

EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA

**BASES ECOLÓGICAS E EVOLUTIVAS  
DA DIVERSIDADE DOS SERES VIVOS I  
TOMO I**

EDITORA  
UFMG

**BASES ECOLÓGICAS E EVOLUTIVAS  
DA DIVERSIDADE DOS SERES VIVOS I  
TOMO I**



## **UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Reitor: Clélio Campolina Diniz  
Vice-Reitora: Rocksane de Carvalho Norton

### **Pró-Reitoria de Graduação**

Pró-Reitora: Antônia Vitória Soares Aranha  
Pró-Reitor Adjunto: André Luiz dos Santos Cabral  
Coordenador do Núcleo de Apoio à Educação a Distância:  
Fernando Fidalgo  
Coordenador da Universidade Aberta do Brasil:  
Wagner José Corradi Barbosa

### **EDITORA UFMG**

Diretor: Wander Melo Miranda  
Vice-Diretor: Roberto Alexandre do Carmo Said

### **Conselho Editorial**

Wander Melo Miranda (presidente)  
Flávio de Lemos Carsalade  
Heloísa Maria Murgel Starling  
Márcio Gomes Soares  
Maria das Graças Santa Bárbara  
Maria Helena Damasceno e Silva Megale  
Paulo Sérgio Lacerda Beirão  
Roberto Alexandre do Carmo Said

ARY CORRÉA JUNIOR  
FRANCISCO ÂNGELO COUTINHO  
LUIZ GUILHERME KNAUER  
NELSON M. VAZ  
RICARDO DINIZ DA COSTA  
ROGÉRIO PARENTONI MARTINS

**BASES ECOLÓGICAS E EVOLUTIVAS  
DA DIVERSIDADE DOS SERES VIVOS I  
TOMO I**

2ª reimpressão

Belo Horizonte  
Editora UFMG  
2011

© 2006, OS AUTORES  
© 2006, Editora UFMG  
2007 - 1ª reimpressão  
2011 - 2ª reimpressão

Este livro ou parte dele não pode ser reproduzido por qualquer meio sem autorização escrita do Editor.

---

B299 Bases ecológicas e evolutivas da diversidade dos seres vivos I/  
Ary Corrêa Junior... [et al.] - Belo Horizonte : Editora UFMG, 2006.

76 p. – 2v.: il (Educação a Distância)

Inclui referências.  
ISBN: 85-7041-543-5  
ISBN: 854-7041-542-7 (Série)

1. Ecologia. 2. Zoologia. I. Corrêa Junior, Ary II. Série

CDD: 577  
CDU: 577

---

Ficha catalográfica elaborada pela CCQC - Central de Controle de Qualidade da Catalogação da Biblioteca  
Universitária da UFMG

Este livro recebeu o apoio financeiro da Secretaria de Educação a Distância do MEC.

Coordenação de Produção de Textos de Biologia: Gleydes Gambogj Parreira

EDITORAÇÃO DE TEXTOS: Ana Maria de Moraes

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO: Maria do Rosário Alves Pereira

REVISÃO DE PROVAS: Eduardo Martins, Maria do Rosário Alves Pereira, Priscilla I. Felipe

PRODUÇÃO GRÁFICA: Warren M. Santos

PROJETO GRÁFICO e CAPA: Eduardo Ferreira

FORMATAÇÃO: Warren M. Santos

EDITORA UFMG  
Av. Antônio Carlos, 6.627 - Ala direita da Biblioteca Central - Térreo  
Campus Pampulha - 31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: 55 (31) 3409-4650 - Fax: 55 (31) 3409-4768  
[www.editora.ufmg.br](http://www.editora.ufmg.br) - [editora@ufmg.br](mailto:editora@ufmg.br)

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
Av. Antônio Carlos, 6.627 - Reitoria – 6º andar  
Campus Pampulha - 31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: 55 (31) 3409-4054 - Fax: 55 (31) 3409-4060  
[www.ufmg.br](http://www.ufmg.br) - [info@prograd.ufmg.br](mailto:info@prograd.ufmg.br) - [educacaoadistancia@ufmg.br](mailto:educacaoadistancia@ufmg.br)

O Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da UFMG, modalidade a distância, foi concebido tendo em vista dois princípios fundamentais. O primeiro deles se refere à democratização do acesso à educação superior; o segundo consiste na formação de professores de alto nível, comprometidos com a qualidade da educação no país.

A coletânea da qual este volume faz parte visa dar suporte aos estudantes do Curso. Cada volume está relacionado com um tema, eleito como estruturante na matriz curricular. Ele apresenta os conhecimentos mínimos que são considerados essenciais no estudo do tema. Isto não significa que o estudante deva se limitar somente ao estudo do volume. Ao contrário, ele é o ponto de partida na busca de um conhecimento mais amplo e aprofundado sobre o assunto. Nessa direção, cada volume apresenta uma bibliografia, com indicação de obras impressas e obras virtuais, que deverá ser consultada à medida que se fizer necessário.

Cada volume da coletânea está dividido em aula, que consistem em unidades de estudo do tema tratado. Os objetivos, apresentados em cada início de aula, indicam as competências e habilidades que o estudante deve adquirir ao término de seu estudo. As aulas podem se constituir em apresentação, reflexões e indagações teóricas, em experimentos ou em orientações para atividades a serem realizadas pelos estudantes.

Para cada aula ou conjunto de aulas, foi elaborada uma auto-avaliação, com o objetivo de levar o estudante a avaliar o seu progresso e a desenvolver estratégias de metacognição ao se conscientizar dos diversos aspectos envolvidos em seus processos cognitivos. A auto-avaliação auxiliará o estudante a tornar-se mais autônomo, responsável, crítico, capaz de desenvolver sua independência intelectual. Caso ela mostre que as competências e habilidades indicadas nos objetivos não foram alcançadas, ele deverá estudar com mais afinco e atenção o tema proposto, reorientar seus estudos ou buscar ajuda dos tutores, professores especialistas e colegas.

Agradecemos a todas as instituições que colaboraram na produção desta coletânea. Em particular, agradecemos às pessoas (autores, coordenador da produção gráfica, coordenadores de redação, desenhistas, diagramadores, revisores) que dedicaram seu tempo e esforço na preparação desta obra que, temos certeza, em muito contribuirá para a educação brasileira.

*Maria do Carmo Vila*  
*Coordenadora do Centro de Educação a Distância*  
*UFMG*



**PARTE 1 – A PERGUNTA ZERO**

Aula 1	A pergunta zero sobre o viver e os seres vivos . . . . .	11
	Varição e constância . . . . .	12
	O meio interno e a sabedoria do corpo . . . . .	13
	Do ser ao fazer . . . . .	14
	Compartilhando uma cor sem nome . . . . .	15
	Princípios explicativos e explicações . . . . .	16
	As explicações científicas . . . . .	17
	Leitura recomendada . . . . .	18

**PARTE 2 – BASES GEOLÓGICAS**

Aula 1	Introdução . . . . .	21
	O Universo . . . . .	21
	O Sistema Solar . . . . .	22
Aula 2	A Terra, origem, evolução, estrutura e composição . . . . .	25
	Mas o que faz da Terra um corpo esférico? . . . . .	25
Aula 3	Geodinâmica interna . . . . .	31
	Geodinâmica interna: deriva continental e tectônica de placas . . . . .	31
	Geologia estrutural e movimentos sísmicos . . . . .	32
Aula 4	Geodinâmica externa: denudação e intemperismo . . . . .	34
	Processos de metamorfismo . . . . .	38
Aula 5	Estratos e seus arranjos . . . . .	39
	Coluna geológica e a escala do tempo . . . . .	40
	O tempo geológico e sua determinação . . . . .	41
	Datação relativa . . . . .	42
	Datação radiométrica . . . . .	42
Aula 6	Noções de geologia histórica . . . . .	45
	Hadeano e Arqueano . . . . .	45
	Os tempos proterozóicos . . . . .	45
	O farenozóico . . . . .	47

### PARTE 3 – EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS BIOLÓGICOS

Aula 1	Evolução de sistemas biológicos . . . . .	51
	1. Introdução. . . . .	52
	2. Teoria geral dos sistemas e sistemas biológicos . . . . .	52
	3. Sistemas complexos, caos e evolução . . . . .	53
	4. Emergência . . . . .	54
	5. A evolução de sistemas biológicos . . . . .	57
	Referências . . . . .	62
	Glossário. . . . .	63

### PARTE 4 – MICROBIOLOGIA

Aula 1	Microorganismos: estrutura e diversidade . . . . .	67
	1. Introdução. . . . .	68
	2. Morfologia externa de microorganismos . . . . .	69
	Auto-avaliação . . . . .	76

**PARTE 1**  
**A PERGUNTA ZERO**



## A pergunta zero sobre o viver e os seres vivos

*Nelson M. Vaz*

“O que é vida?”<sup>1</sup> indaga a pergunta número um no estudo da Biologia, e tudo parece partir dela. Sugiro, porém, que há uma “pergunta zero” que vem antes de qualquer outra: aquela que indaga como podemos perguntar qualquer coisa? De onde vem o entendimento humano? Porque há uma maneira de abordar a vida e os seres vivos através dessa pergunta. Como conhecemos? É possível conhecer o conhecer?

Afinal, tudo o que dizemos é dito por alguém. Como as pessoas fazem isso? Como as crianças, que antes não dizem nada, crescem e passam a falar como as pessoas falam? Como aprendemos? Todo fazer é uma forma do conhecer, e todo conhecer é uma forma do fazer. Quando a criança recebe na escola um grão de feijão com as instruções de colocá-lo sobre um algodão molhado, isso é feito no entendimento de que o feijão “sabe” desenvolver-se em uma plantinha, e a gente espera que a criança se encante com isso.

Assim como a semente sabe desenvolver-se em uma planta, cada planta sabe viver de sua maneira própria, sabe conservar-se bem encaixada (os biólogos dizem “adaptada”) ao seu meio. Uma aranha sabe tecer sua teia, encontrar parceiros sexuais e evitar predadores. Uma aranha conserva um modo de vida particular adaptado ao seu meio.

Além de aspectos mais visíveis, como crescer ou mover-se, os seres vivos executam ainda outras ações que não são tão evidentes, como, alimentar e respirar, transformar os alimentos e o oxigênio em energia para mover-se e acionar seus tecidos. A biosfera, a camada de seres vivos que envolve o planeta Terra, contém seres muito variados em tamanho, forma, duração... Enfim, variam de muitas maneiras, mas estão todos vivos. Dada essa grande variação, como saber que estamos diante de um ser vivo? E todos os seres vivos morrem, quando

<sup>1</sup> *O que é vida? Para entender a Biologia do século XXI*, de El Hani, Charbel Niño e Videira, Antonio Augusto Passos Videira (Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2000) é uma coleção de textos muito interessantes.

perdem essa característica comum de estarem vivos. Por que, então, temos tanta dificuldade em descrever isso que, quando perdido, trás a morte?

Talvez seja porque essa pergunta envolve a “pergunta zero”, ou seja, ela tem dois lados: envolve um “saber”, um “conhecer”. Como “sabemos” estar diante de um ser vivo, ou de restos de um ser vivo, como um fóssil? Esse “saber”, esse “conhecer” é também uma característica dos seres vivos. As sementes sabem germinar, as árvores sabem crescer e dar frutos; as pequenas amebas sabem encontrar seu alimento; aranhas fazem teias e, as abelhas, colméias. A biosfera é uma imensa rede de “saberes” entrelaçados.

Mas, dentro desses saberes dessa coleção de seres vivos, nos interessa particularmente o conhecer humano, nosso entendimento, nossa linguagem. Tudo o que dissemos até aqui é parte dessa outra grande preocupação, expressa em uma pintura de Gauguin: “Quem somos, de onde viemos, para onde vamos?” A resposta à última pergunta parece simples: não vamos a lugar algum, vamos ficar aqui mesmo nesse planeta, que tem condições tão particularmente adequadas à vida, como a conhecemos. Temos uma idéia cada vez menos nebulosa sobre nossas origens, a partir de primatas ancestrais, que não existem mais. Mas, quem somos?

Somos muitas coisas ao mesmo tempo. Somos humanos na linguagem, na reflexão, e somos também primatas, um tipo de mamífero. De alguma forma, nossa linguagem e nossas reflexões estão baseadas em nossa biologia de primatas, de mamíferos, de animais, de metazoários, de seres vivos. Em outras palavras, que saibamos que somos primatas, mamíferos, vertebrados, animais, multicelulares, seres vivos — tudo isso depende de sermos humanos e vivermos no linguagear humano, coordenando condutas consensuais uns com os outros, do nascimento à morte.

## VARIAÇÃO E CONSTÂNCIA

---

Os seres vivos são estruturas dinâmicas, estão em contínua transformação, em interações com o meio em que vivem, até que morrem, passam a ser outra coisa. Mas enquanto mudam, os seres vivos parecem exemplos de um ditado francês que diz: “Quanto mais mudam, mais são a mesma coisa.” Da semente à planta já crescida, o feijão muda muito e começa a produzir outras sementes, mas de certa forma ainda é a mesma coisa. Também nos animais, as formas que se desenvolvem nas larvas e nos embriões não se parecem nada às formas adultas, mas sabemos tratar-se do mesmo ser vivo.

De modo que para lidar com essa variação e essa constância que são simultâneas, é muito importante adotar uma terminologia com significados bem claros e segui-la com rigor. Vou adotar o termo “organização” (que vem de *organon*, instrumento) para falar daquilo que

permanece invariante, e vou adotar o termo “estrutura” (de *struere*, construir) para descrever os componentes de um ser vivo e as relações entre esses componentes. A organização, portanto, é a parte invariante da estrutura, aquilo que é conservado e confere à entidade sua “identidade de classe”. É a organização que nos permite, por exemplo, separar rãs de sapos e pererecas, e também agrupá-las como uma certa classe de seres vivos.

Todos os seres vivos compartilham um tipo particular de estrutura. Todos os seres vivos, ou são células, ou passam uma parte da vida como células. Cada um de nós, seres humanos, já fomos uma só célula, o zigoto, formado pela união de um espermatozóide com um óvulo. As células são as unidades fundamentais de todos os seres vivos e todo ser vivo vem de uma célula.

Analisadas do ponto de vista molecular, todas as células compartilham um tipo particular de organização: são redes de processos de produção capazes de gerar os próprios componentes gerados nesses processos e, além disso, de gerar uma fronteira, uma membrana, entre esse processo e o meio no qual o processo se realiza. Todas as células são máquinas moleculares capazes de produzir a si mesmas. Esse tipo de organização particular de processos capazes de gerar a si mesmos é conhecido como organização “autopoiética” — uma organização auto-criadora, auto-mantenedora. Todos os sistemas vivos são sistemas autopoiéticos.

## O MEIO INTERNO E A SABEDORIA DO CORPO

O termo “homeostase” foi inventado na década de 1930 pelo fisiologista norte-americano Walter B. Cannon para descrever a capacidade do organismo de restaurar seu estado original face a perturbações. O termo homeostase é usado com dois significados. Mais comumente, ele se refere a alças de retro-alimentação (*feedback*), mas há um segundo significado, mais amplo, presente no título do livro de Cannon, *A sabedoria do corpo* (*The wisdom of the body*), que se refere à estabilidade dinâmica do organismo ou à conservação de referenciais nas atividades biológicas. Esse aspecto mais amplo deriva da noção da estabilidade de um “meio interno” (*milieu interieur*), uma idéia criada pelo famoso fisiologista francês Claude Bernard, no século XIX, que afirma que nós e nossas células vivemos em mundos diferentes. Enquanto nossas células vivem em um “meio interior” de propriedades bastante estáveis em termos de composição, temperatura, etc., nós, como organismos de vida livre, habitamos um “meio externo”, submetidos aos vagares do clima e a uma variedade de outros fatores. A noção de retroalimentação (*feedback*) se refere a essa mesma conservação, mas enfatiza mudanças temporais sugerindo que as máquinas, em geral, e os organismos, em particular, têm meios de recapturar seus estados prévios.

A idéia de que nós e nossas células vivemos em mundos diferentes é uma idéia fascinante. O que fazemos como organismos atuantes no meio em que vivemos se passa em um mundo diferente do mundo em que atuam nossas células, que constituem o sistema vivo que viabiliza nossas ações como organismos. O sistema vivo e o organismo vivem em mundos distintos e, de certa forma, o organismo ignora o sistema vivo que subjaz e possibilita todas as suas ações. O sistema vivo opera no *milieu interieur* de Claude Bernard; o organismo interage com componentes de um meio muito diferente desse meio interno. É importante lembrar disso quando procuramos explicar ações do organismo (a entidade) em termos do que se passa com o sistema vivo (o mecanismo que mantém essa entidade). Por exemplo, eu não tenho a menor idéia do que o meu corpo faz enquanto eu falo português: como é controlada a respiração que deixa sair o ar em pequenos jatos que acionam as cordas vocais, que precisam se contrair aqui e relaxar ali; e de tudo o que precisa ocorrer no sistema nervoso... Enfim, eu, organismo, não sei o que se passa enquanto meu corpo fala. Na Imunologia, por exemplo, é costumeiro dizer que o organismo se defende de infecções através da formação de anticorpos específicos, podemos estar confundindo o organismo com o sistema vivo. Mas, se não formos cautelosos nessa afirmação podemos confundir o que o sistema vivo faz com o que o organismo faz em suas interações com o meio em que vive.

