



Deriva genética: a aleatoriedade no processo evolutivo

Janaina Lima de Oliveira¹, Iderval S. Sobrinho-Júnior²

¹ Doutoranda, University of Bath, Department of Biology & Biochemistry, Bath, Reino Unido

² Universidade Federal de Jataí, Campus Jatobá, Unidade Acadêmica Especial de Biociência, Jataí, GO

Autor para correspondência - janajpb2@gmail.com

Palavras-chave: deriva genética, evolução não-adaptativa, erros amostrais, aleatoriedade



A seleção natural foi o primeiro mecanismo proposto para explicar satisfatoriamente a evolução biológica. Entretanto, ela não é suficiente para explicar a existência de toda a diversidade que encontramos na natureza. Algumas características observadas nos seres vivos podem ter-se tornado mais frequentes, ou mais raras, por simples acaso, através de um processo denominado deriva genética.

A seleção natural proposta por Charles Darwin em sua maior obra, *A Origem das Espécies* (1859), foi, sem dúvida, um marco para as ciências naturais por propor um mecanismo eficaz para explicar o surgimento e a transformação de toda a diversidade biológica. Por meio desse mecanismo evolutivo, os organismos com alguma vantagem contribuem com mais indivíduos para a próxima geração, de forma que, ao longo do tempo, substituem indivíduos menos aptos. A evolução por seleção natural sustenta-se até a atualidade como o único processo evolutivo capaz de gerar adaptações.

No entanto, evolução não é sinônimo de adaptação, pois, mudanças evolutivas (isto é, descendência com modificação) nem sempre são resultado da seleção natural e podem acontecer independente do seu efeito ser benéfico ou maléfico para o indivíduo. Como exemplo, temos a produção da vitamina C que ocorre na maioria dos animais, mas foi perdida em algumas linhagens de vertebrados, incluindo aquela à qual pertencem os humanos. O que explicaria essa perda da síntese de um composto tão importante? Existe algum outro fator evolutivo além da seleção natural que poderia explicar tal fenômeno?

A EVOLUÇÃO RESULTANTE DO ACASO

Seria possível que **alelos** extremamente vantajosos fossem eliminados da população, mesmo trazendo uma grande vantagem ao indivíduo que os possuísse? Ou, em caso extremo, que uma mutação deletéria aumentasse em frequência até que se tornasse a única versão do gene na população? Analisando essas questões sob o ponto de vista da evolução por seleção natural, a resposta seria negativa, pois a Seleção agiria em favor da mutação vantajosa, no primeiro caso, e contra a mutação desvantajosa, no segundo. No entanto, a resposta correta seria que sim (e com frequência). Para entender como isso acontece, precisamos primeiro esclarecer um ponto: é verdade que esses cenários não seriam explicados pela seleção natural, mas ela não é a única força evolutiva existente. A deriva genética (WRIGHT, 1931), caracterizada principalmente por mudanças aleatórias no conjunto genético de uma população ao lon-

go das gerações, não só é capaz de provocar mudanças evolutivas, mas de se sobrepor à seleção natural em alguns cenários, como veremos a seguir.

MAS O QUE SERIA A DERIVA GENÉTICA?

O conceito de deriva genética pode ser compreendido por uma abordagem que se refere à estatística, o que para alguns alunos dificulta a compreensão desse importante fator evolutivo. Para tentar contornar esse problema e ilustrar o processo, criamos aqui uma situação hipotética.

Imagine que uma grande empresa mantém um jardim de plantas para fins de venda e que ela cultiva três raras variedades de girassóis: azuis, lilases e roxos. Já que a variedade lilás é um pouco mais comum que as outras duas, a empresa adotou a seguinte norma para evitar um viés de venda: em cada lote vendido, metade deve ser composta por girassóis lilases (1/2), e a outra metade igualmente dividida entre girassóis azuis (1/4) e roxos (1/4).

