

A reprodução assexuada parece ser uma ótima maneira de um ser vivo passar seus genes para a próxima geração. Afinal, nesse caso, os filhos são praticamente cópias genéticas dos pais. Se isso é verdade, para que existiria o sexo? Essa pergunta já incomodou muita gente e obteve muitas respostas, cada uma com sérias limitações, mas uma teoria lançada nos anos 80 parece resolver o problema. Segundo essa teoria, o sexo permite que os organismos equilibrem a constante luta evolutiva contra os seus próprios parasitas.



Carlos Roberto Fonseca

*Laboratório de Ecologia de Insetos,
Departamento de Ecologia,
Universidade Federal
do Rio de Janeiro*

Se plum

XO, as e parasitas

Que sexo é bom, poucas pessoas discordam. No entanto, quando os cientistas se perguntam “bom para quê?” há controvérsias. Em 1889, o biólogo alemão August Weismann (1834-1914) notou que a função do sexo não poderia ser a de permitir a multiplicação dos organismos, pois diversas espécies reproduzem-se sem recorrer ao sexo. Qualquer pessoa que gosta de jardinagem sabe que muitas espécies de plantas ‘pegam de galho’: basta enterrar um pedaço de um ramo para obter novo indivíduo.

Outros organismos, como as planárias (vermes de vida aquática), podem gerar novo organismo pela fissão do corpo. Micróbios unicelulares simplesmente dividem-se em dois, por um processo semelhante à mitose. E muitos insetos, como os pulgões, passam parte do ano produzindo ovos que geram cópias genéticas do indivíduo que os produziu – tal processo, chamado de ‘partenogênese’, é uma forma de reprodução assexuada bem comum entre os animais, e ocorre até em animais mais complexos, como alguns lagartos, peixes e anfíbios. ▶

Figura 1. Na reprodução sexuada, machos e fêmeas – ou estruturas masculinas e femininas, presentes na maioria das flores – misturam os seus genes para formar um novo ser



A grande maioria dos animais e plantas, porém, reproduz-se sexuadamente, misturando genes do pai com genes da mãe (reprodução cruzada). Para que a reprodução sexuada seja possível, machos e fêmeas (ou estruturas masculinas e femininas, nas plantas) (figura 1) precisam produzir gametas (células reprodutivas, masculinas ou femininas) que em geral têm apenas uma das duas cópias de cada gene que esses indivíduos possuem.

A redução do número de cromossomos (de $2n$ para n) na produção de gametas ocorre através de um processo celular complexo, a meiose (figura 2). A fusão de um gameta masculino de um indivíduo com o gameta feminino de outro é chamado de fertilização. Durante essa fusão, os genes recebidos da mãe e do pai misturam-se em novas combina-

ções. Isso explica por que os filhos de um mesmo casal são sempre diferentes. De maneira simplificada, pode-se dizer que sexo é reprodução cruzada mais recombinação.

Em 1971, o evolucionista inglês John Maynard Smith (1920-) notou que um indivíduo sexuado passa apenas metade do seu material genético aos filhos, enquanto um indivíduo assexuado passa todos os seus genes. Ou seja, na corrida evolutiva, onde passar os genes para a próxima geração é um dos maiores ‘objetivos’, organismos sexuados partem com desvantagem de quase 50%, que ficou conhecida como “o custo da meiose”. Sexo, portanto, parece ser um luxo que não deveria existir.

Como a existência do sexo é inegável, os biólogos têm quebrado a cabeça para descobrir qual o grande benefício que ele traz para os seres vivos. Maynard-Smith argumentou que o sexo só poderia ter evoluído se esse benefício misterioso pelo menos contrabalançasse o grande custo da meiose. Mas, afinal, que benefício é esse?

Desde Weismann, vários cientistas tentam identificar essa vantagem, capaz de justificar a origem e a manutenção da reprodução sexuada (ver ‘O sexo serve para quê?’). Algumas das hipóteses lançadas apontam para benefícios genéticos e outras para

O sexo serve para quê?

