

O efeito da construção de uma usina hidrelétrica na biodiversidade de peixes: uma investigação sobre frequências alélicas e fenotípicas

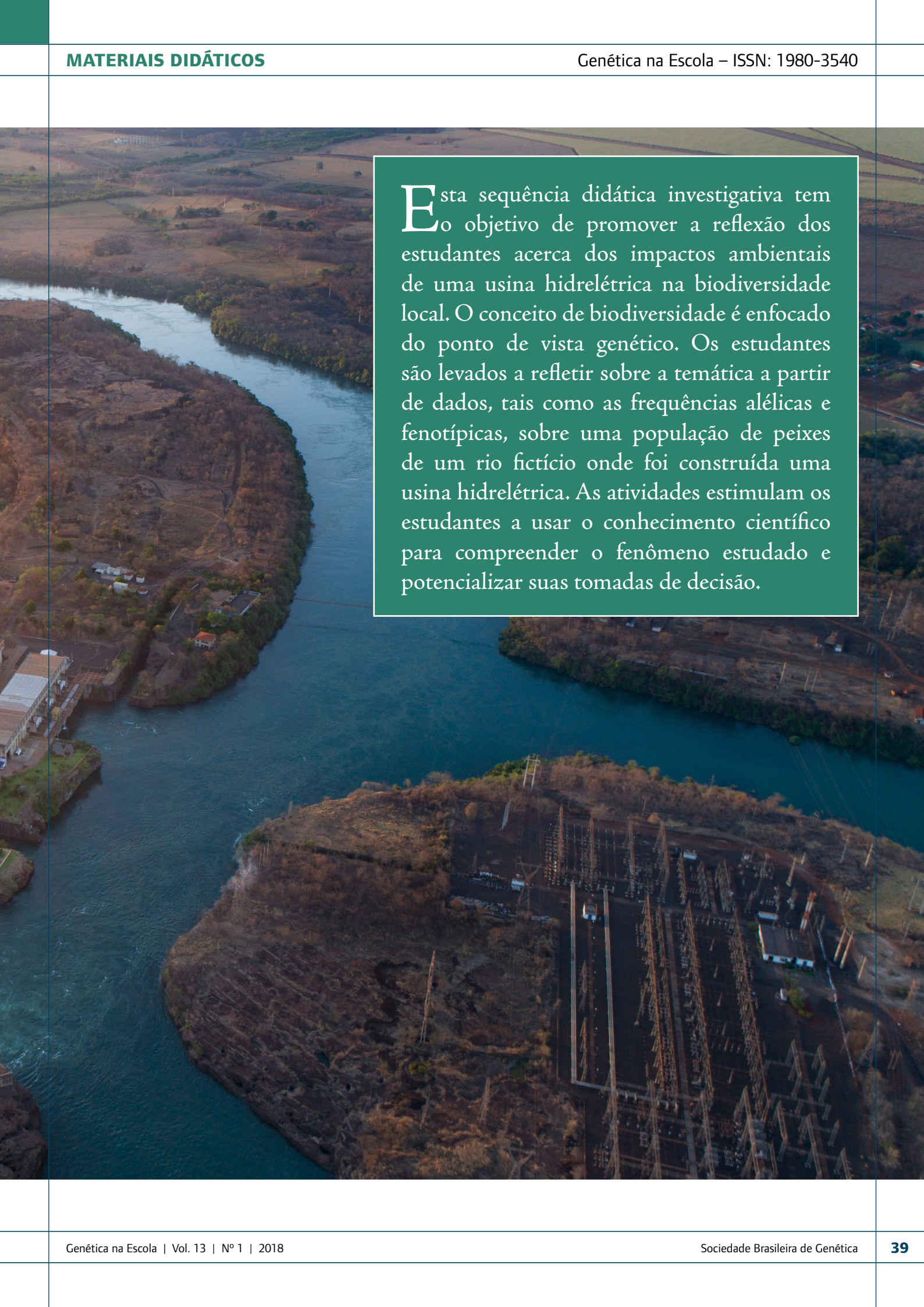
Rafael Gil de Castro¹, Marcelo Tadeu Motokane², Marcelo Pereira²

¹ Professor de ciências do município de Brodowski, mestrando do programa Interunidades em Ensino de Ciências, modalidade Biologia, Departamento de Biologia da Faculdade de Ciências e Letras de Ribeirão Preto Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP

² Departamento de Biologia da Faculdade de Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP

Autor para correspondência: rafacastro07@hotmail.com

Palavras-chave: biodiversidade, ensino por investigação, genética

An aerial photograph of a river winding through a landscape. On the left bank, there is a hydroelectric dam with a large concrete structure and a building. The river flows towards the right. In the foreground, a large area of land is covered with numerous tall, thin wooden poles, likely for a power line construction site. The surrounding terrain is a mix of brownish soil and sparse vegetation.