Para a inauguração do Jardim Botânico Municipal, a prefeitura comprou 200 plantas desse fornecedor para iniciar uma população de girassóis. Com o intuito de manter a população, todas as sementes produzidas por cada uma das plantas eram primeiramente coletadas e juntas em um saco, a partir do qual uma amostra de 200 sementes era retirada de forma aleatória para ser semeada e formar a próxima geração. Ou seja, ao longo do processo não havia seleção de qualquer uma das variedades em particular, de modo que algumas plantas poderiam contribuir com mais sementes, outras com menos, ou até mesmo não haver sementes de certa variedade. Esse manejo garantia um tamanho populacional constante de 200 plantas no Jardim Botânico, pois cada girassol floresce apenas uma única vez ao ano, morrendo após a reprodução. Dessa forma, a população recém-formada será sempre composta por novos indivíduos anualmente.

Em paralelo, um frequentador do Jardim Botânico Municipal ficou encantado com os girassóis e resolveu comprar daquela mesma empresa apenas 20 plantas e iniciar uma pequena população. Consciente de que seu



Alelos são diferentes formas ou variantes de um gene.

O **genótipo** é o conjunto de alelos que um indivíduo possui.

pequeno terreno é suficiente para manter apenas 20 girassóis em condições apropriadas, ele manteve esse tamanho populacional constante, adotando o mesmo processo de escolha aleatória das sementes produzidas para formar cada nova geração. Assim, o processo de criação adotado foi o mesmo do Jardim Botânico Municipal, mas em uma escala 10 vezes menor.

Anos mais tarde, essas variedades ganharam prêmios em exposições importantes, aumentando o interesse por elas. A empresa logo anunciou que dispunha das três variedades, mas que era parte de sua política interna vender apenas lotes com proporções específicas dos três tipos de girassóis, garantindo que essa estratégia vinha sendo mantida com sucesso nos últimos anos.

Com essa informação, o Jardim Botânico Municipal fez um censo da população em seu jardim e descobriu que dos 200 girassóis da geração atual, aproximadamente 100 indivíduos da população eram de coloração lilás, 50 de coloração azul e as outras 50 eram de flores roxas. Certo de que encontraria o mesmo, o pequeno produtor realizou a contagem dos 20 indivíduos e encontrou um resultado surpreendente: todos os girassóis eram da variedade azul. Supondo que poderia ter sido um engano, ele comparou seus dados com fotografias detalhadas de seu jardim original e se certificou de que de fato a população inicial era composta pelas três variedades nas proporções anunciadas pela empresa (1/2 lilases, 1/4 azuis e 1/4 roxas).

Seu filho, um pesquisador da área de Genética de Populações, explicou-lhe que o resultado foi devido à ação da deriva genética, pois aquela era uma espécie **diploide** e por isso muitas características do organismo são o resultado da ação conjunta dos dois alelos que o indivíduo carrega para determinados genes. No caso desses girassóis, a característica em questão é a cor da flor, e as cores são produzidas pela interação entre os alelos $G1$ e $G2$. As flores roxas seriam produzidas por plantas com duas cópias do alelo $G1$ ($G1G1$) enquanto que as azuis são produzidas pelas plantas $G2G2$ e as lilases seriam produzidas pela interação entre as duas cópias diferentes, $G1G2$.

Diploides são organismos que possuem duas cópias de cada cromossomo em suas células somáticas (ou seja, não reprodutivas).

O filho ainda explica que uma forma de registrar as mudanças populacionais é através do acompanhamento das frequências dos alelos ao longo das gerações. Então, ao preparar a nova geração pela escolha aleatória de sementes, uma determinada variedade de girassol poderia ter uma representação maior ou menor do que as outras, simplesmente por um desvio no momento da amostragem. Tal acontecimento ocorre porque o tamanho da população é limitado e esses desvios na amostragem podem acontecer. Por exemplo, se durante a coleta o jardineiro recolher, apenas por acaso, mais sementes de flores azuis com **genótipo** $G2G2$, na próxima geração existirão mais alelos $G2$ em relação ao outro alelo. Nesse caso, falamos que sua frequência aumentou e a do outro diminuiu. Como a amostra de sementes é finita e aleatória, na próxima geração nada garantirá que serão escolhidas mais plantas com flores azuis, podendo ocorrer uma amostragem em outra direção, com mais sementes com alelos $G1$, provocando o aumento da frequência desse alelo e a diminuição da frequência do outro. Para visualizar melhor esse processo, considera-se a possibilidade de se poder enxergar a frequência dos alelos $G1$ e $G2$ ao longo das gerações das populações do Jardim Botânico Municipal e do pequeno produtor, como mostrado na Figura 1. Assim, a frequência dos alelos flutua de modo aleatório, e é justamente essa variação aleatória na frequência dos alelos em uma população, provocada por um erro na amostragem desses alelos para comporem a próxima geração, que chamamos de deriva genética.

