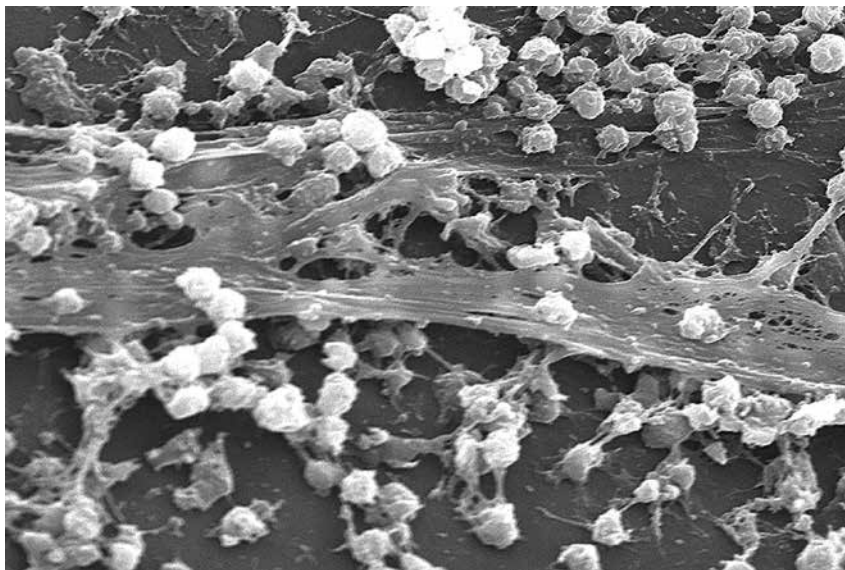


**Figura 6:** O fitoplâncton marinho é composto por organismos unicelulares fotossintetizantes procariontes (cianobactérias) e eucariontes (algas unicelulares).

Mais importante do que isso é o fato de que os sistemas de organismos complexos estão intimamente conectados. Por exemplo, a respiração celular só consegue quebrar a glicose para produzir energia porque

o sistema digestório degradou o alimento ingerido pelo mamífero. A glicose chega a todas as células, e não apenas às relacionadas ao sistema digestório, pela atuação do sistema circulatório que transporta pelo sangue nutrientes, água e os resíduos do metabolismo que serão expelidos pelo sistema excretório. Por outro lado, em organismos multicelulares autotróficos, como as plantas, a questão é um pouco mais simples. Neste caso, cada célula do organismo consegue nutrientes e energia da mesma forma que um organismo autotrófico unicelular, através da fotossíntese e da respiração celular, e os sistemas são mais simples.

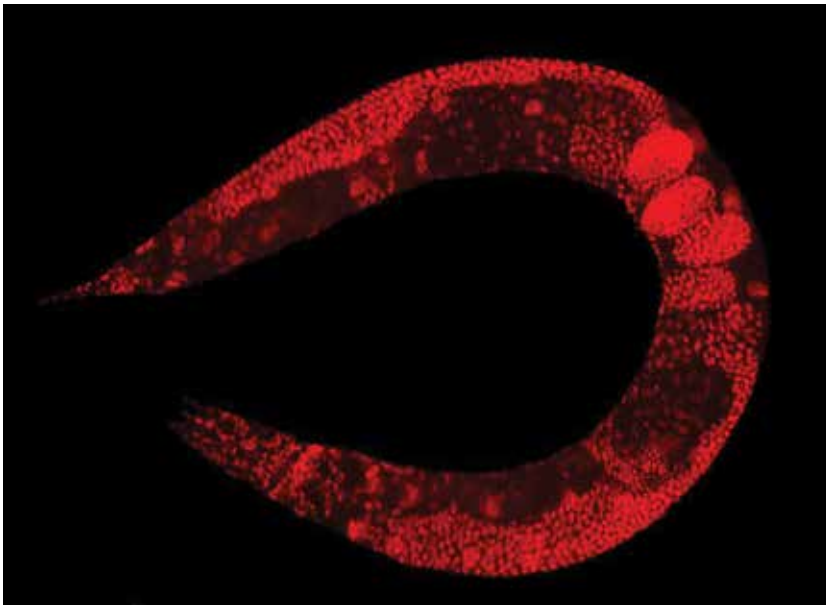
Assim, observando em detalhes estes sistemas simples, podemos ter uma ideia de como a multicelularidade mais complexa pode ter evoluído inicialmente. Um exemplo relativamente simples de ser entendido seria se um organismo celular apresentasse uma mutação pela qual a divisão celular não se completasse; neste caso, as duas células filhas permaneceriam grudadas. Neste caso também, como o fator é genético, os descendentes dessas duas células descendentes também ficariam unidas, podendo dar origem a um organismo multicelular rapidamente. Assim, o organismo multicelular primitivo seria apenas um aglomerado de células sem nenhum tipo de organização ou de regulação multicelular. As capacidades deste primeiro indivíduo multicelular seriam simplesmente a soma das capacidades de cada uma de suas células.



**Figura 7:** Biofilme (agregado) da bactéria *Staphylococcus aureus*, uma bactéria que vive normalmente em nosso trato respiratório, mas pode causar problemas de saúde, como a sinusite. O biofilme que estas bactérias fazem pode nos dar dicas sobre a origem dos primeiros multicelulares.

### Seção 3: Origem da multicelularidade

Entretanto, para um organismo ser multicelular, além de muitas células unidas, ele tem que fazer algo mais complicado - que envolve mais do que a soma de suas partes. Neste caso, é necessário uma rede de integração e um sistema de comunicação entre os trilhões de células para o pleno desenvolvimento de um organismo multicelular. Porém, surge um problema: como podemos estudar como esse tipo de integração iniciou, se um organismo multicelular, por mais simples que seja, apresenta, a cada instante, milhões de interações? Por onde começar? Quais são as mais importantes? Quais foram as primeiras interações a evoluírem?

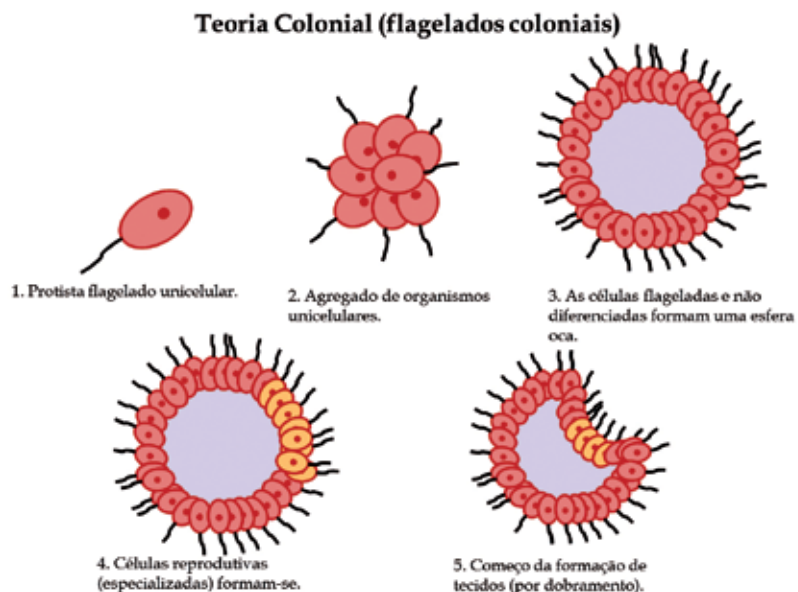


**Figura 8:** Imagem do nematódeo multicelular *Caenorhabditis elegans* corado em vermelho, ressaltando o núcleo de cada uma de suas células. Estudando os multicelulares com poucas células, como este nematódeo, podemos começar a entender como aconteceu a origem da multicelularidade.

Como em qualquer pergunta cuja resposta está no passado, a solução para este problema está na Biologia comparada. Assim, poderemos entender ou, pelo menos, propor um cenário plausível para explicar como surgiu essa rede de interações. Porém, quais organismos vamos comparar? Como estamos querendo entender a evolução da multicelularidade, devemos estudar detalhadamente não apenas as interações entre as células dos organismos multicelulares mais simples e as interações entre os organismos unicelulares.

Ao estudar organismos multicelulares mais simples, os cientistas descobriram que existe uma comunicação entre as células que usam moléculas sinalizadoras, que funcionariam como um carteiro. Tais moléculas são endereçadas a determinados tecidos desses organismos que podem ser próximos ao local de origem da mensagem ou não. Em células adjacentes, a comunicação é realizada por uma junção celular que forma uma espécie de ponte que conecta diretamente o citoplasma das células que, assim, podem trocar substâncias entre elas.

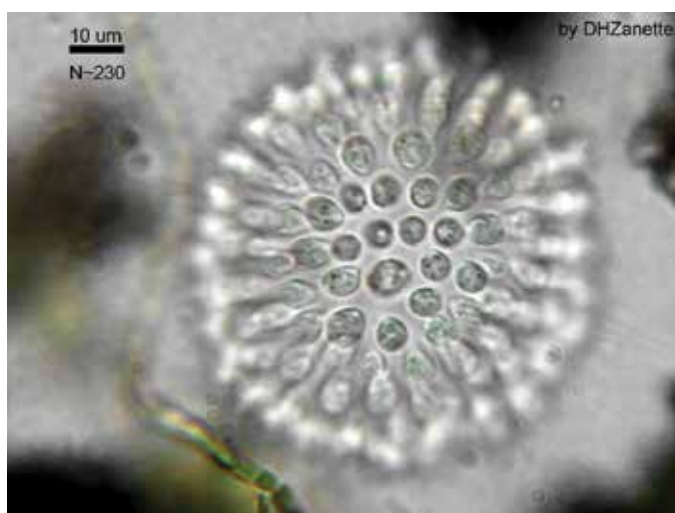
As células de nosso corpo também apresentam a capacidade de reconhecer se uma célula é estranha ao nosso corpo através de marcadores de superfície celular. Tais marcadores são moléculas extremamente variadas, tão alta é a variação que apenas gêmeos geneticamente idênticos são idênticos para tais marcadores. Isso é importante, por exemplo, para o sistema imunológico que atua no reconhecimento e na eliminação de organismos patogênicos ao nosso corpo. Ou seja, o sistema imunológico, para ser eficiente, deve reconhecer se uma determinada célula é própria do organismo ou é externa. Por outro lado, isso também torna o processo de transplante complicado, pois o órgão do doador terá marcadores incompatíveis com os do doador, caso eles não sejam da mesma família.



**Figura 9:** Teoria colonial de origem dos animais, a partir de protistas uniflagelados. O primeiro organismo multicelular teria iniciado como um agregado de células indiferenciadas que, aos poucos, foram assumindo funções e características diferenciadas no organismo.

Existem muitas teorias sobre a origem dos animais; a mais aceita é a teoria colonial. De acordo com esta teoria, protistas unicelulares flagelados iniciaram formando um agregado de células não diferenciadas. Em seguida, esse agregado deu origem a uma esfera oca e iniciou a diferenciação celular em tecidos. Esta origem a partir de protistas uniflagelados tem uma razão de ser. Isso porque estes protistas apresentam um único flagelo e, entre os eucariontes, apenas os animais também apresentam este tipo de células com apenas um flagelo.

No século XIX, um pesquisador francês, Dujardin, percebeu uma alta similaridade entre os coanoflagelados e um tipo especial de células de esponjas marinhas chamadas coanócitos, também células uniflageladas. A partir daí, as similaridades de coanoflagelados e animais ficaram cada vez mais evidentes, incluindo filogenias com base em sequências de genes ribossomais e de outros genes também. Um exemplo de célula animal uniflagelada é o espermatozóide masculino.



**Figura 10:** Uma colônia de um protista coanoflagelado *Sphaeroeca* com mais de 200 indivíduos.

## Seção 4: Origem do sexo

Estamos falando de reprodução desde a aula de origem da vida, mas não falamos sobre os tipos diferentes de reprodução que existem nos organismos. Até agora. Então, vamos lá!



Os procariontes se reproduzem através da fissão binária. Por meio deste modo de reprodução, cada organismo procarionte produz cópias de si mesmo e do seu genoma. Assim, cada organismo procarionte tem a habilidade de reproduzir sozinho, sem a necessidade de outro organismo da mesma espécie para completar o ciclo reprodutivo. Muitos eucariontes também se reproduzem desta forma, produzindo novas cópias idênticas do seu genoma nos descendentes. As estrelas do mar, por exemplo, podem sofrer fragmentação. Neste caso, se um braço da estrela é destacado do corpo, o braço pode ser regenerado no corpo, e o braço pode regenerar outro corpo. Na figura a seguir, vemos esse último exemplo em que um único braço tem a habilidade de regenerar uma estrela do mar inteira.



**Figura 11:** Um tipo de reprodução é a fragmentação em que os descendentes são partes do ancestral e que tem a habilidade de regenerar, como no caso dessa estrela do mar. A fragmentação gera descendentes geneticamente iguais.

Um outro tipo de reprodução é o nosso, que envolve um macho e uma fêmea, para gerar filhotes. Como este tipo de reprodução geralmente envolve sexo, ele é chamado de reprodução sexuada, enquanto a reprodução que não envolve um macho e uma fêmea é chamada de assexuada. Já vimos que a reprodução sexuada envolve, além de sexo, a divisão celular reducional que gera os gametas, com metade do material genético de células comuns do organismo.

Agora, vamos comparar os dois tipos de reprodução. No modo assexuado, um único organismo é capaz de gerar filhotes, e toda a energia que ele investe na reprodução gera cópias idênticas de seu genoma. No outro tipo, ele não apenas tem que achar uma parceira da mesma espécie de outro sexo para conseguir se reproduzir, mas também vai acabar

gastando energia produzindo um monte de gametas que não serão fecundados. Humm..., o que parece mais vantajoso?

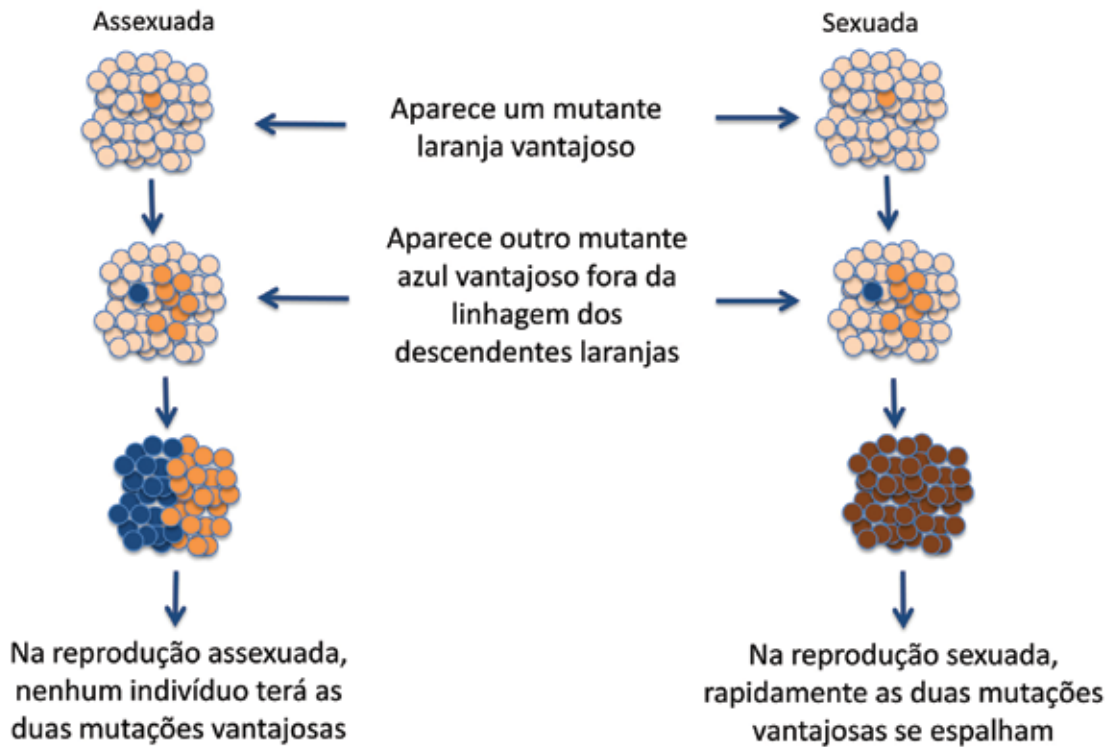
A reprodução assexuada, é claro! Neste caso, a reprodução é direta, imediata e sem obstáculos, pois toda energia dedicada à reprodução converte imediatamente em cópias do genoma do ancestral para todos os descendentes. Além disso, na reprodução sexuada, apenas a metade de seu genoma passa para os descendentes. Imagine também que, se um organismo conseguiu sobreviver até a idade reprodutiva, seu genoma está minimamente adaptado ao ambiente. Assim, dividi-lo e juntá-lo com outra metade, cuja união ainda não foi testada pela seleção natural, não tem como ser melhor do que o genoma inteiro já testado.

Humm..., será? Não deve ser tão simples assim, pois, se fosse tão vantajoso, a primeira espécie ancestral que desenvolveu a capacidade de reproduzir sexualmente não deveria ter dado origem a duas com a mesma capacidade. Além disso, se observarmos melhor a diversidade, a grande maioria das espécies apresenta algum mecanismo de troca gênica entre organismos da mesma espécie. Até os organismos procariontes apresentam o processo de conjugação bacteriana, entre outros, que é uma troca de material genético entre duas células.

Então, qual é a vantagem da reprodução sexuada? Deve existir uma vantagem enorme nesta troca de material genético que justifique o dispêndio energético desse processo. Vamos refletir... A reprodução assexuada reproduz genomas que estão adaptados ao ambiente, certo? Ok, mas se o ambiente mudar? Então, se o ambiente mudar e todos os descendentes forem idênticos, ou todos eles morrem ou todos conseguem sobreviver. Portanto, vai depender de quanto o ambiente vai mudar. Se mudar pouco, possivelmente, todos os descendentes sobrevivem; mas se mudar muito?

Podemos fazer uma analogia com bilhetes de loteria, que seriam os genomas, para cada filho. Na reprodução sexuada, cada filho recebe um bilhete de loteria diferente e, quando o ambiente muda, dentre esses bilhetes diferentes, pode haver um bilhete que tenha a habilidade de sobreviver ao novo ambiente. Por outro lado, na reprodução assexuada todos os filhos recebem o mesmo bilhete de loteria e todos têm a mesma chance de sobrevivência. Além disso, uma vantagem da reprodução sexuada é o fato de que existe uma mistura de genomas. Por exemplo, se tivermos mais de um mutante vantajoso, essas duas características nunca estarão no mesmo descendente, se a população se reproduzir assexuadamente apenas.





**Figura 12:** Uma das vantagens da reprodução sexuada é o fato de que mutações vantajosas que apareceram em linhagens diferentes em uma mesma espécie podem se espalhar na população, caracterizando a cor marrom de seus indivíduos com as duas mutações. Na reprodução assexuada, ou a azul sobrevive ou a amarela sobrevive.

Repare na figura anterior: o primeiro indivíduo mutante laranja enxerga mais longe, e essa mutação vantajosa começa a aumentar de frequência por seleção natural. Entretanto, antes que essa característica seja fixada, uma outra mutação vantajosa surge nesta mesma população, por exemplo, o segundo mutante corre mais rápido que os demais. Como essa segunda mutação não ocorreu entre os descendentes do primeiro mutante, mas em uma linhagem diferente, essas duas mutações vantajosas nunca vão estar no mesmo indivíduo.

Além disso, na reprodução assexuada, para uma mutação vantajosa se espalhar na população, todo o genoma original do organismo mutante também deverá ser fixado. As populações descendentes irão apresentar a mutação vantajosa apenas quando uma delas for constituída somente pelos descendentes diretos do mutante. Assim, o restante da variabilidade da população é perdido na fixação de adaptações quando a população se reproduz assexuadamente.