Esta sequência didática investigativa tem o objetivo de promover a reflexão dos estudantes acerca dos impactos ambientais de uma usina hidrelétrica na biodiversidade local. O conceito de biodiversidade é focado do ponto de vista genético. Os estudantes são levados a refletir sobre a temática a partir de dados, tais como as frequências alélicas e fenotípicas, sobre uma população de peixes de um rio fictício onde foi construída uma usina hidrelétrica. As atividades estimulam os estudantes a usar o conhecimento científico para compreender o fenômeno estudado e potencializar suas tomadas de decisão.

A DIVERSIDADE GENÉTICA E O ENSINO

A biodiversidade é um tema presente em nossa realidade e tem ganhado cada vez mais destaque no cenário mundial devido às consequências de sua perda. A crise hídrica, o desmatamento da Amazônia, a construção de usinas hidrelétricas, as enchentes nas grandes cidades, a extinção de espécies e a escassez de alimentos são apenas alguns exemplos de questões que necessitam do conhecimento sobre a biodiversidade para a tomada de posicionamentos. Com isso, faz-se necessário o desenvolvimento de materiais didáticos que possibilitem a fundamentação de opiniões pelos estudantes em relação a esses aspectos. A biodiversidade amplia a aprendizagem da ciência para fronteiras de outras dimensões como a ambiental, a social, a política e a econômica.

A ideia de biodiversidade, na qual esta atividade está baseada, é a de que ela não é uma mera coleção de genes, espécies ou ambientes, mas sim um conjunto dinâmico e interativo entre os diferentes níveis da hierarquia biológica. É graças à existência de uma diversidade genética no seio das espécies que elas podem se adaptar às mudanças do meio ambiente que sempre marcaram a história da Terra; reciprocamente, a diversidade genética de uma espécie evolui em função do tempo, em resposta a essas mudanças do meio ambiente, bem como em razão das mutações. A partir dessas ideias, propusemos uma sequência de atividades que pretende estimular os estudantes a investigarem uma questão a partir de dados científicos hipotéticos e, dessa forma, superar o desafio que é abordar a biodiversidade em nível genético na sala de aula.

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA INVESTIGATIVA

O contexto proposto para as atividades é a perda da biodiversidade por impactos causados pelas construções de usinas hidrelétricas. A abordagem dada à situação problema permite que os estudantes possam compreender a importância da biodiversidade genética para a sobrevivência das espécies. O objetivo

da atividade é abordar os seguintes conteúdos:

- ♦ **Conceituais:** fenótipo, genótipo, frequências genotípica e fenotípica, homozigose, heterozigose, gene, alelo, dominância incompleta, migração, impacto ambiental, biodiversidade em nível genético e populacional;
- ♦ **Procedimentais:** análise de mapa, interpretação de dados de tabela e imagem, cálculo de frequências;
- ♦ **Atitudinais:** trabalhar em grupo, respeitar o outro quando este estiver expondo sua opinião ao restante da sala, postura ética perante os problemas ambientais.

A atividade foi planejada para ser desenvolvida junto a estudantes do ensino médio. Contudo, também é possível utilizá-la no ensino superior. Dividimos o material em duas partes:

- ♦ **Parte A** – Material apresentado para os estudantes
- ♦ **Parte B** – Comentários para professores

PARTE A – MATERIAL APRESENTADO PARA OS ESTUDANTES

Problema proposto

A construção de qualquer empreendimento ocasiona impactos socioambientais para o seu entorno, principalmente quando se trata da construção de uma grande usina hidrelétrica. Uma das maiores preocupações diz respeito às possíveis perdas de biodiversidade. Por isso, a legislação brasileira assegura que devem ser realizados estudos de impacto ambiental na área em que se dará o empreendimento. A intenção seria analisar se as perdas ambientais ocorridas serão compensadas pela melhoria na qualidade de vida da população após a instalação do empreendimento.