As hipóteses científicas mais atuais sobre a necessidade e a importância da reprodução sexuada para os seres vivos baseiam-se em argumentos genéticos ou ecológicos.

HIPÓTESES HISTÓRICAS

August Weismann (1889) – Sexo é... “uma fonte de variação individual que fornece material para a operação da seleção natural”.

LIMITAÇÕES: a reprodução sexuada certamente produz variabilidade, que passará pelo crivo da seleção natural. A explicação do Weismann, porém, assume que uma adaptação é criada hoje com a intenção de facilitar a evolução amanhã. Em outras palavras, bota a carroça na frente dos bois.

Ronald Fisher (1930), **Hermann Müller** (1932), **James Crow** e **Motoo Kimura** (1965) – Sexo é... “uma adaptação que permite a linhagens sexuais juntar boas mutações, de forma a sobrepujar linhagens assexuais”.

LIMITAÇÕES: hoje, admite-se que, em geral, a evolução não ocorre pela disputa entre grupos, linhagens ou espécies, e sim pela disputa entre indivíduos possuidores de diferentes genótipos.

HIPÓTESES GENÉTICAS

▶ **Mark Kirkpatrick** e **Cheril Jenkins** (1989) – Sexo é... “um mecanismo que aumenta a probabilidade de uma mutação recessiva ‘boa’ se manifestar em um indivíduo”.

LIMITAÇÕES: embora modelos teóricos demonstrem que tal hipótese funciona bem sob certas condições (altas taxas de seleção e mutação), ela não explica por que, no mundo real, o número de organismos que fazem autofecundação (caminho mais curto para reunir boas mutações recessivas) é tão baixo.

▶ **Hermann Müller** (1964) e **Alexey Kondrashov** (1982) – Sexo é... “um mecanismo para eliminar mutações prejudiciais”.

LIMITAÇÕES: as baixas taxas de mutação verificadas em organismos procariotos (cujas células não têm núcleo diferenciado) sugerem que existem soluções celulares mais simples e baratas que a meiose para

