

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO PROFESSOR ALBERTO CARVALHO
DEPARTAMENTO DE BIOCÊNCIAS

Milena Nascimento do Rosário

A Biologia Evolutiva no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2019 a 2024

ITABAIANA

2025

Milena Nascimento do Rosário

A Biologia Evolutiva no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2019 a 2024

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Biociências do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciada em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Ricardo Santos do Carmo

ITABAIANA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

R789b Rosário, Milena Nascimento do.
A biologia evolutiva no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2019 a 2024 / Milena Nascimento do Rosário. – Itabaiana (SE), 2025.
43 f.

Orientador: Prof. Ricardo Santos do Carmo
Monografia (Licenciatura em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Sergipe.

1. Exame Nacional do Ensino Médio – Avaliação. 2. Biologia evolutiva.
3. Biologia – Estudo e ensino. I. Carmo, Ricardo Santos do. II. Universidade Federal de Sergipe. III. Título.

CDU 57

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Milena Nascimento do Rosário

A Biologia Evolutiva no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2019 a 2024

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Biociências do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciada em Ciências Biológicas

Data de aprovação: 24/02/2025

Nota: 9,0

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ricardo Santos do Carmo (orientador)
Departamento de Biociências
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Cristiano Aprígio dos Santos
Departamento de Geografia
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Rony Peterson Santos Almeida
Departamento de Biociências
Universidade Federal de Sergipe

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu filho Mathias, que é minha maior motivação; ao meu esposo Alexandre, que sempre esteve comigo e me apoiou durante essa minha caminhada; em especial aos meus pais Maria José e Jaconias, que sonhavam em me ver formada e sempre me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guia e dá forças todos os dias.

Agradeço ao meu orientador Prof. Ricardo, que lutou comigo para conseguir chegar até aqui e fazer um bom trabalho.

RESUMO

A Biologia Evolutiva é um eixo unificador da Biologia e tem implicações diretas para a educação científica, mas sua abordagem no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) permanece inexplorada na literatura acadêmica. Este estudo investiga quais tópicos sobre evolução biológica são exigidos dos estudantes nas questões de Biologia do ENEM e se sua abordagem é consistente com a literatura acadêmica em Biologia Evolutiva. Fundamenta-se na Teoria da Evolução, na Matriz de Referência do ENEM, e em princípios da avaliação educacional. A análise documental abrangeu 495 questões da área de Ciências da Natureza entre 2019 e 2024, das quais 172 pertencem à disciplina Biologia e 18 abordam Biologia Evolutiva. Os resultados revelam a centralidade do conceito de adaptação no exame, como parte do tópico “Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos”. Contudo, não são abordados os mecanismos que produzem as adaptações. Há repetição de questões sobre as adaptações que favoreceram a conquista do ambiente terrestre por angiospermas. Outra temática frequente é a especiação alopátrica, enquadrada no tópico “Aspectos genéticos da formação e manutenção da biodiversidade”. Em contrapartida, durante os seis anos em que o ENEM foi aplicado e reaplicado, não há nenhuma questão sobre evolução humana e tempo geológico, nenhuma questão sobre teorias evolutivas anteriores à teoria de Darwin. De fato, o tópico “Explicações pré-darwinistas para a modificação das espécies”, como a teoria de Lamarck e Buffon, é ignorado no exame nacional brasileiro. A presença de questões relacionadas à fragmentação de habitat e à conservação da biodiversidade sugere uma tentativa de explicitar as implicações dos estudos em Biologia Evolutiva para estratégias de conservação da biodiversidade. Para aprimorar o ensino de evolução, recomendamos a diversificação dos tópicos avaliados, maior integração com a genética molecular e o aumento da frequência de questões sobre interpretação filogenética. O estudo fornece subsídios para uma avaliação mais equilibrada da Biologia Evolutiva no ENEM.

Palavras-chave: ENEM; Biologia Evolutiva; Ensino de Biologia.

ABSTRACT

Evolutionary Biology is a unifying axis of Biology and has direct implications for science education, but its approach in the National High School Exam (ENEM) remains unexplored in the academic literature. This study investigates which topics on biological evolution are required of students in the ENEM Biology questions and whether their approach is consistent with the academic literature on Evolutionary Biology. It is based on the Theory of Evolution, the ENEM Reference Matrix, and principles of educational assessment. The documentary analysis covered 495 questions from the area of Natural Sciences between 2019 and 2024, of which 172 belong to the subject of Biology and 18 address Evolutionary Biology. The results reveal the centrality of the concept of adaptation in the exam, as part of the topic "Evolution and anatomical and physiological patterns observed in living beings". However, the mechanisms that produce adaptations are not addressed. There are repeated questions on the adaptations that favored the conquest of the terrestrial environment by angiosperms. Another frequent theme is allopatric speciation, which is covered in the topic "Genetic aspects of the formation and maintenance of biodiversity". On the other hand, during the six years in which ENEM has been applied and re-applied, there has been no question on human evolution and geological time, no question on evolutionary theories prior to Darwin's theory. In fact, the topic of "pre-Darwinian explanations for the modification of species", such as the theory of Lamarck and Buffon, is ignored in the Brazilian national exam. The presence of questions related to habitat fragmentation and biodiversity conservation suggests an attempt to explain the implications of evolutionary biology studies for biodiversity conservation strategies. To improve the teaching of evolution, we recommend diversifying the topics assessed, better integrating them with molecular genetics and increasing the frequency of questions on phylogenetic interpretation. The study provides support for a more balanced assessment of Evolutionary Biology in ENEM.

Keywords: ENEM; Evolutionary Biology; Biology Teaching.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Avaliação educacional em larga escala.....	9
1.2	O ENEM como avaliação em larga escala	9
1.3	Objetivos e questões de pesquisa	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Ensino de Evolução Biológica	12
2.2	Aprendizagem de Evolução Biológica	14
3	MÉTODO	18
4	RESULTADOS.....	20
5	DISCUSSÃO	23
5.1	Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos	23
5.2	Aspectos genéticos da formação e manutenção da diversidade biológica.....	29
5.3	Sistemática e as grandes linhas da evolução dos seres vivos	30
5.4	Fundamentos genéticos da evolução.....	32
5.5	A teoria evolutiva de Charles Darwin	32
6	CONCLUSÃO.....	34
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Avaliação educacional em larga escala

Na década de 1990, no Brasil e em outros países, o modelo de avaliações em larga escala (ALE) se tornou dominante, respondendo às necessidades políticas de reforma, financiamento, avaliação da aprendizagem, da escola e do currículo (Pellegrino, 2020; Fritsch e Vitelli, 2021). A forma como esses dados são interpretados varia conforme o contexto, podendo ser analisada em escalas nacional e internacional (Sellar e Lingard, 2018). Avaliações em larga escala são testes padronizados que enfatizam métricas como validade e confiabilidade (Wagemaker, 2020). A confiabilidade mede a estabilidade dos resultados do teste ao longo do tempo. Se um teste for administrado ao mesmo grupo em duas ocasiões diferentes, a alta confiabilidade teste-reteste significa que as pontuações devem ser semelhantes. A consistência interna é um tipo de fiabilidade e avalia a consistência dos resultados entre os itens de um teste. A validade diz respeito a se o teste mede o que se pretende medir. Um teste pode ser confiável sem ser válido, mas um teste válido deve ser confiável (Wagemaker, 2020). O Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) se tornou o principal instrumento desse modelo avaliativo, assumindo um papel estratégico tanto na seleção para o ensino superior quanto na definição de diretrizes curriculares (BRASIL, 1999; Sousa e Ferreira, 2019).

1.2 O ENEM como avaliação em larga escala

O ENEM foi criado em 1998 como uma ferramenta para avaliar competências e habilidades dos estudantes ao final da educação básica. O surgimento desse teste esteve alinhado aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) e à LDB/1996 (Castro e Tiezzi, 2005). Em 1998, os PCNs inauguraram um novo conceito de ensino médio, com influência clara e admitida das propostas da Unesco sobre aprender a conhecer, aprender a fazer, aprender a viver e aprender a ser. O ensino médio, além de ser passagem para a educação superior, deveria ofertar preparação básica, ou seja, desenvolver competências para continuar a aprender, conviver, produzir e definir identidade própria (Castro e Tiezzi, 2005). Com base na LDB/1996, o ENEM se materializa com três fundamentos: (i) contribuir para os estudantes autoavaliarem suas aprendizagens; (ii) servir de base

referencial para avaliar nacionalmente os resultados dos sistemas de ensino dos entes federativos (União, estados, Distrito Federal e municípios); (iii) e substituir ou complementar o modelo tradicional de vestibulares (Brasil, 1999).

Antes dos PCNs e do ENEM, o ensino médio no Brasil sofria com a fragmentação curricular, uma vez que cada universidade desenvolvia suas próprias provas de vestibular, forçando as escolas a seguirem orientações distintas. Esse cenário beneficiava estudantes de escolas particulares, que adaptavam seu ensino às exigências dos vestibulares, enquanto alunos de escolas públicas, que seguiam apenas o currículo oficial, ficavam em desvantagem. O ENEM, ao se tornar um parâmetro nacional, buscou mitigar essas disparidades e promover maior equidade no acesso ao ensino superior.

