

# Seleção e efeito das mudanças climáticas na diversidade genética\*

Liliana Ballesteros-Mejia<sup>1,2</sup>, Rosane Garcia Collevatti<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Genética & Biodiversidade, ICB, Universidade Federal de Goiás (UFG) Cx.P. 131, 74001-970, Goiânia

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, ICB, Universidade Federal de Goiás (UFG), Cx.P. 131, 74001-970, Goiânia

Autor para correspondência: rosanegc68@hotmail.com

**Palavras-chave:** frequência de alelos, simulação de experimento, ensino da genética da conservação

Essa atividade busca auxiliar no ensino de Genética da Conservação demonstrando como uma metodologia baseada em estudos genéticos pode ser utilizada para avaliar quais populações de uma determinada espécie (ou mais de uma espécie) estão sendo ou serão afetadas por mudanças climáticas. A atividade pode ser utilizada como simulação de aula prática ou como uma atividade complementar a aula expositiva para alunos de ensino superior.

\* Material didático desenvolvido na disciplina de Genética da Conservação, coordenado pela Profa. Rosane Garcia Collevatti, do curso de graduação em Ecologia e Análise Ambiental do Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Goiás, como uma atividade de Docência (bolsista CAPES/UFG, Ciência sem Fronteiras) do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Evolução.

## FUNÇÃO PEDAGÓGICA

A atividade proposta tem como função principal mostrar como estudos genéticos fornecem informações importantes sobre as respostas das espécies às mudanças climáticas. Para tal fim, os estudantes precisarão conhecer genes envolvidos na herança de determinadas características que podem potencialmente evoluir em resposta a mudanças climáticas. Além disso, precisam conhecer o tipo de herança da característica e o **coeficiente de seleção** para calcular as frequências alélicas ao longo do tempo. Estas frequências alélicas podem ser utilizadas, posteriormente, junto com os conceitos de **tempo de geração**, diversidade genética e mutação para avaliar se as espécies estão sendo afetadas por mudanças climáticas. Dessa forma, nesta atividade são trabalhados conceitos e métodos básicos de Genética da Conservação, Ecologia Molecular e Genética de Populações.

A longo da história da Terra o clima mudou muitas vezes levando os organismos a se adaptarem, a migrarem mudando sua distribuição geográfica ou a se extinguirem. Essas mudanças climáticas se referem às modificações significativas nas médias das variáveis climáticas, como temperatura e pluviosidade. Embora o clima tenha mudado várias vezes no passado, a velocidade dessas mudanças vem aumentando nas últimas décadas devido às atividades antrópicas. Por exemplo, nos últimos 100 anos (1880-2012) foi registrado um aumento aproximado na temperatura global de 0,85 °C. (STOCKER *et al.*, 2013).

A temperatura influencia nos processos metabólicos e bioquímicos de todos os seres vivos (COSSINS, 2011). Isto é particularmente crítico para os **animais ectotérmicos**, como os insetos, para os quais a temperatura ambiental tem um grande impacto na fisiologia. Animais ectotérmicos, como os insetos, são especialmente suscetíveis às mudanças climáticas porque não podem regular sua temperatura corporal, isso os converte em ótimos indicadores de efeitos de mudanças climáticas. As mudanças podem afetá-los de diferentes modos, por exemplo, alterando a temperatura ou umidade nas áreas de ocorrência da espécie, impedindo a manutenção das populações ou de diferentes estágios da

vida, por exemplo das larvas ou dos adultos. Se eles não conseguem se adaptar, podem se extinguir ou podem perder também alelos importantes de suas populações, reduzindo assim sua diversidade genética e sua capacidade de adaptação.

Infelizmente, muito pouco se sabe sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre os insetos e suas consequências genéticas específicas devido à falta de dados, apesar de eles desempenharem um papel ecológico muito importante ao nível de função de ecossistema, como, por exemplo, polinizadores, dispersores de sementes e predadores (GRIMALDI; ENGEL, 2005). Além disso, os insetos compreendem mais de 50% da biodiversidade total do planeta e devem seu sucesso (quantidade de espécies) à sua incrível capacidade de adaptação, resultante de uma longa evolução que permitiu surgir muitas adaptações e a conquista de vários nichos. O mais antigo registro fóssil de inseto remonta ao período Devoniano, há 407-396 milhões de anos (GRIMALDI; ENGEL, 2005).