Em um sentido amplo, o termo “homeostase” e o conceito de sistemas dinâmicos se equivalem, porque sistemas nunca são não-homeostáticos. Ou um sistema preserva sua organização, ou perde sua identidade de classe e passa a ser outra coisa. Quando um sistema vivo perde sua organização autopoietica (automantenedora, autocriadora), ele morre e se desintegra como organismo. Como uma aproximação a noções sistêmicas, o conceito de homeostase é uma adição bem-vinda. Porém, tanto a homeostase, quanto a idéia de “regulação”, têm sido usadas no sentido mais restrito de alças de retroalimentação (*feedback*), e nesse modo de olhar se perde de vista a conservação do sistema mais amplo. A idéia de “regulação” acarreta a idéia de uma entidade ou fenômeno “regulador” e uma outra entidade ou fenômeno “regulado”; logo perguntaríamos quem regula o regulador? E depois, quem regula o regulador do regulador — uma regressão infinita. Assim sendo, os termos “estrutura” e “organização”, como descritos acima, são mais adequados que os termos “homeostase” e “regulação” em nosso estudo da variação e da constância nos sistemas vivos.

---

## DO SER AO FAZER

---

Se é como disse William Shakespeare — “Ser ou não ser, eis a questão” —, então, Maturana propõe “Fazer ou não fazer, eis a resposta.” A pergunta número um na Biologia — “O que é vida?” — pode ser

trocada pela pergunta: “O que precisa se passar, o que preciso fazer para dizer que estou diante de um ser vivo, ou de um fenômeno biológico?” Porque pergunto “O que é ...?” alguma coisa, estou admitindo que essa coisa tem uma existência independente de minha observação, que ela existia previamente e vai continuar existindo depois que eu voltar minha atenção para outra coisa. Quando pergunto “O que é...?” estou aceitando a idéia de que as coisas são como são, seja lá como forem, independentemente do que eu faça. Quando pergunto “O que é... o verde dessa folha?”, estou admitindo que o verde pertence à folha, é algo independente de mim, que existe lá fora, em um mundo separado de mim. Quando pergunto “O que se passa comigo quando eu vejo verde nessa folha?”, a pergunta tem a ver comigo, com minha biologia de observador.

Mas será que eu “faço” alguma coisa para enxergar o verde de uma folha? Usualmente, se imagina que a distinção de cores na visão se deva ao comprimento de onda das radiações que penetram o olho. No entanto, isso pode ser contradito por experiências muito simples, como as de “sombras coloridas”. Quando um objeto é iluminado ao mesmo tempo por duas fontes luminosas, sendo uma branca e uma vermelha, se formam duas sombras, uma das quais é vermelho-claro, como esperado, mas a outra é meio verde (turquesa). Se analisarmos os comprimentos de onda presentes nesse verde “ilusório”, veremos que ele não corresponde aos valores espectrais do verde. No entanto, vemos “verde”. Podemos também sonhar com um lago ou um trecho do oceano brilhando em verde. Quando olhamos para uma folha verde, ou para o verde “ilusório” criado experimentalmente, ou quando sonhamos com o verde do mar, nosso sistema nervoso adota configurações semelhantes e em todas essas situações dizemos experienciar a cor “verde”. Verde, portanto, não é um comprimento de onda de certas radiações, mas sim é um estado de nosso sistema nervoso, ao qual associamos um outro estado de nosso organismo, no qual dizemos “verde”. Isso é o que o sistema vivo que subjaz nosso organismo “faz” em nossas experiências cromáticas.

---

### COMPARTILHANDO UMA COR SEM NOME

---

Convivi durante vários anos com um amigo daltônico, sem me aperceber de que vivenciávamos experiências cromáticas distintas. Certo dia, pedi a ele que apanhasse um objeto verde sobre uma mesa, e ele disse que ali não havia objeto verde algum. Só então me dei conta do que se passava. Essa situação mostra que podemos compartilhar condutas consensualmente sem que experienciemos as mesmas coisas. Em uma reunião para atingir um acordo sobre qualquer coisa, como os argumentos nem sempre são acompanhados de explicações mais claras, freqüentemente se atinge um consenso ilusório e os participantes se retiram na suposição de que houve um acordo, quando o entendimento de cada um pode ter sido distinto. Por isso há sempre

que se valorizar as explicações e as definições precisas daquilo que descrevemos.

## PRINCÍPIOS EXPLICATIVOS E EXPLICAÇÕES

Quero terminar ilustrando a diferença entre princípios explicativos e explicações, porque nem sempre esse contraste é percebido e pode criar sérios entraves ao entendimento. Gregory Bateson, um grande pensador do século XX, alertava contra os princípios explicativos. Um de seus famosos “metadiálogos” — diálogos imaginários com sua filha sobre temas complexos — intitulado “O que é um instinto?”, começa assim:

*Filha: Papai, o que é um instinto?*

Pai: Um instinto, minha querida, é um princípio explicativo.

*F: Mas o que ele explica?*

P: Qualquer coisa — quase qualquer coisa mesmo. Qualquer coisa que você queira que ele explique.

*F: Não seja tolo. Não explica a gravidade.*

P: Não. Mas isto é porque ninguém quer que um instinto explique a gravidade. Se eles quisessem, ele explicaria. Nós diríamos simplesmente que a Lua tem um instinto cuja força varia inversamente com o quadrado da distância...

*F: Mas isto é tolice, Papai.*

P: Certamente. Mas foi você quem mencionou “instinto”, não eu.

*F: Está bem — mas então o que explica a gravidade?*

P: Nada, minha querida, porque a gravidade é um princípio explicativo.

*F: Oh.*

Assim como foi Gregory Bateson, Humberto Maturana é um biólogo de grande importância no pensamento atual que, assim como Bateson, também despreza a idéia de “princípios explicativos”. Segundo Bateson e Maturana, “princípios explicativos” ocultam o que se quer explicar, e são utilizados exatamente quando se quer evitar a explicação de alguma coisa. Na realidade, de que nos adianta dizer que algum fenômeno se dá por “instinto”? Qual a diferença básica entre algo instintivo e algo aprendido? O termo “instintivo” nos faz crer que entendemos a natureza de uma ação, quando apenas colocamos nisso um novo rótulo.

Uma explicação é algo diferente de um “princípio explicativo”. Explicar algo é propor um “mecanismo”, que deixado operar, ou posto a

operar, é capaz de gerar aquilo que se quer explicar — um “mecanismo gerativo”. A descrição de um mecanismo gerativo envolve a descrição de componentes e relações entre esses componentes, de forma que se perceba como eles se articulam para produzir o fenômeno ou a coisa que se quer explicar. Um “princípio explicativo” parece substituir o “mecanismo gerativo”, mas não o faz.

O “mecanismo gerativo” não constitui, por si só, uma explicação, porque para se constituir como uma explicação, uma proposta explicativa precisa ser aceita por quem a ouve. E o ouvinte pode colocar em seu ouvir muitas condições não-formais; alguém pode legitimamente dizer que uma explicação não lhe agrada.

---

### AS EXPLICAÇÕES CIENTÍFICAS

---

As explicações científicas são o que caracterizam e definem a prática da ciência. Ou seja, não existem propriamente “livros científicos”, ou “instrumentos científicos”; apenas as explicações científicas são diferentes das demais modalidades de explicações. O que distingue as explicações científicas de explicações estéticas, religiosas ou filosóficas, por exemplo, são seus critérios de validação, ou seja, que seqüência de acontecimentos devemos testemunhar para dizer que estamos diante de uma explicação científica.

Uma explicação científica inclui quatro etapas, não necessariamente na mesma ordem. Na primeira etapa, uma entidade ou um fenômeno é descrito de uma forma aceitável por uma comunidade de observadores; por essa razão, os textos científicos contêm uma seção intitulada “Material e métodos”, na qual são especificadas as condições em que a observação deve ser realizada. A segunda etapa consiste na proposta de um mecanismo gerativo capaz de criar no observador a experiência do fenômeno que se quer explicar. A terceira etapa, uma etapa crítica nas explicações científicas, consiste em mostrar que outros fenômenos, ou entidades, do mesmo domínio podem ser gerados pelo mecanismo proposto. A quarta etapa repete mais ou menos a primeira etapa e consiste na observação desses outros fenômenos pela comunidade de observadores. Isso é o que constitui uma explicação científica, não mais que isso, não menos que isso.

Essa seqüência de procedimentos permite responder a uma pergunta curiosa que, usualmente, nunca faríamos a nós mesmos: Como sabemos que sabemos o que afirmamos saber? Ou, Como saber que já explicamos o que queríamos explicar? A resposta é: quando o mecanismo gerativo proposto for capaz de gerar outros (todos os) fenômenos naquele domínio de descrição.

Quando, portanto, teremos explicado a vida e os seres vivos? Quando estivermos diante de um mecanismo gerativo capaz de criar todos os fenômenos biológicos — e nossa explicação for aceita por uma comunidade de observadores.

## LEITURA RECOMENDADA

MAGRO, Cristina; GRACIANO, Miriam; VAZ, Nelson (Org.) (1997). *Ontologia do observar* – Humberto Maturana. Belo Horizonte: Editora UFMG.

MAGRO, Cristina; PAREDES, Victor. (Org). (2001). *Cognição, ciência e vida cotidiana* – Humberto Maturana. Belo Horizonte: Editora UFMG.

MATURANA, H. (1998). *Emoções e linguagem em educação e política*. Trad. José Francisco Campos Fortes. Belo Horizonte: Editora UFMG.

MATURANA, H.; VARELA, F. (2001). *A árvore do conhecimento*. As bases biológicas do entendimento humano. São Paulo: Palas Athena.

MATURANA, H.; VERDEN-ZÖLLER, G. (2004). *Amor e brincadeira* – caminhos esquecidos do humano. São Paulo: Palas Athena.

**PARTE 2**  
**BASES GEOLÓGICAS**



## Introdução

*Luiz Guilherme Knauer  
Ricardo Diniz da Costa*

A Terra é o terceiro planeta do Sistema Solar, localizado em uma região periférica da chamada Via Láctea, que é apenas mais uma galáxia dentro do universo conhecido. Esta definição, simples, pode dizer muito, mas também muito pouco. Em realidade, o que é um planeta? E o Sistema Solar? E uma galáxia? E o Universo? Assim, se Geologia é o “estudo da Terra”, é, também, o estudo de sua localização, daquilo que a cerca e das origens destes objetos de diferentes escalas.

---

### O UNIVERSO

Nas últimas décadas, os estudos dos astrônomos têm levado a novos conceitos na descrição e interpretação das características de nosso universo. Alguns destes conceitos são fundamentais:

- 1- O universo é marcado por regiões com diferentes concentrações de elementos formadores;
- 2- Os objetos mais velhos conhecidos não ultrapassam os 14 ou 15 bilhões de anos;
- 3- O Universo parece ser finito, mesmo que seus limites não possam ser determinados;
- 4- O fim ou não do movimento de expansão depende da quantidade de matéria escura;
- 5- Nosso sistema planetário não deve ter nada de especial em relação aos outros existentes.

## O SISTEMA SOLAR

As principais características físicas do Sistema Solar podem ser visualizadas no Quadro 1, que merece ser lido com a devida atenção. Além destas informações, algumas outras são necessárias e importantes para a caracterização do sistema. Assim, três elementos fundamentais não estão representados no Quadro 1: o cinturão de asteróides (situado entre Marte e Júpiter), o Cinturão de Kuiper (origem dos cometas de período curto) e a Nuvem de Oort (a mais de 100.000 Unidades Astronômicas, ou seja 100.000 vezes a distância Sol-Terra), esta última origem dos cometas de longo período.

A análise do Quadro 1 mostra que o sistema pode ser dividido em dois grandes conjuntos (desde que não consideremos Plutão) separados pelo Cinturão de Asteróides: conjunto interno e conjunto externo. Os planetas internos se caracterizam por altas densidades, pequenos diâmetros e ausência de anéis e de satélites (exceto a Lua, pois os dois de Marte são pequenos asteróides capturados), enquanto os externos têm densidade pequena (são gasosos), grande diâmetro e presença de múltiplos anéis e satélites.

A presença anormal da Lua no interior do sistema evidencia uma origem excepcional. Aparentemente trata-se do resultado da rápida solidificação do produto da colisão de uma

Quadro 1

Características dos planetas do Sistema Solar e de seu satélite mais importante (para nós).

	MÉRCÚRIO	VÊNUS	TERRA	LUA	MARTE
Distância Sol	57,9 milhões Km	108,2 milhões Km	149,6 milhões Km	384400Km da Terra	227,9 milhões Km
Período Orbital	88 dias	224,7 dias	365,26 dias	27,32 dias	1,88 anos
Excentricidade	0,206	0,007	0,0167	0,05	0,093
Inclinação c/ Elíptica	7 graus	3,4 graus	0,0 graus	18,3 - 28,6 graus	1,85 graus
Inclinação Equador	0 graus	177,3 graus	23, 45 graus	6,67 graus	25,19 graus
Rotação	58d 39m	243d (retrógrada)	23h 56m	27d 07h 41m	24h 37m
Diâmetro	4879 Km	12100 Km	12756 Km	3475 Km	6794 Km
Massa	0,06 Terra	0,82 Terra	5,97.10 <sup>27</sup> gramas	0,0123 Terra	0,11 Terra
Densidade	5,43 g/cm <sup>3</sup>	5,24 g/cm <sup>3</sup>	5,515 g/cm <sup>3</sup>	3,34 g/cm <sup>3</sup>	3,94 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade	0,38 Terra	0,91 Terra	980 g/cm <sup>2</sup>	0,17 Terra	0,38 Terra
Atmosfera	O, Na, He	Dióxido de Carbono	78% N, 21% O	Sem	95% CO <sub>2</sub>
Temperatura	(-183 a +467 <sup>o</sup> C)	Média 457 <sup>o</sup> C	15 <sup>o</sup> C	(-153 <sup>o</sup> a +107 <sup>o</sup> C)	(143 a +17 <sup>o</sup> C)
Luas	0	0	1	0	2
Anéis	0	0	0	0	0

	JÚPITER	SATURNO	URANO	NETUNO	PLUTÃO
Distância Sol	778,4 milhões Km	1,43 bilhões Km	2,87 bilhões Km	4,5 bilhões Km	6 bilhões Km
Período Orbital	11,86 anos	29,42 anos	83,75 anos	164,79 anos	248 anos
Excentricidade	0,048	0,054	0,047	0,0086	0,25
Inclinação c/ Elíptica	1,3 graus	2,5 graus	0,77 graus	1,77 graus	17,2 graus
Inclinação Equador	3,12 graus	26,73 graus	82,14 graus	129,6 graus	(-120 graus)
Rotação	9h 55m	10h 39m	17h14m (ret)	16h 07m	6d 23m (ret)
Diâmetro	142.984 Km	120,536 Km	51.118 Km	49.528 Km	2390 Km
Massa	318 Terra	95,16 Terra	14,5 Terra	17,1 Terra	0,0022 Terra
Densidade	1,33 g/cm <sup>3</sup>	0,7 g/cm <sup>3</sup>	1,3 g/cm <sup>3</sup>	1,76 g/cm <sup>3</sup>	1,1 g/cm <sup>3</sup>
Gravidade	2,36 Terra	0,91 Terra	0,889 Terra	1,12 Terra	0,08 Terra
Atmosfera	H, He	97% H, 03% He	83% H, 15% He	79% H, 18% He	N, CO, metano
Temperatura	165° K	134° K	76° K	73° K	57,8° K
Luas	28	30	21	8	3
Anéis	1	7	11	4	0

Obs.: Dados da NASA, observando que o número de satélites sempre tem aumentado com novas pesquisas espaciais.

Proto-Terra com um corpo planetário do tamanho de Marte (ver [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)).



## A Terra, origem, evolução, estrutura e composição

A Terra pode ser considerada como um elipsóide de rotação com diâmetro equatorial de 12.756.776 +/- 8m e polar de 12.713.824 +/- 8m, tendo como maior elevação o Monte Everest, com quase 9 mil metros, e maior depressão, a Fossa das Filipinas com quase 11 mil metros abaixo do nível do mar. A Tabela 1 apresenta alguns dados sobre a espessura, volume, densidade média e massa da Terra e de suas partes.

Tabela 1

Dados físicos sobre o planeta Terra

	Espessura ou raio médio (km)	Volume (10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )	Massa (10 <sup>24</sup> g)
Terra	6.371,0	1.083.230,000	5,52	5.976,0000
Oceanos	3,8	1.370,000	1,03	1,4100
Geleiras	1,6	25,000	0,90	0,0023
Crosta Continental	35,0	6.210,000	2,80	17,3900
Crosta Oceânica	8,0	2,660	2,90	7,7100
Manto	2.883,0	899.000,000	4,50	4.068,0000
Núcleo	3.471,0	175.500,000	10,71	1.881,0000

A primeira tentativa de se medir o raio da Terra foi empreendida por Eratóstenes (276-194 a.C), que obteve o impressionante valor de 5.400 km (o método utilizado pode ser conhecido em <[http://penta.ufrgs.br/edu/telelab/mundo\\_mat/malice3/erast.htm](http://penta.ufrgs.br/edu/telelab/mundo_mat/malice3/erast.htm)>). Atualmente, novas medidas continuam sendo realizadas, permitindo uma maior precisão dos dados sobre o planeta esférico.

### MAS O QUE FAZ DA TERRA UM CORPO ESFÉRICO?

“Corpos grandes como a Terra possuem campo gravitacional suficiente para aglomerar a matéria e distribuí-la de modo que a energia

acumulada seja a menor possível. Pode-se mostrar matematicamente que o formato esférico é o que leva ao estado de menor energia possível.”([http://www.on.br/pergunta\\_astro/indice\\_resposta.php?id\\_tema=34](http://www.on.br/pergunta_astro/indice_resposta.php?id_tema=34)). Como a gravidade não se comporta de forma uniforme, temos maiores valores em montanhas (acúmulo de massa) e menores nos vales, assim como maiores valores nos pólos e menores no equador (diferença de raio).