OS EFEITOS DA DERIVA GENÉTICA

Qual seria a explicação para terem sobrado apenas as plantas com flores azuis no lote do pequeno produtor, enquanto que no Jardim Botânico Municipal ainda existiam as três variedades? Em nosso exemplo, o pequeno produtor esperava obter as mesmas proporções de variedades de girassol de quando ele havia comprado da grande empresa de jardinagem. Entretanto, conforme observamos anteriormente, a cada lote novo de sementes coletadas para gerar a próxima geração, ocorreu um desvio dessa proporção. Isso explica

as mudanças nas frequências alélicas ao longo do tempo. Mas, por que de modo mais intenso no jardim pequeno?

Para entender por que isso acontece, basta imaginar que uma planta azul (G_2G_2) seja amostrada a mais no lugar de uma roxa (G_1G_1) nas duas populações. Na pequena, isso vai resultar em 22 alelos G_2 , e 18 alelos G_1 para a próxima geração; ou seja, a frequência do alelo G_2 : $f(G_2) = 22/40 = 0,55$ e do alelo G_1 : $f(G_1) = 18/40 = 0,45$. Na população grande, por outro lado, essa mesma alteração resultará em $f(G_2) = 202/400 =$

$0,505$ e $f(G_1) = 198/400 = 0,495$. Como pode-se perceber, o desvio causado por uma pequena alteração na amostragem de indivíduos acarreta mudanças de dimensões muito diferentes nas duas populações: enquanto resulta em um desvio considerável nas frequências alélicas da população pequena, não tem praticamente efeito algum na população grande. Percebe-se, então, que a deriva genética é dependente do tamanho da população, sendo mais intensa em populações menores, em que são maiores os desvios na amostragem dos alelos que comporão a próxima geração.