## PROBLEMA PROPOSTO

Os organismos não se adaptam às alterações no ambiente à mesma taxa. Alguns se adaptam mais rapidamente que outros. Um aspecto importante na velocidade de adaptação é o tempo de geração das espécies. Organismos com tempo de geração mais curto têm maior chance de responder às mudanças no ambiente que organismos com tempo de geração mais longo pois mutações favoráveis podem se espalhar mais rapidamente na população.

No problema proposto nesta atividade, nós consideraremos duas espécies diferentes de Lepidoptera que apresentam tempos de geração diferentes. As duas espécies são adaptadas a uma temperatura ambiente média de 15 °C, porém possuem tempos de geração diferentes: a espécie A tem tempo de geração de 1 ano e a espécie B tem tempo de geração de 6 meses.

Em populações das duas espécies há um gene com **dominância completa** (F) que codifica para uma pouca quantidade de escamas escuras nas asas. O **alelo recessivo** (f) codifica para uma quantidade maior de es-

### Coeficiente de seleção

é uma medida da intensidade com que a seleção natural atua sob um genótipo ou fenótipo reduzindo a contribuição relativa do genótipo na geração seguinte (Ridley 2009).

### Tempo de geração

é o tempo médio desde o nascimento dos indivíduos de uma mesma geração até a idade em que podem se reproduzir.

**Animais ectotérmicos** são aqueles que dependem de fontes externas de calor para regular a sua temperatura corporal.

### Dominância completa

é a interação entre alelos na qual o indivíduo heterozigoto apresenta o mesmo fenótipo que o homozigoto dominante.

**Alelos** são as diferentes formas alternativas que um mesmo gene pode apresentar.

camas escuras nas asas. As escamas nas asas das mariposas desempenham um papel importante na regulação térmica, quanto mais escamas escuras melhor é a capacidade de absorver calor. Mas após um limite máximo de temperatura, algumas funções metabólicas param de funcionar.

Um pesquisador fez um estudo ao longo de várias décadas com populações de mariposas das espécies A e B. Como resultado, determinou a **frequência alélica** do alelo F nas populações, sendo para a espécie A,  $F_A = 0,01$ ,  $f_A = 0,99$ ; e para a espécie B,  $F_B = 0,03$ ;  $f_B = 0,97$ . Estimou também que para as duas espécies existia um coeficiente de seleção  $s = 0,10$  contra o genótipo recessivo ff, ou seja, indivíduos com maior quantidade de escamas escuras tinha uma sobrevivência média 10% reduzida em relação ao fenótipo dominante. O pesquisador verificou também uma tendência à diminuição na frequência de indivíduos com mais escamas escuras nas duas espécies de mariposas, A e B.

Ambas as espécies vivem na mesma área e, nos últimos anos, há uma tendência de aumento na temperatura média anual na região. A quantidade de escamas escuras está relacionada à temperatura. Em temperaturas mais baixas, mariposas mais escuras são favorecidas por terem maior quantidade de escamas escuras e, portanto, absorverem mais calor. Entretanto, em temperaturas mais altas, mariposas mais claras são favorecidas, pois absorvem menos calor.

O pesquisador quis determinar a resposta evolutiva das duas espécies às mudanças na temperatura estudando as mudanças nas frequências alélicas deste gene relacionado à quantidade de escamas. Para este fim, decidiu fazer uma simulação para prever o que acontecerá com as frequências alélicas e genotípicas das duas espécies ao longo das gerações futuras. Para isto, a primeira geração de simulação iniciou no ano de 2012 e os valores iniciais das frequências alélicas foram os mesmos que encontrou no seu estudo (espécie A,  $F_A = 0,01$ ,  $f_A = 0,99$ ; e para a espécie B,  $F_B = 0,03$ ;  $f_B = 0,97$ ). O valor do coeficiente de seleção foi mantido inalterado ao longo das gerações simuladas ( $s = 0,1$ ). As populações foram mantidas estacionárias, ou

seja, não se deslocavam de lugar, e o tamanho das populações também se manteve constante ao longo do estudo, para ambas as espécies, e igual a 1.500 indivíduos. O tempo de geração da espécie A foi considerado igual a 1 ano e, para espécie B, igual a 6 meses. Em cada geração simulada, as frequências alélicas ( $p'$ ) foram obtidas pela fórmula de Haldane (1924):

$$p' = p_0 / (1-s)^{q_0^2} \text{ e } q' = 1-p'$$

sendo:

$p'$  - a frequência alélica do alelo dominante F nas gerações posteriores,

$q'$  - a frequência alélica do alelo recessivo f nas gerações posteriores,

$p_0$  - a frequência alélica do alelo dominante F na geração inicial,

$q_0$  - a frequência alélica do alelo recessivo f na geração inicial,

$s$  - coeficiente de seleção contra o alelo f.

## INSTRUÇÕES PARA O PROFESSOR

1. Esta atividade poderá ser realizada individualmente, ou em grupos de alunos de, no máximo, quatro pessoas.
2. Cada grupo deverá receber o problema proposto, uma cópia do procedimento para realizar a atividade, uma cópia das tabelas e gráficos e das questões para serem discutidas.

É recomendável que o professor aplique esta atividade em turmas que já tiveram contato prévio com os conceitos de mudanças climáticas e diversidade genética.

## DISTRIBUIÇÃO DO MATERIAL AOS GRUPOS

Os recursos didáticos que deverão ser utilizados consistem em quatro painéis, conforme descrito a seguir e todos os grupos deverão receber uma cópia de cada painel:

1. **Painel 1** – Tabelas com as frequências dos alelos F e f por geração, para as espécies A e B, calculados a partir da simulação.

- Painel 2** – Tabela para determinar a mudança na frequência do genótipo recessivo  $ff$  no tempo, para as espécies A e B, calculados a partir da simulação.
- Painel 3** - Tabela para determinar a mudança na frequência do alelo recessivo  $f$  no tempo, a frequência do genótipo recessivo  $ff$  e o número de indivíduos com o fenótipo com maior número de escamas escuras, para as espécies A e B.
- Painel 4** – Gráficos da mudança na frequência do alelo recessivo  $f$  no tempo, para as espécies A e B.

## PROCEDIMENTO PARA OS ESTUDANTES

- Ler com atenção o problema proposto
- Analisar a Tabela 1 do Painel 1 que contém as frequências dos alelos  $F$  e  $f$  para diferentes gerações da espécie A, calculados a partir da simulação.
- Analisar a Tabela 2 do Painel 1 que contém as frequências dos alelos  $F$  e  $f$  para diferentes gerações da espécie B, calculados a partir da simulação.
- Baseado nas Tabelas 1 e 2 complete o Painel 2, para determinar a mudança na frequência do genótipo recessivo  $ff$ , sabendo que, sob seleção contra o genótipo recessivo a frequência genotípica é dada por:

$$\text{Frequência genotípica } (ff) = q^2(1-s)$$

Sendo:

$q^2$  - a frequência alélica do alelo recessivo  $f$  em cada geração,

$s$  - coeficiente de seleção contra o alelo  $f$ .

- Baseado nas Tabelas 1 e 2 e no Painel 2, complete o Painel 3, para determinar a mudança na frequência do alelo recessivo  $f$  no tempo, a frequência do genótipo recessivo  $ff$ , além do número de indivíduos com o fenótipo recessivo  $ff$  (maior número de escamas escuras) nas populações das duas espécies, sabendo que o número de indivíduos com o fenótipo ( $ff$ ) em cada geração é dado por:

$$\text{Fenótipo } ff = \text{Frequência genotípica } (ff) \times \text{número de indivíduos total na população}$$

- A partir dos dados do Painel 3 fazer os gráficos de mudança na frequência do alelo recessivo  $f$  ao longo das gerações.
- Discutir com os membros do grupo e responder as questões abaixo.
  - Se a temperatura continuar aumentando na região estudada onde as espécies habitam, qual será o fenótipo de mariposas mais prevalente após 100 anos?
  - Qual a consequência da mudança climática e seleção contra o fenótipo  $ff$  para a diversidade genética nas populações? As duas populações serão igualmente afetadas?
  - As duas espécies responderam igualmente à seleção na característica estudada? Qual das duas espécies será capaz de se adaptar mais rápido? Explique sua resposta.
  - O que aconteceria com a população se não houvesse uma mutação que codifica para menos escamas escuras?
  - De acordo com o suas respostas anteriores, qual a importância do tempo de geração, do tamanho populacional e da diversidade genética para uma espécie se adaptar às mudanças climáticas e qual a importância para a conservação das espécies?



