

A importância da genética na conservação de espécies ameaçadas: um modelo didático envolvendo o manejo de populações pequenas*

Cibele de Cássia Silva^{1,2}, Tatiana Souza do Amaral^{1,2}, Rosane Garcia Collevatti¹

¹ Laboratório de Genética & Biodiversidade, ICB, Universidade Federal de Goiás (UFG) Goiânia

² 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: simulação de aula prática, diversidade genética, endogamia, conservação de espécies ameaçadas

* Material didático elaborado para alunos do Ensino Superior, 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.



Para auxiliar no ensino de Genética da Conservação, é proposta uma atividade que demonstra como a análise de diversidade genética e endogamia podem auxiliar no processo de tomada de decisão referente à conservação de espécies ameaçadas. A atividade pode ser utilizada como simulação de aula prática ou como uma atividade complementar à aula expositiva para alunos de ensino superior.



FUNÇÃO PEDAGÓGICA

Endogamia é acasalamento entre indivíduos aparentados que leva ao aumento da homozigose e diminuição da heterozigose.

Tamanho efetivo populacional é o número de indivíduos que uma população idealizada deverá ter para que ela represente uma população real com o mesmo tamanho, em relação à endogamia, ou à deriva ou a algum parâmetro genético de interesse.

Diversidade genética é a quantidade de variação genética contida em uma determinada população.

Conservação *in situ* é a conservação de espécies nos seus respectivos habitats naturais.

Um dos principais desafios da biologia da conservação é preservar espécies que possuem populações pequenas. De fato, essas espécies estão em risco de extinção eminente uma vez que muitas apresentam **depressão endogâmica** causada pelo acasalamento entre indivíduos aparentados (**endogamia**). Além disto, a redução do **tamanho efetivo populacional** leva a uma redução da **diversidade genética**. A redução da diversidade genética pode deixar as populações mais suscetíveis à infecção por patógenos e mais propensas a doenças devido à perda de alelos ou genótipos que proporcionam resistência. A baixa diversidade genética pode diminuir o potencial adaptativo da espécie frente às mudanças ambientais devido à perda de alelos.

Diferentes estratégias de manejo podem ser adotadas visando a conservação de populações naturais com risco iminente de extinção. Reintroduções e translocações, por exemplo, são estratégias comumente adotadas em planos de manejo. A reintrodução consiste na recomposição de indivíduos, muitas vezes de cativeiros, em habitats onde já existiram. Translocação é o manejo de uma população inteira para outro habitat devido ao risco iminente de seu habitat natural ser extinto ocasionado, por exemplo, pelo alagamento para instalação de hidroelétricas ou o desmatamento. De modo geral, a ocorrência de grandes obras com alto impacto ambiental como, por exemplo, a instalação de mineradoras, construção de rodovias e hidroelétricas requer a adoção de estratégias de translocações visando a conservação de populações naturais locais, devido à intensa modificação do habitat natural. No entanto, devido aos riscos inerentes, estas estratégias exigem estudos prévios aprofundados sobre ecologia (ex: interações, dieta, modo reprodutivo) e genética das populações a serem manejadas. Caso esses estudos prévios não sejam realizados, a probabilidade de declínio populacional das espécies manejadas é alta. Adicionalmente, práticas de **conservação *ex situ***, as quais incluem reprodução de indivíduos em cativeiros, podem ser adotadas a fim de manter viáveis as populações ***in situ***.

No problema desta atividade propomos aos estudantes comparar os parâmetros genéticos populacionais e **pedigrees** de cinco populações candidatas ao processo de reintrodução. Após a comparação e a avaliação desses parâmetros, propomos aos estudantes a tomada de decisão sob qual população remanescente ou indivíduos poderão ser utilizados para reintrodução em outro local, de acordo com diferentes cenários hipotéticos.

Neste problema hipotético, uma espécie fictícia de sapo, o *Sapupus hipoteticus*, apresentava distribuição restrita a uma determinada região do litoral brasileiro e a um arquipélago próximo a este litoral (Painel 1). Devido à especulação imobiliária e à urbanização, a espécie não é mais encontrada no litoral, sendo considerada extinta no continente, e possui populações

Depressão endogâmica é a perda de valor adaptativo na prole devido ao acasalamento entre indivíduos aparentados (endogamia).

Conectividade é a capacidade que uma paisagem possui em facilitar ou dificultar o movimento dos organismos entre as manchas de habitat.

Conservação *ex situ* é a conservação de espécies fora de seus habitats naturais.