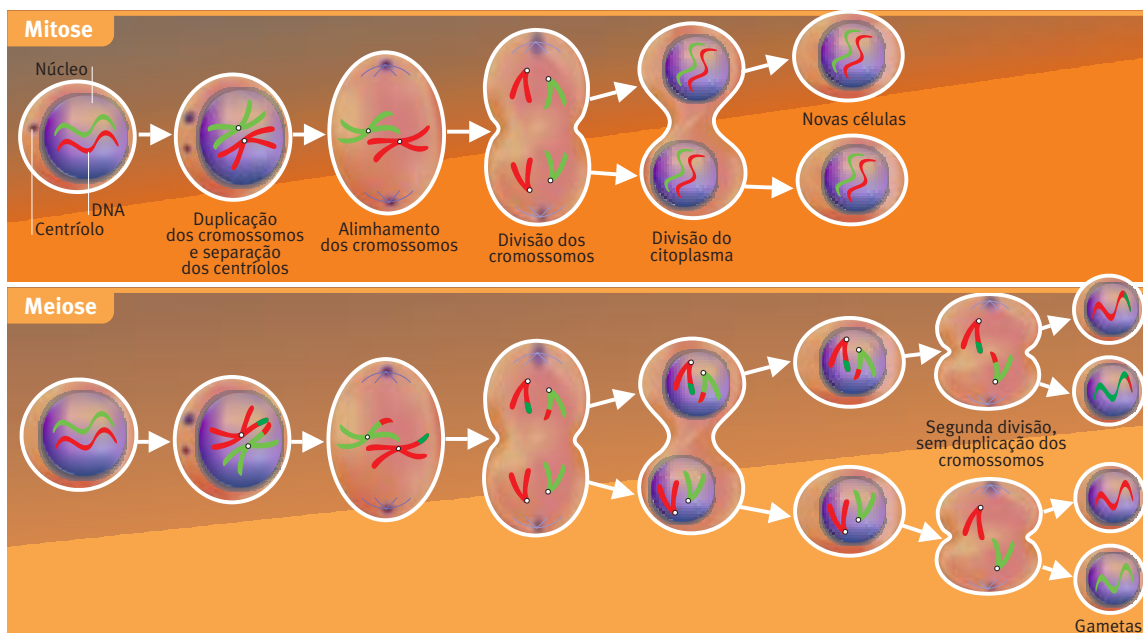


Figura 2. Na mitose (A), a célula divide-se em duas mantendo, nas ‘filhas’, o mesmo número de cromossomos da ‘mãe’, enquanto na meiose (B), a célula gera ‘filhas’ (gametas) que em geral têm apenas a metade do número de cromossomos da célula original

vantagens ecológicas. Este artigo apresenta em detalhes uma das propostas, a teoria sosigônica (ou ‘teoria da Rainha Vermelha’, como é também conhecida), que vem recebendo muita atenção da comunidade científica nos últimos tempos.

O mundo da Rainha Vermelha

Essa audaciosa teoria sobre a origem e a manutenção do sexo foi proposta pelo evolucionista inglês William D. Hamilton (1936-), da Universidade de Oxford, em 1980. Segundo ele, os parasitas estão em

toda parte e procuram sempre, por sua natureza, explorar seus hospedeiros. Além disso, apresentam virulência específica, afetando apenas determinados genótipos dos hospedeiros, enquanto estes têm genes que conferem resistência ao ataque. Como o tempo de geração dos parasitas (figura 3) é muitas vezes menor que o dos hospedeiros e por isso suas taxas de evolução são muitas vezes maiores, a única saída para os



Figura 3. A luta contra os parasitas – como os da ancilostomíase (A), e da doença de Chagas (B), que atacam o homem – parece explicar a origem e a evolução do sexo entre os seres vivos

evitar o acúmulo de mutações prejudiciais.

Harris Bernstein (1983) – Sexo é... “um mecanismo que permite o conserto das fitas de DNA (ácido desoxirribonucléico) através da recombinação”.

LIMITAÇÕES: diversos argumentos sugerem que o conserto do DNA deve ser visto como uma consequência benéfica da existência do sexo e não sua causa.

HIPÓTESES ECOLÓGICAS

George C. Williams (1966) e **John Maynard Smith** (1971) – Sexo é... “um mecanismo que permite a produção de filhos geneticamente diversos, capazes de enfrentar a va-

riabilidade temporal e espacial do ambiente”.

LIMITAÇÕES: essa hipótese prevê que o sexo deve ocorrer com maior frequência em ambientes instáveis, mais sujeitos a variações das condições bióticas. No entanto, os padrões geográficos e ecológicos relacionados à reprodução sexuada são opostos ao previsto por essa hipótese: a reprodução assexuada é mais comum em organismos de água doce, onde os teores de nutrientes e a temperatura flutuam bastante, e a reprodução sexuada predomina em ambientes marinhos, mais constantes. Além disso, organismos assexuados são comuns no início da sucessão ecológica, em países tem-

perados e em topos de montanha, onde espera-se maior instabilidade.

Michael Ghiselin (1974) – Sexo é... “um mecanismo de diferenciação ecológica entre irmãos e parentes, que permite sua coexistência em ambientes saturados”.

LIMITAÇÕES: não existe justificativa para que o filho que conseguiu sobreviver por se diferenciar ecológicamente dos demais parentes opte por se utilizar do sexo para produzir filhos diferentes dele mesmo.

▶ **William D. Hamilton** (1980) – Sexo é... “um mecanismo evolutivo pelo qual os organismos podem escapar dos seus parasitas” (teoria sosigônica).

LIMITAÇÕES: a serem descobertas.



Figura 4. A imagem da fábula, com Alice correndo sem sair do mesmo lugar, ajuda a entender a teoria da Rainha Vermelha, como é conhecida entre os cientistas

hospedeiros é produzir filhos com genótipos diferentes dos demais genótipos da população através da reprodução sexuada.