Existe alguma discussão sobre a origem do universo, apesar de atualmente se apresentar como a teoria a do Big Bang (grande estrondo), a qual advoga que o universo teve seu início a partir de uma singularidade que se expande há 15 ou 18 bilhões de anos. Para saber um pouco mais sobre as teorias cosmológicas e a origem do Universo, veja: <<http://www.observatorio.ufmg.br/pas35.htm>>. A Terra, por outro lado, tem sua origem relacionada à do próprio Sistema Solar, com o resfriamento e condensação de nuvens gasosas dispersas. A Terra se formaria pela aglutinação de planetesimais, como pode ser melhor estudado em: <<http://astro.if.ufrgs.br/planetas/planetas.htm>>.

A chamada litosfera corresponde a um dos três ou quatro grandes “ambientes” do planeta Terra (acompanhada da hidrosfera e da atmosfera, além da biosfera, tratada separadamente por alguns autores). Marcada por solos e rochas, corresponde ao substrato onde se desenvolvem todas as atividades biológicas, e deve ser estudada com o devido cuidado.

A simples visualização da superfície do planeta mostrará um primeiro dado surpreendente: Ele é formado de terras altas (usualmente emersas) e terras baixas, normalmente cobertas por água. Qual o significado de o planeta poder ser caracterizado por duas modas, sendo uma correspondente a profundidades médias de 2.800 metros e outra de 360 metros de altitude?

A resposta pode estar na densidade dos terrenos que as formam. Assim, terrenos oceânicos são mais profundos, pois o material de seu substrato é mais denso que o material gerador dos terrenos continentais. Se olharmos com mais detalhe, verificaremos que tanto dentro das áreas continentais como nas áreas oceânicas outras diferenças marcantes também podem ser observadas, e devem ser explicadas.

Uma rápida caracterização da Terra mostra padrões recorrentes de acordo com o posicionamento geográfico. Assim, as maiores montanhas estão localizadas na Ásia, ao norte da Índia, enquanto os maiores vulcões (ao menos na altura) são típicos da costa oeste sul-americana. Quando olhamos os oceanos, esta repetição de padrão também é notável: as maiores profundidades, por exemplo, sempre estão, no Oceano Pacífico, localizadas a dezenas (ou centenas) de quilômetros de ilhas com características vulcânicas.

Ainda nos oceanos, os padrões de idade das rochas que formam seu substrato são impressionantes: suas rochas não têm mais do que

200 ou 250 milhões de anos (enquanto as rochas mais antigas do planeta chegam a ultrapassar os 3,8 bilhões de anos), e a sua distribuição mostra um aumento de idade simétrico em relação as grandes cadeias mesoceânicas.

Para entender este comportamento do planeta, assim como outras peculiaridades (por que algumas regiões têm terremotos e/ou vulcanismo e outras não? Por que o Chile tem tantos depósitos de cobre e o Iraque possui tanto petróleo?), tornam-se necessários conhecimentos a respeito de suas características internas. Mas como conhecer o interior do planeta se, com boa vontade, não ultrapassamos os 15 quilômetros na sondagem direta mais profunda realizada pelo homem, ou não chegamos aos quatro quilômetros na mina mais profunda já explorada (no caso uma mina de ouro na África do Sul)?

Apenas observações indiretas permitirão a definição das características internas do planeta. Entre estas, merecem destaque:

- a - Observação do material expelido pelos vulcões;
- b - Estudos dos diferentes tipos de meteoritos conhecidos; e
- c - Estudos do comportamento de ondas sísmicas provenientes de terremotos naturais ou artificiais.

Terremotos correspondem a rupturas instantâneas dos materiais rochosos, e podem ter diferentes causas, naturais e artificiais. Os terremotos e suas conseqüências são estudados pela sismologia, através de medidas de seus choques e vibrações por aparelhos designados de sismógrafos. O ponto onde ocorre a primeira liberação de energia de um terremoto é chamado de “foco”, e o ponto imaginário que corresponde à interseção deste foco com a superfície é o “epicentro”. As ondas liberadas podem ser superficiais ou profundas, estas últimas podendo ser separadas em primárias (ondas P) e secundárias (ondas S). As ondas superficiais podem corresponder a oscilações esferoidais (ondas Raleigh) ou torsionais (ondas Love).

As medidas de inúmeros terremotos mostraram que estas diferentes ondas apresentavam diferentes tempos de chegada ao sismógrafo considerado, evidenciando o caráter heterogêneo do interior da Terra. Esta inferência estava de acordo tanto com os modelos propostos de evolução planetária como pelos dados relacionados a rochas vulcânicas e aos meteoritos.

A observação das diferentes refrações ou reflexões destas ondas serve para mostrar as principais divisões internas do planeta (que tem um raio de aproximadamente 6371 km):

- a - 5140 km até 6371 km de profundidade – Núcleo Interno
- b - 2883 km até 5140 km de profundidade – Núcleo Externo
- c - 670 km até 2883 km de profundidade – Manto Inferior

- d- 35/40 km até 670 km de profundidade – Manto Superior  
 e- 0 km até 35/40 km de profundidade – Crosta

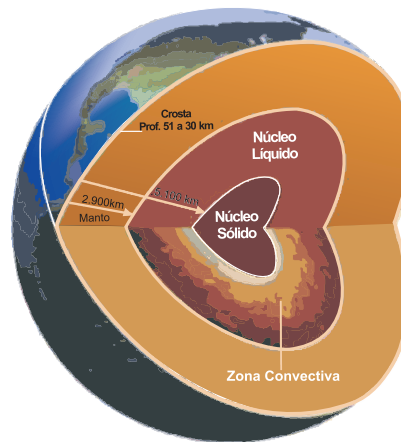


Figura 1 – Esquema de esferas concêntricas para a Terra

É necessário que se enfatize que o conceito de crosta é diferente do conceito de litosfera (erroneamente utilizadas como sinônimos em muitas publicações). Crosta é um conceito químico, ou seja, o limite crosta-manto (conhecido como Descontinuidade de Mohorovicic ou Moho) corresponde a uma mudança de composição rochosa. A litosfera é a parte de comportamento mais rígido (conceito físico), e envolve tanto a crosta como a parte superior do manto. Abaixo desta primeira centena de km, aparecem rochas com comportamento mais “plástico”, constituindo a chamada astenosfera.

Um outro ponto de discussão sobre o planeta diz respeito à sua idade (para detalhamento ver: < <http://www.igc.usp.br/geologia/geocronologia.php>>). Admite-se que a Terra tem uma idade de cerca de 4,5 bilhões de anos e que a partir da sua criação começou a sofrer um processo de separação gravimétrica, com os materiais mais densos acumulando-se no centro, enquanto os mais leves migraram para a porção externa. Estes se resfriaram mais rapidamente na superfície formando uma fina casca, a crosta, de composição muito semelhante ao material do qual se originou, o manto.

A partir da geração de uma fina camada de material mantélico resfriado (a crosta primitiva) sobre um manto de comportamento viscoso com correntes de convecção atuantes, gerou-se um processo de retrabalhamento da crosta já existente, com fusão da parcial da mesma e enriquecimento em matérias mais leves. Esta diferenciação da crosta foi responsável pelo surgimento de porções crustais, compostas por materiais com excesso de sílica e alumínio (SiAl) — a crosta continental. Com a continuação deste processo maiores

quantidades de crosta continental foram geradas, e esta começou a se espessar (cratonização). Estas porções menos densas permanecem estáveis por mais tempo que a crosta oceânica, comumente envolvida em subducção.

**Tabela 2**

**Composição Média da crosta em percentagem por elementos maiores**

O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Outros
46,6	27,7	8,1	5,0	3,6	2,8	2,6	2,1	1,5

**Tabela 3**

**Dados gerais sobre densidade (g/cm<sup>3</sup>) e temperatura (°C) dos materiais terrestres**

	Sial	Sima	Manto	Núcleo
Densidade	2,7	3,0	3,3	9-14
Temperatura	800	1000	2000	3000-5000



## Geodinâmica Interna

### GEODINÂMICA INTERNA: DERIVA CONTINENTAL E TECTÔNICA DE PLACAS

O planeta pode ser visto como um corpo em constante transformação, não apenas em movimento, o que é confirmado pelas características de sua evolução. Em 1912, Alfred Wegener propôs uma teoria para explicar a semelhança existente entre as costas das Américas, Europa e África, a Teoria da Deriva Continental. A proposta de um único supercontinente (denominado Pangea) baseou-se também em dados geológicos, paleontológicos, paleoclimáticos, paleomagnéticos e na semelhança entre fauna e flora da América do Sul, África e Austrália ([http://domingos.home.sapo.pt/tect\\_placas\\_1.html](http://domingos.home.sapo.pt/tect_placas_1.html)).

Esta teoria foi bastante criticada, especialmente por não explicar o motor da deriva, ou seja, quais os processos responsáveis pela movimentação horizontal dos continentes. Após a Segunda Grande Guerra, especialmente a partir dos dados do magnetismo terrestre e da geologia dos fundos oceânicos, juntamente com dados da localização de vulcões e terremotos, uma nova análise da Deriva Continental foi possível, graças ao aparecimento da Tectônica de Placas (ver: <<http://www.fgel.uerj.br/Dgrg/webdgrg/>) Timescale/Tectonica\_placas.html>).

A base desta teoria foi a individualização das Placas Litosféricas (conjuntos de crosta oceânica e continental e da parte superior do manto — litosfera) através da localização de vulcões (círculo de fogo) e terremotos. A Figura 2 apresenta uma comparação entre as placas e um mapa do relevo do planeta.

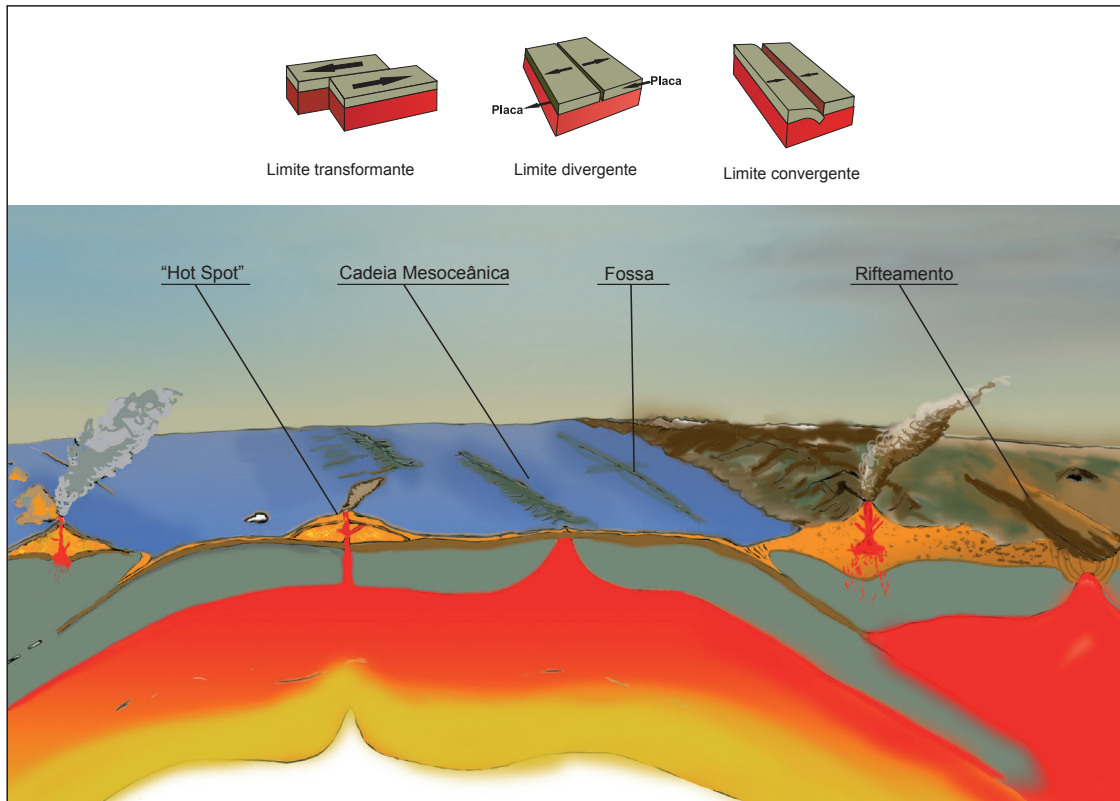


Figura 2 – Principais placas litosféricas e sua relação com o relevo. Partes emersas mais escuras indicam maiores altitudes (acima de 2.000 m) e partes submersas claras, as menores cotas batimétricas. As setas indicam a movimentação relativa entre as placas. Figura extraída de: <<http://earth.geol.ksu.edu/sgao/g100/plots/>>.

A movimentação relativa entre as placas pode ser divergente, convergente, transformante ou tangencial e oblíqua, com velocidades de até 9 cm por ano (Pacífico). Nas regiões oceânicas podemos ter criação de placas nas cadeias meso-oceânicas ou sua destruição em arcos de ilhas ou magmáticos onde ocorre subdução (trincheiras – *trench*). Estes contatos podem se dar entre placas oceânicas ou continentais. As principais feições associadas a esta dinâmica são as cadeias meso-oceânicas geradas em ambiente divergente oceânica-oceânica (Atlântico, Índico, Pacífico); rifte associado a ambiente divergente em placa continental (Rifte do Leste Africano); trincheiras com arcos de ilhas (oceânica-oceânica - Japão, Tonga Aleutas) e trincheiras com arcos magmáticos (oceânica-continental - Peru-Chile).

## GEOLOGIA ESTRUTURAL E MOVIMENTOS SÍSMICOS

A movimentação das placas tectônicas gera esforços que são distribuídos ao longo das mesmas e que propiciam a deformação das rochas. O ramo da geologia que estuda estas deformações é chamado de Geologia Estrutural e estuda os corpos rochosos através da descrição e classificação das estruturas geradas, buscando compreender como foram formadas.

Para este fim é necessário compreender os mecanismos da deformação atuantes sobre as rochas, sendo a deformação definida como mudança de volume, forma ou posição de qualquer corpo rochoso ou uma combinação dos três. Os materiais naturais caracterizam-se por apresentar uma deformação anisotrópica (varia de acordo com a posição) e dependente do tempo. Estes fenômenos estão associados a forças colossais atuando durante um tempo espantosamente grande, o que limita a experimentação com rochas. Para possibilitar um estudo menos empírico utilizam-se materiais que possuam características análogas aos naturais em experimentos de curto prazo.

Dessa forma é possível observar-se que a deformação natural envolve comportamentos elástico, plástico e viscoso, apesar de ser, na maioria, uma combinação complexa dos três comportamentos. As rochas podem se deformar sem perda de coesão, possuindo um comportamento dúctil ou com perda de coesão ou rúptil. O principal fator que condiciona o comportamento do terá é o estado de confinamento do mesmo, ou seja, qual é a sua restrição a sofrer qualquer deformação.

Através da coleta de dados podem-se estimar qualitativamente as tensões envolvidas na geração de uma estrutura, bem como descrever e analisar o seu comportamento espacial. Em algumas circunstâncias, pode-se recontar a história da deformação de uma região. Entre as estruturas mais comuns observadas destacam-se as dobras, as foliações e as falhas/juntas, estas últimas geradas em ambiente rúptil.

As falhas podem ser divididas em compressivas (inversas e empurrões), distensivas (normais) e de rasgamento (transcorrentes sinistrais ou destrais), podendo ser geradas por compressão, tração ou, mais comumente, por cisalhamento. Estruturas rúpteis sem movimentação aparente são denominadas juntas ou fraturas e são extremamente comuns de ser encontradas na superfície.



## Geodinâmica Externa: denudação e intemperismo

A dinâmica interna é responsável pela deformação crustal e pela construção do relevo. A dinâmica externa atua sobre o relevo buscando a estabilização da superfície terrestre a partir da construção de um perfil de equilíbrio, plano e de baixa energia. Este processo natural é usualmente chamado de desnudação ou denudação. Para que este processo seja efetivo é necessário que os materiais rochosos expostos na superfície sejam transformados, propiciando o seu transporte e deposição, ou seja, que ocorra erosão. Os fatores que controlam a erosão são a topografia, a cobertura vegetal (tipo e densidade), as características geológicas, o clima, a posição do lençol freático e a ação antrópica, podendo estes fatores agirem isolada ou conjuntamente.

O intemperismo é o conjunto de processos operantes na superfície terrestre que ocasionam a decomposição dos minerais das rochas, graças à ação de agentes atmosféricos e biológicos. Os principais agentes do intemperismo são a água, superficial (rios, lagos, oceanos e geleiras) e subterrânea, os ventos e os organismos. A desintegração das rochas pode se dar por agentes mecânicos, como dilatação diferencial associada à variação da temperatura, pela cristalização de sais, pelo congelamento e pelo crescimento de raízes. Esta desintegração facilita a percolação da água e diminui o tamanho dos fragmentos, auxiliando a decomposição química e o transporte das partículas.

A decomposição química das rochas é mais efetiva em climas quentes e úmidos e está associada à água da chuva (mistura de água, oxigênio e gás carbônico), que é primeiramente responsável pela quebra dos feldspatos e outros minerais através de reações envolvendo oxidação, redução, hidrólise e hidratação, carbonatação e dissolução. A ação antrópica, principalmente associada à queima de combustíveis fósseis, é responsável pela aceleração deste processo pela geração de chuva ácida, como pode ser verificado em: < <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2000/chuva/ChuvaAcida.htm>>.

Os solos são o resultado do intemperismo das rochas, as quais recobrem quase totalmente, e seus principais constituintes, do ponto de vista mineralógico, são quartzo (quimicamente inerte, portanto, resiste ao intemperismo químico e sofre apenas redução no seu tamanho) e argilas resultantes da alteração de todos os aluminossilicatos, os maiores constituintes das rochas. Estas possuem uma malha cristalina com muitos vazios e possuem alta capacidade de absorção d'água podendo se liquefazer por movimentação (illita, montmorilonita, caulinita, bentonita).