Pedigree é a representação gráfica dos padrões de herança genética em uma família.

remanescentes somente nas cinco ilhas do arquipélago. Para recompor a população da espécie no continente, programas de conservação visam reintroduzir a espécie no litoral a partir das populações das ilhas do arquipélago. Assim sendo, a primeira medida tomada no processo de manejo de *S. hipoteticus* foi realizar análises da diversidade genética de todas as cinco populações remanescentes no arquipélago, para evitar que a reintrodução gere uma população com baixa diversidade genética.

Foram coletados indivíduos de *S. hipoteticus* das cinco populações encontradas no arquipélago e estimados três parâmetros genéticos populacionais: a diversidade genética da população, que pode ser estimada pela heterozigosidade esperada pelo equilíbrio de Hardy-Weinberg (H_e), a proporção de indivíduos heterozigotos na população (H_i) e o coeficiente de endogamia (f). Posteriormente, foi estabelecido o parentesco entre os indivíduos e feito um pedigree para auxiliar na tomada de decisão de reintrodução no continente. Embora esse não seja o cenário ideal, é o mais adequado, considerando a ausência de dados da composição genética da população extinta no continente. Caso houvesse estudos genéticos disponíveis na literatura, a tomada de decisão sobre qual ilha seria a melhor fonte de indivíduos para a reintrodução no continente seria baseada em métodos genéticos comparativos. No entanto, devido à ausência de informação, o critério adotado pelos pesquisadores para a escolha da população fonte foi o de maior diversidade genética visando diminuir o risco de um possível problema futuro de depressão por endogamia. Ademais, estudos prévios de monitoramento de fauna indicaram que o tamanho efetivo populacional de *Sapus hipoteticus* e as condições ambientais são bastante similares nas cinco ilhas, o que também contribuiu para tomada de decisão dos pesquisadores sobre qual ilha seria a melhor fonte de indivíduos se fosse baseada apenas em parâmetros genéticos populacionais.

Para as análises de diversidade genética, os pesquisadores coletaram indivíduos de *S. hipoteticus* das cinco populações encontradas no arquipélago e posteriormente estimaram três parâmetros genéticos populacionais: a

diversidade genética da população, que pode ser estimada pela heterozigosidade esperada pelo equilíbrio de Hardy-Weinberg (H_e), a proporção de indivíduos heterozigotos na população (H_i) e o coeficiente de endogamia (f). Após o cálculo desses parâmetros, os pesquisadores estabeleceram as relações de parentesco entre os indivíduos de cada ilha através de um pedigree para auxiliar na tomada de decisão de reintrodução no continente.

Para resolver a proposta, os alunos deverão:

1. Analisar os parâmetros genéticos das cinco populações (Painel 2) de *S. hipoteticus*;
2. Identificar qual a população mais adequada para fazer a reintrodução baseada nos parâmetros genéticos;
3. Analisar os pedigrees das cinco populações (Painel 3) de *S. hipoteticus*;
4. Identificar quais os indivíduos apropriados para fazer a reintrodução, baseado nos pedigrees, de acordo com os diferentes cenários apresentados.

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 de cada painel e das questões para serem discutidas.
3. É recomendável que o professor aplique esta atividade após a definição de conceitos básicos de genética de populações.

Distribuição do Material aos Grupos

Os recursos didáticos que deverão ser utilizados consistem em três painéis, conforme descrito a seguir. Todos os grupos deverão receber uma cópia de cada painel (material do Apêndice):


1. **Painel 1** – mapa mostrando o arquipélago onde ainda são encontradas as populações de *Sapus hipoteticus*, e o continente, onde a espécie não existe mais.

IUCN é a lista vermelha da união internacional para a conservação da natureza.

2. **Painel 2** – tabela com os dados de heterozigosidade esperada (H_e), heterozigosidade observada (H_o) e coeficiente de endogamia (f) das cinco populações de *S. hipoteticus* encontradas no arquipélago.

3. **Painel 3** – pedigrees dos indivíduos das cinco populações de *S. hipoteticus* encontradas em diferentes regiões do arquipélago.

Procedimento para os estudantes

1. Ler com atenção o tema proposto.
2. Observar o mapa da distribuição no Painel 1.
3. Analisar a Tabela do Painel 2 que contém os parâmetros genéticos populacionais das cinco populações de *S. hipoteticus* encontradas no arquipélago, diversidade genética ou heterozigosidade esperada pelo equilíbrio de Hardy-Weinberg (H_e), proporção de indivíduos heterozigotos (H_o), o coeficiente de endogamia (f).
4. Baseado-se nos três parâmetros genéticos, indique qual seria a população mais adequada para fazer a reintrodução no continente e justifique sua resposta.
5. Analisar os pedigrees de cada população no Painel 3. Em cada pedigree, indique com um traço os acasalamentos entre indivíduos aparentados (por exemplo: ,).