O mundo em que esse modelo está inserido ficou conhecido como o mundo da Rainha Vermelha, nome dado pelo paleontólogo norte-americano Leigh Van Valen, da Universidade de Chicago, em referência a uma passagem da fábula *Alice no país dos espelhos*, do inglês Lewis Carroll (1832-1898). Nessa passagem, Alice foge do exército (de cartas de baralho) da Rainha Vermelha, mas não consegue se distanciar de seus perseguidores (figura 4). Nesse momento, é advertida pela Rainha Vermelha: “Aqui, veja, você precisa correr o máximo possível, para se manter no mesmo lugar.” Alice só seria pega se parasse de correr.

Segundo Hamilton, uma ‘corrida armamentista’ entre hospedeiros e parasitas ocorre desde que a

vida surgiu na Terra. Os parasitas estão sempre quebrando as barreiras defensivas impostas pelo genótipo dos hospedeiros, enquanto estes, com a ajuda do sexo, criam continuamente novas defesas. Na ausência do sexo, os hospedeiros permaneceriam em essência os mesmos, enquanto os parasitas iriam acumulando adaptações que lhes permitiriam quebrar todos os sistemas de defesa dos primeiros. Cedo ou tarde, os hospedeiros seriam virtualmente devorados de dentro para fora. Só resta a eles, para fugir do batalhão de parasitas que os perseguem, continuar correndo.

O ciclo coevolutivo de parasitas e hospedeiros reflete essa perseguição eterna. Indivíduos com genótipo resistente aos parasitas reproduzem-se com sucesso, o que aumenta a frequência, na espécie, desses alelos (variações de um mesmo gene). Mas alguns raros parasitas conseguem quebrar essa defesa e começam a se reproduzir com sucesso, espalhando o novo gene da virulência. Com o tempo, o antigo genótipo do hospedeiro deixa de ser o mais resistente, passa a ter sua frequência reduzida, e um novo genótipo raro torna-se a melhor defesa, espalhando-se na população. Em outras palavras, a seleção natural, no modelo de Hamilton, depende da frequência. Genótipos comuns são selecionados negativamente (sua frequência diminui) e genótipos raros são selecionados a favor (sua frequência aumenta).

Um efeito interessante desse tipo de seleção é que a variabilidade genética não é perdida nunca.

Figura 5. As grandes monoculturas, que utilizam plantas geneticamente uniformes, são mais suscetíveis ao ataque de pragas e doenças



É como se soluções genéticas obsoletas em dado momento fossem temporariamente colocadas de lado para serem eventualmente recicladas no futuro. Se isso é correto, a teoria da Rainha Vermelha ajudaria a explicar a diversidade de alelos e, em consequência, a existência de diferentes formas de proteínas, que tanto intrigaram os geneticistas a algumas décadas.

Muitas das suposições decorrentes do modelo de Hamilton foram confirmadas recentemente. Estudos empíricos demonstraram que populações naturais têm uma substancial variação genética para resistência às doenças e à virulência dos parasitas. Além disso, mostrou-se que há forte associação entre genótipos, como um sistema ‘chave-fechadura’: parasitas com a ‘chave’ certa atacam o hospedeiro e reproduzem-se com sucesso, enquanto parasitas com a ‘chave’ errada penam para se perpetuar. Muitos estudos indicam, também, que espécies com reprodução assexuada são mais suscetíveis a ataques de parasitas que espécies aparentadas com reprodução sexuada. Isso também é verdade para variedades de plantas. Qualquer agricultor sabe que monoculturas de cereais geneticamente uniformes são altamente propensas a serem devastadas por pragas (figura 5).