Na reprodução sexuada, pela mistura de genomas, rapidamente as mutações vantajosas vão chegar ao mesmo indivíduo. Este duplo mutante vai ter mais vantagens que os ancestrais e os demais membros de sua geração. Assim, ele vai ter mais chances de sobreviver e passar seus genes vantajosos para todos os descendentes, aumentando as chances de sobrevivência daquela linhagem.

## Resumo

- A teoria da endossimbiose serial sugere que as mitocôndrias e os cloroplastos se originaram de bactérias aeróbicas e fotossintetizantes, respectivamente;
- A origem da multicelularidade inclui mais do que a soma de células em um único indivíduo, pois, para atingir uma organização acima da organização celular, as células do organismo multicelular devem estar em constante interação;
- A reprodução sexuada envolve a divisão celular reducional e a fecundação de gametas, enquanto a reprodução assexuada não. Apesar das diferenças de gasto energético entre os dois tipos, existem poucas espécies em que não foi descrito algum tipo de troca de material genético entre os membros da espécie;
- A vantagem da reprodução sexuada é a quebra de genomas pré-adaptados. Com isso, um indivíduo tem maiores chances de que, pelo menos, um de seus filhotes sobreviva a mudanças ambientais, mesmo que drásticas.

## Referências para as figuras

Lynn Por Jpedreira - Self-published work by Jpedreira, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=407368>

Cadeias De chris (through works of J. Patrick Fischer, C. Schuhmacher, Madprime, Luis Fernández García, Luis Miguel Bugallo Sánchez, chung-tung yeh, Susanne Heyer and Simon Andrews) - Image:Buteo regalis.jpg, Image:Eunectes notaeus (Puntaverde Zoo, Italy).jpg, Image:Mouse.svg, Image:Chromacris sp 1.jpg, Image:Folla\_Caqui\_002eue.jpg, Image:Orca 01.jpg, Image:Barracuda.jpg, Image:Lake Trout GLERL.jpg, Image:Ctenophore.jpg, Image:Coelastrum.jpg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2499964>

### Phytoplankton

By ja:User:NEON / commons:User:NEON\_ja - Own work, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1669485>

### Fagocitose

Por Autor: pt:Usuário:RodrigoNishino - User RodrigoNishino on pt.wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1253928>

### C elegans

CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52874>

Diatom By Bob Blaylock - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12792563>

### Biofilme

Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2740748>

### Formacao de um biofilme

By D. Davis - From: D. Monroe. "Looking for Chinks in the Armor of Bacterial Biofilms". PLoS Biology 5 (11, e307). DOI:10.1371/journal.pbio.0050307.}, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3364284>

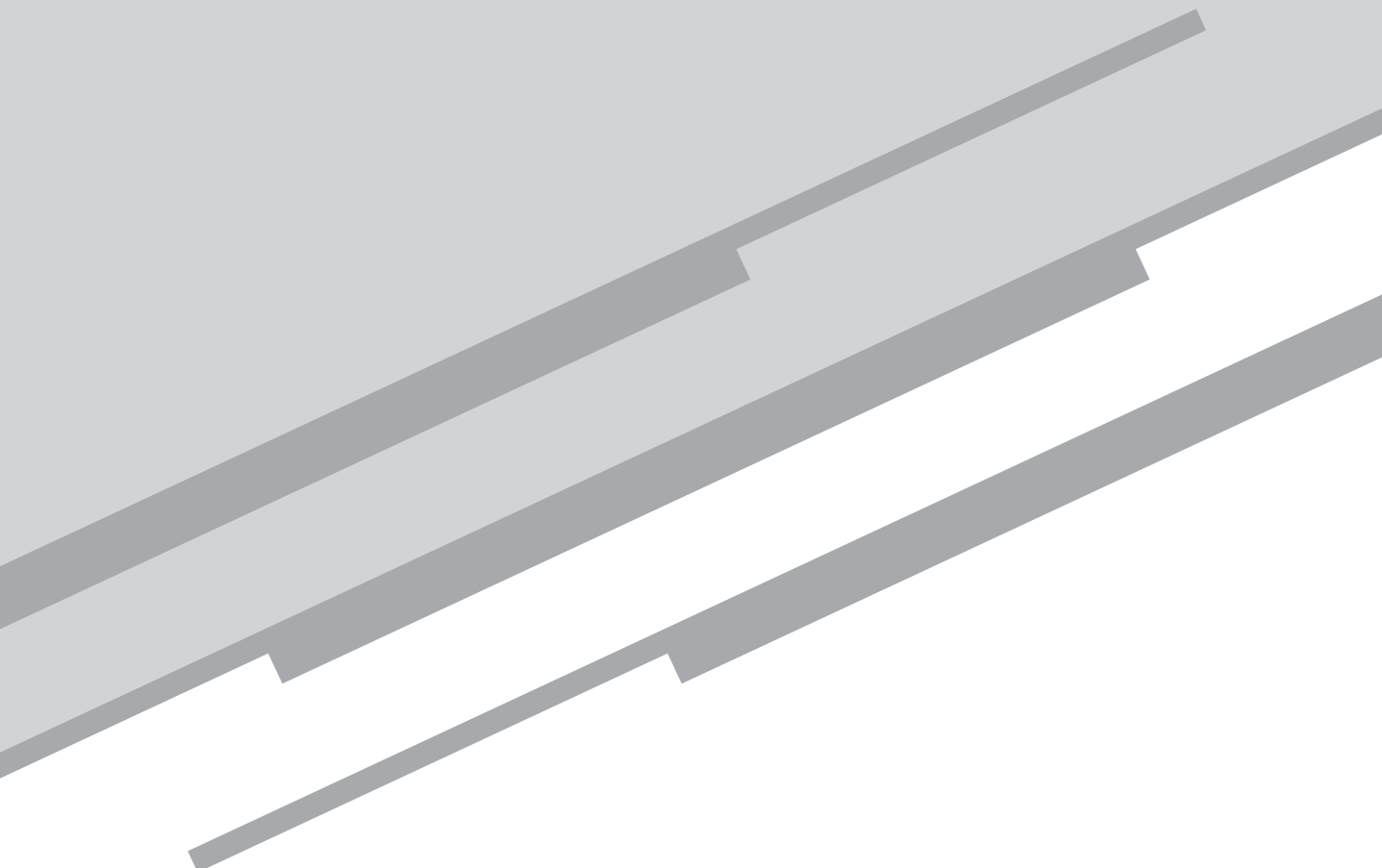
Teoria multicelular Por Thays de Oliveira - autoria própria, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33463363>

By Dhzanette - <http://en.wikipedia.org/wiki/Choanoflagellate>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5506185>

Star fish By Emőke Dénes - Natural History Museum in London, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16002632>

# Aula 12

Evolução do Paleozoico e Mesozoico



*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Os níveis de oxigênio continuaram aumentando depois do Grande Evento de Oxigenação, que iniciou no Arqueano. Além disso, a origem dos processos fundamentais de respiração celular e fotossíntese e a origem dos organismos eucariontes foram os ingredientes básicos para a explosão da diversidade dos eucariontes que iria acontecer no início do Eon Fanerozoico. Esse eon é dividido em três eras geológicas: a Paleozoica, a Mesozoica e a Cenozoica.

A primeira surpresa veio quando os paleontólogos começaram a escavar e encontraram uma fauna relativamente complexa no Fanerozoico, sem nenhuma fauna que os precedesse no Proterozoico. Parecia que essa fauna tinha surgido do nada! Isso realmente não seria compatível com um processo gradual, como pensou Darwin. A figura a seguir retrata alguns dos fósseis do Cambriano encontrados nos estratos desta época.

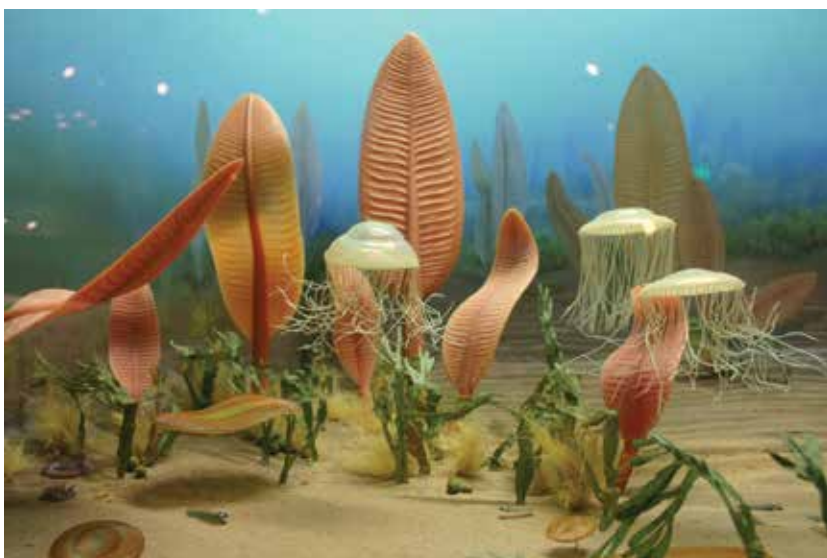


**Figura 1:** Fauna típica do período Cambriano, o primeiro período do Fanerozoico. Muitos dos animais da imagem apresentam esqueleto mais rígido, o que aumenta as chances de preservação desses fósseis. No plano principal da imagem, vemos o *Anomolocaris*, que era o predador mais temido dos mares do Cambriano.

Quanto mais fósseis do Cambriano eram encontrados, mais surpreendente era o fato de que antes desse período nenhum animal multicelular os precedia no registro fóssil. Até que um local na Austrália desvendou o mistério. Sim, existiam animais multicelulares complexos e anteriores aos do Cambriano. Entretanto, a explicação era que, como eles não tinham esqueleto, apenas nos *lagerstätte* poderíamos encontrar seus

fósseis. Então, a explosão do Cambriano simplesmente marca o surgimento do esqueleto! Como essa localidade na Austrália era chamada de Ediacara, essa fauna ficou conhecida como Fauna Ediacariana, e o período geológico em que ela ocorre é conhecido como Ediacariano. Muitas espécies desta época não conseguimos colocar em nenhum grande grupo de animais, para as espécies que conseguimos alocar em grupos; elas são geralmente localizadas nos grupos das esponjas e dos cnidários.

Um detalhe importante é a simetria bilateral que já pode ser encontrada na fauna desta época. Ou seja, já temos animais nos quais o lado direito é semelhante ao esquerdo, como vemos os penatuláceos na imagem a seguir. Atualmente, conhecemos registros fósseis de animais ediacarianos de todos os continentes, com exceção da Antártida. Nesta aula, você vai conhecer mais sobre esses últimos 600 milhões de anos do nosso planeta, época da diversificação dos eucariontes.



**Figura 2:** Fauna típica do período Ediacariano, o último período do Proterozoico. Esses animais não tinham esqueleto rígido, o que diminui as chances de preservação desses fósseis.

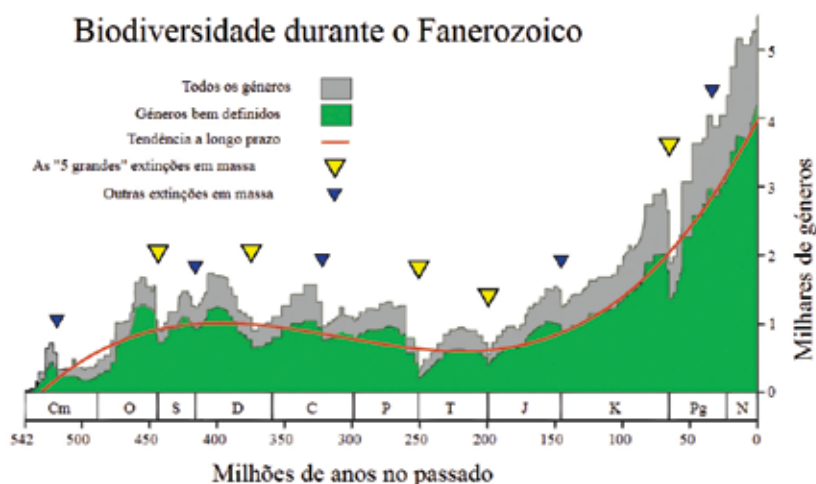
## Objetivos

1. Descrever a fauna de Ediacara em suas características mais marcantes;
2. Estabelecer a conexão da história da diversidade biológica aos períodos de grandes extinções que são seguidos por períodos de especiação e diversificação em massa;
3. Dividir os eucariontes em opisthokontes e bikontes e definir os animais como linhagem evolutivamente próxima ao grupo protista dos coanoflagelados;
4. Associar a evolução da vida na Terra à teoria da deriva continental;
5. Caracterizar o Paleozoico, o Mesozoico e o Cenozoico;
6. Identificar e contextualizar o final do Cenozoico e o Grande Intercâmbio Americano;
7. Detalhar a origem e o início da diversificação dos primatas.

## Seção 1: Extinções e diversificações no Fanerozoico

Um outro problema surge depois da descoberta da fauna do Ediacariano. Comparando as faunas do Ediacariano e do Cambriano, elas são tão diferentes que não conseguimos entender o que aconteceu com esses primeiros organismos do final do Proterozoico. Provavelmente, um grande evento de extinção como aquele que extinguiu os dinossauros há 65 milhões de anos. Aliás, esse tipo de observação no registro fóssil não é raro. Analisando o registro fóssil, percebemos que existem épocas de maior diversificação, ou seja, existem mais linhagens especinando do que se extinguindo. Essas épocas são chamadas de períodos de diversificação, em que novas espécies e novos grupos da diversidade surgem.

Em outras épocas, percebemos mais linhagens se extinguindo do que especinando. Essas épocas são chamadas de Grandes Extinções. De uma maneira ou de outra, uma regra se repete: quem sobrevive a um evento de extinção tem muitas vantagens, pois eles vão ter poucos competidores e muitas possibilidades de alimento. Então, logo depois de um evento de extinção, se segue um evento de diversificação em massa. Na verdade, quanto maior a extinção, maior a diversificação que a segue.



**Figura 3:** Flutuações de diversidade ao longo do Fanerozoico. Repare que, logo depois de uma depressão nas manchas cinza (todos os gêneros) e verde (gêneros bem definidos), existe um pico indicando que o número de gêneros aumenta (diversificação) depois de uma extinção.

De fato, depois da grande extinção dos dinossauros na fronteira K-Pg (65 milhões de anos atrás) na figura, é que vemos aparecer no registro fóssil uma grande diversidade de mamíferos e aves. Os dinossauros dominavam o planeta, mas depois de sua extinção, foi a vez dos mamíferos. Repare que os mamíferos não surgiram depois da extinção dos dinossauros, eles surgiram há mais de 200 milhões de anos. Os mamíferos apenas se diversificaram depois da extinção dos dinossauros; antes disso, poucas linhagens desse grupo são encontradas no registro fóssil. Mas o que causou a extinção dos dinossauros?

Estudando evolução é assim: quanto mais descobrimos, mais aprendemos o que ainda falta descobrir. Aliás, este é um dos mais fundamentais aspectos do conhecimento científico. A ignorância é parte central deste conhecimento, pois apenas entendendo o que não compreendemos, poderemos estudar e desenhar um experimento capaz de testar nossas hipóteses, tornando-as teorias e aumentando o conhecimento científico. Retornando à evolução, quanto mais antiga a história evolutiva contada, menos sabemos, mais buracos existem para serem preenchidos pelos cientistas que vivem hoje e pelos que viverão no futuro.

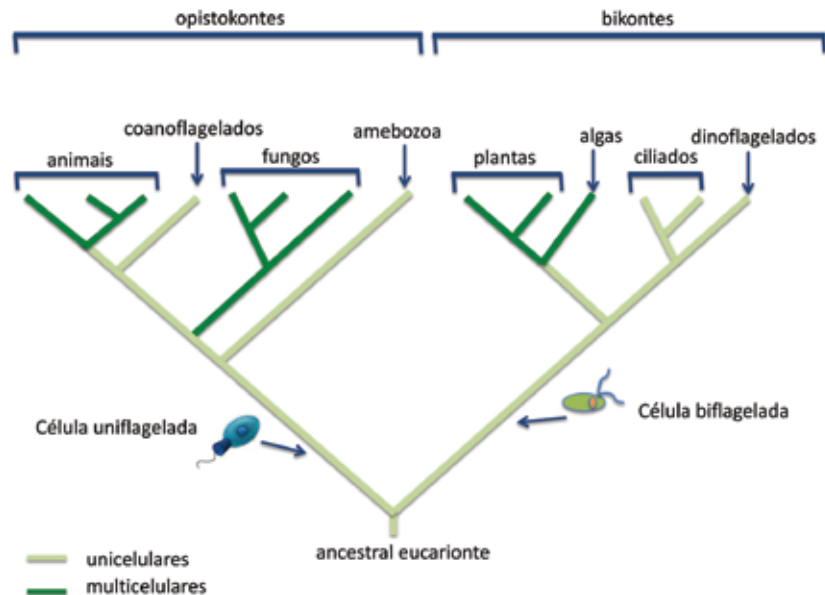
Como mostradas na figura, foram cinco grandes extinções durante o Fanerozoico, além de várias extinções pequenas. Nesta época, provavelmente, o clima e as condições do planeta mudaram drasticamente, ocasionando a extinção de muitas espécies que não tiveram a sorte de



terem deixado filhotes com os bilhetes premiados para sobrevivência da reprodução sexuada. Nestas épocas de mudanças drásticas no clima e na geologia no planeta, não seria vantajoso se reproduzir assexuadamente, mesmo com o ganho energético. Então, em tais épocas, os organismos sexuados se multiplicavam, enquanto os assexuados eram extintos. Isso explica a razão de que a maior parte das espécies são sexuadas hoje em dia.

## Seção 2 : Final do Proterozoico

Os eucariontes são divididos em dois grandes grupos principais, os opisthokontes e os bikontes. A diferença entre eles está nas células flageladas: enquanto os opisthokontes apresentam um único flagelo, como os espermatozoides, os bikontes apresentam dois flagelos, como mostra a figura a seguir. Algas, plantas, ciliados e dinoflagelados, entre outros, fazem parte do grupo dos bikontes, enquanto os coanoflagelados, animais, fungos e amebas fazem parte dos opisthokontes. Repare que alguns opisthokontes perderam seus flagelos, como as amebas.

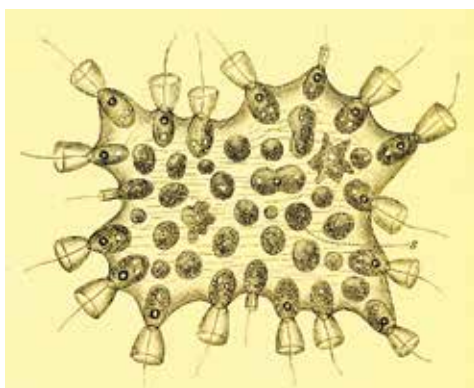


**Figura 4:** Filogenia mostrando a separação das linhagens opisthokontes e bikontes. Os ramos em verde escuro indicam ancestrais multicelulares e, em verde claro, estão os unicelulares. A separação dos três grupos verde escuro indica que a multicelularidade evoluiu independentemente nestes três grupos.

Pela figura, você também deve estar notando outras coisas importantes. Como todos os eucariontes unicelulares são chamados de protistas, fica claro por esta figura que protistas é um termo que não tem um ancestral comum exclusivo deles. Ou seja, ancestrais protistas deram origem a linhagens que hoje são protistas e a outras linhagens que hoje não são protistas. Por isso, protistas não são um grupo aceito na sistemática filogenética que dá nomes apenas a ramos inteiros dessa árvore. Nenhuma característica é exclusiva de protistas, porque o último ancestral comum dos protistas deu origem a animais, fungos e plantas também.