Como o ENEM é um exame em larga escala ou teste padronizado, os governos utilizam os resultados como fonte de informação para indicadores de qualidade escolar e utilização nas políticas de responsabilização (*accountability*). Por outro lado, de acordo com Travitzi (2013, p. 78), é necessário dar mais atenção aos indicadores de processos (métodos de ensino, estrutura curricular) e insumos (formação de professores, infraestrutura das escolas e nível socioeconômico dos estudantes).

Nas últimas décadas, diversos estudos investigaram o impacto do ENEM na educação básica. Na área de Química, diferentes autores concluíram que as questões do ENEM exploram mais habilidades de baixa ordem cognitiva do que de alta ordem cognitiva, ao contrário do que determina a BNCC (Cintra et al., 2016; Marques et al. (2021). No caso da Biologia, uma análise da qualidade psicométrica das questões aplicadas no período de 2009 a 2019 revelou que mais da metade dos itens não eram bons para aferir a proficiência que a prova de Ciências da Natureza se propõe a medir (Vizzotto, 2022). Esses trabalhos levantam questionamentos sobre a eficácia do ENEM em contribuir para uma formação mais crítica e reflexiva dos estudantes. Além disso, sugerem a necessidade de revisão dos critérios de elaboração das questões.

Outra linha de investigação são os estudos sobre conteúdos específicos abordados pelo ENEM. Existem estudos sobre biodiversidade (Garcia, Franzolin e Bizzo, 2022), biologia celular (Santos e Cortelazzo, 2013), microbiologia (Sodré-Neto e Medeiros, 2018), genética (Cestaro et al., 2020; Costa et al., 2024), sistemática filogenética (Soares, Elias, Souza, 2023), entre outros assuntos. Apesar dessas contribuições, a literatura ainda carece de análises sobre como os conteúdos específicos da Biologia, em particular a evolução biológica, são abordados nas questões do ENEM. Essa lacuna se torna

especialmente relevante dado que a evolução é um eixo estruturante das ciências biológicas e fundamental para a compreensão integrada dos fenômenos naturais. Como bem destacado por Mead e Branch (2011),

a biologia evolutiva é a disciplina que delinea as nossas origens e a trajetória da nossa genealogia, esclarece por que razão temos certas características e não outras e esboça os contornos do futuro da nossa espécie. A evolução informa as nossas práticas agrícolas, a gestão das pescas e os tratamentos médicos. Deixar a evolução de fora do currículo de biologia do ensino secundário é tão inaceitável como deixar a álgebra de fora do currículo de matemática ou o Movimento dos Direitos Civis de fora do currículo de estudos sociais. A evolução é o princípio organizador da biologia, o estudo da vida, e deve ser ensinada, não só nas escolas secundárias, mas também, a um nível adequado à idade, em todo o currículo de ciências do ensino básico e secundário - e certamente não deve ser adiada para a universidade (p. 116).

A centralidade dos conceitos evolutivos em todas as áreas da Biologia e a reputação do ENEM no cenário educacional brasileiro justificam este estudo.

1.3 Objetivos e questões de pesquisa

O objetivo geral deste estudo é analisar a presença e a correção conceitual da abordagem da evolução biológica nas provas de Ciências da Natureza do ENEM de 2019 a 2024. As seguintes perguntas de pesquisa norteiam este estudo:

- Quais tópicos sobre evolução biológica são exigidos dos estudantes nas questões de Biologia do ENEM?
- Os tópicos sobre evolução biológica são consistentes com a literatura acadêmica em Biologia Evolutiva?

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ensino de Evolução Biológica

A evolução é um conceito fundamental em Biologia, pois une e dá sentido às diversas subdisciplinas dessa área do conhecimento, além de contribuir para tomar decisões informadas sobre, por exemplo, o uso de antibióticos e as ações humanas sobre a biodiversidade (Hodson, 2003; Mead e Branch, 2011; Harms e Reiss, 2019; Kampourakis, 2022; Panayides et al., 2024). No entanto, ensinar a evolução é desafiador por diferentes motivos, como o negacionismo científico e as concepções alternativas entre estudantes e professores.

O negacionismo científico, embora não seja um fenômeno recente, tem afetado a aceitação da evolução biológica nos dias atuais (Diethelm e McKee, 2009). Os negadores da ciência empregam estratégias como citar falsos especialistas para desacreditar especialistas, selecionar "provas" ou artigos falhos para desafiar o consenso científico, recorrer a falácias lógicas e deturpações do conhecimento científico, além de criar expectativas impossíveis sobre o que a investigação científica é capaz de concluir (Diethelm e McKee, 2009, p. 2). Para sustentar a não existência de evolução, os negacionistas lançam dúvidas sobre algum aspecto da abordagem evolutiva, buscam desacreditá-la como controversa, e exigem tempo igual para o ensino de conhecimentos evolutivos e ideias alternativas à evolução, como o criacionismo (Scott, 2009a).

Diversos estudos revelam a prevalência de concepções alternativas entre alunos e professores (Sickel e Friedrichsen, 2013; Ziadie e Andrews, 2018). Entre os professores, as concepções alternativas comuns incluem explicações teleológicas da adaptação, ideias lamarckianas sobre a herança de características adquiridas e mal-entendidos sobre a adaptação biológica (Beniermann, 2019; Gregory, 2009). Estas concepções equivocadas podem afetar a compreensão da evolução pelos estudantes (Yates e Marek, 2014).

Muitos professores dos níveis fundamental e médio exibem mal-entendidos sobre os principais conceitos evolutivos, como seleção natural e tempo geológico, semelhantes aos de seus alunos, apesar de terem feito cursos de biologia ou terem experiência em pesquisa (Sickel e Friedrichsen, 2013). Em vez de entenderem as mudanças nas populações de uma perspectiva darwiniana, em que uma parte da população (os organismos mais adaptados ao ambiente) tem maior probabilidade de se reproduzir, os

professores geralmente se apoiam na teoria lamarckiana. Isso inclui crenças de que os organismos necessitam mudar, que as modificações são baseadas no uso ou desuso de características e que as características adquiridas na interação com o ambiente são herdadas. Os professores também apresentam dificuldade em relação ao conceito de tempo geológico, que é crucial para explicar como as mudanças graduais se acumulam ao longo de milhões de anos para resultar na diversidade de vida observada hoje. Por fim, ainda segundo Sickel e Friedrichsen (2013), alguns professores aceitam a microevolução, mas geralmente rejeitam conceitos de maior escala, como especiação, descendência com ancestralidade comum e a ideia de que os humanos são um produto da evolução.

Estudos europeus demonstram que a abordagem da evolução em sala de aula está diretamente relacionada ao conhecimento e à aceitação deste tema pelos professores (Nehm e Schonfeld, 2007; Sickel e Friedrichsen, 2013; Kuschmierz et al., 2020). No contexto europeu, Lanka, Hild e Beniermann (2024) investigaram essa relação nos âmbitos de formação e atuação docente na Suíça. Os pesquisadores identificaram uma correlação positiva significativa entre conhecimento e aceitação da evolução entre professores do *Primary School* (equivalente ao Ensino Fundamental I no Brasil), o que não se verificou entre docentes *Lower Secondary School* (Ensino Fundamental II brasileiro) e do *Upper Secondary School* (ensino médio brasileiro). De modo geral, a aceitação da evolução entre professores de ciências suíços apresenta-se elevada em todos os grupos estudados.

Quanto ao conhecimento sobre evolução, os níveis variam de baixo a moderado: professores do jardim de infância (*Kindergarten*) e do ensino primário demonstram conhecimento baixo, enquanto aqueles do Ensino Fundamental II apresentam conhecimento moderado. Estes achados alinham-se aos resultados de Kuschmierz et al. (2020), de que diferentemente dos níveis de conhecimento, a aceitação da evolução entre professores de ciências europeus é geralmente moderada a elevada, excetuando-se a Turquia. A aceitação tende a aumentar conforme o nível educacional e a experiência docente (Athanasiou et al., 2016; Hartelt et al., 2022). Por fim, a relação entre conhecimento e aceitação é também influenciada pela compreensão da natureza da ciência e pelas crenças epistemológicas dos professores (Dunk et al., 2017; Sickel e Friedrichsen, 2013).

No contexto latino-americano, Silva e Mortimer (2020) examinaram as concepções dos professores de Biologia sobre as origens e a evolução humana na

Argentina, no Brasil e no Uruguai. Os resultados revelaram diferenças na forma como os professores desses países abordam a relação entre ciência e religião ao ensinar conceitos evolutivos.

Os professores brasileiros demonstram maior tendência a integrar crenças religiosas com o conhecimento científico sobre as origens e a evolução humana, com respostas que frequentemente refletem tentativas de conciliar fé e ciência. Em contraste, os professores argentinos e uruguaios mantêm separação mais clara entre os domínios científico e religioso. De acordo com Silva e Mortimer (2020), três fatores principais contribuem para essas diferenças: (1) variações nos programas de formação de professores entre países; (2) diferenças na forma como a evolução é abordada nos currículos nacionais; (3) a influência social mais ampla da religião, sobretudo no Brasil. Esses resultados estão alinhados com os achados de Glaze (2013) sobre os modos de atuação docente: professores que abordam o conflito, mas evitam partes da teoria da evolução, especialmente quando a rejeitam; outros que buscam reconciliação entre evolução e crenças religiosas; e aqueles que ignoram o conflito. De modo semelhante, Griffith e Brem (2004) documentaram "professores seletivos", que evitam certos tópicos evolutivos, "professores conflituosos", que se debatem com suas próprias crenças e o impacto de seu ensino, e "professores cientistas", que não abordam questões sociais controversas. Em conclusão, embora os professores de ciências geralmente aceitem a evolução, eles conhecem abaixo do necessário para ensinar. Isto sublinha a necessidade de intervenções específicas nos programas de formação de professores para melhorar o conhecimento do conteúdo, abordar concepções alternativas comuns e equipar os professores com as competências necessárias para ensinar a evolução.