A teoria da Rainha Vermelha prediz diversos padrões ecológicos que têm sido verificados na natureza. Segundo a teoria, por exemplo, quanto maior a diferença entre o tempo de vida do hospedeiro e o tempo de vida do parasita, maior será a pressão de parasitismo. Assim, o sexo deve ser mais freqüente em organismos grandes e de alta longevidade, o que foi confirmado em uma grande revisão da literatura científica. Em outro exemplo, prevê-se que organismos com reprodução assexuada devem ser mais comuns em ambientes instáveis, onde as relações parasita-hospedeiro são quebradas constantemente. De fato, tais organismos são mais freqüentes em campos do que nas florestas maduras, em países temperados e em topos de montanhas, condições de maior instabilidade ambiental. Além disso, organismos de água doce, submetidos a grandes variações de temperatura e de teores de nutrientes, tendem a se reproduzir mais assexuadamente que organismos de ambientes marinhos, mais constantes.

As mesmas idéias de coevolução entre parasitas e hospedeiros que ajudam a entender a evolução do sexo podem ser úteis para explicar as diferenças fisiológicas, morfológicas e comportamentais entre machos e fêmeas.

Plumas: arma contra parasitas

Quando o inglês Charles Darwin (1809-1882) publicou sua obra máxima, *A origem das espécies*, em 1859, propondo que a diversidade biológica poderia ser explicada pela evolução através do processo de seleção natural, ele tinha consciência de que alguns fatos desafiavam essa grande teoria. Se a evolução realmente ocorre pela “sobrevivência dos mais aptos”, como a seleção natural poderia explicar a evolução do elaborado arranjo das plumas multicoloridas da cauda dos pavões?

O excesso de cores, formas e materiais dessa magnífica cauda, que mais parece um traje carnavalesco (figura 6), dificilmente pode ser atribuído a um processo tão econômico quanto a seleção natural. De fato, ao invés de promover a sobrevivência, tal estrutura parece ser um fardo, que torna os pavões

machos mais suscetíveis à ação dos predadores. E é evidente que isso não precisa ser assim, já que o ‘traje’ das fêmeas dos pavões é tão conservador quanto os das senhoras vitorianas.

Em 1871, Darwin publicou um enorme tratado denominado *A origem do homem e a seleção em relação ao sexo*, no qual reconheceu que a evolução de muitas das diferenças entre machos e fêmeas (chamadas de características sexuais secundárias) só poderia ser explicada por um processo de seleção que privilegiasse o sucesso reprodutivo, mesmo que isso acarretasse certo custo em termos de sobrevivência. Para descrever esse processo, Darwin criou o termo ‘seleção sexual’.

Ele notou que em muitas espécies ocorre competição entre machos, na disputa por fêmeas reprodutivas, e que alguns poucos machos monopolizam grande parte das oportunidades de reprodução, enquanto os outros têm poucos filhos ou até morrem virgens. Assim, qualquer característica fisiológica, morfológica ou comportamental que aumentasse a probabilidade de sucesso no conflito entre ▶



Figura 6. A majestosa cauda dos pavões seria uma espécie de ‘propaganda genética’: as maiores e mais bonitas indicariam que seus donos têm os genes que garantem melhor proteção contra parasitas

Figura 7. Características sexuais secundárias como os chifres dos veados (OU as presas dos elefantes/ OU as grandes pinças dos caranguejos) também funcionariam como uma demonstração do melhor potencial genético de seu portador



machos seria selecionada. Para Darwin, esse processo explicaria, por exemplo, porque machos são em geral maiores e mais fortes que as fêmeas e possuem estruturas poderosas usadas como verdadeiras armas em combates físicos com outros machos (como os chifres dos veados, as grandes presas dos elefantes e as fortes patas dos caranguejos) (figura 7).

Darwin percebeu ainda que em muitas espécies o poder de escolher o parceiro reprodutivo está com as fêmeas. Nesse caso, os melhores machos seriam aqueles com mecanismos de sedução desenvolvidos. Isso explicaria, por exemplo, a evolução de cantos, danças e exibições altamente elaboradas dos comportamentos de corte de muitas espécies, assim como o aparecimento das majestosas plumas dos pavões.