Pela árvore, também podemos notar que a multicelularidade evoluiu de modo independente em animais, fungos e plantas. Assim, a multicelularidade desses três grupos deve ter características particulares de cada um. Além disso, pela filogenia, podemos perceber que os animais são um grupo próximo de uma linhagem de coanoflagelados.

Os coanoflagelados são um grupo interessante, pois, de fato, apresentam células muito semelhantes àsquelas dos animais, como podemos ver na figura. Assim, a Biologia comparativa nos dá uma ideia sobre como ocorreu a evolução, pois percebemos hoje organismos vivos que apresentam características intermediárias entre dois grupos vivos. Certamente, é bom lembrar que esses organismos são atuais e, portanto, tão evoluídos como aqueles que apresentam características mais recentes. Esses organismos com características intermediárias, como estão vivos hoje, são simplesmente descendentes destes ancestrais intermediários entre os protistas coanoflagelados e os animais.

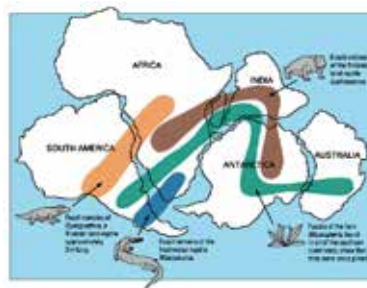


**Figura 5:** Coanoflagelado *Proterospongia*, que é uma colônia de organismos unicelulares. Nesta colônia, não existe diferenciação de tecidos, e a comunicação entre as células é mínima.

### Seção 3: Cambriano, o início do Fanerozoico

Já que estamos falando de passado, vamos falar agora de presente. Você já deve ter percebido que a costa do Brasil e a costa africana parecem se encaixar. Se ainda não percebeu, pegue um mapa do mundo e veja por você mesmo. Isso acontece porque até 100 milhões de anos atrás, esses dois continentes estavam juntos, formando o megacontinente Gondwana. Esse megacontinente incluía mais do que África e América do Sul. Como sabemos disso?

Sabemos disso porque, ao estudar o registro fóssil, percebemos muitos fósseis de animais terrestres de 100 milhões de anos atrás que estão no registro fóssil de continentes que estão hoje separados. Assim, o padrão da distribuição geográfica de alguns grupos indica que os continentes no passado estavam unidos. Neste caso que ilustra a figura, os continentes estavam mais unidos do que estão hoje. A teoria da deriva continental foi formalmente proposta por Alfred Wegener em 1912, mas descobrimos todos os dias novas evidências geológicas e biológicas que sustentam até hoje essa teoria. Repare que a América do Norte não faz parte do megacontinente Gondwana.



**Figura 6:** O megacontinente Gondwana, há 100 milhões de anos atrás, incluía vários continentes que são hoje separados. O que aconteceu com as espécies que habitavam este continente, quando duas placas se separaram? Elas sofreram eventos de especiação.

No período Cambriano, há 500 milhões de anos, os continentes estavam todos separados em mais continentes do que aqueles que vemos hoje em dia. Além disso, esses continentes estavam alinhados próximos ao equador, ou seja, além de muito espaço de água rasa para se diversificar, toda essa água rasa era quente - o que também favorecia o processo de diversificação no Cambriano. Além de diferentes dos organismos do

Ediacariano, a diversidade do Cambriano é muito maior, tanto em número de espécies como em tamanho, do que a de períodos anteriores.

Além da vantagem aos biólogos que vão encontrar fósseis do Cambriano com mais facilidade, como vimos anteriormente, o esqueleto duro traz vantagens de locomoção e de proteção aos animais que o apresentam. Outro motivo para a diversificação do Cambriano. Além do esqueleto, evidências fósseis sugerem que o hábito de se enterrar pode ter surgido também nessa época, pois percebemos túneis escavados desta época.

Como enterrar-se é um hábito que demanda energia, os pesquisadores ficaram se perguntando que tipo de situação poderia ter levado ao surgimento deste hábito, que apareceu ao mesmo tempo em várias linhagens da época. Depois de muita reflexão, eles conseguiram chegar à conclusão: esses escavadores estavam fugindo. Mas fugindo de quem? Eles estavam fugindo de seus predadores! Nos mares do Cambriano, era o *Anomalocaris* o predador mais temido (reveja a imagem dele na Figura 1).



**Figura 7:** Uma reconstrução mais detalhada do predador cambriânico *Anomalocaris*, que deve ser um parente próximo dos artrópodos. Espécies deste gênero são encontradas em depósitos da América do Norte, China, Austrália, etc.

Além da mudança de hábitos, a predação também pode ter favorecido mutações que resultaram no desenvolvimento de sentidos mais apurados (de forma a detectar o predador), incluindo o desenvolvimento de olhos, tanto nos predadores como em suas presas. Se o *Anomalocaris* era o predador mais temido, o *Hallucigenia* era o mais estranho.

Entretanto, uma característica em particular faz destes dois gêneros importantes. Repare no corpo deles; o que você pode perceber? Uma sequência de segmentos repetidos ao longo do corpo. Essa sequência é chamada de metameria, e a repetição não é apenas externa, mas também é encontrada nos órgãos internos do corpo. A vantagem do aparecimento da metameria é o fato de que um organismo metamérico consegue crescer rapidamente com poucas mutações, pois o segmento do ancestral é simplesmente repetido nos descendentes, aumentando facilmente o organismo metamérico. Assim, a metameria pode ter sido outra característica biológica que impulsionou a diversificação do Cambriano.



**Figura 8:** Um outro organismo típico dos mares do Cambriano, *Hallucigenia*, que pode ter dado origem aos onicóforos atuais. Seus espinhos forneciam uma proteção contra o *Anomalocaris*. Encontramos representantes desse gênero em *lagerstätte* do Canadá e da China.

Outras características importantes que surgiram nesta época estão ligadas à obtenção de oxigênio e ao uso eficiente deste gás na respiração celular. Um exemplo é o aparecimento de guelras nos animais marinhos, aumentando a eficiência de obtenção do oxigênio da água do mar. Outro exemplo é o aparecimento de proteínas carreadoras de oxigênio pelo sangue, como a hemoglobina, que fazem um transporte mais eficiente deste gás até as células.

## Seção 4: O restante do Paleozoico

Além da diferença entre o Ediacariano (final do Proterozoico) e o Cambriano (início do Paleozoico), se compararmos a biota do início e do final do Paleozoico, a diferença também é marcante. Entretanto, di-

ferentemente do primeiro caso, aqui o registro fóssil mostra claramente as mudanças evolutivas que ocorreram na biota. Por exemplo, o registro fóssil apresenta evidências da origem (no período Cambriano), da diversificação (nos períodos Cambriano e Devoniano) e da extinção (no período Permiano) dos trilobitas.



**Figura 9:** Um trilobita fóssil do gênero *Paraceraurus*, do Ordoviciano, coletado em sedimentos do Ordoviciano da Rússia. No registro fóssil de todo o mundo, encontramos trilobitas que eram muito comuns no Paleozoico, mas se extinguíram antes do Mesozoico.

Outras mudanças na biota durante o Paleozoico incluem a origem das primeiras plantas terrestres. As primeiras plantas terrestres surgiram no Ordoviciano. Essas primeiras plantas não tinham vasos e, portanto, todas as trocas deveriam acontecer de célula para célula, como as briófitas hoje em dia. Por isso, essas plantas são sempre de tamanho pequeno. Já as primeiras plantas traqueófitas, ou seja, com vasos, no período Siluriano, formaram as primeiras florestas da história da vida na Terra - eram florestas de pteridófitas (samambaias) gigantes.

Os primeiros vertebrados, os peixes, apareceram no Ordoviciano. Logo em seguida, surgiram os primeiros tetrápodos (anfíbios), que invadiram o ambiente terrestre no Devoniano, diversificando-se no Carbonífero. Esse grupo de tetrápodos se diversificou rapidamente, dando origem aos primeiros répteis no Carbonífero. Entretanto, os anfíbios eram dependentes da água para reprodução; assim, para se reproduzirem, deveriam estar sempre perto de uma fonte de água.



Com o advento do ovo amniótico, os anfíbios ancestrais se diferenciaram no que chamamos de répteis. Estes organismos não tinham necessidade de jogar seus ovos na água, pois os ovos tinham casa dura, sendo resistentes à perda de água. Tal adaptação aumentou as chances de os répteis começarem a se diversificar no Permiano, último período do Paleozoico.



**Figura 10:** Répteis, aves e mamíferos apresentam modos reprodutivos nos quais não é necessário colocar os ovos na água, como fazem os anfíbios. Essa mudança de hábito foi possível pelo aparecimento do ovo amniótico de casca dura.

Um dos grupos de diversificação dos répteis foi o grupo dos répteis mamaliformes do Permiano. Estes são répteis ancestrais que apresentam características transitórias entre o grupo dos répteis atuais e o grupo dos mamíferos atuais. Eles são claramente um exemplo de espécie transitória entre répteis e mamíferos. Por exemplo, esses répteis tinham dentes de diferentes tipos, o que é diferente dos répteis atuais, como o crocodilo, no qual todos os dentes têm o mesmo formato.

Esse grupo de répteis tinha essa característica típica dos mamíferos modernos, que é vantajosa, pois dentes diferenciados funcionam para

alimentos diferentes. Os caninos servem para rasgar carne, os molares e pré-molares para moer, os incisivos para cortar. Assim, a alimentação dos membros deste grupo se tornou mais fácil. Portanto, os répteis mamaliformes iriam passar tal adaptação a seus descendentes, os mamíferos, que até hoje a apresentam.



**Figura 11:** Répteis mamaliformes são relacionados aos ancestrais dos mamíferos atuais e já apresentavam dentes diferenciados, como os mamíferos apresentam hoje.

O final do Permiano marca o maior de todos os eventos de extinção da história da vida na Terra. Se o Cambriano apresentou os continentes separados e na zona do equador, aumentando a área de águas rasas e quentes, o Permiano se caracteriza por continentes juntos em um supermegacontinente, chamado de Pangea. Para a fauna marinha, continentes unidos significam uma área menor para habitar. Por outro lado, no ambiente terrestre, a união dos continentes significa menor influência do oceano e, assim, desertos de proporções continentais se formaram.

Todos os trilobitas e os escorpiões marinhos desapareceram nesta época. Além desses grupos, todos os grupos diminuíram sua diversidade. Na verdade, 95% da diversidade biológica não sobreviveu às mudanças climáticas drásticas desta época. Entretanto, como vimos no início da aula, os 5% restantes tiveram muita vantagem, pois tinham pouquíssima competição, e a nossa história continuou, pois começaram a se diferenciar.



## Seção 5: O Mesozoico

O supermegacontinente Pangea começou a quebrar no meio do Mesozoico. A partir desta quebra, os megacontinentes Gondwana (América do Sul, África e Austrália) e Laurasia (América do Norte, Ásia e Europa) se isolaram um do outro. Outras rupturas continuaram a isolar partes menores dos grandes continentes durante o Mesozoico, contribuindo para o processo de diversificação da biota dessa época.

Com a vantagem do ovo amniótico, que não depende da água para reprodução, como os anfíbios, algumas linhagens de répteis conseguiram sobreviver à extinção do Permiano. Os sobreviventes rapidamente dominaram os ambientes marinhos e terrestres e, por isso, chamamos o Mesozoico de “Idade dos Répteis”. Este grupo sofreu grandes alterações, como o aumento de tamanho e mudanças radicais na forma, que fizeram conquistando também os ambientes aéreo, com os pterossauros, e marinho, com os enormes répteis marinhos.



**Figura 12:** Os pterossauros foram os primeiros vertebrados voadores. Eles não são considerados dinossauros, mas eles e os dinossauros têm um ancestral comum exclusivo que deu origem às aves modernas também. Eles variavam muito de tamanho, com espécies que tinham abertura de asas de 25 cm até 10 m.

No cenário da diversificação dos répteis que sobreviveram à extinção do Permiano, dois grupos se destacam. O primeiro deles já discutimos, que foram os répteis com dentes diferenciados, como os mamíferos. Além de dentes mamaliformes, algumas características do crânio destes répteis também são características dos mamíferos; por exemplo, eles apresentam um buraco no crânio, que é um local onde os músculos ligados à mandíbula se conectam. Essa característica também é uma adaptação que permite que a mordida seja mais poderosa. O primeiro organismo classificado formalmente como mamífero surgiu no Triássico.

Do segundo grupo de répteis, alguns de seus membros começaram a andar em duas patas, ou seja, andar bipedalmente. O próprio *Tyrannosaurus rex* era bipedal, como vemos popularmente em filmes e documentários e, as reconstruções mais recentes, colocam penas em membros desta espécie. No Jurássico, esse grupo deu origem às aves, sendo o *Archaeopteryx* considerado como a primeira ave, pois suas penas são assimétricas. Penas assimétricas estão associadas à maior eficiência ao voo, pois dão maior aerodinamismo ao voo. Por outro lado, as penas simétricas estão relacionadas apenas à regulação de temperatura. De fato, mesmo nas aves modernas que não voam, como os pinguins, suas penas são simétricas. Repare, na figura a seguir, um representante da pena dessa primeira ave. Outras características das aves incluem ossos pneumáticos, coração com quatro câmaras, e ausência de dentes.



**Figura 13:** Pena de *Archaeopteryx*. Este animal é considerado como a primeira ave; suas penas são assimétricas - o que é indicativo de que esta espécie voava. Penas assimétricas sofrem menor resistência do ar, adaptação importante para quem voa.



## **Taxonomia discreta e um registro fóssil contínuo**

Entretanto, se o *Achaeopteryx* é considerado como a primeira ave, e as aves não têm dentes, por que consideramos este animal com dentes como a primeira ave? Neste caso, a razão é simples e mais uma vez fornece evidências de um processo evolutivo e contínuo: a presença de dentes no *Archaeopteryx* é evidência de que o voo surgiu antes do desaparecimento dos dentes nas aves. As aves modernas não têm dentes, mas descendem dos dinossauros, que tinham dentes. A perda de dentes nas aves está relacionada com a origem dos bicos, pois, no registro fóssil, essas duas mudanças acontecem praticamente no mesmo momento.

Mas, quando ocorreu o aparecimento da primeira espécie que chamamos de aves? E por que a chamamos de primeira ave, e não chamamos de ave a espécie imediatamente ancestral dela? Ao longo do registro fóssil, esses nomes são relativamente arbitrários, pois a evolução é um processo contínuo. Então, quem determina esse corte são os taxonomistas do grupo; como é um grupo extinto, esses pesquisadores são chamados de paleontólogos. A evolução é não apenas contínua, mas é ininterrupta, desde a origem da vida, passando pelos dias atuais até que toda a vida seja extinta. Além disso, dificilmente conseguimos fazer filogenias com os fósseis para podermos usar a sistemática filogenética.

## **Seção 6: O Cenozoico**

Da mesma forma que a transição entre o Paleozoico e o Mesozoico, a transição entre a era Mesozoica e a era Cenozoica foi marcada por outro grande evento de extinção em massa. Isso não é coincidência. As divisões do tempo geológico não estão em intervalos iguais de tempo. Os geólogos decidem mudar éons, eras, e períodos quando existem mudanças mais ou menos drásticas na biota de um momento para outro.

O impacto de um meteoro pode ter causado esta extinção, pois um aspecto interessante é que, em extratos desta época, encontramos um elemento químico bastante raro na Terra e comumente encontrado em asteroides. De fato, essa camada do elemento irídio é encontrada em todo o planeta e, portanto, indica que pode ter tido consequências em todo o mundo, não apenas no local de impacto. Por outro lado, é importante lembrar que a extinção não foi um evento rápido, mas um processo que durou alguns milhões de anos. As espécies de grande porte foram aos poucos se extinguindo, incluindo o grande *Tyrannosaurus*, e a maior parte dos organismos com mais de 25 quilos não sobreviveu ao evento de extinção.



**Figura 14:** Reconstrução artística do impacto do meteoro na transição entre os períodos Cretáceo-Paleogeno ou entre as eras Mesozoica-Cenozoica.

Como já discutimos, quem sobrevive a um evento de extinção já começa com vantagens. Neste caso, os grupos sortudos foram as aves e os mamíferos que, mesmo tendo sofridos extinções severas, não foram totalmente dizimados. Assim, esses grupos iniciaram um processo de diversificação, ocupando os vazios deixados pelos extintos dinossauros, as aves no ar e os mamíferos na terra e no mar.

Neste tipo de processo, as taxas de especiação são altas, enquanto as de extinção são baixas. O termo diversificação implica o fato de que as

novas espécies surgiram com uma diversidade de formas, de hábitos e de fisiologias em relação a seus ancestrais, o que chamamos de radiação adaptativa. O Cenozoico, portanto, foi o período da radiação adaptativa dos mamíferos e das aves. Da mesma forma que o Mesozoico é a Idade dos Répteis, o Cenozoico é considerado como a Idade dos Mamíferos.



**Figura 15:** Reconstrução da fauna típica de mamíferos da América do Sul do meio para o final do Cenozoico. Em primeiro plano, o carnívoro marsupial *Thylacosmilus*. Apesar de seus dentes caninos longos, esse animal não era aparentado com o tigre-de-dente-de-sabre, que era um mamífero placentário, não marsupial como este.

No final do Cenozoico, o planeta começou a esfriar, e as calotas polares começaram a aumentar de tamanho, o que diminuiu o nível do mar como há muitos milhões de anos não se via. A América do Sul, antes conectada ao Gondwana, estava isolada há, pelo menos, 30 milhões de anos, enquanto a América do Norte, antes conectada ao Laurasia, também estava relativamente isolada. Assim, essas grandes massas continentais apresentavam uma biota típica e endêmica de cada um. Entretanto, analisando extratos fossilíferos mais recentes, já do Plioceno, verificamos uma mistura inicial entre essas faunas e floras, o que tem origem na conexão desses dois continentes pelo istmo do Panamá, tendo duas consequências principais.

Para os organismos marinhos, o istmo do Panamá criou uma barreira às populações do mar do Caribe, separando-as das populações do Pacífico. Isso resultou em um grande evento de especiação de organismos de todo o ambiente. Por outro lado, para as populações de organismos terrestres, a subida do istmo criou uma ponte, permitindo o Grande Intercâmbio da Fauna, o que também pode ser observado no registro fóssil. Na figura a seguir, as faunas endêmicas de cada continente.



que usavam o dedo opositor para se agarrarem nos galhos das árvores. A maior parte dos macacos apresenta hoje o hábito, pelo menos parcialmente, arbóreo.

Além disso, os primatas apresentam visão tridimensional, bem útil para quem quer pular de um galho para outro. Entretanto, esse tipo de visão requer uma sobreposição do campo de visão dos dois olhos. Note que você perde um pouco essa visão tridimensional ao ficar com um olho tapado. Essa sobreposição está relacionada ao fato de que primatas têm olhos voltados para a frente e sofreram uma redução das narinas, com a perda da capacidade olfativa, pois o nariz grande iria bloquear essa sobreposição.

Estávamos discutindo a diversificação dos mamíferos no Cenozoico. Pois bem; o primeiro fóssil de primatas que encontramos no registro fóssil pertence ao gênero *Teilhardina*. Estudos recentes indicam que sua origem foi na Ásia, com a espécie *Teilhardina asiática*. Essa espécie, aos poucos, foi dispersando em direção ao Ocidente, e outras espécies desses primatas foram surgindo. São conhecidas oito espécies desse gênero, que tinha uma ampla distribuição geográfica, ocupando a Ásia, a Europa e a América do Norte. A figura a seguir mostra uma reconstrução da espécie com base nos fósseis encontrados e na comparação morfológica com outras espécies atuais.