6. De acordo com o pedigree de cada população, escolha o(s) pedigree(s) mais adequado(s) para serem utilizado(s) na reintrodução. Além disso, indique nos pedigrees os acasalamentos entre parentes com duas linhas. Após escolher o(s) pedigree(s), escolha, dentro deste(s) pedigree(s), os indivíduos mais adequados para reintrodução, considerando os seguintes cenários:

- 1) cenário 1: escolher apenas um pedigree (reintrodução de indivíduos de apenas uma população e um pedigree):
 - 1a. com reintrodução de quatro indivíduos;
 - 1b. com reintrodução de seis indivíduos;
 - 1c. com reintrodução de oito indivíduos.
- 2) cenário 2: escolher mais de um pedigree (reintrodução de indivíduos de diferentes pedigrees):
 - 2a. com reintrodução de quatro indivíduos;
 - 2b. com reintrodução de seis indivíduos;
 - 2c. com reintrodução de oito indivíduos.



PAINÉIS

PAINEL 1.

Mapa do arquipélago onde ainda são encontradas as populações de *S. hipoteticus*, e do continente, onde a espécie não existe mais.



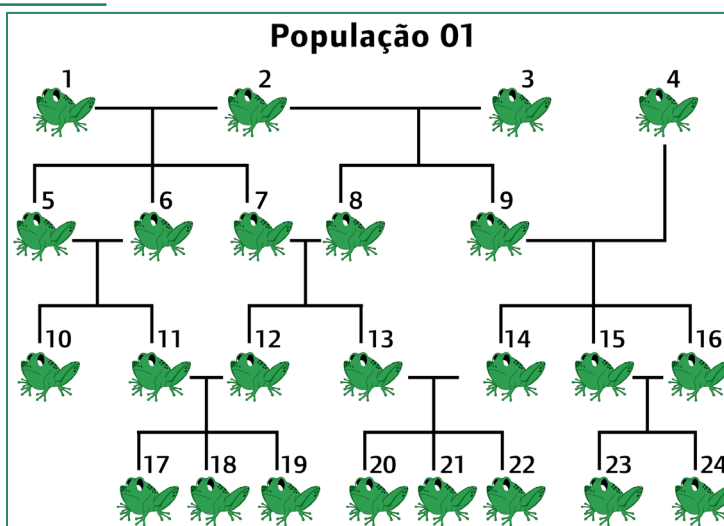
PAINEL 2.

Tabela com os valores de heterozigiosidade esperada (H_e), heterozigiosidade observada (H_i) e coeficiente de endogamia (f) das cinco populações de *S. hipoteticus* encontradas no arquipélago.

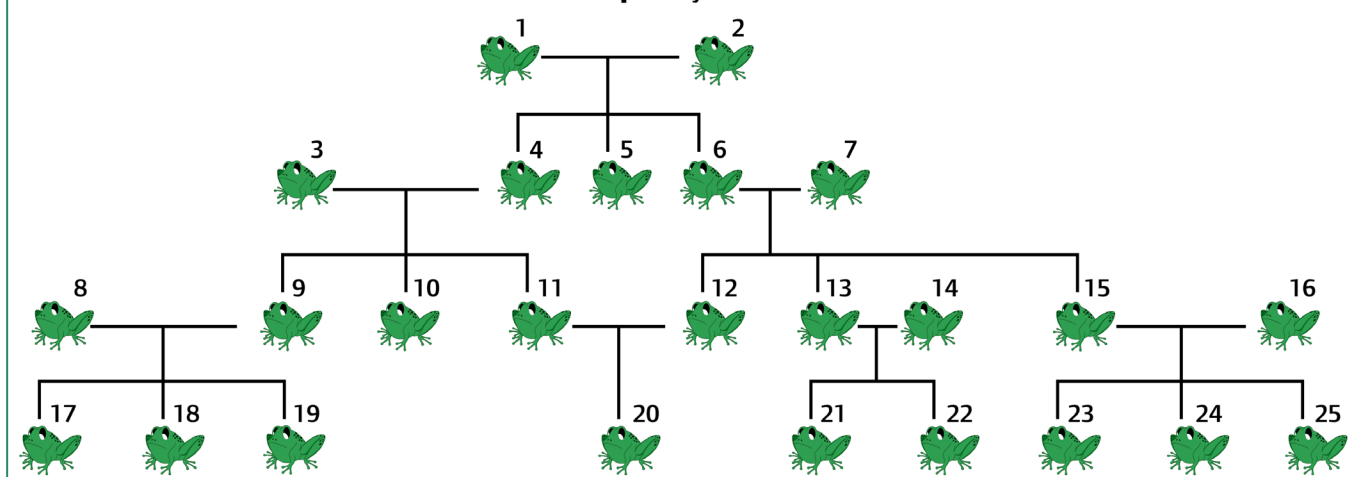
Populações	H_e	H_i	f
População 01	0,21	0,15	0,29
População 02	0,47	0,38	0,19
População 03	0,39	0,30	0,24
População 04	0,11	0,05	0,51
População 05	0,52	0,52	0,00

PAINEL 3.