Os solos podem ser gerados por intemperismo químico e permanecerem no local sendo então chamados de rególito ou manto de alteração. Os fragmentos gerados podem ser resultado do transporte por água fluvial (alúvios), pelo vento (elúvios) ou exclusivamente por gravidade (colúvios).

Os agentes de transporte são as correntes aquosas organizadas (cursos d'água) e desorganizadas (enxurrada), o vento, a geleira e os deslizamentos de terra. As correntes aquosas podem apresentar processos laminares com fluxo disperso ou concentrado, gerando sulcos ou ravinas, ou mesmo, associado à percolação da água em subsuperfície, gerando voçorocas. Os deslizamentos de terra (movimentos gravitacionais de massa) são classificados de acordo com a velocidade com que ocorrem e a dimensão da massa movimentada (rastejo, escorregamento, queda ou tombamento, corridas).

As partículas disponibilizadas pelo intemperismo podem ser transportadas física ou quimicamente. O transporte físico pode se dar por saltação, arraste ou em suspensão de acordo com o tamanho do grão e da capacidade de transporte do agente. O transporte químico se dá em casos particulares onde ocorre a solubilização do material. Cada agente de transporte possui uma capacidade ou carga máxima que é função de sua viscosidade, velocidade e da carga sedimentar já agregada.

Estas partículas serão depositadas, podendo se acumular e preencher fossas tectônicas, bacias associadas à geração de montanhas, bordas de continentes (tanto margens ativas como passivas), regiões de quebra de continentes (*rift valley*) ou mesmo em zonas transcorrentes com porções distensivas (transtrativas), juntamente com restos de origem orgânica (conchas, ossos, material vegetal).

Estes depósitos apresentam estruturas típicas de sua formação, entre elas laminação ou estratificação (plano-paralela ou cruzada), perturbações na superfície (marcas de onda, fendas de dissecação) ou no interior (concreções) e seguem o Princípio da Superposição ou Lei de Steno, que preconiza que camadas mais novas recobrem as mais velhas.

## MAGMATISMO

Os processos de dinâmica interna podem gerar condições para que material mantélico ou crustal se funda, dando origem a uma mistura complexa de substâncias, como sílica, silicatos, óxidos e voláteis ( $H_2O$ ). Magma é a designação dada em grego para um tipo de massa de pão e foi utilizada para descrever esta fusão. O resfriamento do magma gera a sua consolidação, que é regida pelas leis da Termodinâmica e solubilidade. Este magma pode sofrer processos de diferenciação, ou seja, gerar produtos diferentes a partir do mesmo material inicial através de processos de migração da fase fluída, diferenciação por convecção ou por prensagem e filtragem.

Magma pode ser gerado em ambientes divergentes, onde o afinamento da crosta leva a um desconfinamento do manto superior e conseqüente fusão deste material, ou em ambientes convergentes através de espessamento crustal, que leva a aumento de pressão e temperatura das rochas e a sua fusão ou por fusão da crosta subductada. Mas, os ambientes onde os vulcões têm chamado mais a atenção são aqueles convergentes (ver Figura 3). Neste caso, como resultantes da subducção de material crustal oceânico junto com sedimentos e água, o magmatismo resultante é rico em gases, conferindo-lhe caráter explosivo impressionante.

Pode-se gerar magma em condições atectônicas devido à ação de plumas mantélicas (*hot spots* ou regiões anormalmente aquecidas no manto), onde ocorrem pulsos magmáticos. Estes ambientes podem hoje ser observados no Hawaí (onde a crosta oceânica está estacionada sobre uma pluma mantélica), em Yellowstone e na África. Nesta última, causa o início do quebramento continental, com magmatismo carbonatítico, com características peculiares. No caso de Yellowstone, tem se provado nos últimos anos tratar-se do resto de um supervulcão, que pode ser reativado. Supervulcões similares foram responsáveis pela quase extinção da raça humana entre 70.000 e 80.000 anos atrás.

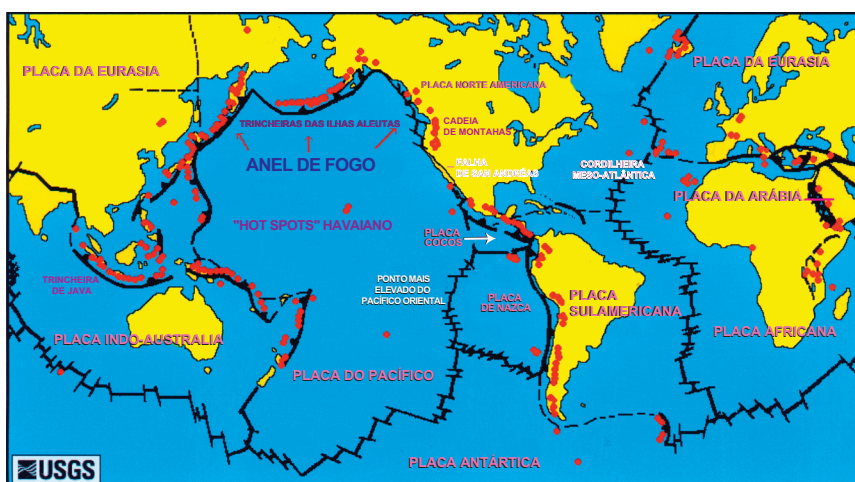


Figura 3 – Mapa associando vulcões ativos e a Tectônica de Placas com o Anel de Fogo. Adaptado de: <[http://vulcan.wr.usgs.gov/Images/Gif/PlateTectonics/Maps/plate\\_tectonics.gif](http://vulcan.wr.usgs.gov/Images/Gif/PlateTectonics/Maps/plate_tectonics.gif)>.

## PROCESSOS DE METAMORFISMO

Metamorfismo pode ser definido como o conjunto de processos que envolvem a aplicação de calor, usualmente pressão e fluidos químicos, levando a mudanças na mineralogia e/ou na textura das rochas, e que ocorrem em resposta a mudanças bruscas nas condições de temperatura, pressão e no ambiente químico, estando relacionados à tendência do material em buscar o equilíbrio. Por convenção, trata-se como metamorfismo as condições entre a diagênese (formação de rochas sedimentares) e a fusão total (geração de magma), que são condições usuais dentro da crosta e impossíveis de ser estudadas diretamente.

Para se definir quais as reais condições de pressão e temperatura às quais uma rocha esteve sujeita, utilizam-se de geobarômetros e geotermômetros, que são animais, plantas ou minerais cuja associação define uma faixa clara de ocorrência. Um exemplo de minerais que podem ser utilizados com este fim são os polimorfos cianita, andaluzita e sillimanita, conforme pode ser visualizado na Figura 4. Os campos de estabilidade para estes minerais são marcados pelas linhas contínuas que separam o diagrama em três campos.

O metamorfismo pode ser de contato, regional, cataclástico e de impacto, sendo distinguíveis por se tratarem de modificações locais ou sobre grandes regiões, pelo predomínio de quebra de grãos ou pela recristalização intensa. O metamorfismo de contato está associado ao aumento de temperatura devido à intrusão de corpos ígneos ou a uma química diversa (hidrotermal); o regional está associado à compressão intensa, profunda, usualmente associado com uma tectônica geradora de montanhas e podendo variar de fácies zeólita (baixo grau), xisto-verde, anfibolito até granulito (alto grau) conforme pode ser visto na Figura 4; o cataclástico está associado a zonas de falha ou a dobramentos intensos, e o de impacto, associado ao impacto de meteoritos.

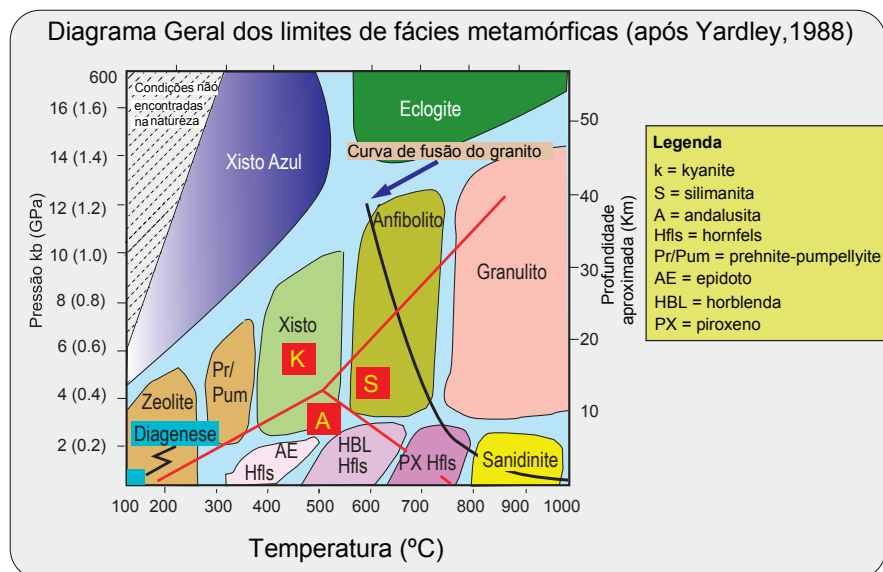


Figura 4 – Gráfico pressão x temperatura, mostrando as fácies metamórficas e o campo de estabilidade dos minerais de fórmula química  $Al_2SiO_5$ . Extraído de: <<http://www.science.ubc.ca/~geol202/meta/metacon.html>>.

## Estratos e seus arranjos

Estudos geológicos dependem, e muito, de um ramo denominado Estratigrafia. Considerando os três grandes grupos de rochas: Ígneas, Sedimentares e Metamórficas, deve-se notar que as sedimentares e parte das ígneas (no caso as vulcânicas) se organizam em estratos ou camadas, e o estudo de suas relações torna-se fundamental. Além disso, as metamórficas representam a transformação de rochas ígneas e sedimentares, podendo, portanto, preservar as antigas relações.

A fundação da geologia como ciência, usualmente atribuída a James Hutton (1726-1797), é baseada em alguns pressupostos fundamentais, incluindo o uniformitarismo, representado pela frase “o presente é a chave do passado” e dois princípios estratigráficos: o princípio da “horizontalidade original” (o que é uma generalização baseada no fato de que a maior parte das seqüências sedimentares preservadas é de origem marinha) e o da “superposição”. Este, definido já no século XVII por Steno (assim como o anterior), afirma que em seqüências preservadas as unidades mais basais são mais antigas que as unidades de topo.

A estratigrafia constitui-se no ramo fundamental para o estudo da história da Terra, e envolve a maior parte das técnicas geológicas tradicionais: mapeamento com trabalhos de campo, separação de conjuntos rochosos reconhecíveis e correlacionáveis, estudos de conteúdos fossilíferos, estudos geocronológicos diretos e indiretos e inferências e determinações dos ambientes deposicionais originais.

Quando seqüências rochosas são estudadas em campo, uma série de características deve ser levada em conta, inclusive o fato de que a discussão deve ser compreensível e assimilável pelos diversos profissionais. Desse modo, observou-se a necessidade de classificar e organizar os estratos rochosos em conjuntos que permitissem uma análise e seu reconhecimento em locais que não aqueles de sua definição original (correlação estratigráfica). Esta classificação estratigráfica tem regras aceitas no mundo inteiro, existindo comissões internacionais para o estabelecimento das diversas unidades formais e suas correlações em nível local ou regional.

No estudo e estabelecimento destas unidades adquirem importância não só as diferentes características internas de cada conjunto estabelecido (por exemplo, litologias e suas variações, conteúdo fossilífero, quantidades relativas de cada tipo rochoso), como suas relações de contato com as unidades adjacentes. Assim, estes contatos podem ser bruscos ou gradacionais, concordantes ou discordantes.

Contatos discordantes são importantes, pois indicam usualmente um longo período de não deposição e/ou erosão. Quatro tipos de discordâncias podem ser reconhecidos (mesmo que muitas vezes uma superfície de discordância, em particular, represente dois ou três destes tipos): Litológica (quando as rochas abaixo e acima da superfície de discordância têm naturezas distintas), Erosiva (quando a superfície de discordância é irregular), Angular (quando os estratos superiores e inferiores têm diferentes inclinações) e Paralela (quando a erosão foi tão intensa que a superfície de discordância é paralela aos estratos).

Por correlação estratigráfica pode ser entendida a determinação de equivalência (normalmente em idade geológica e posição relativa) de um conjunto de estratos encontrados em diferentes regiões. Para que esta possa ser realizada, características como aquelas litológicas, de posicionamento relativo, de idade, de conteúdo fossilífero e de ambientes originais de deposição podem ser utilizadas.

## COLUNA GEOLÓGICA E A ESCALA DO TEMPO

Os vários estudos geológicos com sentido estratigráfico realizados nos últimos dois séculos permitiram a elaboração de uma “coluna geológica”, de tal forma que as diferentes unidades reconhecidas possam ser agrupadas em um arranjo relacionado a suas idades. Os nomes utilizados nesta escala geológica do tempo refletem usualmente lugares e fatos dos continentes do hemisfério norte, em especial da Europa.

Suas principais divisões (ver Figura 5) são conhecidas como eons, e têm relação direta com vida e fósseis. Assim, enquanto o Hadeano (do início do planeta até os 3.800 milhões de anos) corresponde ao período não conhecido em termos de representantes físicos, o Arqueano (entre 3.800 e os 2.500 milhões de anos) representa rochas de um período com vida microscópica bacteriana. Durante o Proterozóico (entre 2.500 e 560 milhões de anos) desenvolve-se a vida pluricelular, sendo o Fanerozóico (a partir dos 560 milhões de anos) o momento da explosão da vida animal e vegetal como hoje conhecemos.

Uma discussão sobre a coluna apresentada na Figura 5 é a do significado dos limites entre os eons, ou entre os períodos ou mesmo entre as épocas. Estes limites foram determinados (de formas mais

ou menos precisas) nas chamadas seções ou regiões tipo, ou seja, nas áreas utilizadas originalmente para sua definição. Conseqüentemente, muitas vezes, o limite não representa um evento mundial, e, sim, um evento regional ou mesmo local, mas a idade aceita para este limite deve ser adotada por todos os países. Os poucos limites de caráter mundial representam, usualmente, crises ecológicas marcantes, por exemplo, no fim do Permiano ou no limite Cretáceo-Terciário (este último, marcado pela extinção dos dinossauros).

Eon	Era	Período	Início-fim
Fanerozóico	Cenozóico	Neogeno	23.0 -
		Paleogeno	65.5 - 23.0
	Mesozóico	Cretáceo	146 - 65.5
		Jurássico	200 - 146
		Triássico	251 - 200
	Paleozóico	Permiano	299 - 251
		Carbonífero	359 - 299
		Devoniano	416 - 359
		Siluriano	444 - 416
		Ordoviciano	488 - 444
Cambriano		542 - 488	
Proterozóico	Neoproterozóico	1000 - 542	
	Mesoproterozóico	1600 - 1000	
	Paleoproterozóico	2500 - 1600	
Arqueano	Neoarqueano	2800 - 2500	
	Mesoarqueano	3200 - 2800	
	Paleoarqueano	3800 - 3200	
Hadeano		- 3800	

Figura 5 – Coluna geológica do tempo, simplificada

## O TEMPO GEOLÓGICO E SUA DETERMINAÇÃO

Para o levantamento da coluna do tempo geológico apresentada anteriormente, torna-se necessária a determinação correta da idade das rochas e de suas sucessões. Esta é a única maneira de contarmos a longa (mais de 4,6 bilhões de anos) história de nosso planeta (e, também, determinarmos essa duração). Essa parte do conhecimento humano é chamada de *geocronologia*, e pode ser relativa ou absoluta.

Uma primeira necessidade é a da determinação da idade do planeta, o que muitas vezes situou em campos opostos os físicos e os geólogos (estes acompanhados dos biólogos e naturalistas). As primeiras determinações tinham um óbvio conteúdo religioso, e são demonstradas soberbamente pela determinação do arcebispo de Usher no

início do século XVII: pelo estudo das diferentes sucessões familiares da Bíblia, a Terra teria sido criada em outubro de 4004 a.C.

Lorde Kelvin, na segunda metade do século XIX, usando cálculos de resfriamento da Terra (e sem conhecer a radioatividade), propôs uma idade máxima de 100 milhões de anos para o planeta. Esta idade, considerada insuficiente para os naturalistas, foi ainda diminuída nos anos seguintes, alcançando valores tão baixos como os 24 milhões de anos. Esta idade foi novamente aumentada, já no início do século XX, para 100 milhões de anos por Joly, que calculou a taxa de saturação de sal nos oceanos.

### **DATAÇÃO RELATIVA**

---

Os chamados métodos de datação relativa são baseados em princípios básicos das ciências geológicas. Assim, o princípio da superposição é um primeiro método de aplicação imediata, já que, salvo processos posteriores, em seqüências sedimentares ou vulcânicas, quem está por baixo é mais velho, e quem está em cima é mais novo.

Um segundo princípio diz respeito à existência de corpos dentro de outros corpos. Assim, se uma sucessão rochosa tem em seu interior seixos ou outros fragmentos, é lícito admitir que a rocha de onde se originasse este fragmento deveria ser mais antiga que a rocha que agora o contém.

### **DATAÇÃO RADIOMÉTRICA**

---

Alguns dos elementos constituintes do universo apresentam características radioativas, sendo marcados por instabilidades que podem ocasionar o aparecimento de isótopos mais estáveis, seja do mesmo elemento, seja de outro. Estudos dos processos radioativos marcados pela desintegração de elementos-pai para a formação de elementos-filho (radiogênicos) mostram que o decaimento radioativo envolve uma constante chamada meia-vida, que é o tempo decorrido para que metade da massa do elemento-pai se transforme no elemento-filho.

Deve ficar claro que a chamada meia-vida é uma tendência, com valores característicos para cada elemento considerado. Os principais isótopos utilizados atualmente nas datações radiométricas (bem como os limites de utilização) podem ser observados na Tabela 4.