Alexandre Pedro Selvatti

**Figura 17:** Reconstrução de *Teilhardina magnoliana*, uma espécie que viveu no Mississippi, no sul dos Estados Unidos. Esse gênero foi originalmente descrito por George Gaylord Simpson, um paleontólogo americano que também detalhou o Grande Intercâmbio Americano, que vimos na última aula.



Estudando com maior detalhamento o registro fóssil desse importante gênero de mamífero, os pesquisadores perceberam que as diferentes espécies de *Teilhardina* se espalharam muito rapidamente. Desde seu surgimento na Ásia, em apenas 25 mil anos, eles já se encontravam no continente americano. Mas o que teria impulsionado essa rápida dispersão e a diversificação desses primeiros primatas? Bom; com as primeiras adaptações ao hábito arborícola, esses primatas ancestrais tinham um estilo de vida diferente. Repare que, por suas adaptações, nossos ancestrais tinham mais chances de sobrevivência e de reprodução do que outras espécies de mamíferos e de vertebrados que também habitavam a Ásia, da mesma forma que, entre indivíduos de uma população, a seleção natural selecionando espécies que têm mais chances de sobrevivência e reprodução do que outros representantes da biota local.

## Resumo

- A fauna de Ediacara apresentava simetria bilateral, mas não tinha esqueleto, o que dificulta o processo de fossilização;
- Os períodos de grandes extinções são seguidos por períodos de especiação e diversificação em massa;
- Os eucariontes são divididos em opisthokontes e bikontes, e os coanoflagelados compõem a linhagem evolutivamente mais próxima aos animais;
- A vida na Terra está intimamente associada à deriva continental;
- A era Paleozoica foi um período de grandes diversificações e marca o aparecimento de grandes grupos de animais e de plantas;
- A era Mesozoica é a era dos répteis, em que estes dominaram todos os locais do planeta até a extinção do final do Cretáceo, que eliminou todos os dinossauros, menos as aves;
- A era Cenozoica é a era dos mamíferos, que ocuparam, junto com as aves, os vazios deixados pelos dinossauros extintos;
- O final do Cenozoico é marcado pela união da América do Sul e da América do Norte através do Istmo do Panamá, que incorreu no Grande Intercâmbio Americano;
- Os primatas são mamíferos adaptados ao hábito arborícola e sua diversificação está relacionada a essa novidade evolutiva.



## Referências para as figuras

Por Splibubay (Portuguese translation) - Este ficheiro foi derivado de: Phanerozoic Biodiversity.svg by Dragons flight (original PNG image) and Albert Mestre (SVG version), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31678415>

Cambriano

Credit: Smithsonian Institution

Anomalocaris

De Jose manuel canete - Trabajo propio, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56523817>

Ediacara

De Ryan Somma - Life in the Ediacaran Sea Uploaded by Funk-Monk, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24277381>

Hallucinogenia

De Jose manuel canete - Trabajo propio, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56523342> Fauna SA NA

Interchange Por Woudloper - Obra do próprio, CC BY-SA 1.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6356026>

Fauna SA

By Rom-diz - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10963980>

Uniflagelado na filogenia CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=455032>

Gondwana Por jmwatsonusgs.gov - United States Geological Survey (USGS) - <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/continents.html> en:Image:Snider-Pellegrini\_Wegener\_fossil\_map.gif - Original upload 19:49, 13 April 2005 by en>User:SEWilco, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1075951>

Trilobita

By Vassil - Alias Collections., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3200496>

Sinapsideos permiano

Illustration of *Dimetrodon* and *Edaphosaurus*. Image: John Sibbick Source: John Sibbick

Pterossauro

Por Heinrich Harder (1858-1935) - The Wonderful Paleo Art of Heinrich Harder, Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=725591>

Ovo amniótico

CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=327382>

Ice age By Mauricio Antón - from Caitlin Sedwick (1 April 2008). "What Killed the Woolly Mammoth?". PLoS Biology 6 (4): e99. DOI:10.1371/journal.pbio.0060099., CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11781070>

Impact meteor

By Donald E. Davis - <http://www.jpl.nasa.gov/releases/98/yucatan.html>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1740905>

Figuras

Figura 01:

<http://ocean.si.edu/slideshow/collection-cambrian-fossils>

Figura 05:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Choanoflagellates\\_Colonie\\_\(M%C3%A9chnikov\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Choanoflagellates_Colonie_(M%C3%A9chnikov).png)

Figura 11:

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dimetr\\_eryopsDB.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Dimetr_eryopsDB.jpg)

Figura 13:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Archaeopteryx\\_\(Feather\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Archaeopteryx_(Feather).jpg)

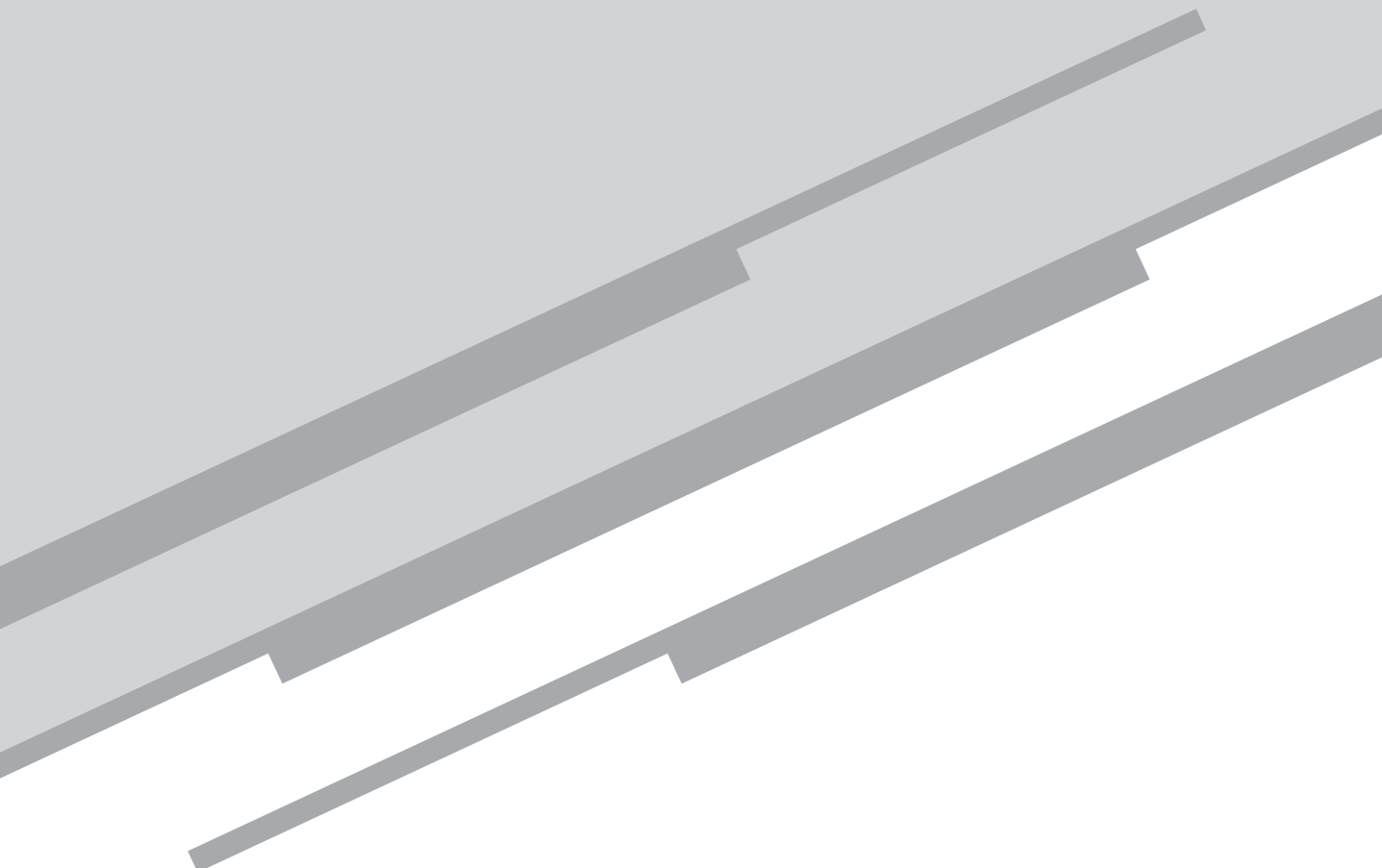
Figura 17:

Autor: Alexandre Pedro Selvatti



# Aula 13

Evolução humana

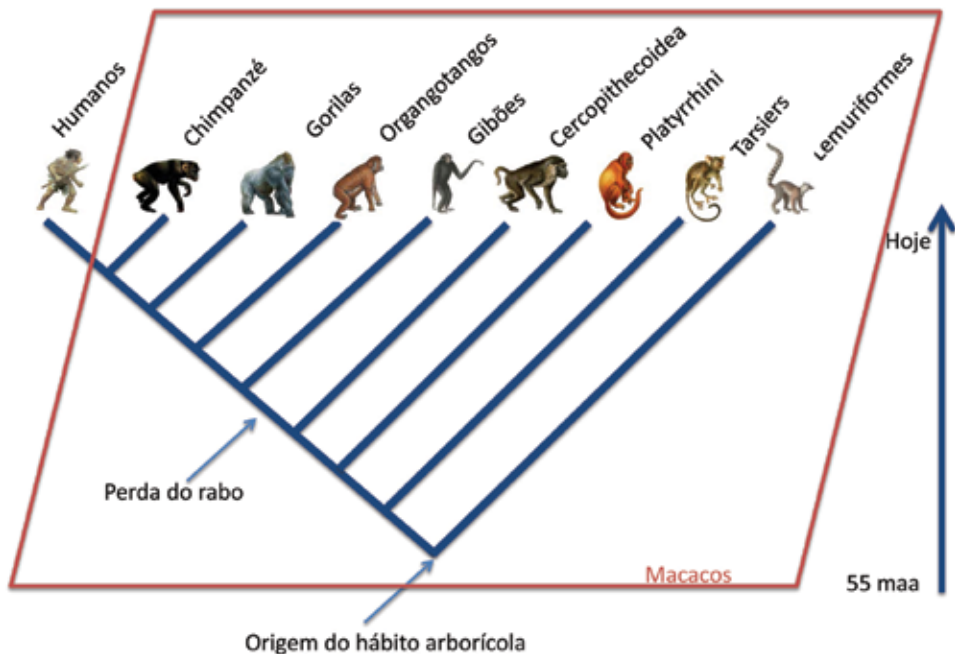


*Claudia Augusta de Moraes Russo*

## Para início de conversa...

Se nós descendemos de *Teilhardina*, como vimos na última aula, significa que somos descendentes dos macacos. Entretanto, se viemos dos macacos, como ainda existem macacos? A resposta simples a essa pergunta é que nós e os macacos atuais viemos de macacos ancestrais. Assim, o macaco ancestral que deu origem às linhagens de chimpanzés e de humanos era tão diferente de humanos como de chimpanzés. Lembre-se de que, desde o ancestral comum, tanto os humanos como os chimpanzés se modificaram até os dias atuais. Neste caso, o ancestral em comum com os chimpanzés viveu há cerca de 8 milhões de anos.

Só chamamos esse “macaco ancestral” pelo mesmo nome que chamamos nossos parentes “macacos vivos” hoje em dia por uma questão antropológica. Ou seja, merecemos um nome só nosso, porque somos o centro do Universo. Porém, o ancestral de todos os macacos, que era arborícola, também deu origem a todos os macacos e também aos humanos. Assim, pela sistemática filogenética, temos duas possibilidades: a primeira é incluir os humanos dentro da diversidade incluída na palavra *macacos*. A segunda possibilidade é abolir o termo *macacos*.



## Filogenia de Primatas e os macacos

**Figura 1:** Filogenia ilustrando uma árvore filogenética de primatas (azul), a origem do hábito arborícola (seta fina), a linhagem na qual o rabo foi perdido (seta fina) e a diversidade que o termo macacos inclui (quadrilátero vermelho).

Vamos entender melhor essa questão do ancestral comum. Vamos pensar em uma analogia mais moderna. Se os brasileiros descendem de portugueses, como os portugueses ainda existem? Pela mesma razão, não descendemos dos portugueses atuais, descendemos dos portugueses ancestrais, aqueles que vieram ao Brasil a partir do século XVI. Mas nem todos os portugueses ancestrais vieram ao Brasil, alguns ficaram em Portugal, dando origem aos portugueses atuais. Assim, os brasileiros são hoje descendentes de parte dos portugueses ancestrais que aqui se misturaram pela reprodução a outros europeus, aos índios que já viviam aqui e aos negros que foram trazidos do continente africano.

As diferenças acumuladas entre essas linhagens durante o isolamento desses grupos humanos não alteraram a capacidade reprodutiva entre eles, mudaram apenas algumas características morfológicas, como cor (olho, cabelo, pele), altura, feições faciais, etc. Assim, quando eles se encontraram no Brasil, eles se cruzaram, dando origem à nossa população brasileira de muitas línguas, com muitos costumes, com muitos sabores diferentes em culinária e com uma alta variabilidade genética. Nós somos o resultado de uma população culturalmente rica e geneticamente saudável. Nesta aula, iremos descobrir sobre esse nosso passado recente, sobre a história recente do *Homo sapiens* e da população brasileira.

## Objetivos

1. Associar o conceito de seleção natural à sobrevivência e à reprodução diferencial de espécies com características particulares;
2. Esclarecer a origem humana e dos chimpanzés a partir de macacos ancestrais, e não de macacos atuais;
3. Identificar os principais grupos fósseis de homínídeos, estabelecendo uma relação histórica entre os grupos africanos e não africanos;
4. Detalhar as mudanças anatômicas e as consequências ecológicas associadas à origem do bipedalismo;
5. Caracterizar o contexto e as consequências sociais associadas à origem da encefalização;
6. Relacionar as grandes migrações para fora da África à origem de *Homo sapiens*, ao domínio do fogo.

# Seção 1: Se nós viemos dos macacos, então nós somos macacos...

Observando a filogenia dos primatas, podemos entender várias coisas. Em primeiro lugar, que nosso polegar opositor não é característica humana, mas característica dos primatas de modo geral. Na espécie humana, o dedão do pé é virado para a frente e funciona como uma alavanca para o nosso passo. Desta forma, ele é diferente do pé de nossos parentes símios, nos quais o dedão do pé também é opositor pois eles agarram os galhos das árvores também com os pés.

Além disso, o rabo não foi perdido na nossa linhagem, pois gibões, orangotangos, gorilas e chimpanzés também são primatas sem rabo. Agora, você deve estar entendendo por que Lineu também nos colocou nesta ordem de Primatas, percebendo a similaridade entre nós e nossos parentes. Repare que ele sugere essa classificação, mesmo sem entender a causa desse padrão evolutivo, conceito que ele desconhecia. Lineu também classificou os humanos em diferentes espécies, o que hoje sabemos que não procede, pois todos podem se reproduzir e ter descendentes férteis.

MAMMALIA.  
ORDER I. PRIMATES.

*Fore-membrs varying; upper 4, parallel; lower 5, pectinate*

1. HUMAN.

*Diverse, varying by education and situation.*

*Species.*

1. <i>Formicae, mure, hairy.</i>	<i>Wild man.</i>
2. <i>Opposum, shaggy, erect.</i>	<i>American.</i>
3. <i>Howler, mure, thick, mure, wide, face hairy, head mure, slender, common fur. Pectinate hind with five and long. Regarded by custom.</i>	
4. <i>Howler, mure, hairy.</i>	<i>European.</i>
5. <i>Howler, mure, hairy, eye blue, gentle, mure, inactive. Covered with three mures. Covered by law.</i>	<i>Indian.</i>
6. <i>Howler, mure, hairy, eye dark, mure, hairy, mure, inactive. Covered with three mures. Covered by custom.</i>	<i>Indian.</i>
7. <i>Howler, mure, hairy, eye dark, mure, hairy, mure, inactive. Covered with three mures. Covered by custom.</i>	<i>Indian.</i>
8. <i>Howler, mure, hairy, eye dark, mure, hairy, mure, inactive. Covered with three mures. Covered by custom.</i>	<i>Indian.</i>

*Mammals.*

1. <i>Small, mure, mure.</i>	<i>Mammals.</i>
2. <i>Large, mure, mure.</i>	<i>Mammals.</i>
3. <i>Small, mure, mure.</i>	<i>Mammals.</i>
4. <i>Small, mure, mure.</i>	<i>Mammals.</i>
5. <i>Small, mure, mure.</i>	<i>Mammals.</i>
6. <i>Small, mure, mure.</i>	<i>Mammals.</i>

*The anatomical, physiological, moral, civil and social history of man, are here described by their respective writers.*

**Figura 1:** Classificação original de Lineu mostra a diversidade humana incorretamente interpretada como espécies diferentes. Por outro lado, nos mostra como primatas, mesmo sem conhecer sobre evolução.

Entretanto, para entender a evolução humana, temos que fazer mais do que comparar as populações atuais. Temos que olhar o registro fóssil humano. E temos muitos fósseis para isso. Logo depois dos trabalhos de Darwin, houve épocas em que achávamos que a evolução se procedia em forma linear. Para esses pesquisadores, uma espécie evoluiria em outra descendente, e este descendente evoluiria em uma nova descendente, todas enfileiradas em uma enorme e gigante linhagem. Daí, o termo evolução linear.

Entretanto, não foi isso que Darwin disse. Se você se lembra da *Origem das Espécies*, Darwin claramente falava na genealogia, que hoje chamamos de filogenia. Nesse sentido, uma espécie ancestral dá origem a duas espécies descendentes, as duas dão origem a quatro, formando assim a árvore filogenética. Porém, muitos pesquisadores não entenderam a proposta darwiniana, e a interpretação era a de que os fósseis da linhagem humana se encaixariam em uma linha única desde o ancestral comum com os chimpanzés até os humanos modernos.

Foi apenas na década de 70, que ficou claro que mais de uma espécie de hominídeos já tinham habitado o planeta ao mesmo tempo. Hoje, sabemos que já tivemos mais de 10 espécies de hominídeos convivendo ao mesmo tempo. Esse conjunto de fósseis muito bem descritos nos dá um cenário com muitos detalhes sobre como aconteceu a nossa história. Durante a nossa história exclusivamente humana, o nosso cérebro mais do que triplicou de tamanho, deixamos as árvores e assumimos a postura bípedal. Essas três características envolvem um número grande de adaptações que estão muito bem refletidas no registro fóssil humano.

Então, vamos começar a contar um pouco da nossa história.

## Seção 2: A origem do bipedalismo

Uma das questões mais evidentes, quando comparamos humanos com os outros macacos sem rabo, é o fato de que nós andamos em duas pernas, enquanto eles se locomovem usando as quatro patas. Não podemos confundir o hábito bípedal, que é o fato de que andamos (como as aves e muitos dinossauros) em duas patas. O hábito de “em quantas pernas andamos” está relacionado ao hábito terrestre, mas não é a mesma coisa. Um hábito terrestre se contrapõe a um hábito arborícola ou a um aéreo, que estão relacionados ao ambiente em que a espécie vive a maior parte do tempo. O hábito bípedal, por outro lado, se contrapõe ao hábito quadrúpedal, que estão relacionados ao modo de locomoção no ambiente terrestre.

Então, muitas adaptações surgiram nestes oito milhões de anos, que nos auxiliaram nesta caminhada. Da mesma forma que em outras espécies, nossos antepassados com tais adaptações tinham maiores chances de sobrevivência do que outros humanos que não as tinham. Então vamos conhecê-los. Um dos fósseis mais importantes de nossa linhagem é a Lucy. Sim, um fóssil tem nome, pelo menos esse fóssil tem nome. Lucy é o nome do fóssil mais completo encontrado de *Australopithecus afarensis*.