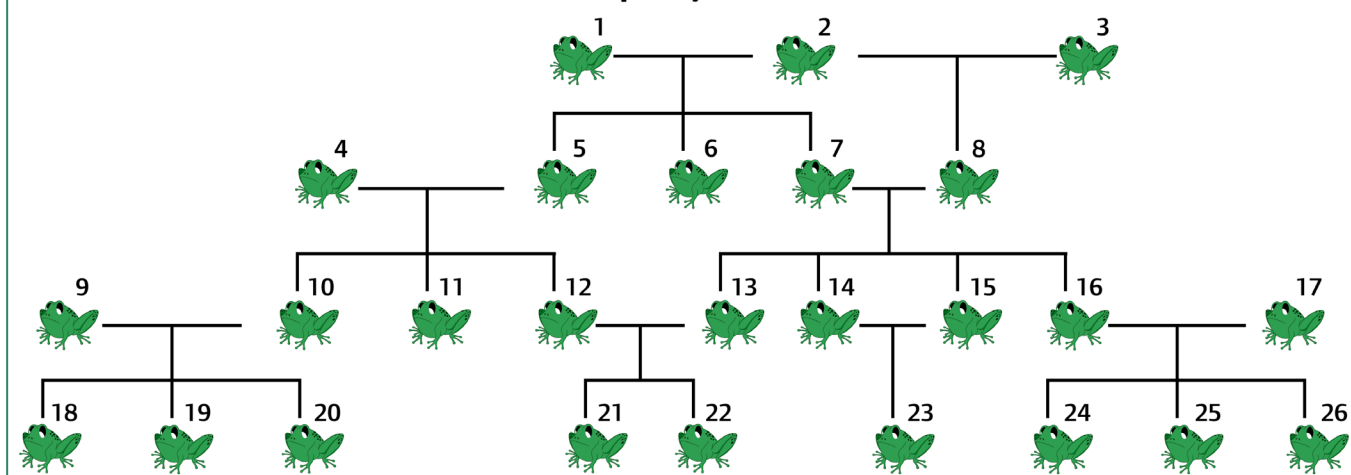
Pedigrees das cinco populações de *S. hipoteticus* encontradas em diferentes regiões do arquipélago.