2.2 Aprendizagem de Evolução Biológica

Os estudantes que colocam ou dependem das crenças religiosas como centrais para a tomada de decisões manifestam tendência a rejeitar conhecimentos ou ideias que afetam ou pareçam colidir com elas (Esbenshade, 1993; Branch e Scott, 2008; Jakobi, 2010; Hermann, 2011). Na aprendizagem sobre Biologia Evolutiva, os estudantes altamente comprometidos com visões religiosas do mundo apresentam mais dificuldade em conciliar sua fé com conceitos evolutivos, aumentando assim a probabilidade de rejeitar a evolução (Glaze et al., 2015). No Brasil, as crenças religiosas têm se

correlacionado com o nível de conhecimento da evolução e a aceitação do criacionismo (Penteado et al., 2012). Por outro lado, nos Estados Unidos, o compromisso religioso está correlacionado com o nível inicial e a mudança na aceitação da evolução (Lawson e Worsnop, 1992).

O fenômeno do "apartheid cognitivo" (Coburn, 1996), que consiste em separar mentalmente a informação aceita das rejeitadas, foi relatado em diversas investigações (McKeachie et al., 2002; Ingram e Nelson, 2006). Este fenômeno sugere que os alunos podem compartimentar ideias contraditórias, particularmente quando confrontados com conceitos científicos que desafiam suas crenças pessoais. Hermann (2012) discutiu esse fenômeno em relação a dois estudantes do ensino médio que mostraram entendimento abrangente da teoria evolutiva, rejeitando ao mesmo tempo a sua validade. Os estudantes receiam de que a aceitação da evolução possa conduzir a uma perda de fé e, por isso, adotam a atitude de separar o conhecimento evolutivo em partes que aceitam e partes que não aceitam (Hermann, 2012). De acordo com Coburn (1996), os mal-entendidos de muitos alunos sobre biologia evolutiva resultam da tendência para compartimentar ou rejeitar o conhecimento científico, e não de uma genuína falta de compreensão.

Lawson e Thompson (1988) investigaram os equívocos de estudantes a respeito de genética e evolução, bem como relacionaram os equívocos ao desenvolvimento cognitivo dos estudantes. Um dos principais equívocos identificados é a crença de que as características adquiridas podem ser transmitidas geneticamente à prole, de maneira semelhante à teorias de Lamarck e de Darwin. Esse equívoco é mais prevalente entre estudantes operacionais concretos em comparação com estudantes operacionais formais. Por exemplo, estudantes operacionais concretos geralmente não conseguem entender que as características de um recém-nascido são determinadas por uma combinação de genes parentais transportados nas células sexuais. Eles acreditam erroneamente que mudanças induzidas pelo meio ambiente nos pais, como bronzeamento da pele ou tingimento dos cabelos, afetarão a prole. O estudo descobriu que estudantes operacionais concretos podem entender alguns aspectos da seleção natural, mas não aplicam esse entendimento de forma consistente para gerar previsões. Em vez disso, fazem interpretações próprias da lei da herança de características adquiridas. Os estudantes consideram a necessidade ou o hábito como razões adequadas para a ocorrência de características vantajosas nas populações. Por outro lado, Lawson e Worsnop (1992) avaliaram que os alunos que

atingiram a fase formal do pensamento apresentam uma maior capacidade de abandonar crenças não científicas em favor de conceitos evolutivos.

Na explicação sobre a mudança biológica nos organismos, os conceitos de seleção natural e variação são raramente mobilizados pelos estudantes, ou mobilizados com significados equivocados. Para explicar por que um traço evoluiu, a maioria dos estudantes usavam palavras como “necessidade” ou “necessário”, que indica a crença de que as mudanças evolutivas ocorrem porque os organismos precisam conscientemente delas para sobreviver, o que é um equívoco teleológico comum. Em seguida, o termo “uso” é o mais frequente nas explicações sobre evolução biológica (Settlage Jr., 1994).

A explicação baseada em “uso” sugere que a aplicação ou uso de uma característica pelo organismo pode dar origem a uma característica nova, ao passo que o desuso pode levar à perda da característica. Uma explicação desse tipo é coerente com lei de uso e desuso da teoria de Lamarck e Darwin, mas não é suportada pela genética moderna. Os conceitos de seleção natural e variação, centrais na teoria de Darwin, são bem-sucedidos na conexão com a genética moderna e explica a mudança por meio da seleção natural agindo sobre variações genéticas aleatórias dentro de uma população. Para explicar corretamente em termos darwinianos, o surgimento de novas características se devem a “variações pré-existentes” e “adaptativas”, não à “necessidade” no significado de “propósito” ou “consciência”, ou pelo “uso e desuso”.

Entender o conceito de seleção natural é crucial para a compreensão de como ocorrem mudanças nas espécies ao longo do tempo, mas ensinar tal conceito é desafiador, porque conflita com o pensamento teleológico, essencialista, e antropocêntrico. Assim, as pessoas conectam o conceito de seleção natural a esses pensamentos e confundem adaptações com propósitos (Gregory, 2009; Crivellaro e Sperduti, 2014).

A seleção natural e os conceitos de genética formam uma base necessária para a compreensão da evolução (Banet e Ayuso, 2003; Mead et al., 2017). Para Mead et al. (2017), o ensino de genética antes da evolução melhora significativamente o entendimento dos alunos sobre a evolução. Essa melhoria é quantificada como um aumento de 7% nas pontuações em comparação com aqueles ensinados primeiro sobre evolução. Para estudantes de menor habilidade, a melhoria na compreensão da evolução só foi observada quando a genética foi ensinada primeiro. Isso sugere que a ordem do ensino é particularmente crucial para esses alunos. O estudo realça sinais robustos de retenção de conhecimento a longo prazo, independentemente da ordem de ensino. No

entanto, devido ao tamanho limitado da amostra, o estudo não conseguiu determinar conclusivamente os efeitos da ordem de ensino na retenção de longo prazo. Ainda assim, os pesquisadores sugerem que ensinar genética antes da evolução é uma intervenção simples, minimamente disruptiva e de custo zero que pode ser facilmente adotada para melhorar a compreensão da evolução. Por fim, os autores notam também que embora o ensino de genética primeiro aprimore a compreensão da evolução, ele não aumenta significativamente a aceitação da evolução. Isso indica uma correlação fraca entre conhecimento e aceitação, destacando que entender um conceito não leva necessariamente à sua aceitação.

Banet e Ayuso (2003) criticam a abordagem tradicional de começar com a genética mendeliana e depois relacionar com o ensino de evolução. Os autores recomendam começar com conceitos mais gerais como traços hereditários e não hereditários antes de introduzir mecanismos genéticos complexos. Na avaliação destes autores, são promissoras as atividades que permitem aos alunos exprimir, testar e rever as suas ideias. De fato, os estudos estão alinhados em destacar o papel dos professores em corrigir as explicações equivocadas dos estudantes, principalmente sobre herança genética e os significados de “necessidade” e “propósito” (Lawson e Thompson, 1988; Settlage Jr., 1994). Contudo, tanto professores iniciantes quanto experientes manifestam dificuldades para identificar e abordar os equívocos dos alunos sobre a evolução com estratégias de ensino direcionadas (Sickel e Friedrichsen, 2013).

3 MÉTODO

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e, quanto ao procedimento, caracteriza-se como uma pesquisa descritiva. O objetivo central desse tipo de pesquisa é oferecer uma descrição detalhada e sistemática do assunto em estudo. No que concerne à coleta de dados, a pesquisa documental não gera novos dados diretamente, mas sim analisa, classifica e interpreta documentos já disponíveis para produzir conhecimento sobre um fenômeno (Bogdan e Biklen, 1994; Berg, 2000; Flick, 2012; Creswell, 2014). Em outras palavras, envolve a interpretação de dados extraídos de fontes existentes, sem necessariamente estabelecer relações causais. Para isso, foram utilizados como fonte de dados as provas oficiais do ENEM (caderno na cor azul), analisadas por meio da técnica de análise de conteúdo (Bardin, 2011). A unidade de análise deste estudo corresponde aos itens do ENEM relacionados ao assunto evolução biológica. A definição dessa unidade foi guiada pelo critério de abordar conceitos centrais da teoria da evolução, garantindo que os dados produzidos fossem coerentes com os objetivos da pesquisa. Os arquivos do exame apresentam cores variadas, com o objetivo de organização das salas de aula que recebem os respondentes. As questões em quaisquer arquivos são exatamente iguais quanto aos conteúdos abordados, então a cor é irrelevante para a análise das questões. Assim, de maneira aleatória, selecionamos o arquivo da prova na cor azul.