Para entenderem e vivenciarem a complexidade disso que foi mencionado, supõe-se a atuação de um grupo de profissionais que avaliará os possíveis impactos ambientais gerados pela construção de uma barragem de usina hidrelétrica numa região hipotética.

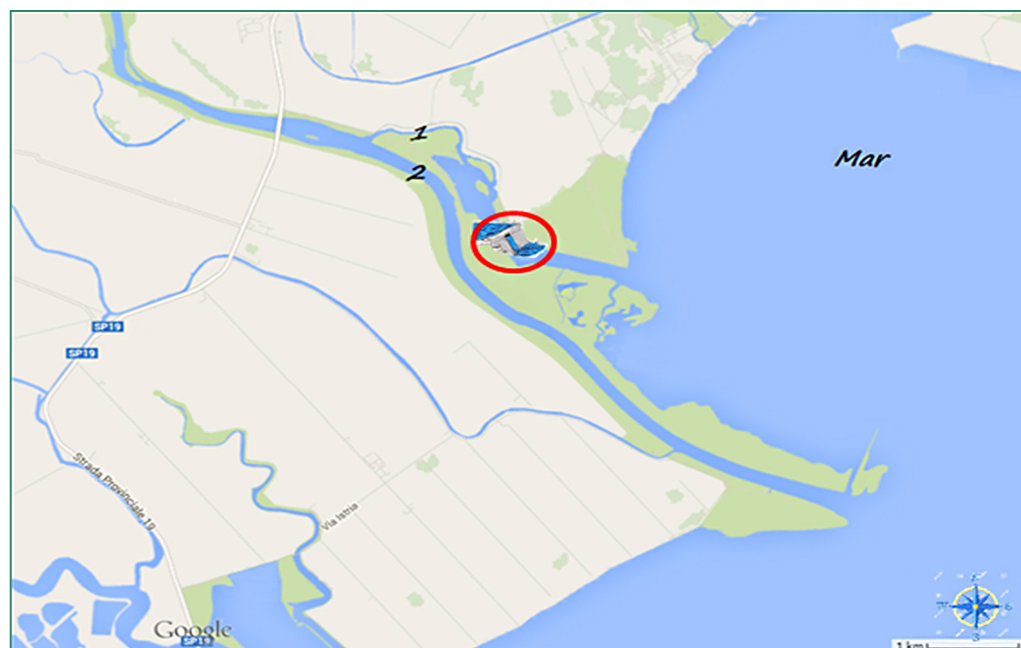


Figura 1.

Esquema das rotas migratórias dos peixes. Rota 1 – caminho que os peixes realizavam antes da instalação da barragem da usina. Rota 2 – caminho atual que os peixes devem fazer para ter acesso ao litoral. Notem que o percurso é maior do que o anterior. A barragem da usina está destacada por um círculo vermelho na figura.

Essa região tem como relevo predominante o planalto; clima tropical; o bioma é de floresta tropical; apresenta um rio principal que se divide em dois afluentes antes de desaguar na região de mar.

Considera-se também que a instalação de indústrias na região demandou mais energia e, em 2009, foi iniciada na região a construção da barragem de uma usina hidrelétrica em um dos afluentes. Os estudos de impacto ambiental realizados para a construção desse empreendimento foram duramente criticados por setores ambientalistas da sociedade,

o que ocasionou a interrupção das obras em 2015. As autoridades locais decidiram realizar novo estudo para analisar a perda da biodiversidade e verificar se poderiam ou não dar continuidade às obras. Dentre os vários profissionais solicitados, foram selecionados alguns biólogos para realizar o estudo sobre a biodiversidade de peixes do local. Os biólogos ficarão encarregados de investigar várias situações para que possam, ao final de todo o processo, responder à seguinte pergunta: os impactos na biodiversidade dos peixes da região são significativos?