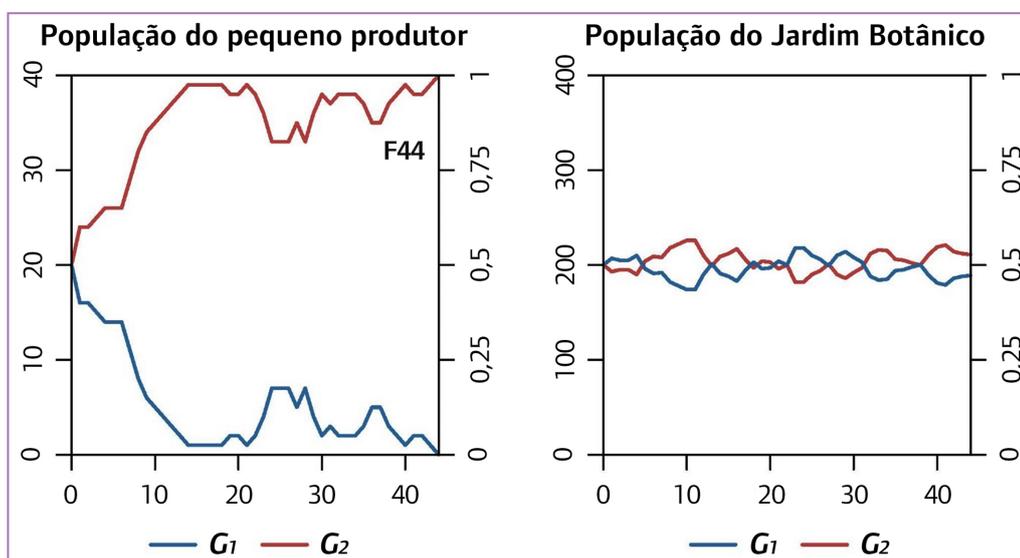


Figura 1. Alterações nas frequências alélicas ocorridas a cada geração nos dois jardins. Os eixos verticais da esquerda e da direita representam o número e a frequência dos alelos, respectivamente, em cada população. O eixo x representa as gerações, sendo 0 os parentais (provenientes da empresa). Observe que após 44 gerações (F44) o alelo G_2 foi fixado (vermelho) enquanto o alelo G_1 (azul) foi perdido na população menor, mas se mantiveram em frequências aproximadamente iguais no Jardim Botânico Municipal após esse mesmo período.

Como observado na Figura 1, pode acontecer de essas mudanças nas frequências dos alelos culminarem no desaparecimento de um deles na população. Nessa situação, ocorre a PERDA de um alelo, enquanto o outro alcança a frequência de 100%, o que chamamos de FIXAÇÃO de alelo. No caso de nosso pequeno produtor, o alelo G_2 foi fixado na população de seu jardim, daí somente seriam produzidas plantas G_2G_2 com flores azuis. Nesse estágio, a variabilidade genética nesse **lôcus** foi perdida nessa população, sendo observado apenas o alelo G_2 .

como mostrado na Figura 2. Ou seja, é o equivalente a mil outros pequenos produtores e mil outras prefeituras realizando aquele procedimento que descrevemos. A primeira parte da figura nos mostra que a fixação de um dos alelos acontece nos dois tamanhos populacionais (Figura 2A). Nas menores, no entanto, isso ocorre muito mais rápido: em no máximo 526 gerações acontece a fixação de um dos alelos (observe o eixo horizontal do primeiro histograma), enquanto apenas ~25% das populações grandes fixaram um dos alelos após esse mesmo período. Nos grupos maiores isso também ocorre, embora possa levar até mais de 6000 gerações (eixo horizontal do segundo histograma).

Lôcus é uma posição em um cromossomo que é ocupada por um dado gene ou um de seus alelos.