A análise de dados foi conduzida em etapas sucessivas. Na primeira fase, foram classificados os itens do componente Biologia nas provas oficiais do ENEM aplicadas entre 2019 e 2024, considerando tanto as versões de aplicação quanto de reaplicação. A prova de Ciências da Natureza avalia os estudantes por meio de 45 itens distribuídos entre os componentes curriculares Biologia, Física e Química. Para a identificação das questões de Biologia presentes nos exames, foram utilizados os Objetos do Conhecimento descritos na Matriz de Referência do ENEM, conforme o Edital nº 1, de 08 de maio de 2013 (BRASIL, 2013).

Em todos os anos, exceto no ano de 2024, houve duas versões da prova, logo 495 itens de Ciências da Natureza da natureza compuseram o corpo geral da pesquisa. No caso dos itens com tratamento mais interdisciplinar, a classificação foi realizada com base nos conceitos e habilidades exigidos para a resolução do item, bem como no assunto central. Desse modo, os 172 itens de Biologia foram separados dos demais componentes curriculares.

Na segunda etapa, classificamos os itens como pertencentes especificamente à área de Biologia Evolutiva. Para isso, adotamos dois procedimentos. Em primeiro lugar, consideramos tanto os conceitos explícitos no texto-base quanto aqueles necessários para a compreensão do enunciado, eliminação dos distratores e escolha do gabarito. Em segundo lugar, cada item foi comparado à lista de Objetos do Conhecimento. Desse modo, foram classificados 18 itens de Biologia Evolutiva. A classificação dos itens do componente de Biologia e, em específico, dos itens de Biologia Evolutiva foram realizadas de maneira independente pelos dois autores do estudo. Depois, em reuniões presenciais, as classificações foram revisadas.

Por exemplo, o item 96 foi excluído da amostra. A questão trata da escolha de espécies para um processo de recuperação ambiental, que é um problema ecológico direto. Do ponto de vista dos objetivos educacionais, a ênfase está em fazer o estudante reconhecer os atributos das espécies (potencial biótico, estratégias reprodutivas, ciclo de vida) e sua adequação ao processo de sucessão ecológica, um fenômeno amplamente estudado na ecologia. Em específico, as estratégias r e K são conceitos usados para descrever comportamentos ecológicos de populações em relação ao ambiente. A questão não requer que o estudante entenda ou explique o processo evolutivo que deu origem às estratégias reprodutivas. Embora os conceitos de estratégias reprodutivas r e K estejam fundamentados em processos evolutivos, como seleção natural, esses aspectos são implícitos na questão e não seu foco principal. A evolução funciona como um background explicativo, mas não é o centro da análise demandada.

Além da classificação dos itens, este estudo também investigou a ocorrência de contexto nos itens sobre evolução biológica. Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002, p. 31), no ensino de Ciências, o contexto envolve "competências de inserção da ciência e de suas tecnologias em um processo histórico, social e cultural, bem como o reconhecimento e a discussão de aspectos práticos e éticos da ciência no mundo contemporâneo". Assim, a análise contemplou a identificação de cenários para os conceitos avaliados.

4 RESULTADOS

A análise das questões de Biologia Evolutiva no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) entre 2019 e 2024 revelou um padrão de distribuição assimétrico entre os tópicos avaliados. Seis dos onze tópicos mapeados não foram contemplados em nenhuma questão: (1) Evolução humana; (2) A biologia como ciência: história, métodos, técnicas e experimentação; (3) Hipóteses sobre a origem do Universo, da Terra e dos seres vivos; (4) Teorias da evolução; (5) Explicações pré-darwinistas para a modificação das espécies; e (6) Teoria sintética da evolução. Por outro lado, as 18 questões identificadas concentraram-se majoritariamente no tópico “Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos” (8 questões), com menor incidência nos demais tópicos abordados. Nosso achados estão sumariados na Tabela 1.

A distribuição interna dos subtópicos revela uma ênfase desproporcional em determinados conteúdos dentro do tópico predominante. Quatro das oito questões sobre “Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos” abordam a conquista do ambiente terrestre pelas angiospermas, mas com enfoques distintos: adaptações anatômicas reprodutivas, coevolução com insetos, impacto da extinção da megafauna na dispersão de sementes e pressões seletivas exercidas por aves sobre o tamanho dos frutos. Esse recorte evidencia uma preferência por conteúdos vinculados a interações ecológicas e biológicas contemporâneas, em detrimento de aspectos macroevolutivos e paleobiológicos. Além disso, o subtópico mimetismo foi explorado em duas questões distintas (mimese facultativa em polvos e mimetismo batesiano em cobras-coraís), sugerindo uma seleção temática recorrente, ainda que limitada a casos específicos.

Nos demais tópicos abordados, a distribuição das questões também apresenta padrões contrastantes. No tópico “Aspectos genéticos da formação e manutenção da diversidade biológica” (5 questões), houve uma predominância de conteúdos sobre especiação alopátrica (2 questões), com destaque para o isolamento reprodutivo e a teoria dos refúgios. Os outros três itens trataram de coevolução entre patógenos e hospedeiros, efeito da fragmentação do habitat sobre a diversidade genética, e efeitos da introdução de espécie de planta exótica, ambos com forte viés aplicado à conservação. Esse recorte sugere uma abordagem centrada nas implicações ecológicas da variação genética.

Tabela 1: Tópicos de Biologia Evolutiva contemplados e não contemplados no ENEM no período 2019-2024

ITEM	PROVA DE APLICAÇÃO											PROVA DE REAPLICAÇÃO						
	2019 125	2020 101	2021 93	2021 121	2021 127	2021 129	2022 99?	2022 110	2023 103	2024 98	2024 110	2019 130	2020 113	2021 102	2022 103	2022 133	2022 134	2023 130
HABILIDADE	16	16	28	16	16	16	28	16	22	-	-	16	16	16	16	11	28	4
Fundamentos genéticos da evolução																X		
Aspectos genéticos da formação e manutenção da diversidade biológica		X		X			X					X						X
Sistemática e as grandes linhas da evolução dos seres vivos	X								X					X				
Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos			X		X	X				X	X		X		X		X	
Evolução humana																		
A biologia como ciência: história, métodos, técnicas e experimentação																		
Hipóteses sobre a origem do Universo, da Terra e dos seres vivos																		
Teorias de evolução																		
Explicações pré-darwinistas para a modificação das espécies																		
A teoria evolutiva de Charles Darwin								X										
Teoria sintética da evolução																		

Tópicos ou assuntos sobre evolução dos seres vivos

No tópico “Sistemática e as grandes linhas da evolução dos seres vivos” (3 questões), a distribuição dos conteúdos avaliados apresenta um contraste metodológico. Uma das questões abordou as relações filogenéticas entre peixes ósseos, anfíbios e répteis, exigindo a interpretação de um cladograma para estabelecer a proximidade evolutiva entre esses grupos. As outras duas questões trataram da evolução das plantas a partir da presença ou ausência de tubo polínico, mas com exigências cognitivas distintas: em uma delas, o conceito foi trabalhado dentro da interpretação de uma árvore filogenética, enquanto na outra ocorreu apenas como um lembrete de que essa estrutura foi fundamental para a conquista do ambiente terrestre pelas angiospermas.

Por fim, os tópicos “Fundamentos genéticos da evolução” e “Teoria evolutiva de Charles Darwin” foram representados por uma única questão cada. A questão sobre fundamentos genéticos abordou a clonagem embrionária e sua relação com a desextinção. A única questão sobre Darwinismo enfatizou variações em padrões reprodutivos de anfíbios.

Esses resultados indicam um padrão de exclusão de determinados tópicos evolutivos, ênfase em adaptações e extinção. As adaptações são abordadas, mas sem abranger a variedade de mecanismos evolutivos envolvidos na produção de adaptações. Essa assimetria sugere um desalinhamento entre os conteúdos avaliados e a amplitude conceitual esperada para a Biologia Evolutiva no ensino médio.

5 DISCUSSÃO

5.1 Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos

A questão 93 da prova do ano de 2021 (aplicação) trata de adaptações morfológicas e comportamentais que aumentam a sobrevivência frente a pressões seletivas, como a capacidade do polvo mimético de imitar outros animais para evitar predadores ou enganar presas. Nessa questão, estão sendo explorados os conceitos de “mimese facultativa”, “mimetismo batesiano” e “mimetismo agressivo”.

A mimese facultativa refere-se à capacidade de um organismo adotar um padrão de aparência ou comportamento similar a outro ser ou objeto, mas de forma voluntária e situacional. O organismo que utiliza essa estratégia pode mudar sua forma ou comportamento dependendo das condições ambientais, como a presença de predadores ou presas. É uma capacidade rara no reino animal, mas observada em cefalópodes como os polvos (Cheney et al., 2007). Isso permite que os polvos adotem cores miméticas na presença de certas espécies, proporcionando camuflagem ou vantagens predatórias. O polvo mimético, ao alterar a cor, a textura e a forma de sua pele, está fazendo uso de uma mimese facultativa. Ele imita outros animais ou elementos do ambiente (como pedras ou corais) para se proteger de predadores ou para caçar presas. A capacidade de alternar rapidamente entre transparência e pigmentação foi observada em alguns cefalópodes mesopelágicos, como *Japetella heathi* e *Onychoteuthis banksii*, em resposta a mudanças nas condições ópticas do ambiente (Zylinski e Johnsen, 2011). Isso sugere uma estratégia dinâmica para otimizar a camuflagem sob diferentes condições de iluminação.