Estudando o genótipo e o fenótipo

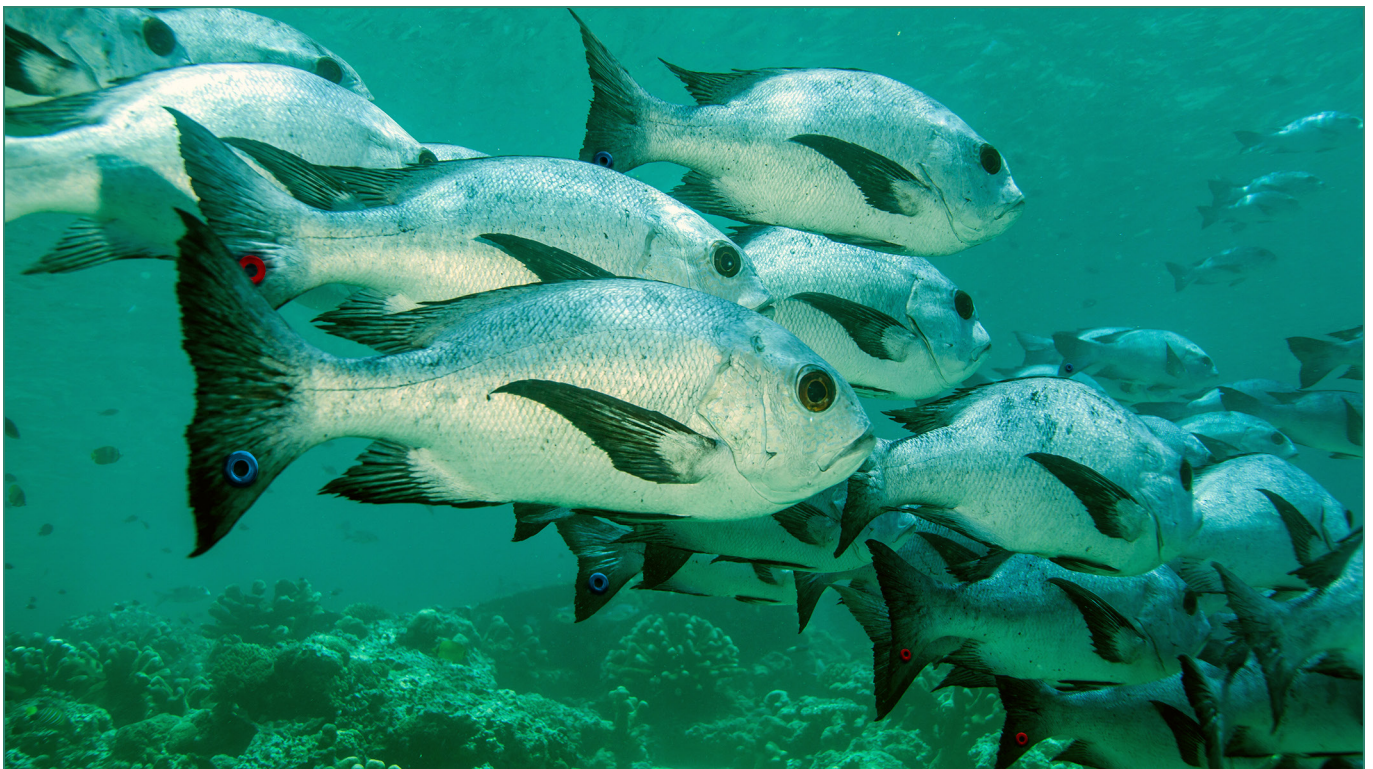
Os indivíduos de uma população apresentam diferenças entre si, sendo algumas dessas diferenças de caráter genético.

Nosso foco de estudo será uma suposta população de peixes de tal rio que apresenta o comportamento migratório no período reprodutivo. Eles se alimentam de frutos e pequenos insetos que caem das árvores da mata ciliar e assim conseguem estocar determinada quantidade de gordura no corpo, de acordo com a predisposição genética de cada indivíduo desta população e a oferta de alimento do ambiente. Após a época de chuvas, os peixes param de se alimentar e tanto machos quanto fêmeas migram dos rios até o oceano, e se reproduzem na costa, voltando ao rio após o período da desova.



Análise da figura 2 que representa a população de peixes migratórios do rio em questão: nessa população de peixes há um gene que confere ao indivíduo a capacidade de armazenamento de gordura no corpo. Esse armazenamento é de grande importância durante a migração desses animais para a foz do rio uma vez que a oferta de alimento é escassa durante o percurso. Esse

gene apresenta dois alelos: um, que vamos chamar de A1, que confere armazenamento de grande quantidade de gordura corporal e outro, que vamos chamar de A2, que confere baixa quantidade de armazenamento. Esses alelos apresentam uma interação de dominância incompleta, isto é, o fenótipo do heterozigoto é intermediário aos dos dois homozigotos.