Ao encontrarem os primeiros ossos de Lucy, os pesquisadores logo perceberam a sua importância. Assim, a escavação completa de Lucy levou cerca de 15 dias, tomando muito cuidado para não quebrar algum osso que não estava aparente aos escavadores. Depois de completamente escavado, eles estavam dando uma festa para celebrar esse fóssil importantíssimo, e estava tocando a música dos Beatles *Lucy in the Sky with Diamonds*. E eles resolveram apelidá-la de Lucy.

De tão completo, Lucy esclareceu muitas coisas. O sítio arqueológico de Lucy era no deserto de Afar, na Etiópia, em sedimentos datados em 3,2 milhões de anos. Lucy já tinha adaptações ao hábito bipedal, o que nos indica claramente que ela tinha esse hábito. Em primeiro lugar, uma adaptação típica a esse hábito é o fato de que o fêmur do bipedal sai da bacia e se direciona não verticalmente, mas tem direção para baixo do centro do corpo.



**Figura 2:** Esta é a reconstrução de Lucy (ao centro), um chimpanzé (à esquerda) e um humano (à direita) destacando os ossos ligados a angulação do fêmur. Lucy e o humano apresentam o fêmur direcionado para o centro de gravidade do corpo, que é uma característica ao hábito bipedal. No chimpanzé, não existe angulação: o osso sai verticalmente.

A angulação do fêmur é uma adaptação ao hábito bipedal. Mas por quê? Para você descobrir o porquê, faça o seguinte experimento: fique em pé, colocando os pés afastados uns 40 cm um do outro. Agora, levante um dos pés do chão, mas tenha cuidado para não cair! Você vai tender a cair no chão, a menos que coloque todo o seu peso em cima do pé que está no chão. Então, faça isso. Agora, tente dar outro passo. Você vai descobrir por que os chimpanzés andam rebolando! É porque eles alternam o peso do corpo em cima de cada perna a cada passo. Por isso, o andar é menos eficiente, gastando muito mais energia do que a gente. Assim, claramente, Lucy já tinha essa adaptação ao hábito bipedal, pois, como podemos perceber na figura, ela já tinha os ossos da coxa

voltados para o centro do corpo. Lucy tinha ainda o dedão de seus pés voltado para a frente, como o nosso, que funciona como uma alavanca ao próximo passo.

Por isso, não foi surpresa quando pesquisadores encontraram uma trilha de pegadas humanas com a mesma datação de Lucy. Por outro lado, Lucy não conseguia travar os joelhos, como nós conseguimos. Tente agora andar ou ficar em pé com joelhos dobrados durante cinco minutos e poderá ver como travar o joelho reto também é uma adaptação ao hábito bipedal. Outra adaptação ao hábito bipedal, que Lucy não possuía, é a curvatura da sola do pé, que tem a função de amortecer o nosso passo.



**Figura 3:** Reconstrução de Lucy (*Australopithecus afarensis*) e suas pegadas típicas do hábito bipedal. Repare na anatomia de seus pés, que já incluía a adaptação do dedão voltado para a frente, e não opositor.

Então, como já discutimos antes, a adaptação ao hábito bipedal é um processo, não é um evento; todas e cada uma das adaptações fazem parte deste processo. Ou seja, nossos antepassados eram adaptados ao hábito arborícola, mas não eram perfeitamente adaptados a esse hábito. Não é uma adaptação que torna uma espécie adaptada assim; nenhum organismo está adaptado na medida em que novas adaptações podem surgir. Da mesma forma, nós não somos perfeitamente adaptados ao hábito bípede; nossas dores nas costas estão aqui para nos lembrar disso.

A espécie de Lucy não era o único homínido que andava bípedalmente nesta época, mas muitas espécies tinham esse hábito há três milhões de anos na África. Tantas, que elas eram agrupadas em dois grandes grupos. O primeiro eram os australopithecíneos robustos. Este grupo inclui espécies de maior robustez, mais fortes, de dentes maiores, com

mais dimorfismo sexual, isto é, mais diferenças morfológicas entre machos e fêmeas. O segundo grupo incluía os australopitecíneos gráteis, que era o grupo de Lucy.

Com o que já sabemos sobre evolução, essa diversificação rápida está geralmente relacionada à origem de uma adaptação importante. Neste caso, claramente, a adaptação importante é o hábito bípedal. Então, vamos entender as vantagens associadas ao hábito. Imagine uma grande extensão de terra, permeada de muitas florestas e muitos desertos. Em períodos mais secos, as florestas encolhiam, e os desertos alongavam de extensão, criando ilhas de florestas entre enormes desertos. Em períodos mais úmidos, as florestas voltavam a expandir, e as ilhas se uniam. Assim, era a África há poucos milhões de anos atrás, quando existiam muito mais florestas do que existem atualmente.

Agora, pense que você é um primata arborícola. Nos períodos de seca, as florestas, seu *habitat*, diminuía de extensão, diminuindo as suas chances de sobrevivência. Nos períodos mais úmidos, as florestas expandiam, fornecendo mais *habitat* e mais alimentos para o seu grupo. Entretanto, depois de um período úmido, vinha a seca, retraindo as florestas e as transformando em pequenas e grandes ilhas de florestas no meio de uma savana em expansão.

Neste momento, imagine que você esteja em uma ilha cheia de outros da sua espécie. Uma maneira de você sair dessa ilha muito povoada para outra menos povoada teria que, necessariamente, passar pela terra, ou seja, atravessar a savana pelo chão. Como o continente foi progressivamente perdendo suas florestas, os cientistas acham que esses períodos cada vez maiores de seca foram um incentivo ao hábito terrestre em nossos ancestrais.

Certo, éramos terrestres, mas como evolui o hábito bípedal? A passagem pelo chão, mesmo que temporária, de uma espécie acostumada a viver nas árvores, não é simples, pois ela estaria exposta a um número grande de predadores durante a sua passagem pelo ambiente terrestre. Assim, a eficiência desta passagem seria certamente algo em que a seleção natural iria atuar. Não existe modo mais eficiente de se andar pelo chão do que o hábito bípedal. Assim, a eficiência energética relacionada ao hábito bípedal está clara. Mas existem outras, muitas outras vantagens.

Em primeiro lugar, o animal bípedal estará mais alto e, com isso, terá uma melhor visão da savana. Assim, este grupo conseguirá detectar predadores e alimento mais facilmente, aumentando suas chances

de sobrevivência. Essa é uma adaptação nas savanas, mas não necessariamente nas florestas, já que a densidade de árvores não permite uma visão clara do horizonte.

Além disso, se você não usa as mãos para andar, terá mãos livres para carregar filhotes, alimento ou água, por exemplo, mesmo se locomovendo. Essas mãos que não sustentam o corpo podem se tornar mais finas e especializadas em manipulações delicadas, como de ferramentas. Outra questão importante é a eficiência hídrica, pois um organismo bípedal, por estar mais longe do chão e ter menor área de incidência solar, consome menos quantidade de água por dia do que um organismo quadrupedal com o mesmo porte e os mesmos hábitos. Ufa, muitas vantagens relacionadas ao hábito bípedal!... Portanto, isso explica bem a diversidade de australopithecíneos que encontramos no registro fóssil.

Houve uma época em que o continente africano passou por um período de seca muito forte e prolongada. Os dois grupos de australopithecíneos acostumados a se alimentar de frutas e vegetais não mais conseguiam esse tipo de alimento. O grupo dos robustos passou a se alimentar de raízes e tubérculos de consistência mais dura e, aos poucos, sua estrutura dentária passou a se modificar em dentes molares mais potentes e maiores. O gênero *Paranthropus* abriga essas espécies que desenvolveram essas adaptações.

O grupo dos gráceis, por outro lado, passou a se alimentar de carne, provavelmente roubando as carcaças de outros mamíferos carnívoros, como os felinos e os canídeos africanos. Por exemplo, depois que a leoa mata sua presa, ela tira uma boa parte da carne dela, mas não toda a carne do esqueleto, como mostra a figura a seguir.



**Figura 4:** O uso de ferramentas deve ter-se desenvolvido com o hábito carnívoro. Imagine cortar a pele de um elefante sem uma faca!

Assim, nossos antepassados provavelmente se valeram dessas carcaças deixadas pelos grandes felinos africanos para sua alimentação. Mais

curioso do que isso é o fato de que uma parte bem energética de uma carcaça está dentro dos ossos, a parte que chamamos de tutano ou medula. Porém, esse precioso alimento estava no interior de ossos duros demais para serem quebrados com dentes ou com mãos. Dessa forma, também explicamos o aparecimento das primeiras ferramentas trabalhadas que surgem no registro fóssil há cerca de três milhões de anos.

Tanto *Australopithecus afarensis* como *Australopithecus sediba* pertencem a essa linhagem dos australopitecíneos gráteis que passaram a se alimentar de carne. *Australopithecus sediba* é mais recente do que *A. afarensis* e tinha um cérebro um pouco maior, de cerca de 500 cm<sup>3</sup>. Esta característica, além da datação, a coloca como uma espécie de australopitecínio bem tardia, ou seja, que era um ancestral recente do grupo do gênero *Homo*. Na figura a seguir, estão as reconstruções de um jovem e uma fêmea de *A. sediba*. Note que o jovem apresenta a mesma angulação do fêmur de Lucy, além de um crânio maior do que ela. Da fêmea, infelizmente, não temos os ossos do fêmur. A datação de 2 milhões de anos, mais recente do que Lucy em 3 milhões de anos, se encaixa na ideia de que estas eram espécies distintas da linhagem que deu origem às espécies do gênero *Homo*.



**Figura 5:** Esta é a reconstrução de Lucy (*Australopithecus afarensis* ao centro) e dois indivíduos de *Australopithecus sediba*. O jovem macho e a fêmea adulta, possivelmente mãe e filho. Repare nos ossos conhecidos e na reconstrução em cinza de cada indivíduo, que é baseada em todos os fósseis encontrados para cada uma das espécies.

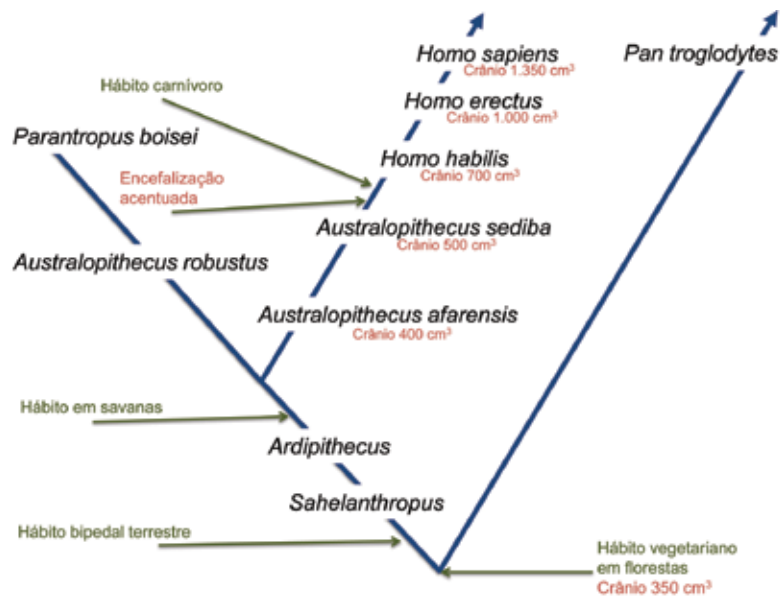
### Seção 3: A encefalização

Um segundo ponto importante em nossa história exclusiva é a mudança do tamanho do cérebro. Apesar de o cérebro grande não estar diretamente associado à inteligência, está bem relacionado a ela. Agora, surge um problema. Já é difícil medir inteligência hoje, pois os testes relacionados à inteligência são elaborados em uma língua e medem um tipo de raciocínio para o qual alguns humanos treinaram e outros não treinaram. Então, imagine a gente medir a inteligência ao longo do registro fóssil... Esta, de fato, não é uma tarefa fácil, mas podemos tentar. Por exemplo, podemos tentar entender como esses nossos antepassados usavam o ambiente e os recursos disponíveis ao longo do tempo. Além disso, podemos ver questões como tamanho de população e distribuição geográfica ao longo do registro fóssil, comparando com o tamanho do crânio. Então, é isso que faremos.

O cérebro é hoje o órgão do nosso corpo mais caro energeticamente. Ele apresenta cerca de 2% da massa do seu corpo, mas consome mais de 20% da energia que você produz. Imagine como não foi complicado o aumento deste órgão. Se a seleção natural é a pressão do ambiente que diminui as chances de um organismo com maior necessidade energética de sobreviver e se reproduzir, este processo deveria tender a eliminar um ancestral mutante com cérebro maior, você não acha?

Vamos pensar no outro lado. Um cérebro maior te permite explorar melhor o seu ambiente e conseguir mais recursos para você e sua família conseguirem perpetuar seus genes. Entretanto, esse ganho em sobrevivência é relativamente demorado e não vem imediatamente com a mutação do aumento do cérebro. Isso porque o mutante deve aprender sozinho a usar o seu cérebro aumentado. Vamos lembrar que os outros membros daquela população tinham cérebro pequeno, incluindo os pais do mutante, e, portanto, não podiam ensinar as novidades ao mutante.

Claramente, para que esse aumento do crânio, mesmo demandando mais alimento para sobreviver, fosse viável, a comida rica em calorias não pode ter sido um fator importante para a sobrevivência. Bem, carne é uma comida bem calórica. E, quando comparamos o tamanho do crânio dos homínídeos e o padrão de desgaste do dente, ao longo da evolução humana, percebemos uma associação clara. A encefalização, ou o processo de aumento do cérebro, se torna acentuada no mesmo momento em que passamos a nos alimentar de carne.

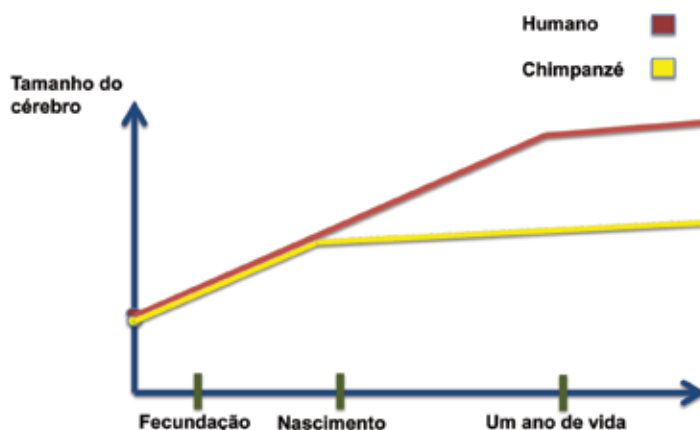


**Figura 6:** Árvore filogenética ilustrando uma possível relação entre as espécies de homínidos e a origem do bipedalismo e da encefalização. Note a relação entre a alimentação carnívora e a encefalização na linhagem humana.

Quando observamos no registro fóssil, percebemos que existe claramente uma tendência. Nosso volume craniano é de cerca de 1.350 cm<sup>3</sup>, enquanto o dos outros macacos sem rabo atuais é de 400 cm<sup>3</sup>. De modo mais interessante, as espécies descritas do gênero *Homo* formam uma progressão do tamanho do cérebro desde o gênero *Australopithecus*, cujo cérebro tinha o volume de 400 cm<sup>3</sup>, como os macacos sem rabo atuais. Em extratos fósseis mais recentes, encontramos fósseis com diversos tamanhos no gênero *Homo*, desde 500 cm<sup>3</sup> (*Homo naledi*), passando por 700 cm<sup>3</sup> (*Homo habilis*), por 1.000 cm<sup>3</sup> (*Homo erectus*), por 1.350 cm<sup>3</sup> (*Homo sapiens*) até cerca de 1.400 cm<sup>3</sup> (*Homo neanderthalensis*). Pois é, *Homo sapiens* não é o maior deles, mas retornaremos aos neandertais no final desta aula.

Desta forma, *Homo habilis*, além de ser o primeiro homínido a usar ferramentas bem trabalhadas rotineiramente (daí o nome *habilis*), também foi o primeiro a ter uma alimentação carnívora e uma expansão cerebral considerável de 500 cm<sup>3</sup> (*Australopithecus sediba*) para 700 cm<sup>3</sup>. Uma outra forma de entender a encefalização é compararmos o crescimento do cérebro em chimpanzés e humanos. Veja o gráfico a seguir, que mostra que os humanos e chimpanzés têm, enquanto no útero, a

mesma taxa de crescimento cerebral. O chimpanzé, quando nasce, interrompe essa taxa, mas o bebê humano continua com a mesma taxa até um ano de idade. Aliás, faz até sentido, então, que os chimpanzés bebês sejam tão mais ágeis e fortes que os bebês humanos, nos quais toda a energia conseguida pela alimentação deve ser canalizada para o crescimento cerebral.



**Figura 7:** Relação entre o aumento do tamanho do cérebro ao longo do desenvolvimento em humanos e chimpanzés, mostrando que os cérebros humanos continuam crescendo na mesma taxa até um ano de idade, enquanto os chimpanzés interrompem esse processo quando nascem.

## Seção 4: As transformações do corpo

Comparando os fósseis de nossos ancestrais, percebemos outro padrão. Existe uma transformação acentuada em todo o corpo quando passamos a nos alimentar de carne a partir de ancestrais vegetarianos. O corpo símio de *Australopithecus* passou a dar espaço a um corpo mais humanoide de *Homo*. Essas mudanças estão associadas ao hábito carnívoro, que apareceu em *Homo habilis*.

Entretanto, outras transformações aconteceram, quando comparamos o corpo de *Homo habilis* com uma espécie descendente dele, que é o *Homo erectus*. Essas transformações incluem mais adaptações ao andar bipedal e uma mudança acentuada no crânio. De fato, *Homo erectus* tem mandíbula e dentes menores que *Homo habilis*. Como as duas espécies eram carnívoras, os pesquisadores ficaram refletindo o que determinou tais modificações no crânio. Vamos refletir, observando os detalhes dos dois crânios.





**Figura 8:** *Homo habilis* (à esquerda) e *Homo erectus* (à direita). Quais diferenças você consegue notar?

Agora, outra dica: *Homo erectus* foi o primeiro hominídeo que saiu da África. Como chimpanzés e gorilas, também são primatas africanos; faz todo sentido que todos os fósseis de hominídeos sejam africanos, pelo menos, no início de nossa história exclusiva. Entretanto, encontramos fósseis de *Homo erectus* na China, na Indonésia e na Europa. Isso significa que esses antepassados não tinham energia suficiente apenas para sobreviver, mas para viver caminhando e atravessando continentes. O que pode estar relacionado à diminuição da mandíbula, ao aumento da energia disponível e à colonização de lugares mais frios?

Ah, já descobriu? É o fogo. O mesmo fogo da primeira aula. O mais vivo entre os elementos não vivos. O domínio do fogo tornou os humanos mais poderosos e mais diferentes do restante dos primatas e da diversidade. Com um pouco de fogo, alguém poderia incendiar uma floresta e simplesmente coletar os animais mortos para sobreviver pelo tempo que necessitasse. Além disso, alimento cozido é mais macio e mais energético, o que também explicaria a diminuição da mandíbula, dos dentes, e a vontade de atravessar continentes. O fogo explica ainda a colonização de ambientes frios, como a Europa.

Uma outra coisa mudou com o fogo. Nosso hábito. Lucy vivia no ambiente terrestre, mas à noite, possivelmente, ela dormia em árvores, para se proteger dos predadores. De fato, um estudo recente indica que tanto Lucy como os dois indivíduos de *Australopithecus sediba* ilustrados na Figura 6 morreram de uma queda, o que torna a queda de árvore

a explicação mais provável. Dá para imaginar que os pesadelos podem ter matado muitos de nossos antepassados... Retornando ao *Homo erectus*, o domínio do fogo possivelmente transformou-o em um habitante de cavernas. Cavernas são ambientes bem visados pelos animais, pois fornecem proteção ao frio, à chuva e ao sol, mas são visados por todos, inclusive pelos predadores. Com o fogo para proteção, o hábito de viverem em cavernas tornou-se possível.