Em alguns casos, os polvos podem usar a mimese para se assemelhar a espécies venenosas ou não comestíveis, evitando assim a predação (mimetismo batesiano). O polvo mimético pode ser considerado um exemplo de mimetismo batesiano se ele imitar animais como o peixe-leão ou a serpente-marinha, que são reconhecidos por predadores como perigosos. Embora o polvo não seja venenoso nem perigoso, ele assume a aparência de uma criatura ameaçadora, reduzindo a chance de ser predado. Assim, a semelhança com espécies nocivas funciona como estratégia de defesa (Cheney et al., 2007).

O mimetismo agressivo ocorre quando um organismo imita outro para se aproximar e atacar sua presa, muitas vezes se fazendo passar por algo inofensivo ou atraente. Essa imitação tem a intenção de enganar as presas e facilitar o ataque. O polvo

mimético também pode exibir mimetismo agressivo em situações em que ele imita, por exemplo, um predador ou uma presa inofensiva para facilitar a captura de presas. Algumas espécies de polvos podem imitar animais como peixes pequenos ou criaturas inofensivas para se aproximar furtivamente de suas presas e então atacá-las com sucesso. A mimese de cores em polvos é uma adaptação que lhes permite ajustar sua aparência de acordo com o contexto ambiental, seja para evitar predadores ou para caçar presas mais eficientemente. Essa habilidade demonstra a notável plasticidade fenotípica e as complexas estratégias de sobrevivência desenvolvidas por esses cefalópodes.

A questão 110 de 2024 (aplicação) se enquadra no tópico “Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos”, pois aborda um caso clássico de mimetismo — uma estratégia evolutiva que resulta de pressões seletivas, em que a similaridade na coloração entre cobras-corais verdadeiras e falsas-corais tem a função de reduzir a predação. O mimetismo batesiano é um fenômeno em que espécies inofensivas (mímicos) evoluem para se assemelhar a espécies tóxicas ou perigosas (modelos) para evitar a predação (Cheney et al., 2007).

Esse tipo de mimetismo é dependente da frequência, pois um aumento na abundância do mímico pode levar ao colapso do sinal de alerta (Darst e Cummings, 2006). Alguns estudos mostram que o mimetismo batesiano pode ser mantido mesmo quando o modelo é raro (Ries e Mullen, 2008). Além disso, a generalização de estímulos pode conferir maior proteção aos mímicos que se assemelham ao modelo menos tóxico devido à sobreposição de curvas de evitação generalizada (Darst e Cummings, 2006). Esse item do ENEM explora também o conceito de evolução convergente, em que espécies diferentes, mas com pressões seletivas semelhantes, evoluem características parecidas.

A questão 127 de 2021 (aplicação) está classificada em "Evolução e padrões anatômicos e fisiológicos observados nos seres vivos", pois trata de adaptações de plantas (dispersão de sementes) em função da interação com organismos que exercem papéis ecológicos específicos, como as preguiças-gigantes. Essa abordagem dá ênfase aos padrões ecológicos e funcionais resultantes de processos evolutivos. A questão oferece uma perspectiva mais centrada nas consequências dessas interações na biodiversidade.

As preguiças gigantes eram parte importante da megafauna do Pleistoceno na região do Pantanal e outras áreas do Brasil. Estudos sugerem que várias espécies de preguiças gigantes tinham hábitos alimentares mistos ou de pastagem, o que as tornava potenciais dispersoras de sementes (Dantas e Santos, 2022). Algumas espécies, como

Ahytherium aureum, *Australonyx aquae* e *Nothrotherium maquinense*, eram provavelmente trepadoras, o que poderia facilitar o acesso a frutos e sementes (Santos et al., 2023).

A extinção das preguiças-gigantes resultou em um vazio ecológico, impactando diretamente outras espécies, como aquelas que dependem da dispersão de sementes, uma função que as preguiças desempenhavam. A perda dessa função ecológica afetou a distribuição e a diversificação de plantas, alterando as interações entre espécies e, por consequência, os processos evolutivos dessas plantas. A extinção das preguiças-gigantes não foi apenas uma perda de uma espécie individual, mas desencadeou uma mudança nos padrões evolutivos e ecológicos em um ecossistema. Essas mudanças nos mecanismos de dispersão levou provavelmente a novos padrões evolutivos, com algumas plantas potencialmente se tornando mais dependentes de outros tipos de animais para dispersão (como aves ou roedores) ou, em alguns casos, se adaptando a métodos de dispersão mais autossuficientes, como a dispersão pelo vento.

A questão 129 de 2021 (aplicação) trata de uma adaptação anatômica e funcional (a formação do endosperma triploide) que confere vantagem evolutiva às angiospermas, garantindo nutrientes para o desenvolvimento do embrião. Em outras palavras, o processo de fertilização dupla, no qual um segundo núcleo espermático se funde com o núcleo da célula central, levou à formação do endosperma nas angiospermas (Friedman, 1998). O endosperma evoluiu como uma estrutura especializada para nutrir o embrião zigótico, proporcionando uma vantagem adaptativa ao fornecer recursos para o desenvolvimento da semente (Friedman, 1992). Essa inovação contribuiu de modo substancial para o sucesso evolutivo das plantas com flores. Um processo semelhante de fertilização dupla ocorre em algumas gimnospermas do grupo *Gnetales*, como *Ephedra* e *Gnetum*, que são consideradas as parentes vivas mais próximas das angiospermas (Friedman, 1990; Friedman, 1998). No entanto, nesses casos, o produto da segunda fertilização geralmente forma embriões adicionais, em vez de endosperma (Carmichael e Friedman, 1996; Friedman, 1992). Isso sugere que a fertilização dupla pode ter evoluído inicialmente em um ancestral comum de *Gnetales* e angiospermas, sendo posteriormente modificada nas angiospermas para formar o endosperma (Friedman, 1994).

A questão 98 de 2024 envolve as mudanças nos padrões de reprodução e nutrição dos embriões, com destaque para a diminuição da vesícula vitelínica e o desenvolvimento da lactação. A diminuição da vesícula vitelínica e o desenvolvimento da lactação são

modificações fisiológicas e anatômicas que surgiram em algumas linhagens, especialmente no contexto da transição dos répteis para os mamíferos.

A evolução da vesícula vitelínica (*yolk sac*) em mamíferos apresenta uma tendência geral de redução, mas com variações importantes entre os diferentes grupos. Nos mamíferos térios (marsupiais e placentários), houve uma diminuição significativa da vesícula vitelínica em comparação com outros vertebrados. No entanto, todos os mamíferos ainda possuem uma vesícula vitelínica, embora com funções e graus de desenvolvimento variados (Ager et al., 2007).

Nos marsupiais, a vesícula vitelínica forma uma placenta vitelínica funcional, sendo a principal estrutura placentária neste grupo (Renfree, 2010). Já nos mamíferos placentários (eutérios), ocorreu uma maior redução, com a placenta corioalantóica assumindo o papel principal na nutrição fetal na maioria das espécies (Carter e Enders, 2016). Em alguns grupos de mamíferos placentários, como roedores e lagomorfos, a vesícula vitelínica persiste até o final da gestação e mantém funções importantes na transferência de anticorpos, vitaminas, lipídios e proteínas (Carter e Enders, 2016). Isso sugere que, mesmo com a redução evolutiva, a vesícula vitelínica ainda desempenha papéis relevantes em certos grupos. Em resumo, houve uma tendência geral de diminuição da vesícula vitelínica na evolução dos mamíferos, especialmente nos placentários. No entanto, esta estrutura não desapareceu completamente e manteve funções importantes em diversos grupos, demonstrando uma evolução complexa e adaptativa deste órgão extraembrionário nos mamíferos.

Na questão 113 de 2020 (reaplicação), há destaque para o fato de que a interação entre as angiospermas e os insetos polinizadores está diretamente relacionada a mudanças anatômicas e fisiológicas nas plantas, como a evolução de flores adaptadas para atrair polinizadores e a modificação no sistema reprodutivo. Essas adaptações facilitam a polinização e promovem a variabilidade genética, resultando em maior diversificação das angiospermas, que se reflete no sucesso evolutivo dessa classe de plantas.

A coevolução das angiospermas e dos insetos envolveu várias adaptações que facilitaram o seu sucesso e diversificação mútuos. Os compostos de defesa das plantas desempenharam um papel crucial neste processo, selecionando adaptações comportamentais, morfológicas e fisiológicas nos insetos (Beran e Petschenka, 2022). Uma adaptação significativa foi a capacidade dos insetos herbívoros de sequestrar

compostos de defesa das plantas, que evoluiu em várias linhagens de insetos e lhes proporcionou vantagens de *fitness* (Beran e Petschenka, 2022).