Em 1982, com a publicação do artigo de William Hamilton (e de sua então aluna de pós-graduação Marlene Zuk), os parasitas ‘infectaram’ o cenário dos debates sobre seleção sexual e evolução de características sexuais secundárias. No mundo da Rainha Vermelha, no qual os parasitas estão a poucos passos evolutivos atrás dos hospedeiros, acasalamento é coisa séria. Como em geral as fêmeas investem mais recursos na prole que os machos e dedicam mais tempo ao cuidado das crias, espera-se que sejam extremamente cuidadosas na escolha dos parceiros reprodutivos, pois uma má escolha pode comprometer de maneira vital a sobrevivência de seus filhos.

Acredita-se, portanto, que as fêmeas, ao decidir com quem se acasalar, buscam sinais que evidenciem a presença de ‘bons genes’ contra parasitas, para aumentar as chances de que seus filhos adquiram essas defesas. Ao mesmo tempo, espera-se que machos possuidores de bons genes façam ‘propaganda’ disso. Assim, cores vistosas (figura 8), exibições atléticas prolongadas e cantos elaborados podem ser vistos como ‘propagandas genéticas’ que sinalizam as qualidades relativas entre potenciais parceiros reprodutivos. Além disso, os combates entre machos e a evolução de muitas outras caracte-



rísticas sexuais, como os chifres dos alces, seriam uma forma de ordenar os machos quanto às suas qualidades genéticas antiparasitas.

Nesse mercado reprodutivo competitivo, porém, pode-se esperar que nem todos os machos sejam honestos quanto às suas qualidades. A tentação de produzir adornos um pouquinho mais elaborados do que o vizinho, mesmo sem ter bons genes, é muito grande. Isso leva ao surgimento de propagandas não-fidedignas. Para que isso não ocorra, segundo o evolucionista israelense Amotz Zahavi, da Universidade de Tel-Aviv, as características sexuais secundárias têm que ser custosas, de modo que apenas indivíduos com genes realmente bons possam produzi-las. Em outras palavras, se o custo da mentira é grande, não vale a pena mentir. É interessante notar que enquanto Darwin considera o custo das características sexuais secundárias um subproduto não-desejável da seleção sexual, a teoria da Rainha Vermelha vê em tal custo uma condição essencial para o funcionamento do modelo.

Essa nova teoria também resolveu um antigo problema dos modelos de seleção sexual baseados em vantagens genéticas, identificado em 1930 pelo geneticista norte-americano Ronald Fisher (1890-1962). Se há genes ‘bons’, e se as fêmeas preferem se acasalar com os machos que os possuem, tais genes tenderiam a se espalhar na população e a se fixar rapidamente, e as fêmeas não conseguiriam mais fazer essa escolha. Assim, como as vantagens genéticas seriam mantidas

Figura 8. O colorido dos pássaros, em geral nos machos, e até os cantos mais elaborados seriam maneiras de atrair o interesse das fêmeas e garantir o sucesso reprodutivo



através das gerações, levando à seleção de características tão elaboradas como a cauda dos pavões?

A dinâmica coevolutiva entre hospedeiros e parasitas foi o truque que Hamilton usou para contornar o problema. Para ele, as fêmeas sempre procuram se acasalar com o melhor genótipo da população, mas no mundo da Rainha Vermelha a seleção depende de frequência, e os genes que conferem resistência aos parasitas de hoje provavelmente não serão os melhores para as pressões de amanhã. Ou seja, o que é 'bom' muda continuamente. Esse ambiente teórico admite ciclos coevolutivos longos, que permitem o desenvolvimento de características sexuais secundárias elaboradas.

Diversos estudos recentes, de campo e de laboratório, têm verificado algumas previsões da teoria da Rainha Vermelha. Em andorinhas (*Hirundo rustica*), machos parasitados por carrapatos têm caudas mais curtas do que machos não-infectados, e as fêmeas preferem acasalar-se com machos com caudas longas. Além disso, um interessante experimento trocou a metade dos ovos entre ninhos e revelou que a carga de parasitas dos filhos é mais relacionada com a carga de parasitas dos pais genéticos do que com a dos 'padrastos'. Isso revela que a resistência aos parasitas é hereditária, um dos fatores-chave para a teoria de Hamilton e Zuk funcionar.