As cavernas tornaram outras coisas possíveis. Possivelmente, aumentou a socialização entre humanos, pois quem não gosta de contar e ouvir histórias ao redor do fogo? As paredes das cavernas tornaram-se o primeiro registro físico sobre o que nossos antepassados estavam pensando. Pinturas em cavernas são relativamente comuns, mas são mais recentes. Mas há um detalhe, as cavernas pintadas só começam a aparecer quando as ossadas indicam que ali viveram *Homo sapiens*, como mostra a bela figura a seguir.



**Figura 9:** Pintura na parede de uma caverna em Altamira, na Espanha, ilustrando provavelmente um feito ou um desejo do pintor. O que mais ele estava pensando? Só a nossa espécie se preocupava em registrar.

O fogo e seu domínio modificaram para sempre nossa vida, afastando-nos da vida nas árvores; passamos a habitar cavernas e a atravessar os continentes. Infelizmente, não conseguimos ter uma ideia clara sobre quando nossos antepassados dominaram o fogo, pois fogueiras feitas não são facilmente distinguíveis de fogueiras naturais no registro fóssil.

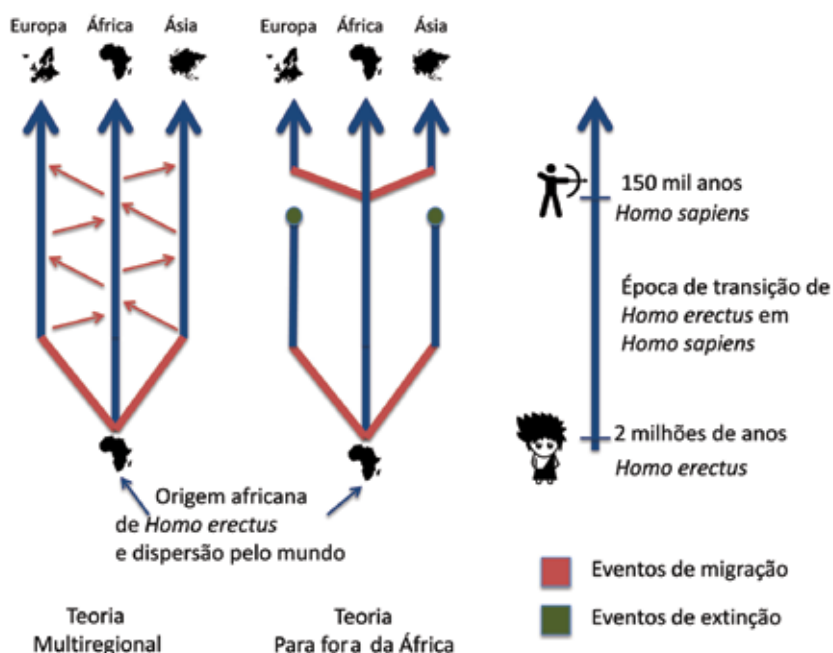
A mais antiga fogueira que foi claramente construída tem menos de um milhão de anos. Entretanto, se há dois milhões de anos, o *Homo erectus* tinha saído da África, ido para China e para Europa, e sua mandíbula e seus dentes tinham diminuído, é bem possível que o fogo tenha sido dominado antes dessa época.

## Seção 5: Origem do *Homo sapiens*

Agora sim, chegamos ao pedacinho de nossa história que é só da nossa espécie, *Homo sapiens*. Entretanto, como veremos ao longo desse final da disciplina, essa história se mistura com a história de outras espécies.

Então, chegamos a uma questão: *Homo erectus* claramente faz parte da nossa linhagem ancestral. Isso significa que eles, ao longo do tempo, evoluíram com características que hoje definimos como sendo de *Homo sapiens*. Então, duas espécies relacionadas uma com a outra por ancestralidade e descendência e as duas espécies são cosmopolitas. Mas, qual o problema disso? O problema é que existem algumas possibilidades para descrever a origem de uma espécie cosmopolita a partir de outra também cosmopolita. A figura a seguir ilustra as duas teorias modernas de origem de *Homo sapiens* a partir de *Homo erectus*. Nas duas teorias, a origem de *Homo erectus* é na África, e este se dispersa para a Europa e para a Ásia há dois milhões de anos. Isso é compatível com o registro fóssil dessa espécie. Entretanto, as similaridades param aí.

Na primeira, a teoria multirregional sugere que a transição entre *Homo erectus* e *Homo sapiens* ocorreu globalmente ao mesmo tempo. Isso seria explicado por eventos menores de migração e, portanto, de trocas genéticas entre populações depois da migração inicial de *Homo erectus*. Assim, os proponentes dessa teoria explicam que todos os *Homo sapiens* apresentam as mesmas características, pois, neste processo de transição, cada uma das características exclusivas de *Homo sapiens* era passada para populações em outros lugares pela migração.



**Figura 10:** Teorias alternativas de origem do *Homo sapiens* a partir do *Homo erectus*, mostrando duas teorias alternativas: a multirregional (à esquerda) e a Para fora da África (à direita).

A segunda teoria, por outro lado, sugere que a origem de *Homo sapiens* é na África. Esta teoria é chamada Para fora da África, pois requer um segundo evento de migração para fora da África. O primeiro evento seria de *Homo erectus*, e o segundo, de *Homo sapiens*. Neste cenário, *Homo erectus* africano continuou a acumular modificações que o tornariam *Homo sapiens* antes do segundo evento de migração. Repare que, de acordo com essa teoria, as populações de *Homo erectus* asiático e europeu foram extintas.

## Resumo

- A seleção natural está associada não apenas à sobrevivência e à reprodução diferencial de indivíduos, mas também de espécies com características particulares. O primeiro mamífero adaptado ao hábito arbóreo deu início à diversificação dos primatas;
- Os macacos atuais e os humanos têm um ancestral comum, a quem, por antropocentrismo, chamamos de macaco ancestral. Entretanto, esse macaco ancestral é tão diferente dos humanos como ele é diferentes dos chimpanzés;

- O bipedalismo apresenta muitas vantagens imediatas relacionadas às mãos livres, economia de água, visualização de predadores, enquanto na encefalização, as vantagens são mais demoradas, pois o mutante deverá aprender a usar a nova parte do seu cérebro;
- A angulação do fêmur é uma adaptação ao hábito bipedal, que nos mostrou que o bipedalismo apareceu antes do processo de encefalização;
- O processo de crescimento do cérebro ao longo do desenvolvimento mostra que o cérebro dos chimpanzés diminuiu muito essa taxa depois do nascimento, enquanto nos humanos, a taxa continua até um ano de idade;
- A primeira grande transformação foi relacionada à forma do corpo entre *Australopithecus* e *Homo*, e está relacionada ao hábito carnívoro em *Homo*;
- A segunda grande transformação foi relacionada a mudanças no crânio entre *Homo habilis* e *Homo erectus*, e está relacionada ao domínio do fogo por *Homo erectus*;
- O domínio do fogo permitiu a nossos ancestrais habitarem cavernas e iniciarem um processo de socialização maior;
- Existem duas teorias para explicar a origem de *Homo sapiens* a partir de *Homo erectus*: a multirregional, ou origem global, e a Para fora da África, ou origem africana.

## Referências para as figuras

### Filogenia primatas

By Joseph Smit - Proceedings of the Zoological Society of London 1899, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57152784>

Gorila By Blanca Martí de Ahumada - <http://blog.illustraciencia.cat/2015/05/gorila-de-llanura-occidental-gorilla.html>, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57152874>

### Orangotangos

By Creator:Adolph Fries - Guérin, Dictionnaire pittoresque d'histoire naturelle, pl. 428, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57152816>

## Hylobates

Cercoptecoidea By Protheroe, Ernest. - <http://www.flickr.com/photos/biodivlibrary/5985361246>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47597438>

Tarsier By Königl. Zoologisches und Anthropologisch-Ethnographisches Museum zu Dresden (Germany); Meyer, Adolf Bernhard - <http://www.flickr.com/photos/biodivlibrary/5984633427>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57181245>

Lemur By Charles Henry Dessalines d'Orbigny - D'Orbigny, M. Charles (1849) Dictionnaire Universel d'Histoire Naturelle. Atlas., Paris: MM. Renard, Martinet et Cie., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57181961>

## Mico leão dourado

By Allen's Naturalist's Library.; Forbes, Henry Ogg; Sharpe, Richard Bowdler - <http://www.flickr.com/photos/biodivlibrary/6028573673>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57162695>

Human By Charles Robert Knight - <http://donglutsdinosaurs.com/knight-neanderthals/>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57152832>

Lucy e suas pegadas Image Credit: Karen Carr Studio

<http://humanorigins.si.edu/evidence/behavior/footprints/laetoli-footprint-trails>

<https://www.si.edu/termsfuse/>

Humanos comendo o elefante

<http://humanorigins.si.edu/evidence/behavior/stone-tools>

<https://www.si.edu/termsfuse/>

## Sediba x Lucy

By Profberger - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16429162>

Bipedalism By Chris Stringer, Peter Adams - The Complete World of Human Evolution ISBN 978-0500051320, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6817790>

Erectus By Rama - Own work, Public Domain, <https://commons.wiki->

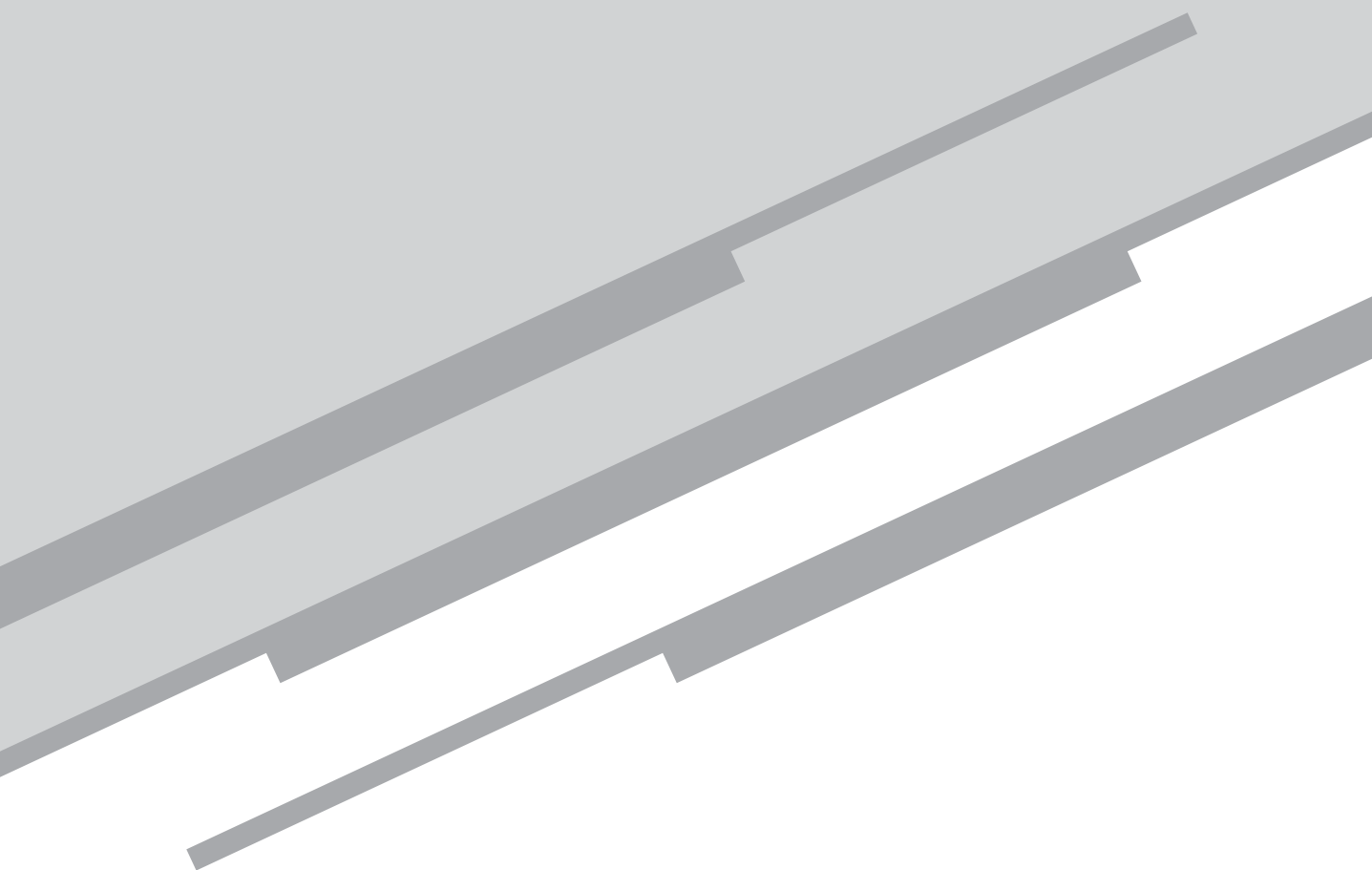
[media.org/w/index.php?curid=7529356](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7529356)

Habilis By Royroydeb - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37599915>

Pintura Caverna By Rameessos - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5569986>

# Aula 14

Sobrevive o mais adaptável



*Claudia Augusta de Moraes Russo*



## Para início de conversa...

O debate entre as duas teorias de origem do *Homo sapiens* ainda continua até os dias de hoje. De fato, existem alguns dados morfológicos mais compatíveis com a teoria Multirregional do que com a Para Fora da África. Por outro lado, dados moleculares dão um forte e consistente suporte à teoria Para Fora da África, o que a torna mais aceita entre os cientistas. Por exemplo, a diversidade genética das populações africanas é maior do que a diversidade genéticas fora deste continente somadas. Isso é uma referência clara de antiguidade de uma população e, portanto, um forte indicador de que, há 150 mil anos, vivíamos todos na África.

Por outro lado, existem evidências contundentes de que não houve apenas uma migração de sapiens para fora da África, como sugere a teoria Para Fora da África, mas algumas, pois o *Homo sapiens* não era a única espécie do gênero *Homo* habitando nosso planeta nos últimos milênios. Por exemplo, evidências recentes de datação radioativa sugerem que a espécie *Homo naledi* viveu até cerca de 300 mil anos na África do Sul. Entretanto, existe um ponto curioso: o cérebro de *naledi* se encaixaria na transição *Australopithecus/Homo*, pois é do tamanho do cérebro de *Australopithecus sediba*. Entretanto, a data de 300 mil anos é muito mais recente do que outros fósseis humanos com o mesmo tamanho de crânio que viveram há 2 milhões de anos, segundo o registro fóssil.

Assim, *naledi* representa uma anomalia na progressão linear na linhagem humana. Entretanto, a evolução não se dá linearmente, e a datação de *naledi* é claramente uma lembrança disso. Em uma evolução linear, uma espécie ancestral dá origem a outra, que se torna ancestral de outra, que se torna, por sua vez, ancestral também e, assim, até os dias de hoje. Em uma evolução não linear, uma espécie dá origem a duas espécies descendentes. Como essas duas espécies descendentes não se homogeneízam mais, as duas vão sofrer transformações de maneira independente. Uma delas pode ter sofrido muitas transformações, como sapiens, enquanto outra não ter sofrido muitas, como *naledi*.



**Figura 1:** O tipo de *Homo naledi*. Naledi significa estrela que homenageia a caverna onde foram encontrados os fósseis dessa espécie.

Assim, nesse cenário de evolução não linear, naledi, que viveu até 300 mil anos, não seria a ancestral da nossa linhagem; ela teria sido um descendente pouco transformado de uma espécie ancestral semelhante que ainda não encontramos. Essa espécie ancestral, além de naledi, também deu origem a outra linhagem que se transformou em *Homo habilis*, que deu origem a *Homo erectus*, que deu origem a *Homo sapiens*. De fato, naledi apresenta outras características mais derivadas, que a coloca como claramente do gênero *Homo*, como a anatomia de suas pernas. Assim, a datação recente de 300 mil anos dessa espécie se encaixa bem no cenário de evolução não linear.

Aliás, não foi apenas naledi que viveu até bem pouco tempo. Outras espécies de *Homo*, como *Homo neanderthalensis* e *Homo floresiensis*, também se extinguíram recentemente. Isso significa que houve uma época em que nosso planeta era povoado por uma diversidade de espécies de *Homo*, que conviviam, competiam, disputavam e trocavam os recursos para sua subsistência. Quais eram elas? De onde surgiram?

Então, essa nossa última aula é sobre essa diversidade humana mais recente e a atual.

## Objetivos

1. Caracterizar *Homo neanderthalensis* e *Homo floresiensis* e relacioná-los com *Homo sapiens*;
2. Detalhar a origem e a importância da linguagem;
3. Identificar as quatro revoluções humanas;
4. Associar a história humana como a sobrevivência do mais adaptável;
5. Individualizar o período Antropoceno.

## Seção 1: Muitas espécies de *Homo*: os *hobbits*

Uma espécie de *Homo* que viveu até bem pouco tempo recebeu o apelido de *hobbits*, em homenagem aos personagens de Tolkien nos livros da saga Senhor dos Anéis. Formalmente, a espécie se chama *Homo floresiensis*, pois habitava a ilha de Flores, na Indonésia. A ilha de Flores é uma das milhares de ilhas do arquipélago da Indonésia. Como os *hobbits* do livro, *Homo floresiensis* eram pequeninos, com cerca de um metro de altura e um pequeno crânio (400 cm<sup>3</sup>). De acordo com os primeiros dados, essa espécie chegou ali há 200-100 mil anos e desapareceu há 50 mil anos. Essa espécie, portanto, como *naledi* também, se encaixa no cenário de que a evolução não é linear.

Analisando os objetos que *floresiensis* usavam, há um ponto que não se encaixa no que conhecemos sobre evolução humana. (E, quando isso acontece, é sinal de que precisamos repensar o quão confiável é cada uma das coisas que a gente acha que sabe...): os *hobbits* tinham ferramentas muito modernas, muito mais modernas do que estamos acostumados a encontrar em ancestrais com esse tamanho de crânio. Como essa fatia de tempo é anterior à chegada dos primeiros *Homo sapiens* na ilha, eles não poderiam ter simplesmente copiado as ferramentas de humanos modernos. Então, será que eles eram inteligentes, mesmo com cérebro pequeno, a ponto de fazerem ferramentas modernas?

O registro fóssil indica que *Homo floresiensis* chegou lá há 100 mil anos. Naquela época, o nível do mar estava mais baixo do que está hoje, mas a plataforma continental não chegava até a ilha. Assim, mesmo com o mar mais baixo, para chegar até a ilha, os ancestrais dessa espécie teriam de ter atravessado um estreito de mar de cerca de 20 km. Com o mar mais baixo, entretanto, a ilha teria sido visível do continente. Em primeiro lugar, algum tipo de embarcação rudimentar teria sido neces-

sária. Além disso, para a construção dessa embarcação e para convencer outros indivíduos a embarcarem também, teria sido necessário alguma forma de linguagem complexa.



**Figura 2:** Uma reconstrução de Flo, a *hobbit*-tipo de *Homo floresiensis*.

Como um único crânio ( $400\text{cm}^3$ ) desta espécie foi encontrado, pensou-se que esse crânio poderia não ser bem representativo da espécie, mas que fosse, por exemplo, de um indivíduo com microcefalia. De fato, outros fósseis encontrados mais recentemente indicam que os *hobbits* podem ter chegado há mais tempo, há cerca de 700 mil anos. Assim, poderíamos pensar que os *hobbits* talvez tivessem sido os últimos sobreviventes da linhagem de *Homo erectus* ( $1.000\text{ cm}^3$ ) que migrou para a Ásia e se extinguiu quando seu registro fóssil desapareceu há 50 mil anos. Lembra-se da última aula?