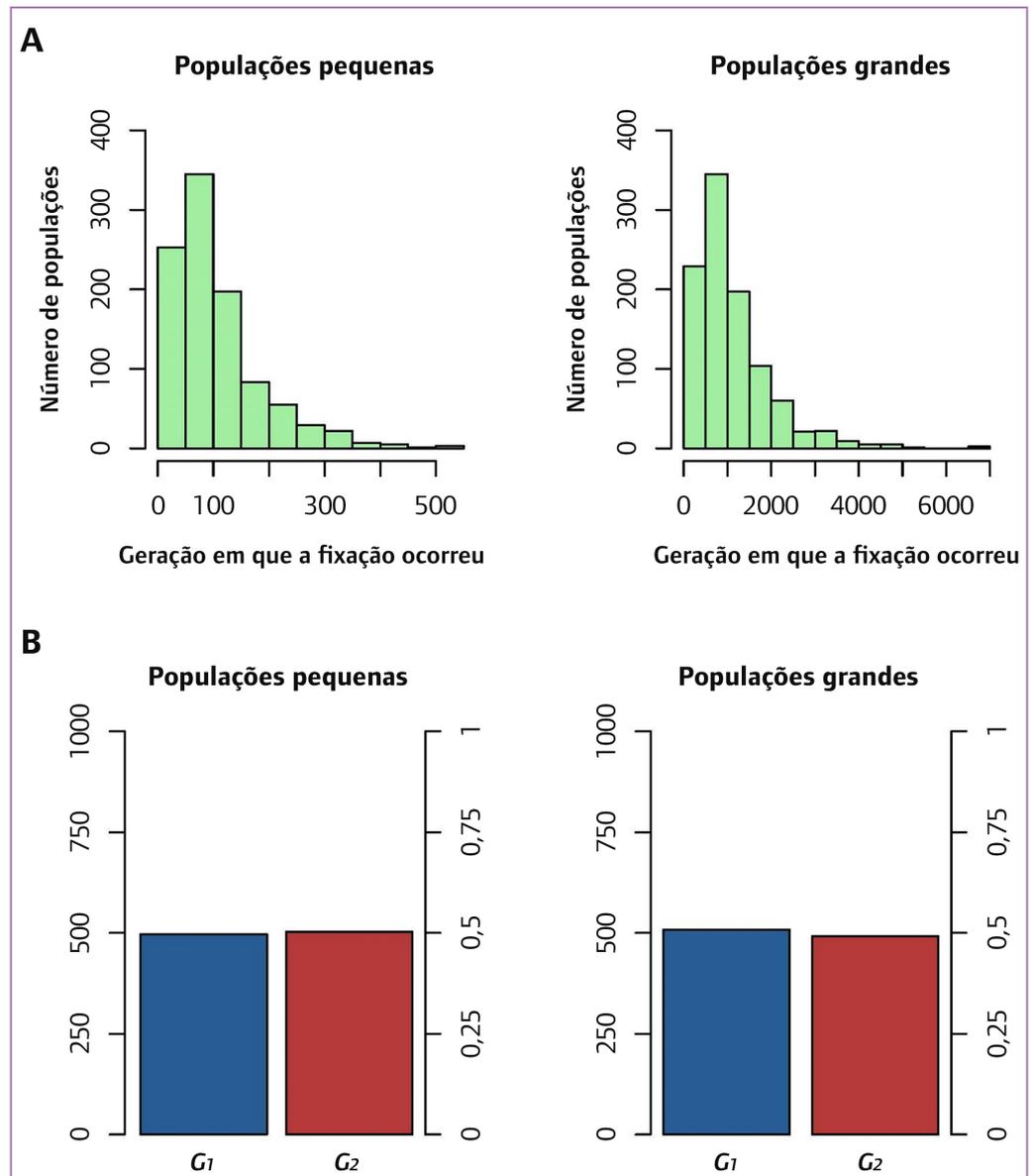


Figura 2.

Resultados de 1000 réplicas de cada experimento – populações de pequenos produtores (esquerda) e em grandes jardins (direita). **A)** O eixo vertical dos histogramas representa o número de jardins (réplicas) em que um dos alelos foi fixado na geração x. Note que o máximo de gerações para populações pequenas é pouco mais de 500, enquanto em populações grandes, chega a mais de 6000. **B)** O número e a proporção de casos em que G1 é o que foi o alelo fixado (azul), e o mesmo para o alelo G2 (vermelho).

Ainda, pode-se perguntar: o alelo G2 foi fixado por ele conferir alguma vantagem para a planta? Existiu, nesse caso, alguma preferência por um dos alelos? A segunda parte da figura nos mostra que tanto nas populações pequenas quanto nas grandes, o alelo G1 foi fixado em torno de metade dos casos (os desvios observados para mais ou menos 0,5 não são significativos), enquanto G2 é que se fixou na outra metade. Isso demonstra que, embora no experimento original do pequeno produtor o alelo fixado tenha sido o G2, poderia igualmente ter sido o G1, pois não há uma escolha por um dos alelos – isso

acontece apenas por acaso. Ou seja, é como se fosse jogada uma moeda para o alto uma vez e o resultado fosse “cara”. Não significa que há algum tipo de seleção para o “alelo cara”: as probabilidades para cada lado são iguais. Se repetíssemos esse experimento 1000 vezes, em aproximadamente metade dos casos, observaríamos esse resultado, e na outra metade, o “alelo coroa”. A partir disso, percebemos que mesmo na ausência de seleção natural, a composição genética das populações pode ser alterada ao longo das gerações devido a outra força evolutiva – a deriva genética.