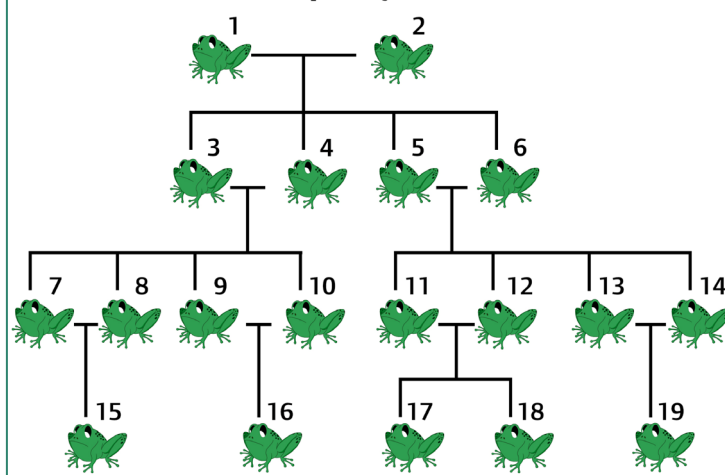
População 02

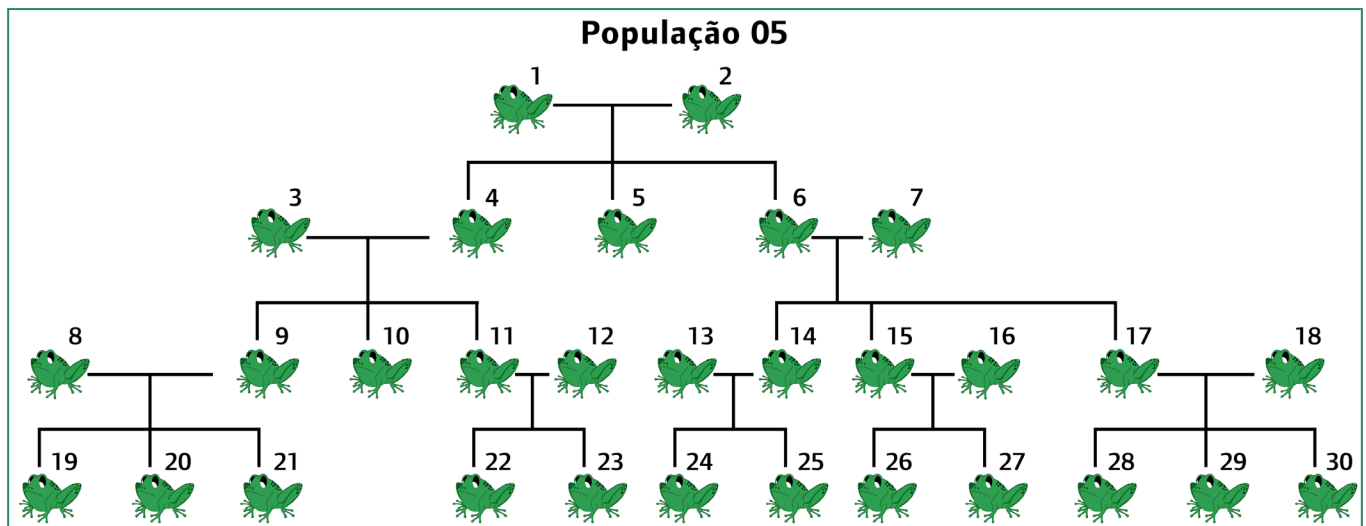


População 03



População 04



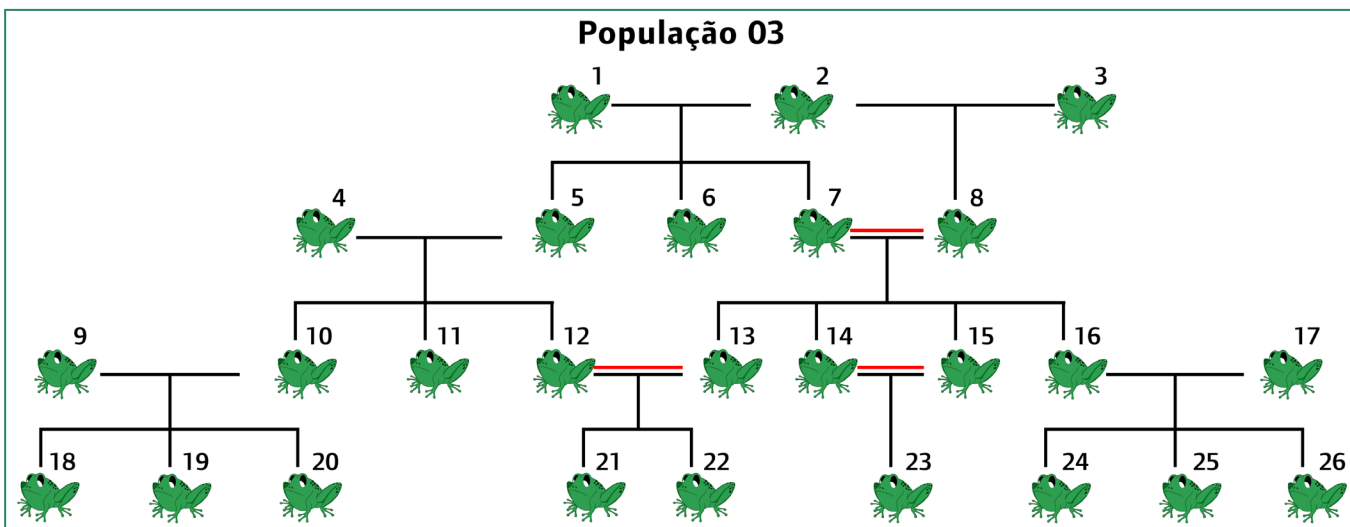
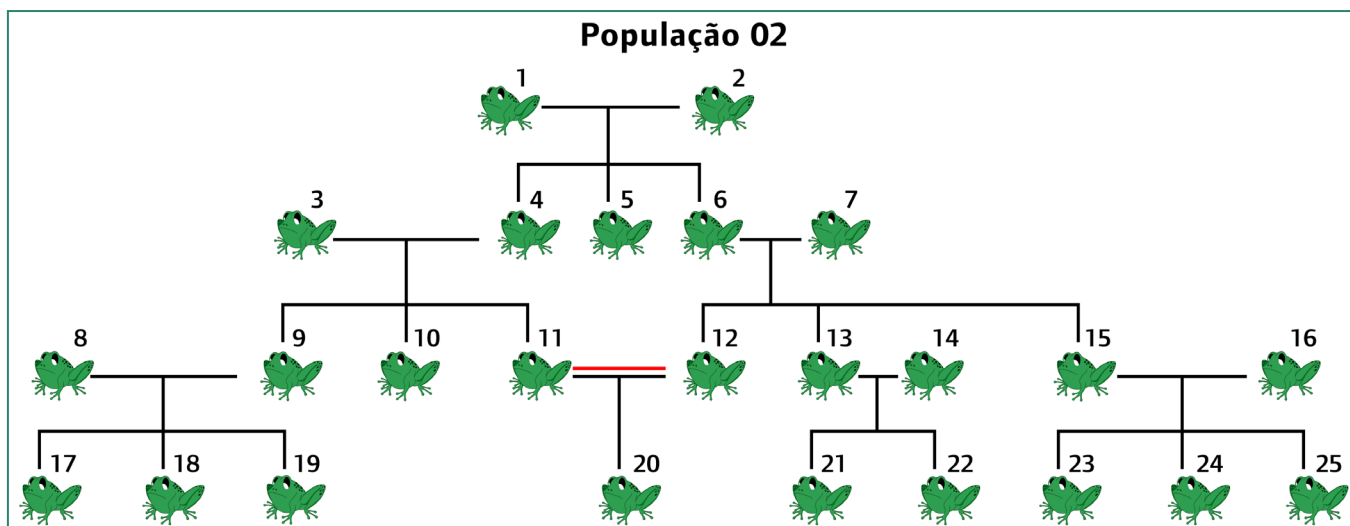
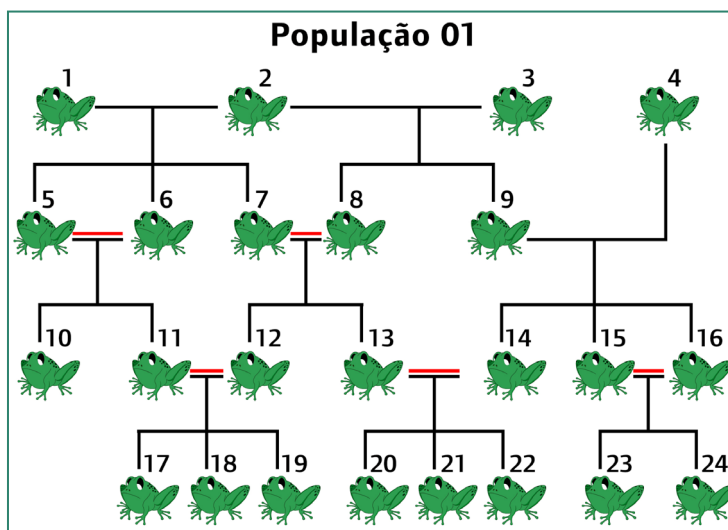