**PAINEL 1**

Tabelas com as frequências dos alelos do gene F por geração, para as espécies A e B, calculadas a partir da simulação.

**Tabela 1.**  
Frequências alélicas (Freq) para a espécie A.

Geração	Freq (F)	Freq (f)	Geração	Freq (F)	Freq (f)
1	0.01109	0.98891	21	0.07884	0.92116
2	0.01229	0.98771	22	0.08615	0.91385
3	0.01362	0.98638	23	0.09400	0.90600
4	0.01508	0.98492	24	0.10241	0.89759
5	0.01670	0.98330	25	0.11138	0.88862
6	0.01849	0.98151	26	0.12093	0.87907
7	0.02046	0.97954	27	0.13106	0.86894
8	0.02264	0.97736	28	0.14176	0.85824
9	0.02503	0.97497	29	0.15303	0.84697
10	0.02766	0.97234	30	0.16486	0.83514
11	0.03054	0.96946	31	0.17722	0.82278
12	0.03371	0.96629	32	0.19009	0.80991
13	0.03718	0.96282	33	0.20343	0.79657
14	0.04098	0.95902	34	0.21721	0.78279
15	0.04513	0.95487	35	0.23139	0.76861
16	0.04966	0.95034	36	0.24592	0.75408
17	0.05459	0.94541	37	0.26075	0.73925
18	0.05995	0.94005	38	0.27582	0.72418
19	0.06576	0.93424	39	0.29109	0.70891
20	0.07205	0.92795	40	0.30649	0.69351

**Tabela 2.**  
Frequências alélicas (Freq) para a espécie B.

Geração	Freq (F)	Freq (f)	Geração	Freq (F)	Freq (f)	Geração	Freq (F)	Freq (f)
1	0.03312	0.9669	28	0.2883	0.71169	55	0.6364	0.363
2	0.03653	0.9635	29	0.3037	0.6963	56	0.6449	0.355
3	0.04027	0.9597	30	0.3191	0.6808	57	0.6531	0.346
4	0.04436	0.9556	31	0.3347	0.6653	58	0.6611	0.339
5	0.04881	0.9512	32	0.3502	0.6498	59	0.6688	0.3312
6	0.05367	0.9463	33	0.3656	0.6344	60	0.6762	0.3238
7	0.05895	0.9411	34	0.3809	0.6191	61	0.6834	0.3166
8	0.06467	0.9353	35	0.3961	0.6039	62	0.6903	0.3097
9	0.07088	0.9291	36	0.4111	0.5889	63	0.6970	0.3030
10	0.07757	0.9224	37	0.4259	0.5741	64	0.7034	0.2966
11	0.08478	0.9152	38	0.4404	0.5596	65	0.7097	0.2903
12	0.09254	0.9075	39	0.4546	0.5454	66	0.7157	0.2843
13	0.10084	0.8992	40	0.4686	0.5314	67	0.7215	0.2785
14	0.10971	0.8903	41	0.4822	0.5178	68	0.7272	0.2728
15	0.11915	0.8808	42	0.4955	0.5045	69	0.7326	0.2674
16	0.12918	0.8708	43	0.5084	0.4916	70	0.7379	0.2621
17	0.13978	0.8602	44	0.5210	0.4790	71	0.7430	0.2570
18	0.15095	0.84905	45	0.5332	0.4667	72	0.7479	0.2521
19	0.16268	0.83733	46	0.5451	0.455	73	0.7527	0.2473
20	0.1750	0.8251	47	0.5566	0.443	74	0.7574	0.2426
21	0.18772	0.81228	48	0.5678	0.432	75	0.7618	0.2381
22	0.20098	0.79902	49	0.5786	0.421	76	0.7662	0.2338
23	0.21469	0.78531	50	0.5891	0.411	77	0.7704	0.2296
24	0.22879	0.77120	51	0.5992	0.401	78	0.7745	0.2255
25	0.24326	0.75674	52	0.6089	0.391	79	0.7786	0.2215
26	0.2580	0.7419	53	0.6184	0.382	80	0.7823	0.2177
27	0.2731	0.72693	54	0.6276	0.372			

**PAINEL 2**

Tabela para determinar a mudança na frequência do genótipo recessivo  $ff$  no tempo, para as espécies A e B, calculados a partir da simulação.