- Peixes marcados com **ponto azul** apresentam o alelo que confere armazenamento de grande quantidade de gordura corporal em homozigose (genótipo **A1A1**);
- Peixes **sem marcação** apresentam o alelo que conferem baixa quantidade de armazenamento de gordura corporal em homozigose (genótipo **A2A2**).
- Peixes marcados com **ponto vermelho** apresentam os alelos em heterozigose e capacidade intermediária de armazenamento de gordura (genótipo **A1A2**).

Figura 2.

Esquema representando uma população de peixes em um rio.

Pesquisas antes da instalação da usina hidrelétrica evidenciavam que a proporção fenotípica dos peixes era praticamente constante ao longo dos anos conforme a tabela 1 a seguir.

A seguir tem-se a tabela 2 que representa um estudo realizado no ano de instalação da usina, em 2009, que evidencia a numeração do peixe coletado e a massa corporal em quilogramas.

Tabela 1.

Proporção fenotípica dos peixes encontrada nas pesquisas feitas antes da instalação da usina hidrelétrica.

Fenótipo	Frequência
Grande quantidade de armazenamento de gordura	aprox. 0,1
Armazenamento intermediário de gordura	aprox. 0,3
Baixa quantidade de armazenamento de gordura	aprox. 0,6

Tabela 2.

Dados da coleta de 2009.*

Dados dos peixes coletados em 2009	
Número do peixe	Massa (Kg)
1	3,8
2	2,8
3	2,7
4	2,7
5	1,9
6	1,8
7	1,8
8	1,7
9	1,7
10	1,5

A) A proporção fenotípica de peixes em 2009 está dentro da proporção fenotípica que havia nos anos anteriores à instalação da barragem?

B) Qual seria a frequência dos alelos A1 e A2 nessa população de 2009? Para calcular esses valores, devem ser levados em consideração alguns dados:

- ♦ peixes com massa entre 4,0 e 3,0 quilogramas são considerados com grande armazenamento de gordura e seu genótipo é representado por A1A1;
- ♦ peixes com massa menor do que 3,0 quilogramas até 2,0 quilogramas são considerados com armazenamento intermediário de gordura e seu genótipo é representado por A1A2;
- ♦ peixes com massa menor do que 2,0 quilogramas até 1,0 quilogramas são considerados com baixo armazenamento de gordura e seu genótipo é representado por A2A2.

* A tabela é uma simplificação dos resultados obtidos. Em situação real, a quantidade de peixes analisados deve ser muito maior.

C) Este é um trabalho que exige muita organização por parte de quem realiza os cálculos, a fim de que não ocorram erros durante o processo. Os erros podem resultar de uma visão equivocada a respeito da biodiversidade local. Por isso, é preciso organizar o raciocínio em etapas. Primeiro: encontrar na tabela 2 a quantidade de peixes de cada fenótipo. Completar o quadro a seguir com os valores encontrados.

		2009
Frequência fenotípica	Grande quantidade de armazenamento de gordura	
	Armazenamento intermediário de gordura	
	Baixa quantidade de armazenamento de gordura	

D) Em seguida, prosseguir a análise com uma nova etapa: encontrar a frequência alélica. Para isso, obter os dados a partir da contagem direta dos alelos e dividindo o resultado pelo total de alelos. Completar o quadro a seguir com os valores obtidos para a frequência de cada alelo.

		2009
Frequência do alelo	A	
	B	

Até este ponto do trabalho, o que se tem é uma análise de como estava a condição daquela população de peixes antes da construção da barragem e, conseqüentemente, do

funcionamento da usina hidrelétrica. A partir dessa situação, obtém-se dados referentes aos anos de 2012 e 2015, ou seja, no período de funcionamento da usina hidrelétrica.

E) Observando-se o quadro 1 referente às coletas realizadas nos anos 2012 e 2015 e comparando-as, pode-se dizer que tais alelos na população encontram-se em equilíbrio? Por quê?