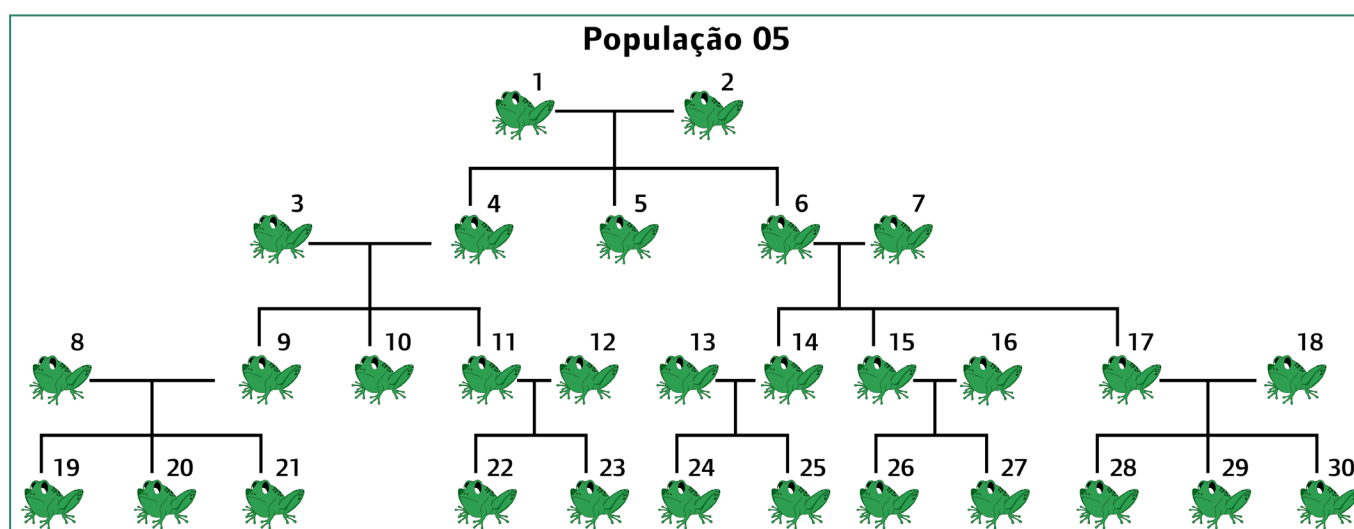
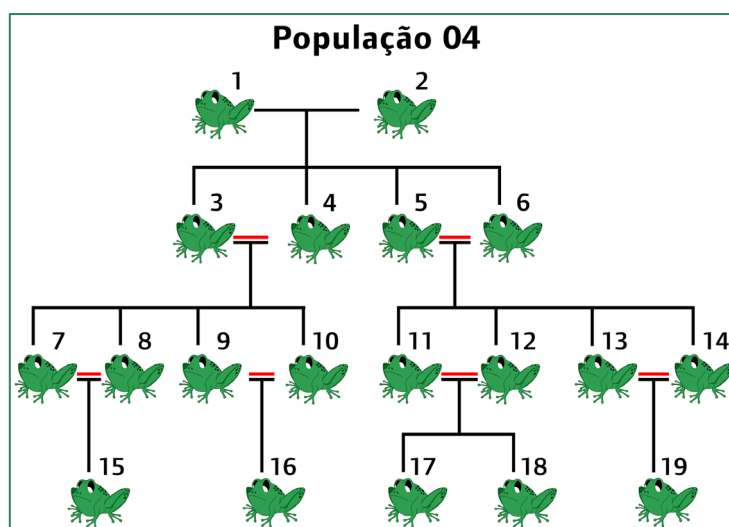
ENTENDENDO A ATIVIDADE