A partir desse exemplo podemos resumir algumas das propriedades da deriva genética:

- ♦ Ela é uma força evolutiva inversamente proporcional ao tamanho populacional. Tanto no exemplo original quanto nas réplicas, os efeitos da Deriva foram muito mais intensos nas populações pequenas, conforme pode ser observado pela quantidade de gerações decorridas até que um dos alelos se fixasse;
- ♦ A deriva genética promove a fixação e perda aleatória dos alelos;
- ♦ Ela leva à perda da variabilidade genética dentro de uma população: após o evento de fixação, apenas um dos alelos será encontrado naquele grupo.

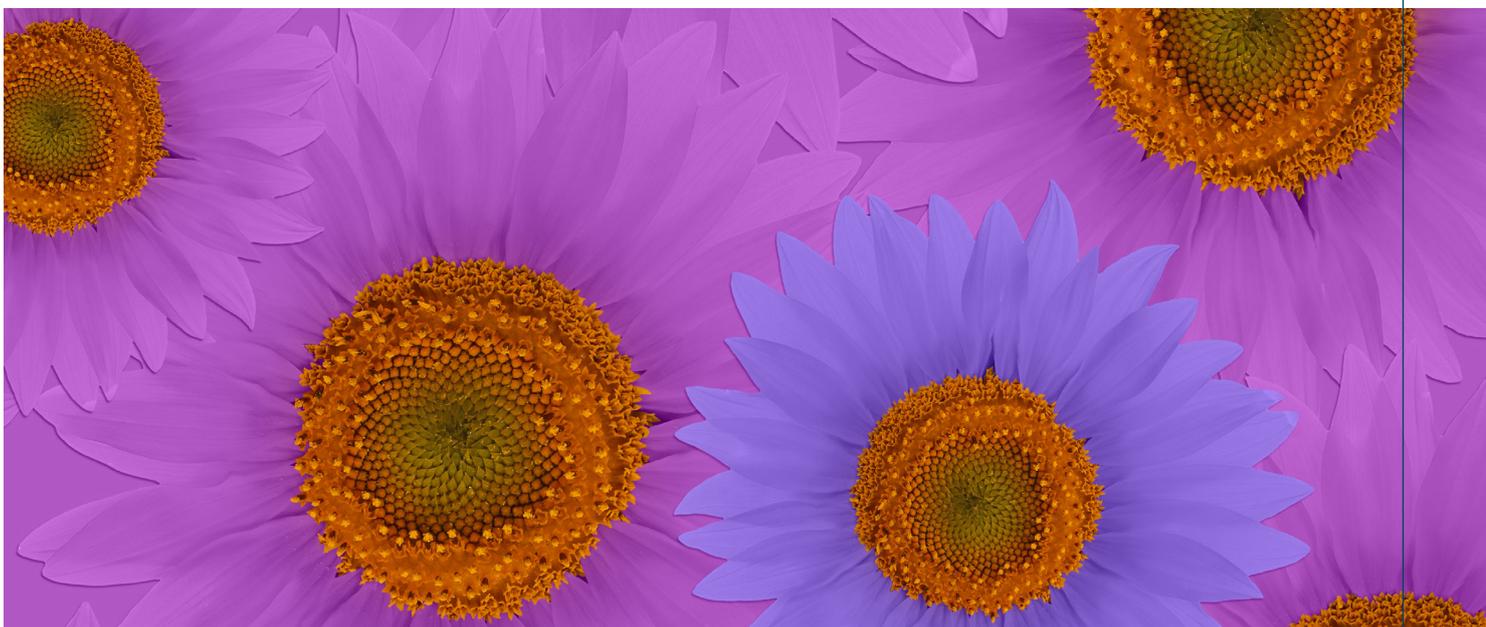
DERIVA GENÉTICA VERSUS SELEÇÃO NATURAL

Agora que entendemos a deriva genética como uma força evolutiva, nossa discussão dirige-se, quase que inevitavelmente, a traçar um paralelo com um outro fator evolutivo: – a seleção natural. Ou seja, qual das duas terá maior importância em moldar a variação genética no processo evolutivo? Esse é um debate que data desde a proposta da Síntese Moderna, nas décadas de 1930-40, quando a deriva genética foi inicialmente proposta por Sewall Wright (1889-1988). Este encontrou grande oposição principalmente por parte de Ronald Fisher (1890-1962), que defendia que alterações na composição genética devi-