Evidências recentes sugerem que as primeiras diversificações das angiospermas e dos insetos não foram tão estreitamente associadas como se pensava. A longa história de polinização por insetos de gimnospermas provavelmente moldou os primeiros mutualismos de polinização por insetos de angiospermas, e o evento de extinção em massa K-Pg foi crucial para impulsionar as interações modernas entre angiospermas e insetos (Asar et al., 2022). Além disso, o *downsizing* do genoma em angiospermas durante o início do período Cretáceo facilitou a redução do tamanho das células, permitindo mais veias e estômatos em suas folhas, o que aumentou suas habilidades competitivas (Simonin e Roddy, 2018). Está claro que a coevolução das angiospermas e dos insetos envolveu adaptações complexas de ambos os lados. Os insetos desenvolveram mecanismos para lidar com as defesas das plantas, incluindo o sequestro, enquanto as angiospermas desenvolveram características que aumentaram sua competitividade. No entanto, esta coevolução nem sempre foi síncrona, havendo evidências que sugerem que a diversidade de insetos atingiu o seu pico antes da diversificação das angiospermas (Peris e Condamine, 2024). A relação entre angiospermas e insetos continua a ser um tema de investigação em curso, com estudos centrados em vários aspectos, como a polinização, a herbivoria e as adaptações mútuas (Birnbaum e Abbot, 2018; Mckenna et al., 2009).

A questão 103 de 2022 (reaplicação) aborda um exemplo de seleção sexual, um processo evolutivo descrito por Darwin, no qual características que aumentam o sucesso reprodutivo de um dos sexos (geralmente os machos) são favorecidas, mesmo que essas características não necessariamente aumentem a sobrevivência do indivíduo. A seleção sexual favorece o sucesso reprodutivo individual de machos dimórficos por meio de diferentes mecanismos. A competição entre machos e a escolha das fêmeas são fatores que impulsionam a evolução de características sexualmente dimórficas que aumentam o sucesso reprodutivo dos machos (Breuer et al., 2012). Em espécies poligínicas, a maior proporção de machos em relação às fêmeas favorece a seleção sexual, estabelecendo uma relação entre sistemas de acasalamento e seleção sexual (Izar et al., 2009).

Características dimórficas como tamanho corporal, coloração e ornamentos podem conferir vantagens aos machos na competição por territórios e acesso às fêmeas, bem como na atração de parceiras (Arak, 1983; Moore, 1990). Entretanto, nem sempre o dimorfismo sexual favorece machos maiores. Em algumas espécies, como a cobra d'água

Nerodia sipedon, os machos são menores que as fêmeas apesar da intensa competição entre eles (Weatherhead et al., 1995). Isso sugere que outros fatores, como alocação de energia para produção de espermatozoides, também podem influenciar o dimorfismo. Portanto, a seleção sexual atua de formas variadas sobre características dimórficas dos machos, seja por meio da competição intrasexual ou da escolha intersexual.

No caso do pavão, as penas vistosas do macho são um exemplo clássico de dimorfismo sexual, em que os machos evoluem características atraentes para as fêmeas, que indicam boa saúde e aptidão genética. Da mesma forma, chifres, garras ou dentes maiores em outras espécies podem ser resultado de competições entre machos para garantir o acesso a fêmeas. Esses traços dimórficos são favorecidos pela seleção sexual porque aumentam as chances de reprodução dos indivíduos que os possuem, mesmo que impliquem em um custo em termos de sobrevivência.

Na questão 134 de 2022 (reaplicação), a mudança no tamanho dos frutos do palmito juçara pode ser vista como uma alteração em uma característica anatômica da planta, ou seja, o tamanho dos frutos, em resposta a mudanças no ambiente e à seleção natural provocada pela extinção das aves de maior porte.

As aves desempenham um papel crucial como predadores de insetos herbívoros, ajudando a controlar suas populações. Estudos sugerem que a exclusão de aves levou a um aumento nas densidades de lagartas e danos foliares em plantas (Hooks et al., 2003). A redução na predação de herbívoros por aves pode resultar em menor biomassa e produtividade das plantas (Marquis e Whelan, 1994). Ao longo do tempo, isso pode exercer pressões seletivas sobre as plantas e o consequente surgimento de melhores defesas contra herbivoria.

As aves também são importantes vetores de nutrientes entre ecossistemas marinhos e terrestres. A diminuição de aves pode interromper o fluxo de subsídios marinhos para ecossistemas terrestres, levando à redução de nutrientes disponíveis no solo, diminuição da qualidade nutricional das folhas e redução da herbivoria (Young et al., 2010). Essas alterações nos ciclos de nutrientes podem influenciar a evolução das estratégias de aquisição de nutrientes das plantas. Além disso, as aves atuam como polinizadores e dispersores de sementes para muitas espécies de plantas. A escassez de aves pode afetar os padrões de fluxo gênico e dispersão das plantas, potencialmente alterando sua distribuição geográfica e estrutura populacional ao longo do tempo.

5.2 Aspectos genéticos da formação e manutenção da diversidade biológica

A questão 101 de 2020 (aplicação) aborda o isolamento reprodutivo como mecanismo que promove a divergência genética e fenotípica, influenciando a formação de novas espécies ou a manutenção da diversidade entre populações. A evolução alopátrica é um mecanismo chave pelo qual a biodiversidade aumenta, à medida que populações isoladas se adaptam a seus ambientes únicos e, eventualmente, se tornam espécies distintas. O isolamento reprodutivo não apenas impulsiona a formação de novas espécies, mas também contribui para a manutenção da diversidade biológica ao permitir que as populações se adaptem de forma independente aos seus respectivos ambientes, gerando novas variações fenotípicas e genéticas. Essa diversidade é crucial para a resiliência ecológica, permitindo que diferentes populações ou espécies sobrevivam a diferentes pressões seletivas. Portanto, ao entender como o isolamento reprodutivo promove a divergência genética entre populações, essa questão explora diretamente os mecanismos genéticos que são fundamentais para a evolução das espécies e a manutenção da diversidade biológica.

A especiação alopátrica é também assunto da questão 130 da prova de 2019 (reaplicação). Em específico, o isolamento geográfico, como descrito na teoria do refúgio, pode levar à especiação alopátrica. O processo de diferenciação genética das populações isoladas é uma consequência da isolamento geográfico, que impede o fluxo gênico entre as populações, promovendo a formação de novas espécies ou subespécies ao longo do tempo. A explicação do texto descreve como as populações em refúgios separados se adaptam às condições locais, resultando na diversidade biológica observada, um fenômeno central no modelo da especiação alopátrica.

Na questão 121 de 2021 (aplicação), o examinador aborda a interação evolutiva entre patógeno e hospedeiro, destacando como a baixa letalidade pode ser um indicador de uma relação de longo tempo estabelecida por meio da coevolução. A baixa letalidade do vírus pode ser interpretada como um reflexo da evolução adaptativa ao longo do tempo. Patógenos que causam mortes rápidas nos hospedeiros não têm tempo suficiente para se espalhar, o que pode ser desvantajoso para sua sobrevivência a longo prazo. Assim, ao longo da coevolução, muitos patógenos evoluem para se tornarem menos letais, aumentando suas chances de transmissão enquanto mantêm o hospedeiro vivo. Esse tipo de adaptação é um exemplo claro de como a coevolução genética entre vírus e

hospedeiros pode manter a diversidade biológica de ambas as espécies, ajustando-se às pressões seletivas que surgem dessa interação.

Na questão 130 de 2023 (reaplicação), o estudo está investigando o efeito da paisagem na variabilidade genética das populações de marsupiais e as consequências da fragmentação do habitat. A análise da diversidade genética nas duas paisagens (contínua e fragmentada) está diretamente ligada à conservação da diversidade biológica. A conclusão de que a manutenção da conectividade entre os fragmentos é uma estratégia eficiente de manejo está relacionada ao fato de que o isolamento das populações (devido à fragmentação) pode reduzir a variabilidade genética e aumentar o risco de extinção.

Populações isoladas tendem a sofrer endogamia, o que pode resultar em redução da diversidade genética e maior vulnerabilidade à extinção devido à perda de variabilidade genética, que é essencial para a adaptação a mudanças ambientais. Aumentar a conectividade entre fragmentos de habitat (como áreas florestais isoladas) promove o fluxo gênico, permitindo que indivíduos de diferentes populações se encontrem e troquem genes. Isso aumenta a diversidade genética da população como um todo, pois novas combinações de alelos são introduzidas na população, o que ajuda a manter a capacidade adaptativa da espécie a diferentes pressões seletivas.

O risco de extinção de espécies é abordado também na questão 99 de 2022 (aplicação), que abordou a relação entre introdução de planta exótica jaqueira (*Artocarpus heterophyllus*), originária da Índia e de regiões do Sudeste Asiático extinção de espécies nativas, no Brasil desde a era colonial.

5.3 Sistemática e as grandes linhas da evolução dos seres vivos

Em Biologia Evolutiva, a organização ou classificação da diversidade de seres vivos é feita através do Método da Sistemática Filogenética, desenvolvido pelo entomólogo alemão Willi Hennig em 1956 e que ganhou proeminência a partir de 1966 (Amorim et al., 2001). O método hennigiano (sistemática filogenética ou cladística) assume as relações de parentesco como critério para as classificações a partir de conhecimentos sobre traços morfológicos, comportamentais, ecológicos, fisiológicos, citogenéticos e moleculares. Esses conhecimentos são sintetizados em cladogramas (filogenias ou árvores filogenéticas) com o objetivo de explicar as modificações de determinados traços nas linhagens estudadas. As árvores filogenéticas são hipóteses sobre

as relações dos grupos biológicos (ancestrais e recentes), ou seja, possíveis respostas sobre as mudanças nos traços dos seres vivos ao longo do tempo (Amorim, 2002). Por isso mesmo, a cladística não se confunde com a taxonomia, que fornece regras e princípios para nomear, delimitar e classificar a biodiversidade (Amorim, 2002). Nesse sentido, diante de cladograma, cabe aos professores e estudantes fazerem interpretações sobre modificações de determinados traços, especialmente comparações entre os grupos. Em outras palavras, a cladística ajuda no objetivo produzir hipóteses de homologia que sugiram agrupamentos semelhantes. Prejudicam as interpretações, porém, concepções equivocadas sobre a evolução biológica, como (1) a concepção de sequência linear de modificações - fundada na ideia de progresso ou aperfeiçoamento; (2) concepção de propósito ou finalidade nos mecanismos que produzem mudança nos traços.