Mês/Ano	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie A	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie B
02/2013		
02/2016		
02/2018		
07/2023		
02/2025		
07/2030		
02/2035		
05/2040		
02/2045		
05/2051		

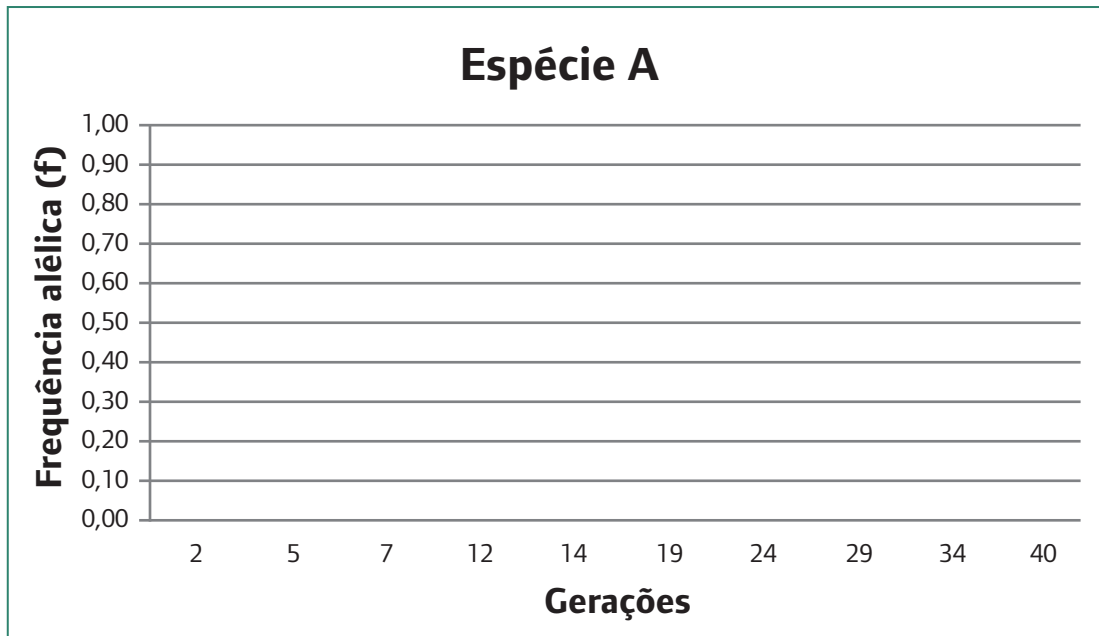
**PAINEL 3**

Tabela para determinar a mudança na frequências do alelo recessivo  $f$  no tempo, a frequência do genótipo recessivo  $ff$  e o número de indivíduos com o fenótipo com maior número de escamas, para as espécies A e B.