		2012	2015
Frequência do alelo	A1	0,4	0,9
	A2	0,6	0,1
Frequência genotípica	A1A1	0,16	0,81
	A1A2	0,48	0,18
	A2A2	0,36	0,01

Quadro 1.

Dados das coletas realizadas em 2012 e 2015.

F) Após a análise do quadro anterior e da comparação do mesmo com o quadro de 2009, os biólogos, têm dados para concretizar as análises a respeito da interferência do funcionamento da usina hidrelétrica na biodiversidade da população de peixes desta região. Qual a conclusão a que se pode chegar sobre essa interferência a partir das evidências apresentadas até agora?

G) Os biólogos devem escrever um relatório científico evidenciando qual deve ser o posicionamento a respeito da continuidade do funcionamento da usina hidrelétrica. Para isso, utilizar as respostas dadas nas questões C, D, E e F como base de dados para a construção dos argumentos.

PARTE B – COMENTÁRIOS PARA PROFESSORES

Professor, o início da sequência didática investigativa acontecerá com a apresentação do problema que será investigado pelos estudantes ao longo das aulas. É importante que se explore junto com os estudantes essa etapa da sequência didática investigativa, uma vez que é o eixo norteador das atividades. Para isso, é preciso ler o texto com os estudantes e fazer perguntas no sentido de averiguar se eles compreendem o que é um impacto socioambiental; quem é diretamente afetado com a construção de uma usina hidrelétrica; quem se beneficia e quais são os estudos necessários para que se implemente um empreendimento dessa magnitude. Por fim, apresentar a situação problema da figura 1 aos estudantes, mencionando que eles farão parte de um estudo que verificará as perdas da biodiversidade daquele local relacionada à construção da hidrelétrica.

A segunda etapa da sequência didática é apresentar o grupo de organismos a ser estudado: uma população de peixes do rio em que a usina foi instalada. Nesse momento, há uma gama de conceitos biológicos que se pode retomar junto aos estudantes: - cadeias e teias alimentares, níveis tróficos, população, características do grupo para-filético “Peixes”, anádromo e catádromo, e principalmente os conceitos de genética que esta sequência didática investigativa aborda-

rá, como genótipo e fenótipo, genes e alelos, homozigoto, heterozigoto, e dominância incompleta. A figura 2 traz uma representação de uma população de peixes migratórios e suas características genéticas. Observar: - 1. o fenótipo a ser analisado é o da capacidade de armazenamento de gordura corporal; 2. - os indivíduos que possuem genótipo que confere maior capacidade de armazenamento de gordura terão mais chances de reprodução; 3. - além disso, os indivíduos que possuem genótipo que confere armazenamento intermediário de gordura também terão chances de reprodução, porém menores, se comparados aos de grande armazenamento de gordura; 4. - já os indivíduos que possuem genótipo que confere pouca armazenagem de gordura terão as menores chances de reprodução; 5. - nessa parte da atividade, é necessário relacionar a figura 1 com a figura 2, para que os estudantes reconheçam que os peixes com maiores capacidades de estocar gordura corporal terão também maiores chances de chegar ao final do percurso migratório e se reproduzir.

Na atividade subsequente, inicia-se um estudo mais aprofundado da população de peixes do ponto de vista genético. A partir disso, os estudantes são levados a analisar as tabelas 1 e 2 e fazer os cálculos necessários para compreender como estava a população de peixes até o momento antes da instalação da usina hidrelétrica (ano de 2009). Em seguida, os estudantes deverão comparar estudos de anos posteriores (2012 e 2015) para verificar

se a população de peixes estudada se manteve em equilíbrio ao longo desses anos. Por fim, a última atividade da sequência envolve a compreensão do problema investigado. É preciso estimular os estudantes a utilizarem os dados analisados para que compreendam o que aconteceu com a população de peixes daquele local e assim possam escrever o relatório final. É importante que os estudantes compreendam que, ao analisar a biodiversidade de um local, é preciso considerar fatores que vão além da mera contagem de espécies. No caso desta atividade, mostramos que a instalação da barragem de uma usina hidrelétrica influenciou diretamente na variabilidade genética de peixes, o que implica em mudanças na biodiversidade em nível genético da população de indivíduos. Desse modo, o que este trabalho propõe é a ampliação do conceito de biodiversidade, evidenciando que a biodiversidade caracteriza-se também pela variabilidade genética entre os indivíduos de uma população e que alterações na variabilidade podem alterar a sobrevivência dos indivíduos e, conseqüentemente, da espécie.