A classificação de uma questão no tópico "Sistemática e as grandes linhas da evolução dos seres vivos" não exige necessariamente a presença explícita de um cladograma. Contudo, a ausência de um cladograma reduz a centralidade de elementos puramente sistemáticos. De acordo com Amorim (2002), cladogramas ou filogenias são representações indispensáveis para que cientistas, professores e estudantes avaliem hipóteses científicas, corroborando ou refutando.

Na questão 125 do ano 2019 (aplicação), o cladograma é usado para ilustrar as relações evolutivas entre grupos de plantas e mostrar como a presença do tubo polínico marca uma transição importante na evolução das plantas, permitindo a fecundação independente da água. A comparação entre grupos que possuem ou não essa estrutura pode ajudar a entender como essa adaptação favoreceu a colonização de ambientes terrestres. Além disso, o cladograma pode destacar a relação entre as angiospermas e outras plantas com flores, fornecendo uma visão sistêmica sobre a evolução da reprodução dessas plantas. Também na questão 103 de 2023 (aplicação), a conquista do ambiente terrestre é abordada.

A questão 102 de 2021 (reaplicação) se enquadra no tópico (3) Sistemática e as grandes linhas da evolução dos seres vivos, pois trata da análise de um cladograma, que é uma ferramenta usada na sistemática para representar as relações evolutivas entre diferentes grupos de organismos com base em suas características compartilhadas. O cladograma, ao mostrar as relações entre sardinha, sapo, jacaré, pardal e coelho, permite identificar quais grupos compartilham mais características ancestrais em comum, o que

indica um grau maior de parentesco genético. Nesse caso, jacaré e pardal compartilham um ancestral mais recente em comum, indicando maior semelhança genética entre eles.

5.4 Fundamentos genéticos da evolução

Na questão 133 de 2022 (reaplicação), a clonagem embrionária, como descrita no texto, é um processo que envolve a transferência de material genético de uma célula somática de um indivíduo (neste caso, um mamute) para um zigoto anucleado de outra espécie (elefante). Esse procedimento está intrinsecamente relacionado aos fundamentos genéticos da evolução, uma vez que manipula diretamente o material genético (DNA) para criar uma cópia genética idêntica ao organismo original. A clonagem visa, assim, gerar indivíduos que possuam um perfil genético quase idêntico ao de uma espécie extinta, o que implica em uma compreensão dos mecanismos de herança genética e como esses mecanismos podem ser manipulados para reconstruir geneticamente um organismo extinto. A clonagem de uma espécie extinta como o mamute também traz à tona a discussão sobre a diversidade genética e o papel da evolução nas adaptações das espécies ao longo do tempo. Embora o objetivo da clonagem seja recriar uma espécie extinta, isso levanta questões sobre o impacto que a introdução de uma espécie clonada teria sobre a diversidade genética de espécies atuais e suas possíveis consequências evolutivas.

5.5 A teoria evolutiva de Charles Darwin

Na questão 110 de 2022 (aplicação), a abordagem se enquadra no contexto de aulas de evolução biológica, especificamente no estudo de estratégias reprodutivas e adaptações. Os diferentes padrões reprodutivos descritos nas espécies de anfíbios anuros ilustram como a seleção natural pode favorecer diferentes estratégias reprodutivas, dependendo das condições ambientais e das pressões seletivas.

Os diversos tipos de cuidado parental, número de gametas e ambientes de desenvolvimento embrionário evidenciam como as espécies se adaptam de maneiras distintas e aumentam suas chances de sucesso na reprodução. A quantidade de gametas produzidos pelas fêmeas pode afetar diretamente o sucesso reprodutivo e o fitness dos indivíduos. Fêmeas que produzem mais ovos tendem a ter maior fecundidade e potencial reprodutivo (Bókony et al., 2018; Byrne e Silla, 2010). No entanto, há um *trade-off*, pois

a produção de muitos gametas também tem custos energéticos para as fêmeas. Por outro lado, fêmeas com menor massa de ovos podem compensar produzindo uma camada de geleia mais espessa ao redor dos ovos, especialmente em ambientes antropizados (Bókony et al., 2018). Isso sugere uma plasticidade reprodutiva em resposta às condições ambientais. A variação na produção de gametas também pode afetar o desenvolvimento e fitness da prole. Por exemplo, fêmeas de ambientes agrícolas e urbanos produziram descendentes com taxas de desenvolvimento reduzidas e menor massa corporal como larvas e juvenis, possivelmente devido a efeitos transgeracionais (Bókony et al., 2018). Além disso, a viabilidade dos embriões pode ser afetada pela qualidade dos gametas maternos (Metts et al., 2013). Portanto, a quantidade e qualidade dos gametas produzidos pelas fêmeas têm consequências importantes para o sucesso reprodutivo e a dinâmica populacional dos anfíbios anuros.

6 CONCLUSÃO

Os conteúdos de Biologia Evolutiva no ENEM são suportados pela literatura acadêmica especializada, de modo que não há erros conceituais nas questões. Em outras palavras, as questões são factualmente precisas, mas a cobertura dos assuntos é restrita. Ausências críticas são percebidas no exame, ou seja, não há questões sobre (1) tempo geológico e seu papel na macroevolução; (2) evolução humana e ancestralidade comum; (3) dinâmica populacional versus mudanças individuais; (4) modelos de especiação além do alopátrico; (5) interpretação filogenética; (6) mecanismos genéticos, como deriva genética e recombinação gênica.

A ausência de questões sobre tempo geológico é particularmente problemática, considerando que este conceito é fundamental para explicar como mudanças graduais se acumulam ao longo de milhões de anos, resultando na biodiversidade atual (Sickel e Friedrichsen, 2013). Esta lacuna pode reforçar dificuldades já documentadas entre professores em compreender a escala temporal da evolução.

Ao enfatizar a grande magnitude do tempo evolutivo, os alunos podem apreciar melhor a força lenta, mas poderosa, dos mecanismos evolutivos. Compreender a longa história da evolução é crucial porque nos ajuda a ver como pequenas mudanças durante um longo tempo podem levar a grandes diferenças. A perspectiva do tempo geológico permite entender que um rio pode esculpir um cânion ao longo de milhões de anos, mesmo que pareça mudar muito pouco a cada dia.

No entanto, quando se pede aos alunos que pensem sobre a evolução ao longo de bilhões de anos, fica muito mais difícil. Isso ocorre porque quatro bilhões de anos é um tempo tão longo que é difícil imaginar. É como tentar imaginar quantos grãos de areia existem em uma praia — ela é grande demais para ser facilmente entendida. Uma forma de alcançar uma visão geral da história da vida na Terra é abordar processos evolutivos mais rápidos. Muitos estudantes acham fácil entender a evolução quando podem vê-la acontecendo rapidamente. Por exemplo, eles podem ver bactérias se tornando resistentes aos antibióticos em apenas alguns anos. Esse é um curto período e é fácil de observar e entender (Hillis, 2007).

As questões envolvendo interpretação de cladogramas refletem a importância crescente do pensamento filogenético no ensino de evolução. Contudo, a baixa frequência

destas questões sugere a necessidade de maior ênfase nesta habilidade fundamental para a compreensão das relações evolutivas.

Muitos estudantes pensam na história evolutiva como uma escada, em que algumas espécies são “superiores” ou mais avançadas do que outras. Em vez disso, trata-se de se ramificar em direções diferentes, como uma árvore. Árvores filogenéticas são diagramas que mostram como diferentes espécies se relacionam ao longo da evolução. Todas as espécies vivas hoje estão igualmente distantes das primeiras formas de vida na Terra. Isso significa que humanos, gatos e árvores estão evoluindo pelo mesmo período desde o início da vida. Nenhuma espécie é mais “avançada” do que outra. A análise filogenética nos ajuda a entender as diferenças e semelhanças entre as espécies. É como comparar membros da família para ver quem é parecido e quem tem características diferentes (Catley, 2006). Os cladogramas não são apenas ferramentas descritivas, mas também preditivas. Eles podem ajudar os alunos a fazer inferências lógicas sobre a evolução dos caracteres e compreender o contexto histórico das mudanças evolutivas. Essa capacidade preditiva pode aprofundar a compreensão dos alunos sobre as relações evolutivas e ecológicas entre os táxons.

Igualmente preocupante é a falta de questões sobre evolução humana. Sickel e Friedrichsen (2013) apontam que professores frequentemente rejeitam conceitos evolutivos de maior escala, incluindo a ideia de que humanos são produto da evolução. A ausência deste tópico nos testes pode perpetuar esta resistência, perdendo oportunidades de confrontar concepções alternativas sobre nossa própria história evolutiva.