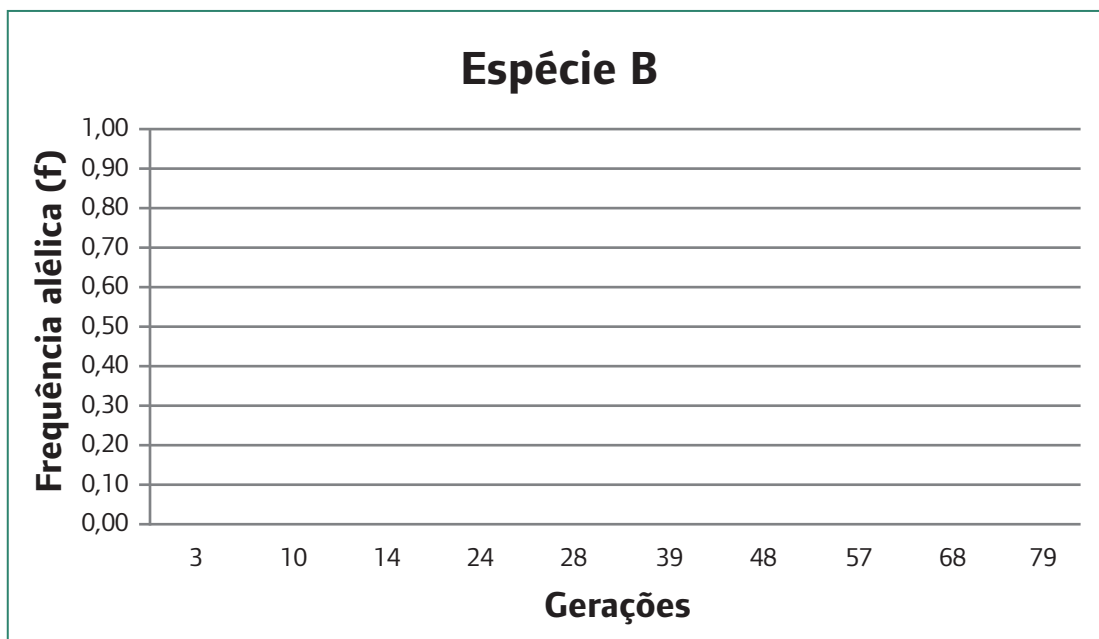
Mês/Ano	Frequência alélica ( $f$ ) Espécie A	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie A	Indivíduos mais escamas escuras	Número de gerações novas Espécie A	Frequência alélica ( $f$ ) Espécie B	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie B	Indivíduos mais escamas escuras	Número de gerações novas Espécie B
02/2013								
01/2016								
01/2018								
07/2023								
02/2025								
07/2030								
01/2035								
07/2040								
01/2045								
05/2051								

## PAINEL 4

Gráficos da mudança na frequência do alelo  $f$  no tempo



**Gráfico.**  
Espécie A.



**Gráfico.**  
Espécie B.

## RESPOSTAS

## PAINEL 2

Tabela para determinar a mudança na frequência do genótipo recessivo  $ff$  no tempo, para as espécies A e B.

Mês/Ano	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie A	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie B
02/2013	0.880	0.829
02/2016	0.870	0.766
02/2018	0.864	0.713
07/2023	0.840	0.535
02/2025	0.828	0.456
07/2030	0.786	0.282
02/2035	0.725	0.168
05/2040	0.646	0.108
02/2045	0.551	0.067
05/2051	0.433	0.044

## PAINEL 3

Tabela para determinar a mudança na frequência do alelo  $f$  no tempo, a frequência do genótipo recessivo  $ff$  e o número de indivíduos com o fenótipo com maior número de escamas, para as espécies A e B.

Mês/Ano	Frequência alélica ( $f$ ) Espécie A	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie A	Indivíduos mais escamas escuras	Número de gerações novas Espécie A	Frequência alélica ( $f$ ) Espécie B	Frequência genotípica ( $ff$ ) Espécie B	Indivíduos mais escamas escuras	Número de gerações novas Espécie B
02/2013	0.98771	0.880	1320	2	0.9597	0.829	1243	3
01/2016	0.9833	0.870	1305	5	0.9224	0.766	1149	10
01/2018	0.97954	0.864	1295	7	0.8903	0.713	1070	14
07/2023	0.96629	0.840	1261	12	0.7712	0.535	803	24
02/2025	0.95902	0.828	1242	14	0.71169	0.456	684	28
07/2030	0.93424	0.786	1178	19	0.5596	0.282	423	38
01/2035	0.89759	0.725	1088	24	0.432	0.168	252	48
07/2040	0.84697	0.646	968	29	0.346	0.108	162	57
01/2045	0.78279	0.551	827	34	0.2728	0.067	100	68
05/2051	0.69351	0.433	649	40	0.2215	0.044	66	79

## PAINEL 4

Gráficos da mudança na frequência do alelo recessivo  $f$  no tempo, para as espécies A e B.