RESPOSTAS ESPERADAS PARA AS PERGUNTAS

As atividades A e B apresentam as perguntas mais gerais que irão nortear os cálculos das atividades subsequentes, C e D. É importante que o professor enfatize aos estudantes que estas etapas são importantes para a organização do raciocínio e da compreensão do fenômeno biológico em questão.

Nas primeiras atividades (A, B, C e D) os estudantes analisam a tabela 2 para calcular a frequência fenotípica dos peixes. Como existe apenas 1 peixe com massa entre 4,0kg e 3,0kg, num universo de 10 peixes, portanto a frequência deste fenótipo é de $1/10 = 0,1$. Para o fenótipo de armazenamento intermediário de gordura tem-se 3 peixes com massa menor do que 3,0kg e até 2,0kg. Portanto, a frequência deste fenótipo é de $3/10 = 0,3$. Por fim, para o fenótipo de baixa quantidade de armazenamento de gordura tem-se 6 peixes com massa menor do que 2,0kg e até 1,0kg. Logo, a frequência deste fenótipo é de $6/10 = 0,6$.

		2009
Frequência fenotípica	Grande quantidade de armazenamento de gordura	0,1
	Armazenamento intermediário de gordura	0,3
	Baixa quantidade de armazenamento de gordura	0,6

A partir disso, os estudantes podem concluir (para a pergunta do item A) que a população encontra-se dentro da proporção fenotípica esperada, uma vez que os valores encontrados estão de acordo com os valores da tabela 1.

Para o cálculo da frequência alélica, pode-se utilizar a contagem direta dos alelos.

Para o alelo A1 tem-se: 1 indivíduo A1A1 e 3 indivíduos A1A2, logo tem-se 5 alelos A1 dentre os indivíduos mencionados. Para o alelo A2 tem-se: 6 indivíduos A2A2 e 3 indivíduos A1A2, logo tem-se 15 alelos A2 dentre os indivíduos mencionados. Portanto, para A1 a frequência é $5/20 = 0,25$ e para A2 a frequência é $15/20 = 0,75$.

		2009
Frequência do alelo	A	0,25
	B	0,75



A questão E apresenta o quadro 1 que traz os estudos realizados em 2012 e 2015 com aquela população de peixes. Neste momento, os estudantes devem comparar os dados de 2009, calculados por eles mesmos, com os dados encontrados nesta tabela. A comparação irá levá-los a perceber que os alelos nesta população não se encontram mais em equilíbrio, uma vez que as frequências alélicas sofreram alterações ao longo das gerações. Em 2009, a frequência alélica era de 0,25 para o alelo A1 e 0,75 para o alelo A2, ao passo que em 2015 a frequência encontrada foi de 0,6 para o alelo A1 e 0,4 para o alelo A2. Estimular os estudantes a utilizarem dados para argumentar em suas respostas, pois é uma etapa importante do ensino por investigação.

A questão F requer um posicionamento dos estudantes sobre a interferência da usina hidrelétrica na biodiversidade dos peixes. A partir dos dados levantados nas questões anteriores, os estudantes devem afirmar que houve uma alteração na variabilidade genética dos peixes daquela região, ou seja, houve alteração na biodiversidade em nível genético

devido à interferência da usina hidrelétrica na dinâmica da população de peixes. Uma evidência disso é a variação das frequências alélicas e fenotípicas dos peixes ao longo dos anos de estudo. Estes devem ser os dados que os estudantes utilizarão em suas respostas para dar subsídio aos argumentos. É importante estimular os estudantes a utilizarem os dados numéricos ao longo da construção do argumento.

Por fim, a questão G requer que os estudantes retomem o problema inicial e utilizem o conhecimento adquirido ao longo da sequência para responder. É esperado que cheguem à conclusão de que a usina hidrelétrica ocasionou impactos significativos na diversidade em nível genético da população de peixes, uma vez que as frequências alélicas e fenotípicas encontradas antes da construção da usina hidrelétrica (2009) são bem diferentes daquelas encontradas quando a usina já estava em funcionamento (2012 e 2015). Além disso, os estudantes precisam se posicionar perante essa situação e argumentar se a usina hidrelétrica deve ou não ser reativada.