Os dados existentes sobre os métodos radiométricos exigem também uma outra leitura que não só aquela do valor obtido. Estes valores devem, necessariamente, levar em conta os limites da cada método em particular. Especialmente criacionistas têm utilizado o desconhecimento das pessoas sobre os métodos geocronológicos para tentar desacreditá-los. Muitas vezes são mostrados dados aparentemente

conflitantes: a rocha tal forneceu idades de 1,7 bilhão de anos (U/Pb) e de 0,6 bilhão de anos (K/Ar) em outro estudo. Isto não evidencia um erro, mas sim pode permitir uma melhor definição da história desta rocha: Ela foi formada há 1,7 bilhão de anos e sofreu aquecimento de 300 graus a 600 milhões de anos (já que o sistema potássio-argônio abre a temperaturas de 300 graus ou um pouco mais).

Tabela 4

## Isótopos utilizados para a realização de datações radiométricas

Isótopos	meia-vida	Limites da datação (anos)	Materiais utilizáveis
Urânio238 - Chumbo206	4,5 bilhões de anos	Entre 10 milhões e 4,6 bilhões	Zircão, uraninita, badeleita
Urânio235 - Chumbo207	710 milhões de anos	idem	Zircão, uraninita, badeleita
Thorio232 - Chumbo208	14 bilhões de anos	idem	Zircão, uraninita, badeleita
Potássio40 - Argônio40	1,3 bilhões de anos	Entre 100 mil e 4,6 bilhões	Muscovita, anfibólios, rochas ígneas
Rubídio87 - Estrôncio87	48 bilhões de anos	Entre 10 milhões e 4,6 bilhões	Idem
Samário147 - Neodímio143	106 bilhões de anos	Entre 10 milhões e 4,6 bilhões	Rochas ígneas, meteoritos
Rênio187 - Ósmio187	42,3 bilhões de anos	Entre 10 milhões e 4,6 bilhões	Rochas ígneas, meteoritos
Carbono14 - Nitrogênio14	5730 anos	Entre 100 e 50000	Turfa, carvão, estalactites, gelo, água, ossos



## Noções de Geologia Histórica

### HADEANO E ARQUEANO

---

O Hadeano, que compreende o tempo de formação do planeta até as rochas mais antigas conhecidas (por volta dos 3,85 bilhões de anos), não corresponde exatamente a um eon geológico do ponto de vista da Terra, já que rochas com essa idade foram observadas apenas na Lua e nos meteoritos.

O Arqueano, que engloba o período entre os 3,85 bilhões de anos e os 2,5 bilhões de anos, poderia ser caracterizado por uma atmosfera redutora à base de metano, amônia e outros gases. Esta atmosfera permite apenas a existência de vida na forma de bactérias, que já estão presentes em rochas com aproximadamente 3,5 bilhões de anos. Comuns são estromatólitos, que representam as construções a partir da atuação de colônias de bactérias fotossintéticas, mais especificamente cianobactérias. Os fósseis mais antigos hoje aceitos provêm de terrenos sul-africanos e australianos.

No início do Arqueano, provavelmente, terras emersas ainda não eram comuns, e durante o decorrer do eon a formação de crosta continental mostra um avanço. Terrenos arqueanos não são raros no Brasil, e incluem, por exemplo, gnaisses, migmatitos e granitos na Amazônia, em Goiás, na Bahia e em Minas Gerais (ver Figura 6). Em Carajás, uma série de rochas arqueanas hospeda uma grande quantidade de depósitos minerais, assim como as evidências de vida mais antigas do continente, que são microorganismos do tipo cocobactérias, presentes em rochas de quase 2.800 milhões de anos (ver mais detalhes sobre o eon em: <<http://www.fgel.uerj.br/Dgrg/webdgrg/Timescale/>>).

### OS TEMPOS PROTEROZÓICOS

---

Os tempos proterozóicos (entre 2.500 milhões de anos e 560 milhões de anos) marcam períodos de intensa modificação no planeta Terra. Suas seqüências rochosas (comuns também no Brasil, ver Figura 6)

representam momentos fundamentais, incluindo a passagem da atmosfera de redutora a oxidante e as maiores glaciações do planeta.

Em algum momento do Paleoproterozóico, possivelmente entre 2,5 e 2,2 bilhões de anos atrás, a atmosfera torna-se oxidante, em boa parte pela atuação orgânica (a partir da atuação fotossintética de algas azuis-verdes), mas também pela fotodissociação inorgânica de moléculas ( $H_2O$  e  $CO_2$ ) a partir da energia solar.

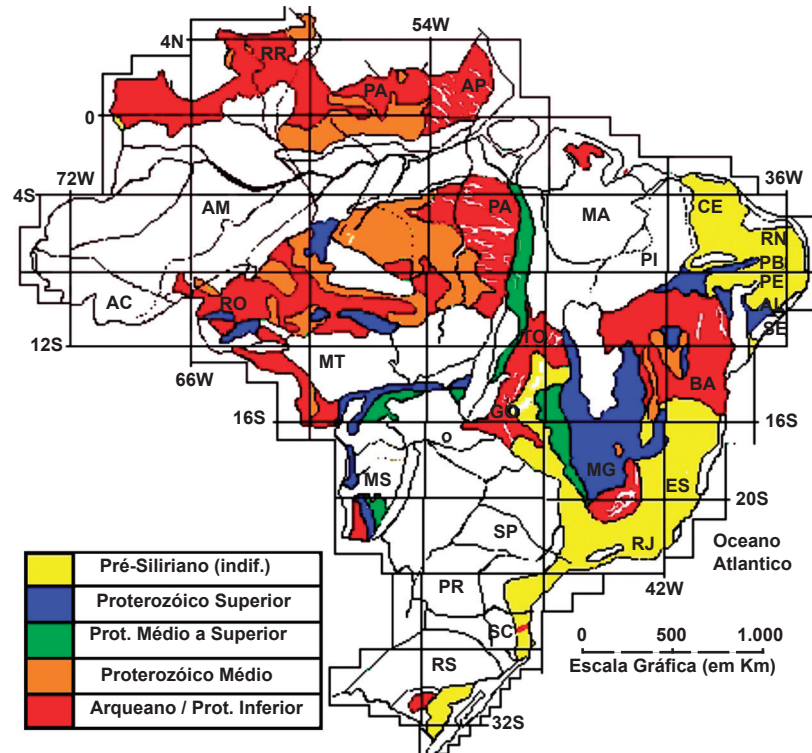


Figura 6 – Distribuição dos terrenos arqueanos e proterozóicos no Brasil. Adaptada de: <<http://www.fgel.uerj.br/Dgrg/webdgrg>>

Há aproximadamente 2,3 bilhões de anos, a Terra encontrou-se em uma situação extrema glacial, mas suas causas e extensão não são ainda definidas. Uma situação glacial ainda mais extrema ocorre no início do Neoproterozóico, entre 1000 e 800 ou 700 milhões de anos atrás, e as suas conseqüências e causas são apresentadas em uma teoria conhecida como *Snow Ball Earth*.

A Terra parece ter se congelado totalmente (ou quase) durante o período, virando um autêntico “planeta branco” (situação talvez similar a um dos satélites de Júpiter, Europa). Um corpo com estas características passa a refletir a luz solar, de tal forma que pode ser gelado para sempre. Na Terra, isso não ocorreu possivelmente graças à sua ativi-

dade tectônica interna, com formação de vulcões e transferência de calor para o exterior, de tal forma que o gelo derreteu.

Quando isso aconteceu, as águas estavam carregadas de nutrientes, causando uma explosão de vida marinha quando do contato com a luz solar. A Terra, de um planeta branco, tornou-se repentinamente um planeta “verde”, com os mares cobertos por tapetes algais, responsáveis pela acumulação de extensos e espessos depósitos carbonáticos típicos do período entre 650 e 600 milhões de anos. Em Minas Gerais, por exemplo, toda a região do “carst” mineiro (incluindo Sete Lagoas, Curvelo, Montes Claros) é marcada por seqüências rochosas com esta origem.

Durante o Neoproterozóico pode-se observar o aparecimento de uma importante e impressionante fauna marinha, cujos fósseis já foram encontrados na Austrália, China e Brasil, por exemplo: a Fauna Ediacara. Ela pode corresponder aos primeiros metazoários desenvolvidos no planeta, e seus fósseis (em realidade impressões de seus corpos moles sobre as rochas) não permitem ainda seu correto posicionamento com relação às faunas hoje existentes.

---

## O FANEROZÓICO

Apesar de constituir-se no eon de menor duração (apenas 560 ou 545 milhões de anos), é o mais conhecido, em boa parte, pelo enorme desenvolvimento da vida, inclusive com o aparecimento das plantas e dos animais com porções duras passíveis de fossilização, e divide-se em três eras: Paleozóico, Mesozóico e Cenozóico.

A Era Paleozóica inicia-se com o Cambriano, período marcado, do ponto de vista biológico, pela ocorrência da chamada Grande Explosão, cujos fósseis mais típicos são encontrados em Burgess Shale (Canadá) e na China, e que marca uma dramática diversificação na vida animal. Assim, ocorrem desde anelídeos e artrópodos até onicoforas e poríferos, além do aparecimento dos ancestrais dos cordados.

Também no Cambriano completa-se a desagregação de Rodínia, um supercontinente originado ainda no Proterozóico (Figura 7). O Paleozóico encerra-se com o Permiano, quando se agregam as massas terrestres para a formação de um novo supercontinente: Pangea. Neste mesmo período, acontece aquela que é considerada a maior extinção em massa da história do planeta, ainda com causas desconhecidas.

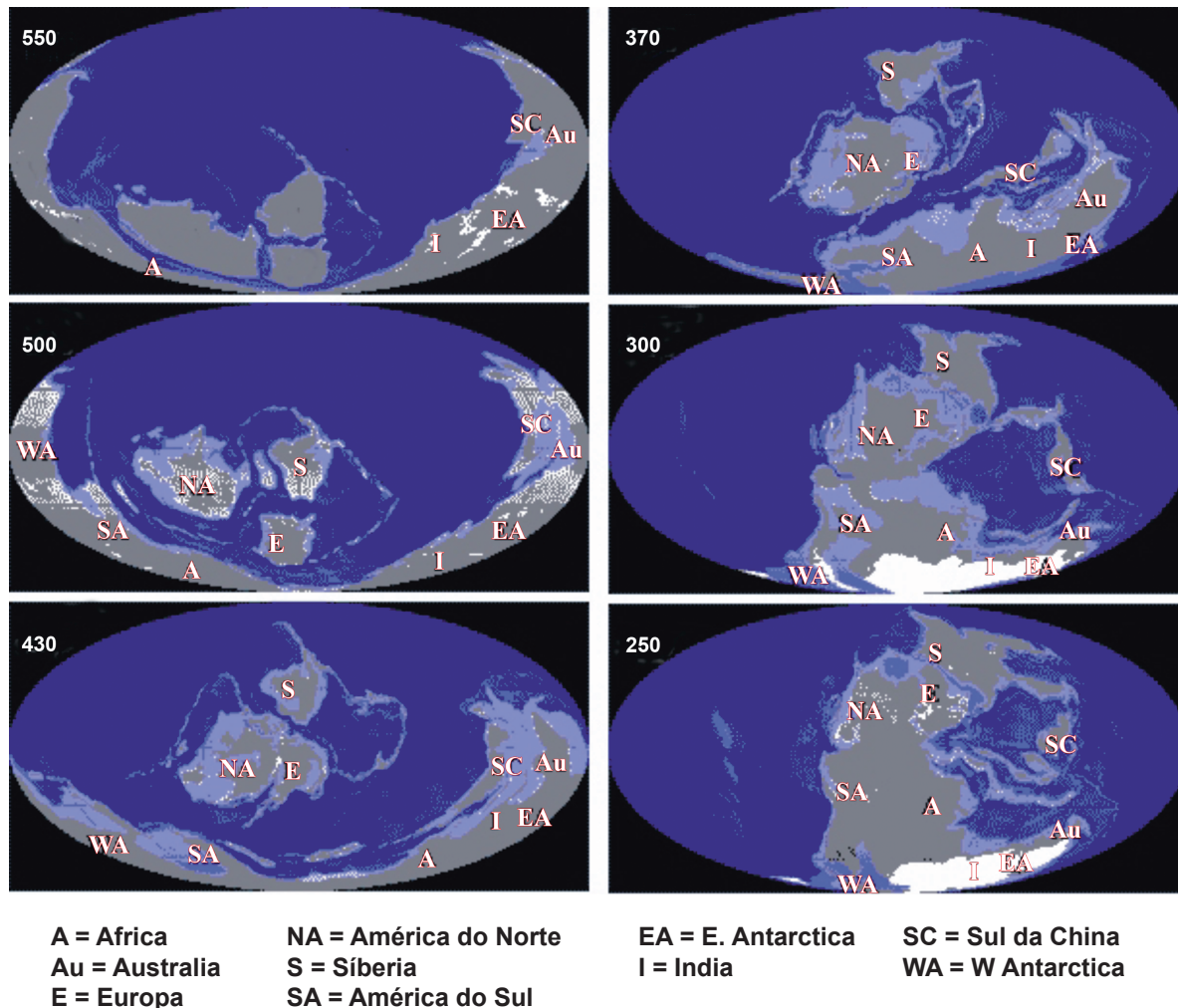


Figura 7 – Evolução da Terra durante o Paleozóico. Adaptada de: <<http://www.palaeos.com>>.

O Mesozóico é caracterizado pelo aparecimento e desaparecimento, em seu final (como consequência de um possível mega-impacto externo), dos dinossauros. No Cretáceo, o supercontinente Pangea vai progressivamente rompendo e separando pequenas massas continentais, e originando oceanos, como o Atlântico.

O Cenozóico, desenvolvido nos últimos 65 milhões de anos, é normalmente chamado de “Era dos mamíferos”, embora, “Era das plantas com flores” também seja uma designação apropriada. Ele é geologicamente caracterizado pelo progressivo desenvolvimento da quebra continental, o que vai originar, inclusive, o homem. O choque da placa indiana com a placa eurasiática ocasionará o aparecimento da grande cadeia montanhosa representada pelos Himalaias.

**PARTE 3**  
**EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS**  
**BIOLÓGICOS**



# Evolução de Sistemas Biológicos

Rogério Parentoni Martins  
Francisco Ângelo Coutinho

## 1. INTRODUÇÃO

---

A palavra sistema é utilizada em diversos contextos e contém diferentes significados. Pode-se falar, por exemplo, em “sistema econômico”, “sistema de saúde”, “sistema lingüístico”. No entanto, o dicionário nos fornece alguns significados e, entre eles, alguns nos interessam neste contexto: “conjunto de elementos, concretos ou abstratos, intelectualmente organizado”; “distribuição de um conjunto de objetos em uma ordem tal que simplifica sua observação e estudo”; “qualquer conjunto natural constituído de partes e elementos interdependentes” ou “inter-relação das partes, elementos ou unidades que fazem funcionar uma estrutura organizada”. Estes significados, descritos em Houaiss (2001), referem-se a termos como “elementos”, “organização”, “ordem”, “partes” e “interação”. Como de modo geral é difícil encontrar uma definição que satisfaça os vários empregos do vocábulo sistema, assumiremos no presente contexto que um sistema é um conjunto de elementos interconectados sujeito a modificações. Contudo, quaisquer modificações que porventura possam ocorrer em alguma das partes que o constituem afetarão de alguma forma as demais. Por ser um conjunto de elementos ou estruturas interconectadas, deve-se manter em mente que um sistema é limitado no tempo e espaço.

Embora seja clara esta definição é insuficiente para que compreendamos de fato o que é um sistema, principalmente quando nosso objetivo é o de entender como um sistema biológico complexo evolui. Portanto, devemos caracterizá-lo de forma mais detalhada, reconhecendo a princípio que um sistema pode ser conhecido pelo menos de duas maneiras: por meio de sua análise, quando estudamos as suas partes

isoladamente ou por meio da síntese, neste caso buscamos compreendê-lo de uma forma mais abrangente e independente do conhecimento detalhado das partes que o compõem.

Nosso objetivo é o de proporcionar uma noção geral do problema de se compreender a evolução de sistemas biológicos complexos sob uma perspectiva sintética. Tendo em vista tal objetivo, apresentaremos certas teorias e conceitos básicos. Os leitores que se interessarem em aperfeiçoar sua compreensão sobre essas teorias e conceitos disporão de algumas referências bibliográficas pertinentes ao final do texto. Dentre elas, haverá algumas que não foram citadas no corpo do texto, devido à limitação de espaço, mas que também servirão de referências, em especial por oferecerem exemplos diversificados que ilustram vários aspectos aqui tratados. Além disso, apresentamos um pequeno glossário, após as referências, a fim de auxiliar a compreensão de conceitos-chave usados no texto.

## **2. TEORIA GERAL DOS SISTEMAS E SISTEMAS BIOLÓGICOS**

---

A Teoria Geral dos Sistemas é uma abordagem interdisciplinar que procura compreender os sistemas a partir do ponto de vista sintético. Essa teoria foi proposta na década de 30 por Ludwig von Bertalanffy. A teoria focaliza a organização estrutural e funcional do sistema e a interdependência das relações entre os elementos que o compõem. A idéia fundamental de von Bertalanffy foi a de desenvolver uma teoria geral e irrestrita que pudesse ser aplicada a fenômenos que compartilham características semelhantes, mas que pertencem a diferentes campos do conhecimento. Assim, disciplinas diversas desenvolveriam pesquisas no sentido de identificar princípios e leis que poderiam ser aplicadas em vários campos, fornecendo uma arquitetura conceitual comum aos diversos saberes. Ou seja, tudo aquilo que for um sistema deve possuir características comuns e, portanto, deve ser regido por leis e princípios comuns. Sendo assim, as pesquisas deveriam se encaminhar no sentido de se encontrar tais princípios e leis. Na concepção de von Bertalanffy, a Teoria Geral dos Sistemas, teria uma função integradora do conhecimento científico, uma vez que poderia tratar as semelhanças estruturais e funcionais entre todos os sistemas a partir de poucos princípios e leis fundamentais.