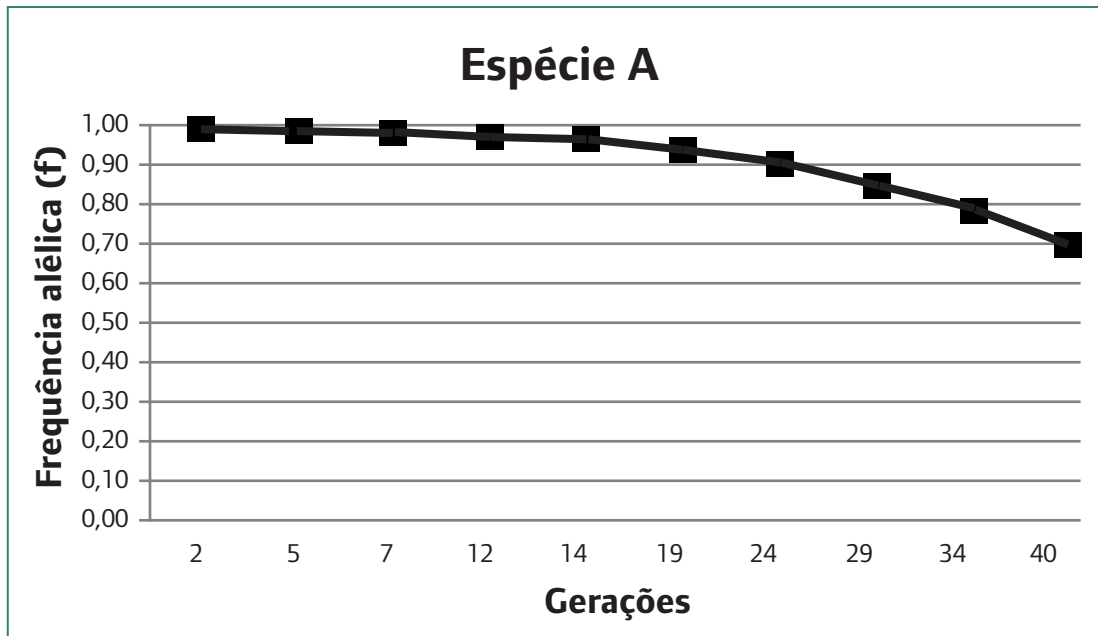


Gráfico.  
Espécie A.

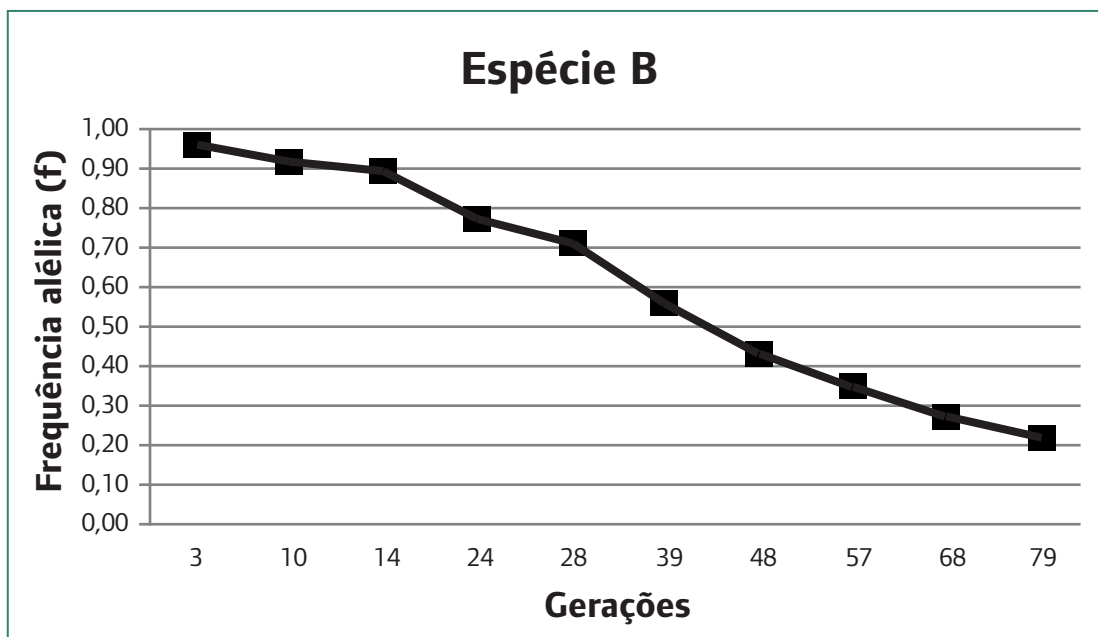


Gráfico.  
Espécie B.