1. As áreas naturais remanescentes estão cada vez menores e fragmentadas. Consequentemente, há um declínio no tamanho das populações naturais de plantas e animais devido à perda de habitat. Por que espécies com populações pequenas estão mais suscetíveis à extinção? Considere na sua resposta, as questões genéticas apresentadas na atividade.
2. Por que a avaliação do pedigree é importante no processo de tomada de decisão de programas de cruzamento em cativeiro e reintrodução?
3. A perda de aptidão das populações em consequência do acasalamento entre indivíduos aparentados, sobretudo em populações pequenas, é um fator de extrema importância para a biologia da conservação. Entretanto, as reintroduções e translocações devem ser feitas com muito cuidado e após um estudo detalhado das populações em questão. Entre algumas consequências negativas de misturar populações sem estudos prévios e detalhados está a depressão exogâmica. Defina o que é depressão exogâmica e enumere alguns fatores que podem levar as populações à depressão exogâmica.
4. As mudanças climáticas ou ambientais estão ocorrendo de forma acelerada. Diante de um mundo em mudanças as espécies podem extinguir, migrar ou adaptar. Explique a relação entre diversidade genética e resposta a mudanças ambientais.

RESPOSTAS

1. Em cada pedigree, indique com um traço os acasalamentos entre indivíduos aparentados:





Questões

1. Indique qual seria a população mais adequada para fazer a reintrodução baseado-se nestes parâmetros. Justifique sua resposta

Resposta: as duas populações mais adequadas para fazer a reintrodução são: População 5 e População 2, pois essas populações apresentam

os maiores valores de heterozigidade e os menores coeficientes de endogamia.

2. Indique o(s) pedigree(s) mais adequado(s) para ser(em) utilizado(s) na reintrodução. Após escolher o(s) pedigree(s), escolha, dentro deste(s) pedigree(s), os indivíduos mais adequados para reintrodução, considerando os seguintes cenários:

- 1) cenário 1: escolher apenas um pedigree (reintrodução de indivíduos de apenas um pedigree):

Resposta: pedigree 5, pois é a população que apresenta maior heterozigosidade, menor coeficiente de endogamia e não possui cruzamento entre indivíduos aparentados.

- 1a. com reintrodução de quatro indivíduos;
1b. com reintrodução de seis indivíduos;
1c. com reintrodução de oito indivíduos.

Resposta: uma vez escolhido o pedigree 5, existem várias possibilidades. O importante é que os indivíduos escolhidos não sejam irmãos, nem pai e filho.

- 2) cenário 2: escolher mais de um pedigree (reintrodução de indivíduos de diferentes pedigrees):

Resposta: pedigree 5 e pedigree 2, pois são as populações com maior heterozigosidade e menor coeficiente de endogamia. O pedigree 3 seria um pedigree intermediário que também pode ser escolhido. Só não podem ser escolhidos os pedigrees 1 e 4, pois eles possuem alto índice de endocruzamento.