Além disso, por ser biólogo, von Bertalanffy estava interessado em entender como os sistemas biológicos se estruturam e funcionam. Em sua concepção, tanto organismos individuais e suas partes integrantes quanto sistemas sociais humanos, animais e ecossistemas poderiam ser compreendidos a partir da Teoria Geral dos Sistemas. Von Bertalanffy tinha em perspectiva um problema já notado pelos biólogos: os seres vivos mantêm uma estrutura estável apesar das modificações a que estão sujeitos. De modo análogo a redemoinhos de

água, tornados, ou galáxias, os seres vivos dependem de um fluxo constante de matéria e energia. Porém, ao contrário da grande maioria dos sistemas físico-químicos, os seres vivos se desenvolvem, reproduzem e evoluem. Tendo em vista essas propriedades peculiares de sistemas vivos, von Bertalanffy propôs que os sistemas biológicos seriam “sistemas abertos”. Em sua visão, tais sistemas se manteriam por meio de um fluxo contínuo e ininterrupto de matéria e energia. A idéia fundamental nesse “raciocínio sistêmico” é a de que os sistemas biológicos se mantêm em um estado estável e afastado do equilíbrio enquanto permanecerem vivos. Uma célula, por exemplo, é uma estrutura singular que se mantém viva e funcional por meio do fluxo de energia e nutrientes que são metabolizados. Embora o metabolismo envolva milhares de reações físico-químicas, a estabilidade estrutural e funcional da célula é mantida, ou seja, sua homeostase não é afetada. O equilíbrio físico-químico acontece quando há interrupção das reações metabólicas. Em palavras de Prigogine e Stengers (1986), um organismo em equilíbrio é um organismo morto.

Sistemas biológicos vivos, portanto, se mantêm em um estado afastado do equilíbrio. Neste estado, segundo Prigogine, pelo fato de a entropia aumentar, este tende a um estado afastado do equilíbrio termodinâmico. Portanto, estes sistemas sofrem a influência de instabilidades naturais que tenderiam a perturbá-los e conduzi-los a um estado de equilíbrio termodinâmico. No entanto, os sistemas biológicos vivos “reagem” por meio da configuração de novas formas de organização e aumento de complexidade, que tenderão a afastá-los ainda mais do estado de equilíbrio. Isto é, os sistemas biológicos desenvolvem novas formas de complexidade, decorrentes dos processos de evolução e instabilidade.

### 3. SISTEMAS COMPLEXOS, CAOS E EVOLUÇÃO

A ciência no século XVII partiu do pressuposto de que uma vez conhecidas as condições iniciais de um sistema, poder-se-ia descrever seu comportamento futuro e passado. Como ilustração dessa idéia, imagine as bolas de uma mesa de sinuca. Conhecendo-se as posições iniciais das bolas, a força e o ângulo da tacada, é possível prever-se a trajetória que a bola percorrerá após ser atingida. Bons jogadores de sinuca fazem isto muito bem. A ciência clássica também pensava sobre os fenômenos do mundo dessa mesma forma descrita no exemplo da mesa de sinuca. Uma vez que conhecêssemos um fenômeno e os fatores que sobre ele atuam, poderíamos prever seu comportamento de forma absoluta. Nessa época, Laplace argumentou que se fosse possível a existência de um ser que tivesse o conhecimento total das ocorrências fenomenológicas do presente, não seria difícil que ele pudesse prever todo o comportamento futuro que o universo adotaria, bem como descreveria todo o seu comportamento adotado

no passado. Este ser imaginário ficou conhecido como o “demônio de Laplace”.

No entanto, voltando ao exemplo da mesa de sinuca, imagine que alguém queira determinar a posição precisa que todas as bolas assumirão após uma tacada. Obviamente, a previsibilidade torna-se complicada, pois são tantos os fatores a serem medidos que se torna impossível uma previsão determinista do estado futuro que as bolas como um todo assumirão sobre a mesa de sinuca. Em seguida, imagine que se deseje prever o comportamento após duas ou três tacadas. Por mais hábil que o jogador seja, esta previsão não seria possível.

Na natureza há sistemas que se comportam de maneira análoga à que foi descrita para as bolas em uma mesa de sinuca. Tais sistemas são chamados de sistemas complexos. Diferentemente dos sistemas imaginados e estudados pela ciência clássica, do século XVII, o comportamento futuro desses sistemas, exatamente pelo fato de serem complexos, não é passível de uma previsibilidade absoluta.

Uma maneira de ilustrarmos certas características dos sistemas complexos e procurar entender seu significado, é a de considerar a história do meteorologista, Eduard Norton Lorenz, cujas pesquisas estavam voltadas para a determinação precisa da previsão do tempo. Seus estudos principais foram realizados na década de 1960, no Departamento de Meteorologia do Boston Tech, conhecido atualmente como MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts).

Utilizando um computador, de baixo poder computacional, como eram os demais utilizados em sua época, Lorenz criou um modelo de previsão que continha 14 variáveis, que posteriormente foram reduzidas a 12. Tal modelo representaria o movimento das correntes de ar na atmosfera e, por meio dele, ele conseguia traçar gráficos que representavam as condições meteorológicas de uma atmosfera artificial, como uma tentativa de entender o que poderia acontecer na atmosfera real.

Certo dia — a fim de examinar mais detalhadamente uma destas simulações — e poupar tempo, Lorenz digitou, como condições iniciais, os números que obteve a partir da última seqüência de números. Saiu para tomar um café e retornou uma hora depois. A sua expectativa era a de que a nova seqüência de números fosse idêntica à última, pois os números utilizados eram idênticos, o que significaria uma repetição das mesmas condições climáticas.

No entanto, Lorenz observou surpreso que a nova seqüência era completamente diferente da última. Ou seja, as condições climáticas se divergiram de tal modo que qualquer semelhança de identidade entre as duas séries havia desaparecido (Fig. 1).

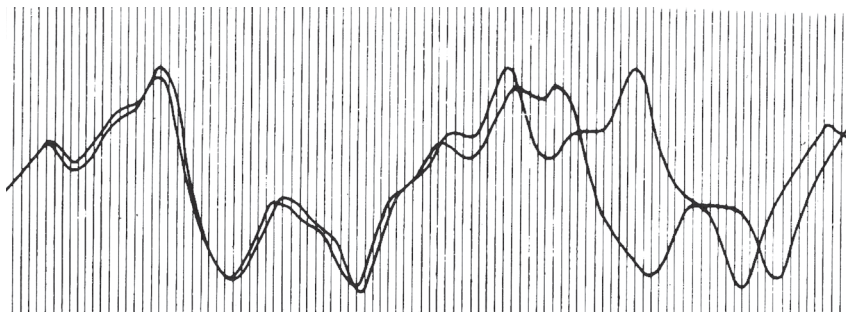


Figura 1 - Os padrões divergentes obtidos por Lorenz. (Extraído de Gleick, 1990).

A partir desse resultado inesperado, Lorenz resolveu tentar entender por que isso havia acontecido. À primeira vista, pensou tratar-se de um defeito do computador, o que era de ocorrência comum com aquele tipo de máquina. Porém, não foi isso que ocorreu. Examinando o experimento simulado em maiores detalhes, ele notou que havia arredondado os números, pressupondo que as pequenas diferenças de arredondamento — um para mil — não afetariam o resultado final. Na interpretação que se poderia dar às suas equações empregadas em seu modelo de simulação, esse arredondamento significaria nada mais do que a adição de uma suave brisa no turbilhão das correntes atmosféricas.

Em 1972, baseando-se nestas idéias e acontecimentos, Lorenz publicou um artigo intitulado: “Previsibilidade: o bater das asas de uma borboleta no Brasil desencadearia um tornado no Texas?” A idéia básica contida em seu artigo é a de que pequenas mudanças que venham a ocorrer no estado inicial podem gerar grandes mudanças no estado futuro de alguns sistemas.

Os seus estudos fazem parte do que hoje chamamos Teoria do Caos. Essa teoria trata sobre o comportamento de sistemas altamente complexos, que apresentam as seguintes características: são dinâmicos, no sentido de estar em constante evolução; abertos, ou seja, interagem com o meio e são muito sensíveis às condições iniciais, isto é, variações de pequenas magnitudes podem afetar o estado que um sistema apresentará no futuro; e, por último, são auto-organizados, isto é, capazes de criar uma certa ordem a partir de um estado desordenado.

Com o poder computacional de que dispomos atualmente, o máximo que se obtém como um padrão característico de sistemas complexos é o que se denomina atratores estranhos. Um atrator estranho é uma representação gráfica que descreve o comportamento dinâmico de um sistema complexo caótico, cuja trajetória converge em direção a um padrão (Fig. 2). Em consequência da existência desse atrator estranho e imprevisível, o sistema em questão jamais assumirá duas vezes o mesmo comportamento ou trajetória. O que pode ser obtido

por meio de simulações computacionais é um padrão que seja o mais provável, mas não poderemos acompanhar precisamente a evolução de um estado qualquer que o sistema assumirá no futuro.

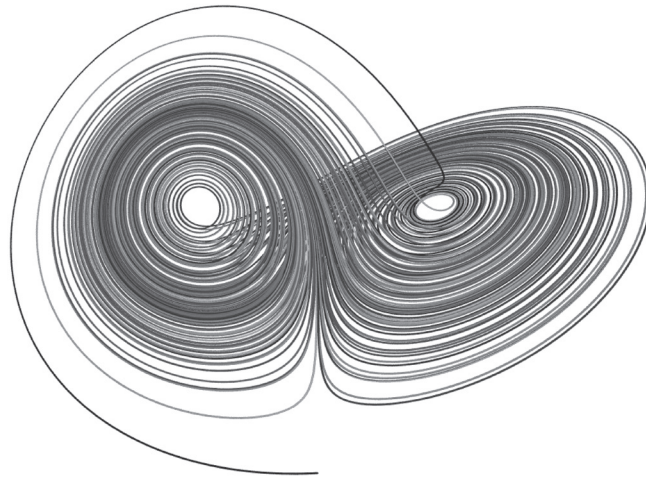


Figura 2. Atrator de Lorenz. Este sistema apresenta um comportamento caótico, que tende para um conjunto denso de linhas, mas para o qual é impossível prever a localização de um determinado ponto.

Comportamentos caóticos podem ocorrer em qualquer escala, seja no mundo microscópico ou no mundo das galáxias, incluindo-se as complexas relações sociais e econômicas vigentes no “mundo” humano. Os sistemas econômicos, por exemplo, são caóticos. Não podemos fazer previsões, em longo prazo, sobre o comportamento da economia, porque eventos de pequena magnitude podem alterar drasticamente o comportamento da economia de toda uma nação. George Herbert escreveu um poema cujos versos talvez ilustrem a situação: “Por falta de um prego, perdeu-se a ferradura; /Por falta de uma ferradura, perdeu-se o cavalo; /Por falta do cavalo, perdeu-se o cavaleiro; /Por falta do cavaleiro, perdeu-se a batalha; /Por falta da batalha, perdeu-se o reino” (citado em Gleick, 1990).

Sistemas biológicos, normalmente, apresentam as características esperadas em sistemas que são complexos. Por exemplo, por mais detalhada que seja a descrição dos estados físico-químicos do sistema nervoso de uma pessoa, não é possível imaginarmos sobre o que ela estará pensando ou o que fará no próximo minuto. Da mesma forma, podemos brincar de prever os estados futuros de evolução das espécies, mas isto não passará de uma brincadeira. Os fatores que influenciam o curso da evolução são tantos e de diferentes magnitudes que o destino de uma espécie será influenciado por numerosos fatores estocásticos ou contingentes.

---

## 4. EMERGÊNCIA

---

Outra propriedade dos sistemas complexos diz respeito aos fenômenos emergentes. Segundo a concepção “emergentista”, sistemas complexos exibem propriedades em um determinado nível de organização de tal forma que estas apenas são detectadas neste nível e não podem ser reduzidas ao nível de organização anterior. O sistema como um todo exibe propriedades novas ou imprevisíveis a partir das interações entre os elementos estruturais do nível de organização anterior. Um bom exemplo é o da água. A água exibe propriedades físico-químicas que não podem ser previstas ou reduzidas às propriedades do hidrogênio e do oxigênio, tomados isoladamente. Este exemplo ilustra a noção conhecida popularmente segundo a qual o todo é maior do que a soma das partes. Sistemas biológicos complexos normalmente exibem esta propriedade.

---

## 5. A EVOLUÇÃO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS

---

Como essas propriedades novas ou imprevisíveis de sistemas biológicos evoluem? Em primeiro lugar, é forçoso reconhecer que à medida que o tempo flui há uma tendência de os sistemas biológicos evoluírem para formas mais complexas a partir de uma origem simples pela qual a vida iniciou-se há 3.5 bilhões de anos. Todavia, evolução neste caso significa simplesmente o ato de mudar de estado estrutural e funcional, sem nenhuma conotação de aperfeiçoamento ou progresso.

Consideremos um sistema complexo representado pela estrutura do DNA em dupla hélice, universalmente presente em todas as formas vivas. Sua configuração química estrutural além de lhe conferir certa estabilidade no tempo e espaço facilita a sua duplicação e, conseqüentemente, a transmissão de características biológicas por meio de suas seqüências, às quais se atribui o nome de genes. Muitos biólogos se contentam em entender a estrutura e os processos físico-químicos que ocorrem na duplicação e transcrição das informações genéticas contidas no DNA. Entretanto, além desse importante conhecimento, gostaríamos também de saber quais seriam as causas que levaram à evolução de tal complexidade. Antes, porém, chamamos a atenção para duas propriedades fundamentais que os sistemas complexos biológicos devem apresentar como garantia de que terão certa persistência no tempo e espaço: estabilidade e reprodução. Um sistema biológico cujos constituintes sejam frouxamente conectados ou que não tenha resiliência (capacidade de se recuperar após sofrer qualquer tipo de alteração que afete sua estrutura e funcionamento) tende a não persistir o bastante a ponto de conseguir reproduzir-se. Isso é válido para quaisquer níveis de organização biológica tanto em nível molecular (DNA) quanto em nível de ecossistemas (uma lagoa) e até mesmo em nível da biosfera, se pudermos considerá-la um sistema ecológico.

Somos capazes de reconhecer e definir um sistema biológico complexo identificando-o por meio de suas propriedades fundamentais, várias delas discutidas acima, e há consenso de que sistemas biológicos evoluem no tempo — uma verdade que não necessita ser comprovada (axioma) é a de que qualquer sistema físico-químico-biológico evolui. Todavia, é bom repetir que evoluir, neste caso, significa simplesmente mudança de estado estrutural e funcional, sem conotação alguma de aperfeiçoamento ou progresso.

Embora saibamos diferenciar sistemas complexos de sistemas simples, por exemplo, uma célula animal ou vegetal de uma molécula de água, sabe-se muito pouco sobre os mecanismos causadores da evolução de sistemas biológicos. No entanto, há pelo menos três modos pelos quais a complexidade tende a se desenvolver à medida que um sistema evolui (Arthur, 1994).

Em primeiro lugar, considerando-se sistemas co-evolutivos, nos quais ocorre a evolução simultânea e recíproca de espécies que interagem, a complexidade pode evoluir por meio do aumento da diversidade em espécies. Em certas circunstâncias, espécies recém-evoluídas podem proporcionar novos nichos que favoreceriam a evolução de novas espécies.

Além disso, em sistemas biológicos relativamente simples, a complexidade pode aumentar por meio do aumento de sua sofisticação estrutural. Neste caso, o sistema pode acumular certo número de subsistemas, subfunções ou subpartes, cuja integração estrutural pode facilitar seu funcionamento e aumentar sua estabilidade e persistência frente às variações ambientais, que tenderiam a conduzi-lo ao estado de equilíbrio termodinâmico.

A terceira possibilidade seria a de um aumento em complexidade de um sistema biológico por meio da incorporação em sua estrutura de elementos simples que podem ser usados para aperfeiçoar seu funcionamento e, desse modo, contribuir para aumentar sua estabilidade e garantir sua capacidade de auto-reproduzir.

No entanto, deve-se ressaltar que o aumento da complexidade por meio dos três mecanismos descritos acima é intermitente e episódico, e nos dois primeiros mecanismos a complexidade pode ser reversível. Discutiremos, a seguir, alguns exemplos que devem ajudar a esclarecer como agem esses três mecanismos geradores de complexidade.

O exemplo mais simples do primeiro mecanismo, chamado co-evolução, retrata como a evolução de uma nova espécie pode criar novos nichos ecológico, o que, por sua vez, cria condições para a evolução de outras novas espécies e, portanto, para o aumento da complexidade ecológica. Essa ação co-evolutiva pode ser ilustrada se considerarmos as conseqüências da evolução do castor, também chamado de espécie-engenheira, para o ecossistema no qual vive.

O comportamento que o castor apresenta de modificar o ambiente de pequenos rios, interrompendo seu curso por meio da construção de barragens construídas com troncos e galhos de árvores, permitiu a evolução de numerosas espécies nestes novos ambientes, às quais não seriam adaptadas a viver no ambiente original, caracterizado por correntezas rápidas. É óbvio que a evolução desse comportamento pode aumentar a diversidade em espécies capazes de ocupar os novos nichos ecológicos criados pela ação da espécie-engenheira, mas também pode resultar na extinção de certas espécies especializadas em viver em correntezas rápidas. Todavia, resta saber se, de fato, houve aumento da complexidade ecológica por meio de novas espécies adicionadas ao novo ambiente, ou se o ambiente lacustre criado pelo castor foi colonizado por espécies provenientes de outros lagos ou lagoas. De qualquer modo, apesar das extinções que ocorreram de espécies adaptadas à água corrente, a complexidade desse novo ambiente deverá ser aumentada. A propósito, aproveitamos para citar uma menção de Darwin, contida em uma de suas cadernetas de anotações, sobre a evolução da complexidade:

O número enorme de animais que vive no mundo depende de suas variadas estrutura e complexidade (...) Em consequência disso, à medida que as formas vão se tornando complexas elas criam novas formas de adicionar complexidade à complexidade já existente (citado em Arthur, 2002).