**Questão A:** De acordo com dados, se a temperatura continuar aumentando após 100 anos, o fenótipo de mariposas mais provável nas populações das duas espécies será o das menos escamas escuras nas asas.

**Questão B:** Como a frequência do alelo *f* e do genótipo recessivo *ff* são reduzidos ao longo do tempo, devido à seleção natural, a diversidade genética nas duas populações deve reduzir. Entretanto, a espécie B, que possui tempo de geração mais rápido que a espécie A, apresentará uma redução mais drástica na diversidade genética que a espécie A. Dessa forma, uma das consequências da seleção natural favorecendo ou desfavorecendo uma característica (no caso, desfavorece o fenótipo recessivo com muitas escamas escuras e favorece o fenótipo dominante com poucas escamas escuras para ambientes mais quentes) é a perda de diversidade genética, já que diminui muito a frequência do alelo que confere menor valor adaptativo.

**Questão C:** A espécie B será a que conseguirá adaptar-se mais rapidamente. Como esta espécie tem um tempo de geração mais curto do que as espécies A, a mutação da escamas menos escuras tem mais chance de passar para a próxima geração e se disseminar na população. Depois de muitas gerações, em um curto período de tempo, esse alelo ficará mais comum e, portanto, provavelmente a população consiga se adaptar e sobreviver ao seu ambiente em mudança.

**Questão D:** Se nas populações não houvesse uma mutação que codifica para ter menos escamas escuras nas asas e, no local onde habitam, se a temperatura continuasse a subir, provavelmente as populações das duas espécies seriam levadas à extinção, já que não conseguiriam acompanhar a mudança climática, já que as altas temperaturas afetariam o metabolismo dos indivíduos cada vez mais. Outra possibilidade seria as populações migrarem acompanhando as temperaturas suportáveis por elas. Entretanto, foi observado que as populações de ambas as espécies não estavam se deslocando. Assim, seria mais provável a extinção das mesmas.

**Questão E:** O tempo de geração desempenha um papel importante na adaptação das populações às mudanças climáticas. Quan-

to mais rápido uma espécie se reproduzir, mais rápido pode ser transmitida uma mutação benéfica para os descendentes. A seleção natural atua mais rapidamente naquelas populações com um tempo de geração menor.

O tamanho da população também desempenha um papel importante na velocidade que a evolução (mudança nas frequências alélicas) pode acontecer, já que quanto menor uma população, mais alta a chance de um alelo novo que apareça na população seja extinto por deriva gênica. Em populações grandes, novas mutações podem permanecer e serem transmitidas para outras gerações.

A diversidade genética pode ser definida como a quantidade de alelos diferentes que uma população apresenta. Quanto maior a diversidade genética, maior a chance de ter nesse conjunto de alelos um que seja favorável à adaptação da população quando ocorre uma mudança no ambiente.

Dessa forma, para a conservação das espécies é importante conservar as populações dentro de uma abordagem de potencial evolutivo das espécies, ou seja, mantendo a capacidade das mesmas em se adaptar em um ambiente em modificação. Assim, a manutenção de populações maiores, com maior diversidade genética, é importante para garantir o potencial evolutivo das mesmas.

## REFERÊNCIAS

- COSSINS, A. *Temperature Biology of Animals*. Springer, 2011.
- GRIMALDI, D, Engel, M. S. *Evolution of the Insects*. Cambridge University Press, 2005.
- HALDANE, J. B. S. A mathematical theory of natural and artificial selection” Part 1. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, v. 23, p.19-41, 1924.
- RIDLEY, M. *Evolution*. Oxford: John Wiley & Sons Incorporated, 2009.
- STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G-K. et al. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge. 2013.