Em galinhas selvagens (*Gallus gallus*), descobriu-se que galos não-parasitados têm cristas mais desenvolvidas do que galos contaminados por vermes intestinais, e que a preferência de acasalamento das galinhas está mais associada às cristas do que ao tamanho do corpo do galo. No peixe barrigudinho (*Poecilia reticulata*), machos mais parasitados exibem o comportamento de corte com menos frequência. Com isso, as fêmeas tendem a se acasalar

com os menos parasitados. Machos de pererecas (*Hyla versicolor*) parasitadas por vermes helmintos emitem menos chamados de corte e têm baixo sucesso repro-

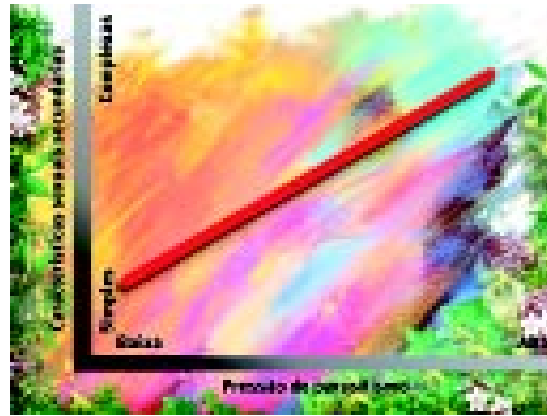


Figura 9. A teoria da Rainha Vermelha prevê que espécies submetidas, durante sua história evolutiva, a alta pressão de parasitismo deveriam ter características sexuais secundárias mais complexas. Se isso não for verdade, a teoria é posta em xeque

duativo. A relação entre parasitismo e menor sucesso reprodutivo também foi confirmada em moscas-das-frutas (*Drosophila testacea*).

O teste mais difícil que a teoria da Rainha Vermelha enfrentou talvez tenha sido o chamado teste da previsão interespecífica. Segundo a teoria, espécies submetidas durante sua história evolutiva a uma maior pressão de parasitas deveriam exibir características sexuais secundárias mais elaboradas (figura 9). Para testar tal hipótese, Hamilton e Zuk cruzaram dois tipos de dados. Marlene Zuk ordenou as espécies de aves norte-americanas em função do grau de desenvolvimento de características sexuais secundárias. Aves com colorações ultra-elaboradas, como *Piranga olivacea* (da família dos tangarás) ganharam nota 6, enquanto pássaros monocromáticos receberam nota 1. Ao mesmo tempo, Hamilton pesquisou a bibliografia veterinária e zoológica para calcular um índice da pressão de parasitas (causadores de infecções sanguíneas crônicas) para cada uma dessas espécies. Se a teoria estivesse correta, aquelas com penas mais coloridas e elaboradas deveriam ter mais parasitas. E foi exatamente isso que eles encontraram.

A teoria resiste às provas

A existência do sexo tem desafiado a mente de grandes evolucionistas desde o século passado. Grande número de hipóteses foram propostas tentando identificar o principal benefício da reprodução sexuada. Muitas obtiveram certa popularidade por algum tempo, mas depois foram deixadas de lado. Outras foram revistas e voltaram ao cenário científico após terem sido quase esquecidas.

A teoria da Rainha Vermelha, desde sua apresentação, foi inúmeras vezes desafiada, o que é demonstrado pelo grande número de trabalhos já publicados a seu respeito. No entanto, ao que tudo indica, a Rainha Vermelha, assim como Alice, continuam correndo à frente de seus adversários. ■

Sugestões para leitura

- CRONIN, H. *A formiga e o pavão – Altruísmo e seleção natural*, Papirus, São Paulo, 1995.
- DARWIN, C. A *origem do homem e a seleção sexual*, Hemus, São Paulo, 1974.
- HAMILTON, W. W. 'Heritable true fitness and bright birds: a role for parasites', *in Science*, v. 218, p. 384, 1982.
- RIDLEY, M. *The red queen*, Penguin Books, Londres, 1994.