Deve-se ressaltar, entretanto, que nessa anotação Darwin se referia à complexidade estrutural como, por exemplo, à formação de recifes de corais. Todavia, também neste exemplo o aumento da complexidade estrutural em si disponibiliza novos nichos que podem ser ocupados por novas espécies ou por espécies já adaptadas a fazê-lo. Não é por acaso que a diversidade em espécies de organismos que vivem em recifes de corais tropicais, que são tão complexos, pode ser tão elevada quanto a diversidade em espécies de uma floresta tropical pluvial! (Connel 1978).

Nosso próximo exemplo de aumento de complexidade refere-se a entidades individualizadas e variáveis — sistemas, organismos, espécies e indivíduos — as quais evoluem por meio da seleção que atua sobre a variabilidade que apresentam. A ação dos fatores ambientais é o mecanismo pelo qual a seleção de formas mais complexas ocorre. Neste caso podemos, pelo menos aparentemente, identificar dois tipos de mecanismos geradores de diversidade (Arthur, 2002).

O primeiro opera em nível de ecossistemas — no curso da evolução, ecossistemas podem tornar-se mais complexos e conseqüentemente mais diversos. Porém, ecossistemas complexos evolutivamente estruturados, por meio da seleção natural atuando sobre os indivíduos que o compõem, podem ser completamente substituídos por ecossistemas mais “adaptados” às condições resultantes de uma

mudança simples, mas significativa, que venha ocorrer em um de seus integrantes ou até mesmo em uma de suas interações ecológicas. Isso parece ter ocorrido em um ecossistema de alta produtividade primária integrado principalmente por vegetação de gramíneas que, em apenas 100 anos, foi inteiramente substituído por um ecossistema de tundra ártica. Embora seja menos produtivo, a vegetação da tundra ártica é mais bem adaptada às mudanças que ocorreram devido à extinção de algumas espécies de aves marinhas em certas ilhas do arquipélago das Aleutas, no círculo polar ártico. A extinção dessas espécies (aves) que produziam o esterco (guano) fertilizante, o qual favorecia o rápido crescimento e manutenção das gramíneas, ocorreu por meio da introdução de raposas que dizimaram os pássaros marinhos que nidificavam nessas ilhas. A vegetação de tundra, composta principalmente de arbustos parecidos com os de cerrado, colonizou estas áreas que, embora menos fertilizadas, ainda proporcionavam condições para o desenvolvimento de espécies de tundra, mais tolerantes a pouca disponibilidade de nutrientes. Desse modo, uma interação relativamente simples, a predação, realizada pelas raposas sobre as aves marinhas, causou a substituição de um ecossistema com pouca resiliência à mudança resultante por outro ecossistema mais “adaptado” às novas condições (ver *Ciência Hoje* on-line).

No segundo tipo de mecanismo, indivíduos em ecossistemas podem tornar-se mais complexos estruturalmente. Por exemplo, alguns biólogos evolucionistas sugerem que a evolução de organismos eucarióticos multicelulares, portanto mais complexos que seus ancestrais unicelulares, foi a base para a ocorrência da explosão de diversidade que ocorreu no período Cambriano, há 600 milhões de anos (Arthur, 2002).

Finalmente, o terceiro mecanismo causador de aumento da complexidade biológica tem a ver com a rápida emergência da complexidade a partir de módulos simples e de caráter universal. Organismos são construídos a partir de módulos (células), os quais por sua vez são formados a partir de moléculas pequenas, em poucas quantidades e de estrutura simples (um pouco mais de 50 moléculas). Essas moléculas são de ocorrência universal na vida terrestre e são os “tijolos” da constituição biológica. Por outro lado, elas se combinam em estruturas mais complexas por meio de regras de combinações que consistem em um número relativamente pequeno de rotas metabólicas. Os moduladores dessas combinações metabólicas são as enzimas. Estas, por sua vez, são governadas por uma combinação complicada de expressão gênica que interfere na sua produção a partir do DNA que as codificam. Neste caso, o sistema completo pode ser considerado “fechado” e com a capacidade de se auto-organizar, no sentido de que não há uma programação externa qualquer a dirigir sua organização e funcionamento. Nesse ponto podemos mencionar uma outra característica fundamental de sistemas biológicos que é a

sua capacidade de se adaptar a mudanças que ocorrem em si próprios devido a mecanismos internos, por exemplo, mutações ou acidentes que ocorrem durante o desenvolvimento, e em função de mudanças ambientais externas. Devido a essa capacidade de se adaptar e de se auto-organizar, sistemas biológicos complexos são, às vezes, chamados sistemas complexos adaptativos. Um bom exemplo de um sistema complexo adaptativo, considerado por alguns pesquisadores o mais complexo dos sistemas complexos, é o cérebro (Stevens, 2002). Aliás, devido ao fato de que a evolução ocorre por meio da modificação de estruturas previamente existentes, genericamente conhecidas como pré-adaptações, o cérebro torna-se um excelente objeto para a realização de um estudo comparativo sobre a evolução de um sistema complexo (veja Allman, 2000).

Em conclusão, podemos dizer que a evolução produziu formas de vidas e cérebros mais complexos partindo de estruturas simples. Por isso podemos afirmar que a evolução por seleção natural é a maior responsável pela geração da expressiva diversidade de formas, tamanhos e cores que podemos observar à nossa volta.

#### Resumo

Sistemas biológicos podem ser considerados sistemas complexos, pois apresentam uma série de características estruturais e funcionais típicas de sistemas complexos, como, por exemplo, uma ampla diversidade de elementos distintos que interagem produzindo propriedades coletivas emergentes. Porém, ao contrário da maioria dos sistemas físico-químicos, relativamente mais simples e menos maleáveis, os sistemas biológicos podem ser considerados sistemas complexos adaptativos, pois a partir da interação entre elementos simples o sistema pode se modificar, tornando-se cada vez mais complexo à medida que se auto-organiza por meio de novas interações realizadas entre esses elementos. Isso pode ser observado pela tendência de aumento da complexidade durante o transcurso da evolução das formas de vida orgânicas e dos níveis de complexidade nas quais estas se auto-organizam. Um exemplo de aumento de complexidade devido às interações entre módulos simples é o do cérebro: os milhões de neurônios simples se interagem resultando em subestruturas e funções complexas. Há pelo menos três mecanismos pelos quais os sistemas biológicos complexos podem evoluir: por meio da atuação de sistemas co-evoluídos, por meio do aumento da sofisticação estrutural e funcional e por meio da incorporação em sua estrutura de elementos simples, que podem ser usados para aperfeiçoar seu funcionamento e aumentar sua adaptabilidade às instabilidades decorrentes de variações ambientais imprevisíveis, as quais tendem a conduzi-los ao estado de equilíbrio termodinâmico.

## Referências

ALLMAN, J. 2000. *Evolving brains*. New York: W. F. Freeman and Company.

ARTHUR, W. B. 1994. On the evolution of complexity. In: COWAN, G. A., PINES, D.; MELTZER, D. (Ed). *Complexity: metaphors, models and reality*. New York: Addison-Wesley Publishing Company. p. 65-82.

BERTALANFFY, L. 1975. *Teoria geral dos sistemas*. Petrópolis: Vozes.

CIÊNCIA HOJE on-line. <<http://cienciahoje.uol.com.br/materia/view/3310>>. Acesso em: 14/03/2005.

CONNEL, J. H. 1978. Diversity in tropical rainforests and coral reefs. *Science* 199A, p. 1302-1310.

GLEICK, J. 1990. *Caos*. Rio de Janeiro: Campus.

FERRATER-MORA, J. 2001. Sistema. In: *Dicionário de filosofia*. v. 4. São Paulo: Loyola.

HOUAISS, A. 2001. *Dicionário eletrônico da língua portuguesa*. Rio de Janeiro: Objetiva. (CD-ROM).

NUSSENZVEIG, H. M. (Org.). 1999. *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ/COPEA.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. 1986. *A Nova Aliança*. Lisboa: Gradiva.

STEVENS, C. F. 2002. Complexity of brain circuits. In: COWAN, G. A.; PINES, D.; MELTZER, D. (Ed.). *Complexity: metaphors, models and reality*. New York: Addison-Wesley Publishing Company. p. 245-261.

### Referências adicionais

BONNER, J. T. 1998. *The evolution of complexity by means of natural selection*. Princeton/New Jersey: Princeton University Press.

MARTINS, R. P.; MARI, H. 2002. *Universos do conhecimento*. Editora Fale-UFGM, Belo Horizonte.

MOROWITZ, H. J. 2002. *The emergence of everything*. Oxford: Oxford University Press.

## Glossário

*Adaptação*: característica fenotípica ou processo que permite o ajustamento estrutural e funcional de quaisquer níveis de organização biológica às variações ambientais às quais estão sujeitas e que interferem em sua capacidade de persistir e reproduzir.

*Arquitetura conceitual de uma teoria*: é um modelo que expressa as relações entre os vários elementos conceituais que constituem uma teoria.

*Auto-organização*: capacidade que sistemas complexos adaptativos têm de se organizar internamente, mantendo, dessa forma, a sua estabilidade estrutural e funcional.

*Atrator estranho*: Um atrator estranho é uma representação gráfica de um sistema caótico, ou seja, um sistema que pertence à categoria dos sistemas nos quais uma pequena variação em suas condições iniciais acarreta mudanças radicais nos resultados finais. Por exemplo, o efeito asas de borboleta representado na Figura 2.

*Caos*: sistema dinâmico não-linear cuja trajetória temporal é extremamente sensível às condições iniciais. Dois exemplos de sistemas caóticos são as turbulências atmosféricas e os sistemas econômicos.

*Ciência clássica*: suas características são a universalidade, a causalidade, o determinismo e o reducionismo absolutizados e a matematização, como pressuposto da ciência.

*Entropia*: estado de desorganização estrutural e funcional de sistemas termodinâmicos.

*Equilíbrio termodinâmico*: um sistema termodinâmico atinge o equilíbrio termodinâmico se sua distribuição de energia interna resultar em uma única temperatura para todo o sistema.

*Fatores estocásticos ou contingentes*: eventos que ocorrem inesperadamente e que influem no comportamento de sistemas complexos.

*Fenômeno*: qualquer padrão ou processo observável.

*Homeostase*: processo de regulação pelo qual um organismo mantém seu equilíbrio e, conseqüentemente, sua persistência integral. Vários processos fisiológicos contribuem para a homeostase, por exemplo, os mecanismos fisiológicos de regulação da temperatura corporal.

*Instabilidade*: processo que resulta das variações em condições ambientais que podem selecionar modificações estruturais e funcionais em quaisquer níveis de organização biológica.

*Lei*: constitui uma classe especial de generalização. Em outras palavras, é uma afirmação universal condicional que especifica as condições sob as quais ocorre um processo biológico, por exemplo, evolução por seleção natural. Neste caso, há três condições necessárias e suficientes para que ocorra seleção natural: variabilidade genética, herdabilidade e capacidade diferencial de indivíduos em deixar descendentes.

*Níveis de organização biológicos*: categorias que reaperceptam arranjos discretos de estruturas biológicas que apresentam propriedades emergentes.

*Padrão*: arranjo de entidades ou eventos no tempo e espaço confirmáveis por observação ou experimentos.

*Previsão determinista*: capacidade que uma teoria tem de prever de modo absoluto a ocorrência de determinado evento, a partir de certas condições especificadas. Por exemplo, havendo as três condições necessárias e suficientes (ver verbete *Lei*) ocorrerá evolução por seleção natural.

*Princípio*: um modo de descrever a natureza de maneira sucinta e abreviada, o mesmo que generalização. Em outras palavras, princípios seriam generalizações derivadas indutivamente de observações, registros ou dados científicos.

*Processo*: causa, mecanismo ou limitação que explica um determinado padrão. Conjunto seqüencial de eventos.

*Simulação*: representação por meios artificiais de quaisquer fenômenos naturais complexos que se deseja compreender. São muito comuns as simulações em computador realizadas por meio da combinação dos comportamentos que se espera que várias variáveis tenham em condições naturais.

**PARTE 4**  
**MICROBIOLOGIA**



## Microorganismos: Estrutura e Diversidade

Ary Corrêa Junior

### 1. INTRODUÇÃO

Os microorganismos estão presentes em todos os ambientes onde a vida é possível. Apesar de ubíquos, os microorganismos passam despercebidos para a maioria das pessoas. Isto se deve ao fato de que a grande parte dos microorganismos é extremamente pequena na maior parte do seu ciclo de vida. Microorganismos são observados normalmente apenas quando frutificam (fungos filamentosos), formam colônias (fungos e bactérias) ou quando desencadeiam sinais em seus hospedeiros (vírus, fungos e bactérias). Apesar de serem de pequeno tamanho, alguns microorganismos estão entre os maiores organismos do mundo. Por exemplo, o tamanho de um exemplar do fungo de solo *Armillaria bulbosa* foi estimado em 160.000 m<sup>2</sup>, seu peso em mais de 100 toneladas, e a sua idade, entre 1.000 e 1.500 anos. Apesar deste tamanho descomunal, o fungo é normalmente observado apenas quando frutifica produzindo o seu basidiocarpo, conhecido popularmente como cogumelo do mel (Figura 1).



Figura 1 – Basidiocarpo do fungo *Armillaria bulbosa* (cogumelo do mel) medindo aproximadamente, 7 cm.

Esta aula procurará instrumentar o leitor a reconhecer microorganismos no ambiente, descrever a sua morfologia e estruturas, e maneiras pela qual eles são identificados e coletados.

## 2. MORFOLOGIA EXTERNA DE MICROORGANISMOS

Entre os microorganismos apenas alguns fungos filamentosos apresentam estruturas que podem ser detectadas a olho nu. Alguns desses fungos formam estruturas reprodutivas, como cogumelos e ascocarpos, facilmente detectados, que servem de característica que permite a sua separação em diferentes gêneros e espécies.

### 2.1. Cogumelos

Os cogumelos são estruturas desenvolvidas por fungos filamentosos de solo, para permitir a liberação de esporos e sua dispersão. Eles têm uma morfologia extremamente variada, mas basicamente são formados por pílio, haste, bulbo e vulva (Figura 2).

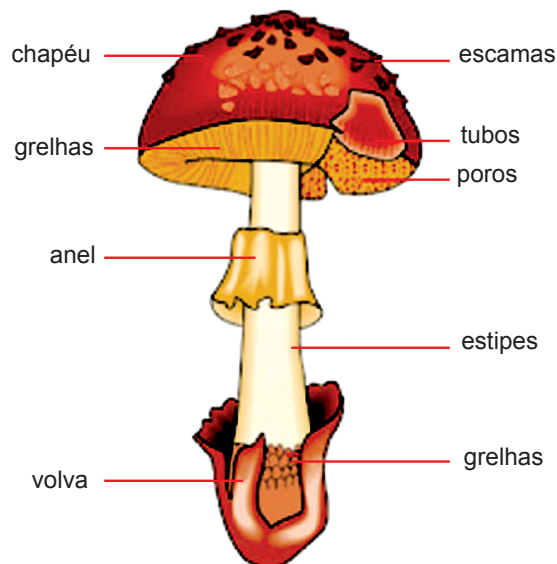


Figura 2 – Partes que constituem um cogumelo típico

Este tipo de cogumelo em forma de um chapéu é típico de um grupo de basidiomicetos. Como estes fungos crescem subterraneamente, os seus propágulos são disseminados com dificuldade. O cogumelo ou basidiocarpo é uma estrutura que permite que esporos que são formados na parte inferior do pileo, na superfície de guelras ou poros, possam ser liberados na atmosfera e carreados pelo vento

para outros ambientes (Figura 2). Os esporos de basidiomicetos se desenvolvem no exterior de uma estrutura chamada basídia e são o resultado de uma divisão meiótica que resulta em células haplóides, os basidiosporos (Figura 3). O cogumelo é formado por uma trama de hifas (células fúngicas com crescimento apical em forma de tubos) denominado himênio. Neste himênio se desenvolvem as basídias e os basidiosporos. Basidiosporos sempre são formados exogenamente à estrutura onde a divisão meiótica do seu ciclo de vida ocorre. A presença de basidiosporos caracteriza o grupo dos basidiomicetes, e não a formação de cogumelos. Diferentes basidiocarpos podem ser observados nos basidiomicetes como o representado na Figura 4.

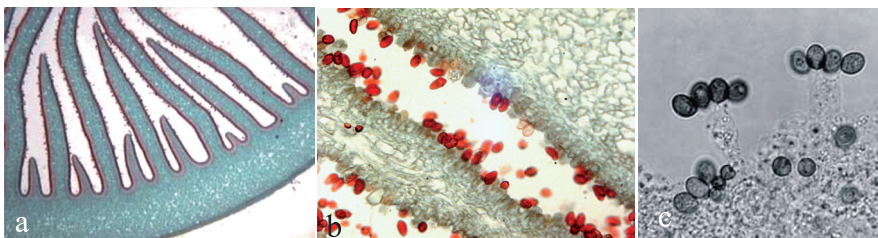


Figura 3 – a) corte transversal de um cogumelo mostrando as guelras; b) um detalhe de duas guelras mostrando o himênio, os basídios e basidiosporos; c) fotomicrografia de uma basídia típica com quatro basidiosporos.