- 2a. com reintrodução de quatro indivíduos;
2b. com reintrodução de seis indivíduos;
2c. com reintrodução de oito indivíduos.

Resposta: uma vez escolhida o pedigree 5 e o pedigree 2, também pode ser escolhido o pedigree 3. Na verdade aqui também existem várias possibilidades, o importante é que os indivíduos escolhidos não sejam irmãos, pai e filho e que tenham indivíduos dos dois ou três pedigrees. Os indivíduos dentro dos círculos vermelhos são os indivíduos provenientes de outras famílias. Os traços vermelhos indicam cruzamento entre indivíduos aparentados.

Justifique suas respostas.

Resposta: O primeiro critério para escolha seriam as populações com menos endocruzamentos. Posteriormente, dentro destas populações, o critério para escolha dos indivíduos é o grau de parentesco entre eles, ou seja, o objetivo é escolher aqueles indivíduos com menor grau de parentesco. Obs.: Os indivíduos dentro dos círculos vermelhos são os indivíduos provenientes de outras famílias.

Entendendo a atividade

1. As áreas naturais remanescentes estão cada vez menores e fragmentadas. Consequentemente, há um declínio no tamanho das populações naturais de plantas e animais devido à perda de habitat. Por que espécies com populações pequenas estão mais suscetíveis à extinção? Considere na sua resposta, as questões genéticas apresentadas na atividade.

Resposta: Em populações pequenas há uma maior frequência de endocruzamentos. O endocruzamento pode causar uma diminuição no valor adaptativo da prole. Isso ocorre devido ao decréscimo da heterozigosidade e ao aumento da homozigose, a qual pode levar à expressão de alelos deletérios. Além disso, a redução do tamanho populacional ocasiona a perda de diversidade genética devido principalmente à deriva genética aleatória. A perda de diversidade genética, por sua vez, pode diminuir o potencial adaptativo futuro de uma espécie diante das mudanças ambientais.

2. Por que a avaliação do pedigree é importante no processo de tomada de decisão de programas de cruzamento em cativeiro e reintrodução?

Resposta: A avaliação do pedigree é importante para verificar o nível de parentesco dos indivíduos que serão introduzidos a fim de evitar a introdução ou reintrodução de indivíduos muito aparentados e ocasionar problemas futuros de depressão endogâmica. Quanto menor o grau de parentesco entre os indivíduos de população, menor será a endogamia e, consequentemente, o risco de depressão endogâmica também será menor.

3. A perda de aptidão das populações em consequência do acasalamento entre indivíduos aparentados, sobretudo em populações pequenas, é um fator de extrema importância para a biologia da conservação. Entretanto, as reintroduções e translocações devem ser feitas com muito cuidado e após um estudo detalhado das populações em questão. Entre algumas consequências negativas de misturar populações sem estudos prévios e detalhados está a depressão exogâmica. Defina o que é depressão exogâmica e enumere alguns fatores que podem levar as populações à depressão exogâmica.

Resposta: Depressão exogâmica é a redução da aptidão na prole devido ao acasalamento entre indivíduos não relacionados. Os principais fatores que podem levar à depressão exogâmica são: a) misturar indivíduos de populações muito divergentes; b) misturar indivíduos de populações adaptadas a habitats diferentes; c) misturar indivíduos de populações com diferenças cromossômicas já fixadas; d) misturar indivíduos de populações que não apresentam **fluxo gênico** entre elas há muito tempo (mais de 500 anos).

Fluxo gênico é qualquer movimento de alelos de uma população para outra, é também referido como migração.

4. As mudanças climáticas ou ambientais estão ocorrendo de forma acelerada. Diante de um mundo em mudança, as espécies podem extinguir, migrar ou adaptar. Explique a relação entre diversidade genética e resposta a mudanças ambientais.

Resposta: A adaptação *in situ*, seja morfológica ou fisiológica, a novas condições ambientais assim como a capacidade de sobrevivência em um “novo habitat” após a migração são em grande parte dependentes da diversidade genética da população. A redução da diversidade pode, por exemplo, deixar as populações naturais mais propensas a patógenos e doenças devido à perda de alelos ou genótipos que proporcionam resistência. A perda de alelos e genótipos também leva a uma diminuição do potencial adaptativo da espécie diante de mudanças climáticas, pois alelos que poderiam conferir adaptação às condições climáticas diferentes daquelas encontradas em seu habitat natural podem ter sido perdidos. De um modo geral, a manutenção da diversidade genética é o ponto de partida para as respostas adaptativas das espécies às mudanças ambientais.