Mas como explicar o tamanho do corpo e o crânio tão pequeno, quando comparados a *Homo erectus*? Neste caso, existe uma explicação bem conhecida, que é a diminuição de tamanho em mamíferos ilhéus, ou seja, em mamíferos que habitam ilhas. Os elefantes pigmeus de Borneo são do tamanho de um humano, e os extintos mamutes pigmeus das Ilhas Canal são outros exemplos dessa tendência à miniaturização. A ideia central desta teoria é que a seleção natural tende a diminuir o tamanho desses organismos (e, portanto, suas necessidades energéticas) quando não existem predadores na ilha.

### Mutações, acaso e necessidade

Lucy dormia em árvores; esse hábito explica suas articulações mais flexíveis. Entretanto, a linhagem *Homo* deixou esse hábito, quando dominou o fogo, passando a habitar cavernas e ter articulações menos flexíveis. Mas como isso aconteceu? A necessidade de uma característica não promove o seu aparecimento nem a ausência da necessidade promove seu desaparecimento imediato. De fato, 99,99% das espécies que habitaram a Terra já foram extintas; isso significa que a evolução não prossegue sempre em direção ao mais adaptado.

Mudanças evolutivas requerem mutações nos genes, para que venham a passar aos descendentes. A girafa, por exemplo, não tem pescoço alto porque os ancestrais se esticavam para pegar folhas mais altas. Ela tem esse pescoço porque um de seus genes sofreu uma mutação que aumentou o comprimento do pescoço. Reflita. Se apenas esticar tornasse o pescoço da girafa mais alto, porque os outros mamíferos herbívoros não apresentam pescoço alto, só a girafa?

Porém, análises recentes nos esqueletos, mais detalhadas, descartaram também essa possibilidade. De fato, além de seu tamanho e do volume cranial, o esqueleto dos *hobbits* tem articulações compatíveis que também lembram a nossa personagem central da evolução humana, a Lucy. Então, será que algum ancestral *Australopithecus/Homo* chegou a sobreviver até praticamente os nossos dias? Você vai saber mais sobre isso na próxima seção.

## Seção 2: Muitas espécies de *Homo*: os neandertais

A terceira espécie moderna de *Homo* de que vamos falar é a mais famosa, conhecida como neandertal ou *Homo neanderthalensis*. Como já conversamos na última aula, *Homo neanderthalensis* tinha um cérebro grande, inclusive com uma média maior do que *Homo sapiens*. Os neandertais viviam em cavernas, eram caçadores de sucesso que viveram na Europa e na Eurásia. Fósseis com características típicas de neanderthalensis surgem no registro fóssil há 100 mil anos e desaparecem, sugerindo a extinção, há 25 mil anos.



**Figura 3:** Distribuição geográfica dos sítios clássicos de neandertais, na Europa, no Oriente Médio e na Eurásia. O vale do Neandertal, na Alemanha, é o sítio no qual o primeiro indivíduo foi encontrado e descrito. A mancha mais escura indica o limite máximo das geleiras na Europa naquela época.

Os neandertais tinham um nariz longo e fino, que é uma característica exclusiva da espécie. Esse formato de nariz apresenta uma adaptação ao clima frio europeu, pois esse tipo de nariz tem um orifício menor para entrada de ar. Isso é uma adaptação, pois ele diminui a quantidade de ar inalada, que deve ser aquecida, enquanto o comprimento longo do nariz facilita esse processo antes de o ar entrar em contato com o resto do corpo.

A figura a seguir é a reconstrução da face de um indivíduo *Homo neanderthalensis* que morreu com 40-50 anos de idade. Esta é uma idade avançada para a espécie, o que explica os diversos traumatismos que ele sofreu. Ele tinha fraturas no braço direito que chegaram a cicatrizar, mas o levaram a perder a parte inferior do braço e a mão. Um outro trauma na cabeça o fez perder o olho esquerdo, que também cicatrizou. Essas evidências sugerem que este indivíduo sofria muitas dores diariamente antes de morrer. Além disso, as cicatrizações bem antes de sua morte indicam que os neandertais se ajudavam, pois ele não teria sobrevivido sem ajuda.

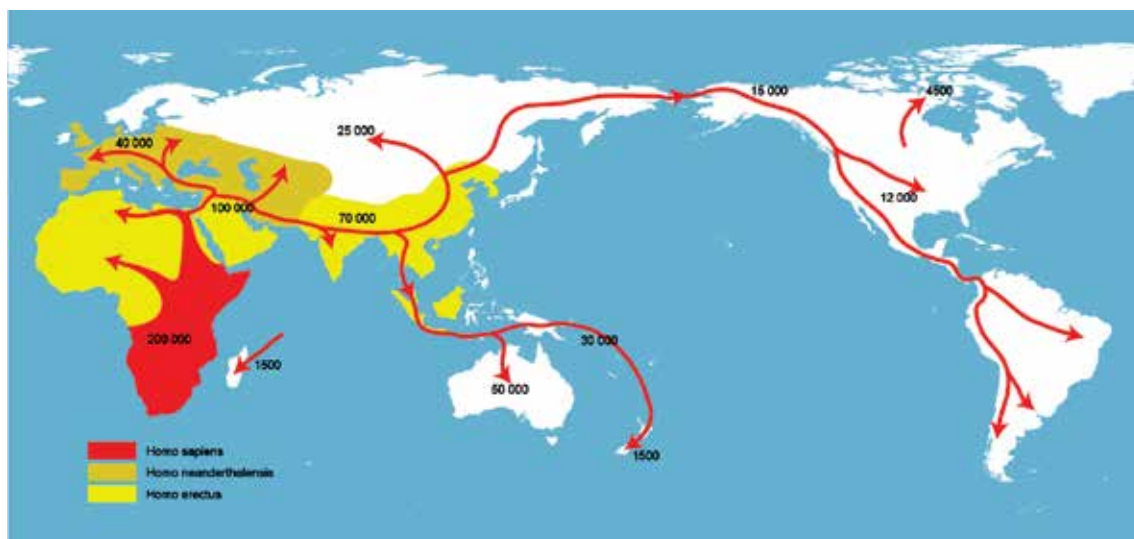


**Figura 4:** Reconstrução de um *Homo neanderthalensis* que viveu há 70 mil anos no atual Iraque. Você acha que ele poderia passar por *Homo sapiens* hoje?

Outro ponto interessante sobre essa espécie é que alguns *Homo neanderthalensis* foram enterrados com objetos. Um conhecido do nosso amigo aí de cima, por exemplo, que também vivia naquele sítio no Iraque, tinha em seu túmulo uma pilha de pedras lascadas e restos de uma



grande fogueira. O enterro com objetos do morto é um indício de crença na vida após a morte, pois os faraós eram enterrados com seu tesouro para usá-lo na caminhada para o mundo inferior.



**Figura 5:** Distribuição geográfica e grandes eventos de migração de *Homo erectus*, *Homo sapiens* e *Homo neanderthalensis* baseado em fósseis e dados moleculares.

Se os neandertais chegaram à Europa há mais de 100 mil anos e foram extintos há 25 mil anos, e *Homo sapiens* chegou à Europa há 40 mil anos, o que será que aconteceu com as duas populações? Será que houve algum cruzamento? Será que *Homo sapiens* foi responsável pela extinção dos *Homo neanderthalensis*? *Homo neanderthalensis* e *Homo sapiens* apresentam poucas modificações morfológicas, tanto que já foram consideradas com uma única espécie e duas subespécies: *Homo sapiens sapiens* e *Homo sapiens neanderthalensis*. Assim, como não podemos fazer cruzamentos-testes, como poderíamos saber se estas duas entidades biológicas são, de fato, duas espécies ou eram grupos isolados da mesma espécie que, ao se encontrarem, cruzavam novamente? O que acontecia quando eles se encontravam? Como encontrar essas respostas?

Há um detalhe interessante sobre os neandertais que torna importante o fato de que eles viveram em locais frios da Europa e da Eurásia. Nesses locais frios, a baixa temperatura ajuda a preservar o corpo, que fica mumificado. Mais importante do que isso é o fato de que o frio também preserva o material genético, possibilitando a comparação molecular entre os fósseis e a população humana atual. Se eles tivessem

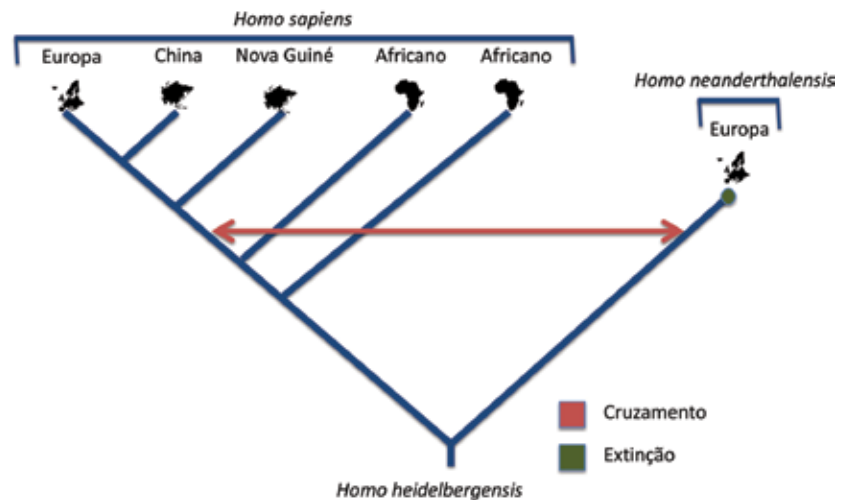
morrido há milhões de anos, não teríamos essa possibilidade. Se houve cruzamento e somos o fruto de uma mistura entre *Homo neanderthalensis* e *Homo sapiens* antigo, dados moleculares seriam a melhor opção para esclarecer essa questão.

Cientistas conseguiram extrair o DNA e sequenciar o genoma mitocondrial de neandertais. Naquele trabalho, os cientistas mostraram que os *neanderthalensis* e os *sapiens* têm um ancestral comum que viveu há cerca de 600 mil anos. Esse ancestral é denominado de *Homo heidelbergensis*, também um descendente africano de *erectus* africano. Repare que *Homo heidelbergensis* já tinha cérebro grande, pois *sapiens* e *neanderthalensis* compartilham essa característica. Então, parte de *heidelbergensis* que já tinha adquirido esta e outras características comuns migrou saindo da África e, fora deste continente, se separou em neandertais (na Europa) e denisovans (na Ásia).

O outro grupo de *heidelbergensis* ficou na África, continuou acumulando adaptações ao clima quente, e se tornou o que chamamos de *Homo sapiens*. Tanto na Ásia como na Europa, as condições eram menos estáveis, com o clima variando muito de um ano para outro. Assim, as populações de neandertais e de denisovans já tinham sofrido mais, pois eram mais vulneráveis a novas mudanças climáticas. Para a gente, que permanecemos na África por mais tempo, essas mudanças climáticas de 5 ou de 10 graus em um clima quente não alteravam muito a rotina, e nossa população foi crescendo nesse continente.

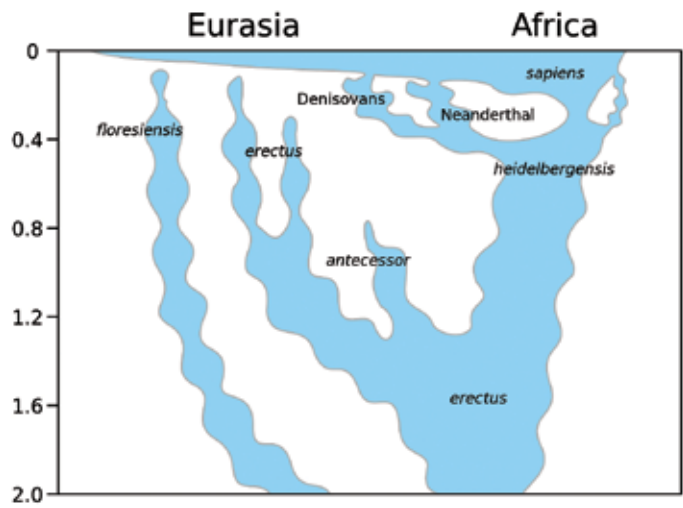
Esta nova espécie se espalhou novamente por todo o mundo, como seu ancestral *Homo erectus* já tinha feito mais de um milhão de anos atrás. Entretanto, há um ponto interessante - o sequenciamento do genoma nuclear de *neanderthalensis* conseguiu detalhar bastante como aconteceu esse espalhamento. Analisando o genoma do neandertal, Svante Pääbo e seus colegas descobriram que, apesar de a árvore filogenética mostrar *Homo sapiens* juntos como grupo-irmão dos neandertais, um detalhe mudava tudo. A equipe demonstrou que os neandertais têm mais em comum com *sapiens* não africanos, do que com *sapiens* africanos. Esses resultados foram corroborados por todos os genomas sequenciados depois. Eles concluíram que *sapiens*, ao sair da África, se encontrou com neandertais e houve algum cruzamento entre os dois grupos, mas não mistura total. Veja, na figura a seguir, e perceba como o estudo detalhado do genoma pode nos dar pistas importantes sobre a nossa história antiga e a recente.





**Figura 6:** A análise filogenética indica que os *Homo sapiens* formam um grupo, mas análises mais detalhadas do genoma sugerem que os neandertais tinham mais em comum com *Homo sapiens* fora da África do que com os africanos.

Segundo este cenário, sapiens saiu de nossa terra natal, a África, e, no Oriente Médio, encontramos com outras espécies de *Homo* que já tinham se espalhado há mais tempo. Aconteceu algum nível de cruzamento com neandertais no Oriente Médio e na Europa e com os denisovans na Ásia. Mas não paramos por aí. Veja, na figura abaixo, a hipótese mais recente sobre a origem e a diversificação de *Homo*.

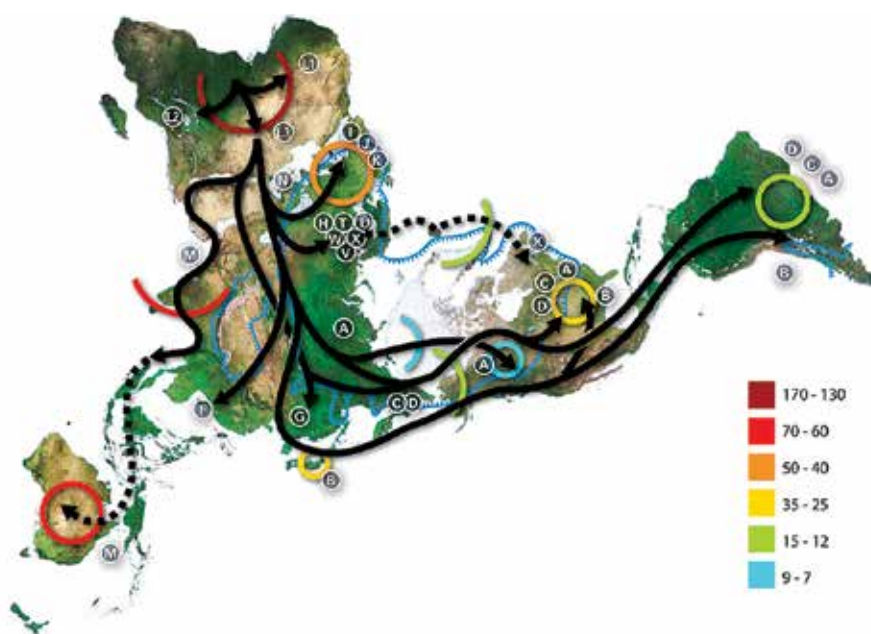


**Figura 7:** Hipótese do paleontólogo Chris Stringer sobre a origem dos neandertais, denisovans e floresiensis e sua relação com *Homo sapiens*. Nesta figura, está faltando o *Homo naledi*, recém-descoberto, que foi datado como extinto há apenas 300 mil anos.

### Seção 3: Muitas espécies de *Homo*: os *sapiens*

Quando Colombo chegou à América do Norte e Cabral chegou ao Brasil, encontraram índios. Mas como eles chegaram aqui sem embarcações transoceânicas, como tinham os europeus? Análises de genomas mitocondriais agrupam nas filogenias os índios americanos, os esquimós e um grupo de asiáticos. Isso indica que os índios devem ter vindo pelo estreito de Bering.

A teoria mais aceita indica que isso aconteceu na Era Glacial, quando a camada de gelo ficou tão grande que abriu um caminho por terra da Ásia até as Américas. Isso também explica a semelhança entre asiáticos (olhos pequenos, cabelo preto e liso, baixa estatura), esquimós e os índios americanos. Essa passagem deve ter acontecido há cerca de 20 mil anos, e os primeiros índios chegando ao Brasil há pouco mais de 12 mil anos. Apesar de ser a mais aceita, estudos da pesquisadora brasileira Niède Guidon analisaram dados coletados no Parque Nacional da Serra da Capivara e sugerem que essa chegada ao continente americano pode ter sido bem anterior a essa data.



**Figura 8:** Mapa-múndi. A análise filogenética do DNA mitocondrial sugere rotas da migração de *Homo sapiens* saindo da África e colonizando o mundo. Os círculos coloridos indicam (as cores da legenda) as datas de colonização para cada lugar em milhares de anos.

Em uma análise do DNA da população brasileira, Sérgio Pena e sua equipe analisaram a composição genética dos brasileiros. Para isso, ele também incluiu na análise o DNA de diversos povos africanos e de diferentes grupos europeus, querendo descobrir a contribuição de cada um deles na formação de nossa nação. Um aspecto interessante deste estudo é que eles verificaram essa contribuição separadamente para as linhagens feminina e masculina.

Isso porque existem marcadores maternos, ou seja, que são passados das mães para os filhos, como o genoma mitocondrial. Assim, esses marcadores mitocondriais (mtDNA) medem a origem materna da variação genética da composição da população brasileira atual. Além destes, ele e sua equipe analisaram marcadores paternos, como os genes que estão no cromossomo Y, que são passados de pais para filhos do sexo masculino. Da mesma forma, eles conseguiram estudar a origem paterna da variação genética da população brasileira atual. Eles também separaram os resultados, analisando brasileiros de pele branca e os brasileiros unidos. O que você consegue descobrir, observando a tabela abaixo?

**Tabela 1:** Composição do DNA de homens e mulheres brasileiras agrupados por gênero e separados por cor da pele (brancos) ou reunidos (total). A origem dos homens ancestrais e das mulheres ancestrais que contribuíram para formar a população brasileira é mostrada no cromossomo Y (homens ancestrais) e mtDNA (mulheres ancestrais).

	Europeu	Africano	Ameríndio
Y brancos (paterno)	98%	2%	0%
MtDNA brancos (materno)	54%	22%	24%
MtDNA total (materno)	39%	28%	33%

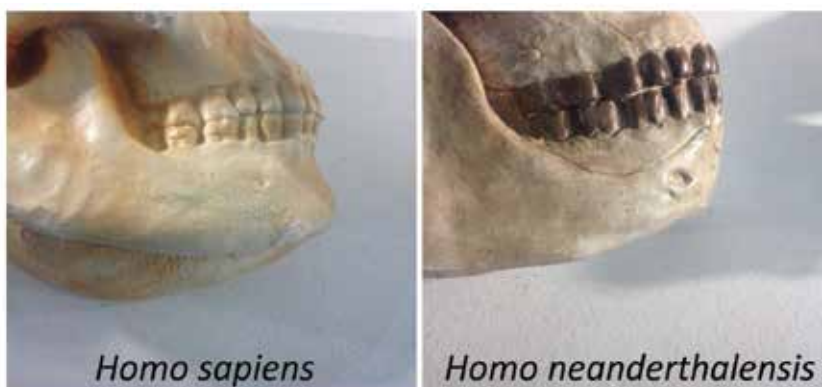
Quando analisamos a população brasileira em geral, temos uma proporção quase equitativa de mulheres de origem africana (principalmente bantús, yorubás e mandingos), de origem indígena e de origem europeia (principalmente portugueses), pois a porcentagem é de 39, 28 e 33 para o DNA mitocondrial. Em pessoas de pele branca, a participação de mulheres europeias é maior, com cerca de metade da proporção (54%), enquanto africanas e ameríndias contribuíram com menor proporção, como esperado.