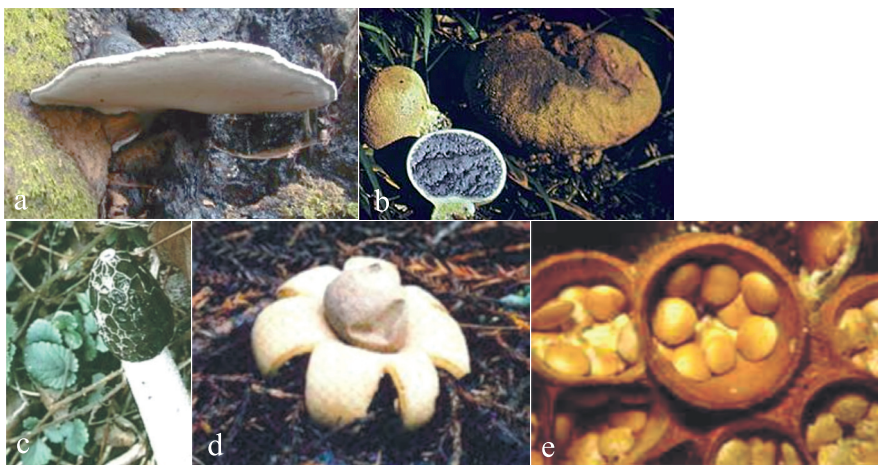


Figura 4 – Diferentes tipos de basidiocarpos; a) fungo poliporaceae (orelha-de-pau); b), c), d) e e) Gastromiceto. Observe que os basidiosporos são formados em uma estrutura fechada.

## 2.2 Ascocarpos

Diferentemente dos basidiomicetes, os ascomicetes formam seus esporos sexuados no interior das estruturas onde a divisão meiótica ocorre. A estrutura que contém os ascosporos é denominada asca, e a estrutura que contém as ascas é denominada ascocarpo (Figura 5).

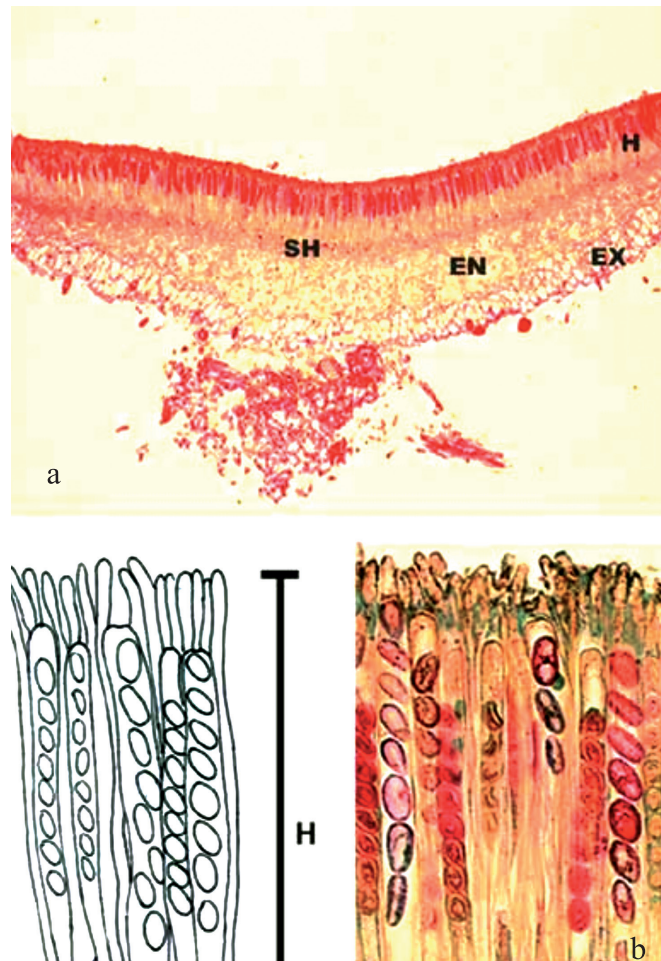


Figura 5 – a) corte transversal de um ascocarpo. Note o himênio basal de onde as ascas. (b, c seta) e os ascosporos se formam (cabeça de seta).

Os ascocarpos possuem, também, morfologia diversa, mas podem ser divididos didaticamente em apotécios (estruturas totalmente abertas), peritécios (estruturas com orifício) e cleistotécio (estrutura totalmente fechada) (Figura 6).

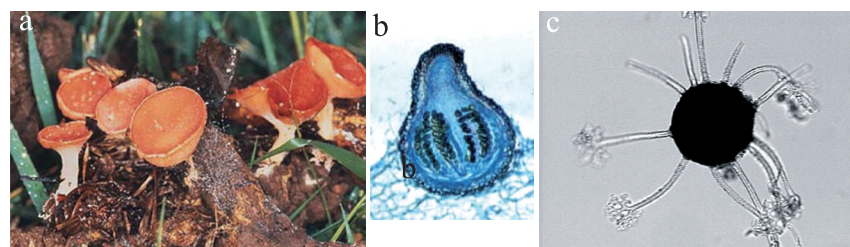


Figura 6 – Tipos de ascocarpos: a) apotécio; b) peritécio; c) cleistotécio

Todas estas estruturas reprodutivas, basidiocarpos ou ascocarpos, são formadas a partir de um micélio fúngico. Micélio é o termo usado para definir o aglomerado de hifas, que são as estruturas básicas dos fungos filamentosos. O micélio pode se apresentar de diversas

maneiras, desde apenas um conjunto de hifas sem uma morfologia específica (Figura 7), até apresentar uma estratificação complexa (himênio). Apesar de fungos não apresentarem tecidos, o himênio é a estrutura que mais se assemelha a um tecido ou órgão.

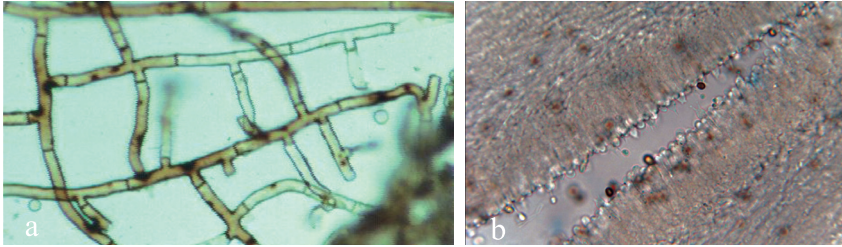


Figura 7 – a) hifas do fungo *Rhizoctonia solani*. Note os septos (setas); b) himênio de *Agaricus bisporus*. Note as várias camadas de hifas emaranhadas.

As hifas são formadas por células fúngicas em forma de tubos. Essas células podem ser septadas (divisão entre duas células contíguas) ou não (Figura 8).



Figura 8 – a) hifa septada; b) cenocítica

Fungos que não formam corpos de frutificação podem ainda ser vistos no campo pela presença de micélio, o que é conhecido comumente como bolor (Figura 9).



Figura 9 Fatias de pão mostrando o crescimento de fungos. As lesões brancas correspondem ao crescimento do micélio vegetativo do fungo *Penicillium digitatum*, e as áreas verdes, os conidióforos e conídios.

Os conidioforos são as estruturas do fungo que originam os esporos assexuados (formados a partir de divisões mitóticas). Estes conidioforos e conídios são as estruturas do fungo usadas normalmente para diagnóstico de fungos assexuais, pois apresentam grande variabilidade morfológica (Figura 10).

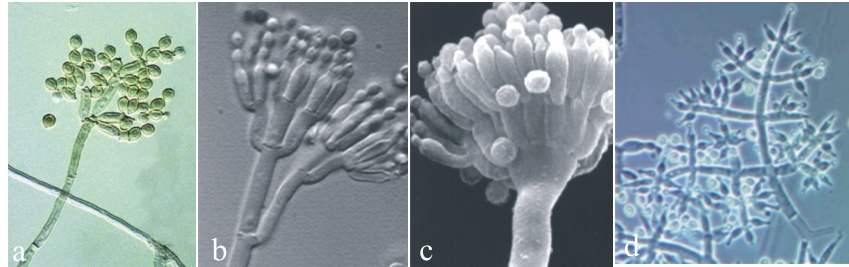


Figura 10 – Conidioforos de: a) *Cladosporium* sp.; b) *Penicillium* sp.; c) *Aspergillus* sp.; e d) *Trichoderma* sp.

A forma do conídio também é uma importante característica que permite a separação entre as diversas espécies fúngicas (Figura 11).

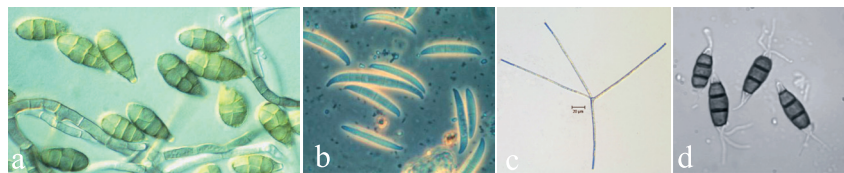


Figura 11 – Diferentes conídios fúngicos: a) *Alternaria* sp.; b) *Fusarium* sp.; c) *Pestalotiopsis* sp.; d) *Tetrachaetum* sp.

Como visto, apesar de seu pequeno tamanho, existem diversas características macroscópicas e microscópicas que podem ser utilizadas para a detecção e caracterização de fungos. Entretanto, nem sempre as estruturas reprodutivas do fungo estão presentes, e raramente se observam estruturas sexuais em condições de laboratório. Em condições de cultivo, normalmente, se observam fungos na forma de colônias. Colônia é uma população clonal de indivíduos. Dependendo do microorganismo cultivado estas colônias apresentaram características distintas. Por exemplo, os fungos filamentosos quando crescendo em meio de cultura formaram uma colônia em forma de feltro ou algodão. Esta forma se deve à célula que forma a colônia. Como o fungo filamentosos, forma hifas alongadas, um conjunto de filamentos aparecerá como um chumaço de algodão. Fungos que se desenvolvem sem formar hifas, mas por divisão binária ou brotamento (leveduras), formam colônias compactas e lisas (Figura 12).

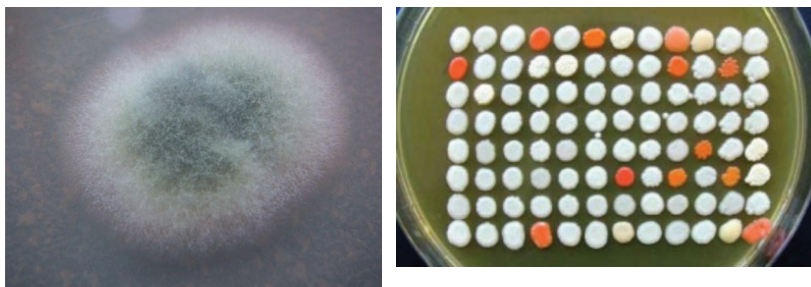


Figura 12 – Colônia filamentososa e lisa

De maneira similar, colônias de bactérias, que se desenvolvem por divisão binária, formam colônias lisas. Como algumas bactérias produzem um material de natureza lipopolissacárida no exterior da célula, essas bactérias formam colônias lisas e brilhantes (Figura 13).

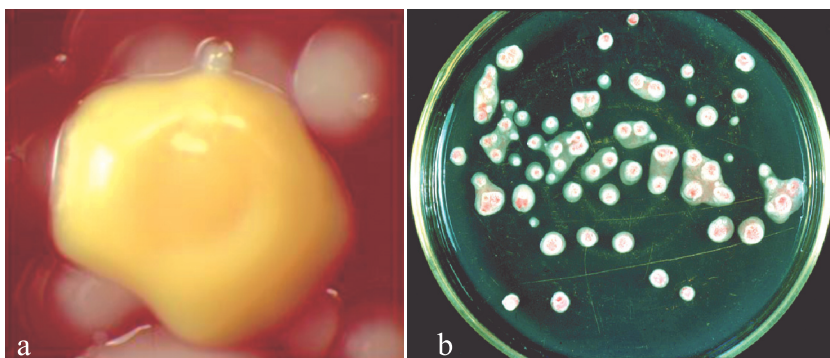


Figura 13 – a) colônia de bactéria. Observe o aspecto liso e brilhante. b) placa de Petri com diversas colônias bacterianas

Observe na Figura 13b que as colônias formam unidades discretas, geralmente circulares. Isso se deve ao fato de cada colônia ter sido originada por um único propágulo. Quando este é o caso o número de colônias observado corresponde ao número de propágulos no material de inoculação. Essa característica é importante para a quantificação de populações bacterianas.

A presença de colônias visíveis é uma constante no laboratório de microbiologia, entretanto, no campo, elas raramente são observadas. São necessárias técnicas de isolamento e caracterização para que os fungos e bactérias de um ambiente em particular possam ser observados. (As técnicas de isolamento de microorganismos serão discutidas na disciplina Microbiologia.)

No campo, os microorganismos que não formam estruturas macroscópicas podem ser evidenciados através de sinais ou sintomas gerados em seus hospedeiros.

Assim, em pântanos a presença de metano é indicativa de bactérias metanogênicas, bactérias que oxidam ferro podem ser observadas em

minas abandonadas através da mudança de cor no mineral, biofilmes bacterianos podem ser vistos em dentes e tubulações (Figura 14).

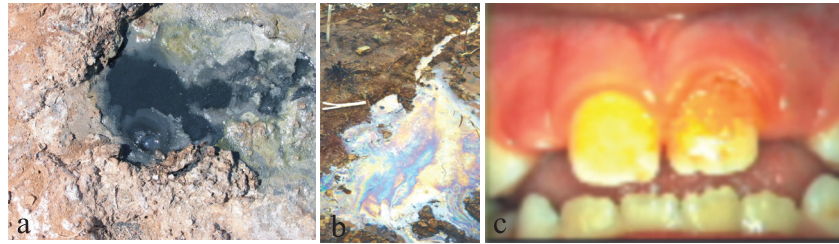


Figura 14 a) região pantanosa com a formação de bolhas de gás metano produzido por bactérias metanogênicas; b) região onde bactérias que oxidam  $Fe^{++}$  e resultam na mudança de coloração da água; c) biofilme bacteriano em dentes.

Geralmente, a presença de microorganismos patogênicos pode ser evidenciada pelos sinais e sintomas que eles apresentam.

Assim, em plantas, os sintomas podem ser indicativos da presença de microorganismos. Por exemplo, o tombamento de plântulas (plantas recém-germinadas) pode ser indicativo da presença de *Fusarium*, *Rhizoctonia* ou *Phytium* no solo (Figura 15).



Figura 15 – Tombamento de plântulas de tomate causada por infecção pelo fungo *Phytium sp.*

Outros sintomas comuns são a formação de manchas, cloroses, necroses, etc. Um profissional experiente é capaz de, através do binômio hospedeiro  $\times$  sintomas, proceder ao diagnóstico da enfermidade e, conseqüentemente, identificar o microorganismo ali pre-

sente. Por exemplo, a presença de manchas e áreas cloróticas em folhas pode ser um indicativo de infecção fúngica ou bacteriana (Figura 16).



Figura 16 – a) mancha necrótica em folha de bananeira causada pelo fungo *Mycosphaerella fijiensis* causador da doença; b) Sigatoka negra; c) lesão em laranja causada pela bactéria *Xantomonas campestris*.

Vírus em plantas também podem ser evidenciados pela sintomatologia que causam em seus hospedeiros, como mosaicos e anéis (Figura 17).

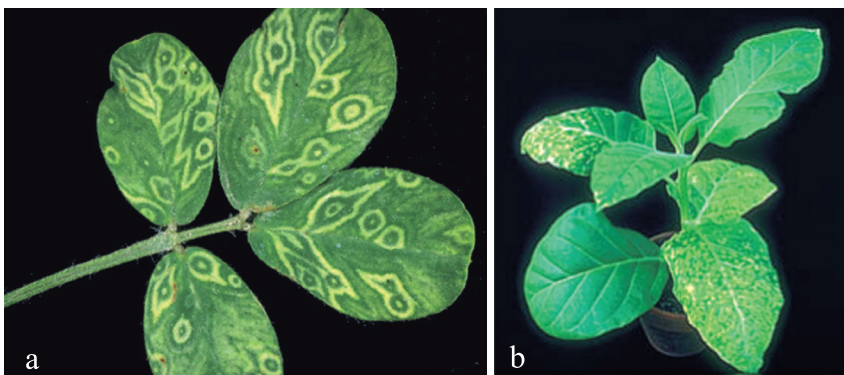


Figura 17 – Folhas mostrando sintomas típicos de mancha: a) em anel e b) mosaico

Como visto, os microorganismos estão em todos os ambientes e em grande quantidade, participando como agentes importantes dos ciclos biogeoquímicos da natureza.

# AUTO-AVALIAÇÃO

Algumas questões podem ser respondidas diretamente, outras necessitam de pesquisa suplementar.

- a) Por que a maioria dos microorganismos não é corriqueiramente observada?
- b) O que é uma colônia microbiana?
- c) Um cogumelo pode ser dividido em quais partes?
- d) Qual a função do cogumelo?
- e) Pesquise a respeito de uma doença em vegetais da sua região e descreva os sintomas e sinais que ela apresenta.









Para obter mais  
informações sobre  
outros títulos da  
EDITORA UFMG,  
visite o site

[www.editora.ufmg.br](http://www.editora.ufmg.br)

A presente edição foi composta pela Editora UFMG, em caracteres Chaparral Pro e Optma Std, e impressa pela Gráfica Ada , em sistema offset, papel offset 90g (miolo) e cartão supremo 250g (capa), em dezembro de 2011.



CENTRO DE APOIO  
À EDUCAÇÃO A  
DISTÂNCIA UFMG

**PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Secretaria de Ensino a Distância  
Ministério da Educação