do a erros aleatórios eram mínimas, e o processo evolutivo era majoritariamente resultado da seleção natural. No entanto, anos de pesquisa têm ajudado a elucidar a questão. Atualmente, certo consenso foi alcançado: quanto menor a população, maior será a influência da deriva genética, enquanto o poder de atuação da seleção natural aumenta gradativamente com o aumento da população. Isso acontece porque os desvios aleatórios na contribuição dos alelos para a formação de cada geração podem ser tão elevados em pequenas populações que mesmo alelos vantajosos correm o risco de ser perdidos. Isso nos leva à conclusão de que nem toda variação encontrada nos indivíduos de uma população é adaptativa, já que parte dela pode ter sido fixada pela deriva genética.

A DERIVA GENÉTICA NA EVOLUÇÃO HUMANA

O ácido ascórbico, mais conhecido como vitamina C, é um composto essencial para o bom funcionamento celular e de todo o organismo, participando da síntese de diferentes compostos celulares, como o colágeno, além de atuar como antioxidante, protegendo as células contra danos oxidativos e infecções. Tamanha a sua importância em humanos, a deficiência desse composto leva ao desenvolvimento de escorbuto, caracterizada por hemorragias, alterações cutâneas e pode levar à morte (MANELA-AZULAY et al, 2003).



Ao contrário de outros organismos, tais como algumas espécies de peixes, aves e mesmo outros mamíferos, nós não temos a capacidade de sintetizar vitamina C, e por isso temos que obtê-la por meio da alimentação. Isso acontece porque a nossa versão do gene *GLO*, que codifica uma enzima envolvida no último passo da produção de vitamina C nesses outros organismos (L-gulono-1,4-lactona oxidase), contém muitas mutações deletérias e, portanto, não codifica uma proteína funcional (DROUIN et al, 2011). Mas, como é possível que ao longo da evolução um gene/proteína tão importante tenha se tornado inativo?

Investigações em vários grupos de organismos demonstraram que, além da linhagem dos primatas antropóides (que inclui, dentre outras espécies, orangotangos, gorilas e humanos), outros grupos de vertebrados também perderam essa enzima – incluindo alguns peixes, aves e mamíferos, como o porquinho-da-índia. A explicação para esse fenômeno é que todas essas espécies têm uma dieta rica em vitamina C, ingerindo até 100 vezes mais que o consumo diário necessário. Assim, a pressão da seleção natural sobre o gene *GLO* diminuiu nessas linhagens, pois tanto indivíduos com a versão normal do gene quanto os mutantes com a versão inativa eram capazes de obter, de uma forma ou de outra, a quantidade necessária de ácido ascórbico e sobreviver (DROUIN et al, 2011). Ou seja, a capacidade de produzir

vitamina C, passou a ser um caráter neutro nessas linhagens, evoluindo sob deriva genética, o que resultou na perda de função do gene *GLO*.

Esse exemplo nos mostra que nem todas as características dos organismos são adaptativas, podendo ter evoluído por deriva genética. Dessa forma, a evolução dos seres vivos é melhor compreendida quando consideramos a influência do ambiente e as ações conjuntas da deriva genética e seleção natural sobre os indivíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (JLO projeto 234216/2014-0).

REFERÊNCIAS

- DARWIN, C. *A Origem das Espécies*. Tradução: C. Duarte e A. Duarte. São Paulo: Ed. Martin Claret, 2014 [1859].
- DROUIN, G.; GODIN, J. R.; PAGÉ, B. The genetics of vitamin C loss in vertebrates. *Current Genomics*, v.12, p.371-378, 2011.
- MANUELA-AZULAY, M.; MANDARIM-DE-LACERDA, C. A.; PEREZ, M. A.; FILGUEIRA, A. L.; CUZZI, T. Vitamina C. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, v.78, p.265-274, 2003.
- WRIGHT, S. Evolution in Mendelian populations. *Genetics*, v.16, p.97-159, 1931.