Por outro lado, quando analisamos a linhagem masculina de pele branca, uma surpresa foi encontrada, pois a proporção de DNA de origem europeia era 98%. O que significa isso? Significa que homens

africanos e homens ameríndios contribuíram praticamente nada (2%) geneticamente para a população brasileira de pele branca, enquanto mulheres dessa origem tiveram uma contribuição alta, mas de apenas 54%. Basicamente, isso significa que os homens portugueses que colonizaram nosso país se reproduziram com mulheres africanas ou ameríndias praticamente tanto quanto eles se reproduziram com portuguesas. E assim nasceu a bela mistura que temos no nosso país!

#### **Seção 4: Diferenças entre *Homo sapiens* e *Homo neanderthalensis***

Em nossa história recente, já tivemos uma lista enorme de características exclusivas de humanos: o uso e a fabricação de ferramentas, a capacidade de resolver problemas, o uso do fogo, a cultura, a linguagem, etc. Entretanto, conforme começamos a estudar outras espécies com mais detalhes, percebemos que a lista de características exclusivas humanas vai encolhendo cada vez mais. Por exemplo, quando comparamos os genomas de *Homo sapiens* e *Homo neanderthalensis*, a porcentagem de diferenças é de apenas 0,16%. Dessa forma, não é de estranhar que a morfologia entre elas seja tão semelhante, a terem sido já consideradas como uma única espécie. Os neandertais são mais robustos, mais baixinhos e têm cérebro um pouco maior. Outras diferenças estão na estrutura interna do nariz, e a presença de queixo protuberante em *Homo sapiens* os distinguem de *neanderthalensis*. Aliás, esta é uma característica exclusivamente humana: a presença desse queixo protuberante, como mostra a figura abaixo.



**Figura 9:** A presença de queixo é uma das (poucas) características que ainda continuam como exclusiva de *Homo sapiens*. Estes exemplares foram fotografados no Museu de Geodiversidade da UFRJ, na cidade do Rio de Janeiro.

Apesar das semelhanças morfológicas, quando analisamos os costumes das duas espécies, as diferenças são mais marcantes. Por exemplo, *Homo sapiens* exercia seus dotes de pintura nas cavernas por onde moravam, e também apresentavam adereços, como colares e objetos sem nenhuma utilidade, a não ser a ornamental. Esculturas misturando partes humanas e de animais, e flautas, são encontradas em sítios arqueológicos de *Homo sapiens* há 60 e há 40 mil anos, respectivamente, o que sugere uma nova dimensão de pensamento complexo.

Por outro lado, os *Homo neanderthalensis* enterravam seus mortos, como os sapiens, mas tinham suas cavernas com paredes limpas, sem pintura, sítios sem objetos ornamentais, pelo menos na grande maioria das vezes. Mas o que significa isso? Como a linguagem falada não é documentável (antes dos gravadores), não temos como saber se Lucy, *Homo erectus* ou qualquer outra espécie ancestral falava ou não. Mas o fato de neandertais não pintarem tanto em cavernas como sapiens, certamente, já indica uma menor tendência para a comunicação do grupo.

Uma segunda diferença marcante entre neandertais e humanos é o fato de que neandertais usavam utensílios construídos com material que havia nas cercanias das cavernas em que habitavam. Isso significa que não existia uma rede de comunicação ou de troca entre grupos de neandertais. Na verdade, estudos mostraram que, muitos dos utensílios de *neanderthalensis* foram copiados ou trocados com grupos de *sapiens*. Em *Homo sapiens*, não era assim. Encontramos sítios arqueológicos de *Homo sapiens* com utensílios cujas reservas do material usado para fazê-los estavam há milhares de quilômetros. Ou seja, claramente, existia uma rede de troca e de comunicação em sapiens. Como essa rede foi formada?

## Seção 5: As revoluções

O historiador Yuval Harari sugere que houve quatro grandes revoluções em sapiens, que determinaram o domínio sobre o planeta e a mudança radical no modo de vida. A primeira grande Revolução de sapiens foi uma Revolução cognitiva há 60 mil anos. A saída de sapiens da África não deve ter sido simples para os neandertais, para os deni-

sovans e para os floresiensis. Não temos evidência direta de que fomos a causa da extinção dessas outras espécies de *Homo*, mas os dados não nos permitem descartar tal possibilidade. Afinal de contas, estávamos todos competindo pelos mesmos frutos, pela mesma caça, pelo mesmo material para fazer ferramentas, pelas mesmas cavernas.

Além do mais, a megafauna mundial também sofreu consequências da nossa expansão. De fato, os maiores mamíferos das Américas e da Austrália se extinguíram logo depois da chegada de *Homo sapiens* àquelas terras. Já reparou que apenas a África tem grandes mamíferos atualmente? Qual seria a explicação para esse fato? Muitos cientistas sugerem que, na África, evoluímos juntos com esses mamíferos, ficávamos mais espertos, mas os mamíferos que sobreviviam no continente eram aqueles que melhor se safavam dos humanos. Houve, assim um tipo de coevolução, quando duas espécies evoluem estratégias, por seleção natural, conseguindo sobreviver no mesmo local. Por outro lado, quando sapiens chegou aos outros locais, a megafauna não tinha se acostumado com nossas rotinas, era tudo novo para esses animais. Rapidamente, sapiens dominou o ambiente, abatendo quantos organismos necessitava para sobreviver e aumentar sua população levando à extinção desses animais.

Há 12 mil anos, uma outra revolução estava prestes a acontecer, quando desenvolvemos a habilidade de “fabricar” comida, plantando sementes e colhendo seus frutos. Comida ficou mais fácil de ser conseguida; era só esperar. Além de conseguirmos mais comida e mais facilmente, essa mudança mudou radicalmente nossa rotina de caçadores coletores. A partir daí, tínhamos um lugar fixo, deixando nosso hábito nômade, tornando-nos sedentários. Esse lugar fixo, nos permitiu também termos mais filhos, pois não era necessário esperar o mais velho ficar maior (e conseguir caminhar sozinho) antes de ter o segundo filho. Os filhos poderiam ir nascendo um depois do outro, o que claramente

está associado à adaptação.



**Figura 10:** A revolução agrícola foi uma das revoluções que mudaram nossos hábitos de vida.

Além disso, com mais filhos, os pais tinham mais ajuda na lavoura também e, com comida suficiente, as taxas de natalidade aumentaram vertiginosamente. Depois do plantio, a tarefa era simples: regar e esperar pela colheita. Assim, tínhamos mais tempo livre para nos dedicar a outras coisas e para pensar, e este hábito sedentário abriu caminho para o surgimento de profissões diferentes para conseguir comida para a família, que foi a única profissão que existia até ali. Apenas com moradia fixa, alguém poderia se dedicar a algo diferente. Por exemplo, uma pessoa com habilidade manual poderia se especializar em fazer as melhores facas da região. Ele ficou rapidamente conhecido pela sua habilidade e, como tinha residência fixa, as pessoas que precisassem de facas iriam em sua casa para tentar trocas. Logo, iniciaram os mercados de trocas.

Por outro lado, problemas também decorreram da nossa mudança de hábito. Por exemplo, o hábito sedentário aumentou as chances



de passarmos fome, caso a colheita fosse perdida por qualquer razão. Ninguém se dedicava mais à caça ou à coleta de alimentos. Este hábito também diminuiu nossas condições de higiene, pois nos obrigou a lidar com nosso esgoto acumulado e com o esgoto dos animais que criávamos. Assim, aumentaram também as mortes por doenças.

A terceira revolução foi a revolução científica, que aconteceu há 500 anos e foi a descoberta do: “eu não sei, mas posso descobrir”. Em muitos locais, ainda hoje, os povos nativos acreditam que os indivíduos mais velhos da tribo detêm o conhecimento total que existe do mundo. Então, a descoberta mais importante desta revolução foi a descoberta da ignorância, ou seja, “existem poderes desconhecidos que podem ser conhecidos com uma metodologia coerente”.

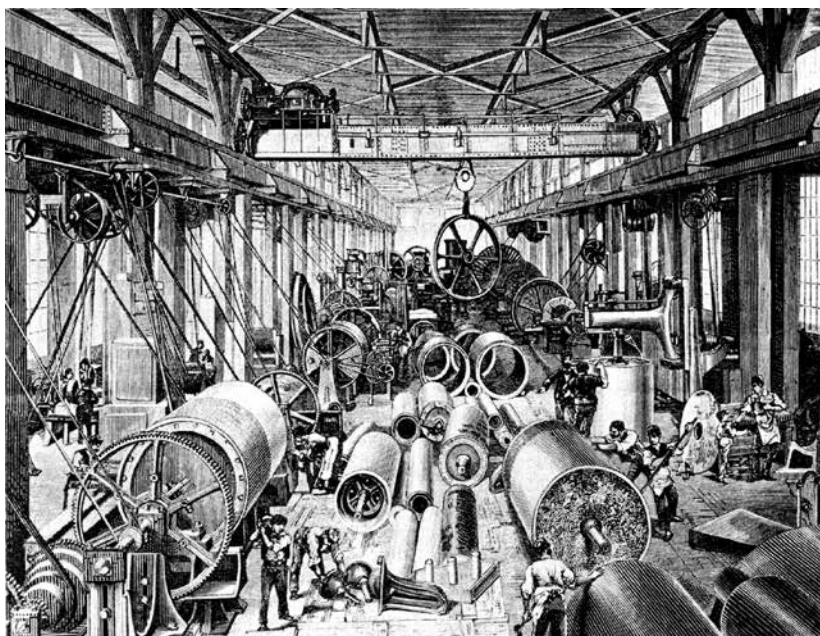


**Figura 11:** O pensador, escultura de Auguste Rodin. O pensamento complexo e as revoluções humanas e a sociedade complexa devem estar associados ao desenvolvimento da linguagem complexa.

Assim, mediante observação e uma metodologia sistemática (método científico), podemos alcançar novos poderes (novas previsões sobre o mundo). Com a revolução científica, fica claro que não sabemos tudo sobre nada, sabemos pouco sobre pouca coisa. Tudo o que sabemos é temporário e pode mudar.



Finalmente, a quarta revolução foi a Revolução Industrial, que é a mudança de trabalho. Antes da Revolução Industrial, toda a força, todo o trabalho tinha fonte humana ou animal. Depois da invenção da máquina a vapor, as máquinas passaram a fazer a maior parte do esforço, pelo menos, nos países mais ricos.



**Figura 12:** A Revolução Industrial foi uma das revoluções que mudaram nosso hábito de vida.

## Seção 6: A sobrevivência do mais adaptável

Claramente, a linguagem complexa é parte estruturante dessas revoluções e das mudanças sociais que aconteceram nos últimos milhares de anos. Vivemos no período geológico chamado de Holoceno, mas devido à influência enorme dos seres humanos no planeta, alguns pesquisadores chamam esse novo período de Antropoceno. A curiosidade por descobrir coisas novas está conosco desde que o primeiro ancestral vegetariano experimentou carne, desde que aquele outro que, mesmo com medo, se aproximou do fogo, percebendo que era possível dominá-lo, e que aquele terceiro, mesmo duvidando, plantou a primeira semente que cresceu em uma plantinha.



**Figura 13:** Nos últimos 200 mil anos, vivemos em períodos glaciais e períodos interglaciais, que alternavam temperaturas muito frias com temperaturas mais amenas. As modificações no ambiente, ao longo de nossa história, nos tornaram adaptáveis, dando-nos novos poderes a cada geração.

Entretanto, apesar de claros aumentos na qualidade e na expectativa de vida dos humanos, estamos vivendo também as consequências da superpopulação humana; por exemplo, a fome, prevista por Malthus (ver aula de Seleção Natural). Um exemplo dos problemas mais sérios brasileiros é que 75% dos jovens não têm um ensino médio de qualidade. Essa estatística limita o potencial máximo na vida profissional da próxima geração de brasileiros. Imagine se 75% dos aviões ou dos carros ou dos poços de petróleo não atingissem seu potencial; seria o caos industrial! Pois bem, estamos em pleno caos de educação. A falta de tratamento de esgoto e de água potável são a maior causa de mortalidade infantil e de doenças que podem ser prevenidas no mundo. No Brasil, por exemplo, apenas 60% das residências têm encanamento de esgoto. Resolvendo o problema do esgoto, sobraria orçamento de saúde para ser destinado à educação dos nossos jovens.

Um outro problema sério é a produção de lixo. Em primeiro lugar, as indústrias tendem a despejar produtos de baixa qualidade e de baixo custo no mercado. Ela desenvolve um novo produto com *design* mais arrojado, mas bonito e de maior conforto, mas que tem um detalhe: ele quebra logo depois de expirada a garantia. Quem nunca teve problema com telefone celular? Outro aspecto que gera lixo em proporções nunca vistas é que as embalagens, o plástico e o vidro ficaram muito e perigosamente baratos. A cada refrigerante tomado, a cada lata de comida aberta, a cada roupa comprada será jogada fora a embalagem. A cada ida ao supermercado, várias sacolinhas de supermercado serão jogadas fora. Porém, onde é “fora”, se toda vez que jogamos fora, estamos jogando em nosso próprio planeta?

Terminamos nossa disciplina olhando para o planeta maravilhoso que temos e o que estamos fazendo com ele. Não são apenas as indústrias e não são apenas os outros que têm que se conscientizar. Será que você não consegue mudar um pouco seus hábitos e os das pessoas ao seu redor? Por exemplo, pedindo para seu pai levar uma sacola retornável para o supermercado, emprestando e pedindo emprestado, ao invés de comprar? Comprando produtos de melhor qualidade, para diminuir o lixo do planeta. Cabe a nós decidirmos qual será a nossa contribuição para as gerações posteriores.



**Figura 14:** O Antropoceno é uma época cheia de desafios. Quantos novos poderes ainda poderemos descobrir? Como podemos salvar o nosso mundo dos costumes que o estão destruindo?



## O pensamento crítico e a teoria evolutiva

Ao longo da disciplina, falamos sobre o desenvolvimento de um pensamento crítico, que é um aspecto importante em ciência. Entretanto, um erro bastante comum é imaginar que isso está associado ao questionamento de todo e qualquer item do conhecimento científico da mesma forma. Um exemplo desse pensamento equivocado está no fato de que algumas pessoas questionam se a Terra é plana. Existem milhões de fotografias já divulgadas que mos-

tram de maneira contundente o caráter esférico de nosso planeta. Claramente, isso não é reflexo de um espírito questionador, como ressaltamos em ciência. Questionar tudo indiscriminadamente é exatamente tão ingênuo como aceitar tudo de maneira cega.

Todo cientista sabe que nunca pode aceitar algo sem exame e sabe também que seu questionamento deve ter níveis diferentes de profundidade. Entretanto, o bom cientista sabe que a profundidade de questionamento deve ser inversamente proporcional à robustez desse conhecimento científico. Essa robustez, por sua vez, está ligada ao número de testes que o conhecimento já passou e à metodologia usada nos testes, ou seja, se seguiu os padrões rigorosos do método científico. Um único experimento rigorosamente elaborado seria suficiente para derrubar a teoria evolutiva de Darwin, mas todos os resultados de tais experimentos rigorosos estiveram sempre e inquestionavelmente de acordo com as previsões dessa teoria.

Outras pessoas sugerem que os cientistas mascaram evidências contrárias a ela. Mas talvez eles esqueçam de um ponto: uma teoria evolutiva já foi derrubada! E foram os próprios cientistas que o fizeram. Foi a teoria evolutiva de Lammarck. E ela foi derrubada porque a cauda dos ratinhos que nasciam não ficaram menores, mesmo se tivessem pais com caudas cortadas. Esse foi um experimento simples, mas mostrou, de maneira clara e inquestionável, para toda a comunidade científica, que as previsões da teoria de Lammarck estavam erradas.

A teoria de Darwin passa diariamente por milhares ou milhões de testes, feitos rigorosamente de acordo com o método científico, mas sobrevive há 150 anos. Claramente, esse tipo de evidência a torna uma das mais sólidas teorias em ciência. Isso porque, desde então, descobrimos não apenas novas evidências, mas novas áreas da Biologia que são perfeitamente compatíveis com a teoria evolutiva, como a genômica comparada. Informe-se mais sobre isso e ajude a difundir a teoria que unifica e esclarece a lógica da Biologia moderna.

---

## Referências para as figuras

Por Lee Roger Berger research team - <http://elifesciences.org/content/4/e09560>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43071595>

Flo <http://humanorigins.si.edu/evidence/human-fossils/species/homo-floresiensis>

Veja site para copyright <https://www.si.edu/termsfuse/>

Figura homo erectus multirregional x out of Africa

CC 3.0 BY. Icon made by Plainicon from [www.flaticon.com](http://www.flaticon.com)

[http://www.flaticon.com/free-icon/caveman\\_78967](http://www.flaticon.com/free-icon/caveman_78967)

hunter Flaticon basic license. Icon made by Freepick from [www.flaticon.com](http://www.flaticon.com)

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20187520>

<http://www.endlessicons.com/free-icons/asia-icon/>

<http://www.endlessicons.com/free-icons/europe-icon/>

<http://www.endlessicons.com/free-icons/africa-icon/>

Distribuição geográfica de neander.

By 120 - my own work 120, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=714664>

Figura dispersão de sapiens, erectus e neander

Autor NordNordWest - File:Spreading homo sapiens ru.svg by Urutseg, Javno vlasništvo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34697001>

Neander

By Tim Evanson - <http://www.flickr.com/photos/23165290@N00/7283199754/>, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20187477>

Migrações CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=227326>

Hipótese de Stringer

By Homo-Stammbaum, Version Stringer.jpg: Chris Stringer derivative work: Conquistador - This file was derived from Homo-Stammbaum, Version Stringer.jpg; CC BY-SA 3.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36416828>

## Agricultura

Por Ralf Roletschek - Transferred from the German Wikipedia. Original file is/was here. (Registo de carregamento original available below.), GFDL, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35770>

Ignorância By Jean-Pierre Dalbéra from Paris, France - Le penseur de la Porte de l'Enfer (musée Rodin), CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24671002>

## Revolução Industrial

Por unbekannt; upload by sidonius (talk) 14:21, 15 September 2008 (UTC) - Graphische Sammlung der Zentralbibliothek Zürich. Aus: Hans-Peter Bärtschi: Industrialisierung, Eisenbahnschlachten und Städtebau. Die Entwicklung des Zürcher Industrie- und Arbeiterstadtteils Aussersihl. Ein vergleichender Beitrag zur Architektur und Technikgeschichte. (Schriftenreihe des Instituts für Geschichte und Theorie der Architektur an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, gta 25). Birkhäuser: Basel 1983., Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4791614>

## Glaciações

Por Mauricio Antón - from Caitlin Sedwick (1 April 2008). "What Killed the Woolly Mammoth?". PLoS Biology 6 (4): e99. DOI:10.1371/journal.pbio.0060099., CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11781070>

## Luzes

Por Data courtesy Marc Imhoff of NASA GSFC and Christopher Elvidge of NOAA NGDC. Image by Craig Mayhew and Robert Simon, NASA GSFC. - [http://eoimages.gsfc.nasa.gov/ve//1438/land\\_lights\\_16384.tif](http://eoimages.gsfc.nasa.gov/ve//1438/land_lights_16384.tif), Domínio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=233702>