As questões analisadas, embora abordem temas relevantes como coevolução e adaptações não explicitam que a evolução ocorre em populações, não em indivíduos. Esta omissão é crítica, pois professores frequentemente recorrem a explicações lamarckistas, focando em mudanças individuais baseadas em necessidade ou uso/desuso de características (Gregory, 2009). A falta de ênfase na perspectiva populacional darwiniana — em que organismos mais adaptados têm maior probabilidade de reprodução — pode reforçar estas concepções alternativas.

A abordagem da especiação, particularmente a ênfase em especiação alopátrica, indica uma simplificação potencialmente problemática dos mecanismos de especiação. Embora este modo de especiação seja didaticamente mais acessível, a ausência de questões sobre outros modos de especiação pode criar uma visão limitada do processo evolutivo. Sugerimos a inclusão de exemplos de especiação simpátrica e parapátrica em

avaliações futuras. O conceito de parapatria destaca a importância de compreender a distribuição das espécies e seus limites, o que pode informar os esforços de conservação, especialmente em habitats fragmentados, onde as áreas de distribuição de espécies podem estar em contato, mas não se sobrepor. Esse entendimento pode ajudar na identificação de áreas críticas para preservação e gestão do habitat.

O foco em adaptações morfofisiológicas revela uma continuidade com o ensino tradicional de evolução. Entretanto, as questões analisadas apresentam uma abordagem coerente com os estudos em Biologia Evolutiva e Ecologia ao conectar estas adaptações com contextos ecológicos específicos, como evidenciado nas questões sobre mimetismo e adaptações reprodutivas.

A presença de temas contemporâneos como fragmentação de habitat, conservação e desextinção representa uma tendência promissora na atualização do currículo. Estas questões promovem o pensamento crítico sobre aplicações práticas da teoria evolutiva e suas implicações socioambientais.

Para aprimorar o ensino de evolução no ensino médio brasileiro, recomendamos:

- Contemplar o tempo geológico na explicação dos processos evolutivos;
- Inclusão de questões sobre eventos paleobiológicos;
- Contemplar os diferentes modelos de especiação;
- Aumento na frequência de questões envolvendo interpretação filogenética;
- Maior integração entre genética molecular e processos evolutivos;
- Inclusão de questões sobre evolução humana;
- Inclusão de questões sobre macroevolução.

Pesquisas futuras poderiam investigar como diferentes abordagens pedagógicas influenciam o desempenho dos estudantes nestas questões, particularmente em temas que exigem pensamento sistêmico como coevolução e interpretação filogenética.

REFERÊNCIAS

- AGER, E.; SUZUKI, S.; PASK, A. The transcriptional profile of ovine mammary gland tissue during the transition from pregnancy to lactation. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, p. e0172570, 2017.
- ARAK, A. Sexual selection by male-male competition in natterjack toad choruses. **Nature**, v. 306, n. 5940, p. 261-262, 1983.
- ATHANASIOU, K.; KATAKOS, E.; PAPADOPOULOU, P. Acceptance of evolution as one of the factors structuring the conceptual ecology of the evolution theory of Greek secondary school teachers. **Evolution: Education and Outreach**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2016.
- AMORIM, D. S. A mesma origem. **Jornal das Ciências**, n. 6, ano 1, p. 4. Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, 2002.
- AMORIM, D. S. et al. Diversidade biológica e evolução: uma nova concepção para o ensino de Zoologia e Botânica no 2º Grau. *In*: BARBIERI, M. R. (orgs.). **A construção do conhecimento do professor: uma experiência de parceria entre professores do Ensino Fundamental e Médio da Rede Pública e a Universidade**. Ribeirão Preto: Holos /FAPESP, 2001. p. 41-49.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011, 229p.
- BANET, E.; AYUSO, G. E. Teaching of biological inheritance and evolution of living beings in secondary school. **International Journal of Science Education**, v. 25, n. 3, p. 373-407, 2003.
- BERAN, F.; PETSCHENKA, G. Sequestration of Plant Defense Compounds by Insects: From Mechanisms to Insect-Plant Coevolution. **Annual Review of Entomology**, v. 67, n. 1, p. 163, 2022.
- BERG, B. L. **Qualitative Research Methods for the Social Sciences**. 4. ed. Long Beach: Allyn and Bacon. 1996.
- BIRNBAUM, S. S. L.; ABBOT, P. Insect adaptations toward plant toxins in milkweed-herbivores systems - a review. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 166, n. 5, p. 357-366, 2018.
- BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Portugal: Porto Editora, 1994.
- BÓKONY, V.; ÜVEGES, B.; UJHEGYI, N.; VEREBÉLYI, V.; NEMESHÁZI, E.; CSÍKVÁRI, O.; HETTYEY, A. Endocrine disruptors in breeding ponds and reproductive health of toads in agricultural, urban and natural landscapes. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 1335-1345, 2018.
- BREUER, T.; ROBBINS, A. M.; BOESCH, C.; ROBBINS, M. M. Phenotypic correlates of male reproductive success in western gorillas. **Journal of Human Evolution**, v. 62, n. 4, p. 466-472, 2012.
- BYRNE, P. G.; SILLA, A. J. Hormonal induction of gamete release, and in-vitro fertilisation, in the critically endangered Southern Corroboree Frog, *Pseudophryne corroboree*. **Reproductive Biology and Endocrinology**, v. 8, n. 1, p. 144, 2010.

CARMICHAEL, J. S.; FRIEDMAN, W. E. Double fertilization in *Gnetum gnemon* (Gnetaceae): its bearing on the evolution of sexual reproduction within the Gnetales and the angiosperm clade. **American Journal of Botany**, v. 83, n. 6, p. 767-780, 1996.

CARTER, A. M.; ENDERS, A. C. Placentation in mammals: Definitive placenta, yolk sac, and paraplacenta. **Theriogenology**, v. 86, n. 1, p. 278-287, 2016.

CATLEY, K. M. Darwin's Missing Link - A Novel Paradigm for Evolution Education. **Science Education**, v. 90, p. 767-783, 2006.

CESTARO, D. C.; KLEINKE, M. U.; ALLE, L. F. Uma análise do desempenho dos participantes e do conteúdo abordado em itens de genética e biologia evolutiva do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM): Implicações curriculares. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 3, p. 503-536, 2020.

CHENEY, K. L.; GRUTTER, A. S.; MARSHALL, N. J. Facultative mimicry: cues for colour change and colour accuracy in a coral reef fish. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 275, n. 1631, p. 117-122. 2007.

CINTRA, E. P.; MARQUES JUNIOR, A. C.; SOUSA, E. C. DE . Correlação entre a matriz de referência e os itens envolvendo conceitos de Química presentes no ENEM de 2009 a 2013. **Ciência & Educação**, v. 22, n. 3, p. 707-725, 2016.

COBERN, W. W. Worldview theory and conceptual change in science education. **Science Education**, v. 80, n. 5, p. 579-610. 1996.

COSTA, K.; SOUZA, R. A.; NASCIMENTO, A. G.; RODRIGUES, F. M. Análise do conteúdo de genética presente no ENEM no período de 1998 a 2022. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 5, n. 1, 2024.

CRESWELL, J. W. **Investigação qualitativa e projeto de pesquisa**: escolhendo entre cinco abordagens. 3. ed. Porto Alegre: Penso, 2014.

DANTAS, M. A. T., SANTOS, A. M. A. Inferring the paleoecology of the Late Pleistocene giant ground sloths from the Brazilian Intertropical Region. **Journal of South American Earth Sciences**, n. 117, n. 10, p. 38-99, 2022.

DARST, C. R.; CUMMINGS, M. E. Predator learning favours mimicry of a less-toxic model in poison frogs. **Nature**, v. 440, n. 7081, p. 208-211, 2006.

DIETHELM, P.; MCKEE, M. Denialism: what it is and how should scientists respond? **Eur J Pub Health**, v. 19, p. 2-4, 2009.

DUNK, R. D.; PETTO, A. J.; WILES, J. R.; CAMPBELL, B. C. A multifactorial analysis of acceptance of evolution. **Evolution: Education and Outreach**, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2017.

ESBENSHADE, D. H. Student Perceptions about Science & Religion. **The American Biology Teacher**, v. 55, n. 6, p. 334-338, 1993.

FLICK, U. W. E. **Introdução à metodologia de pesquisa**: um guia para iniciantes. Porto Alegre: Penso, 2012.

FRIEDMAN, W. E. Double Fertilization in *Ephedra*, a Nonflowering Seed Plant: Its Bearing on the Origin of Angiosperms. **Science**, v. 247, n. 4945, p. 951-954, 1990.

- FRIEDMAN, W. E. Evidence of a Pre-Angiosperm Origin of Endosperm: Implications for the Evolution of Flowering Plants. **Science**, v. 255, n. 5042, p. 336-339, 1992.
- FRIEDMAN, W. E. The evolution of double fertilization and endosperm: an "historical" perspective. **Sexual Plant Reproduction**, v. 11, n. 1, p. 6-16, 1998.
- FRIEDMAN, W. E. The evolution of embryogeny in seed plants and the developmental origin and early history of endosperm. **American Journal of Botany**, v. 81, n. 11, p. 1468-1486, 1994.
- FRITSCH, R.; VITELLI, R. F. Caminhos trilhados em três décadas de avaliação em larga escala no Brasil. **Estud. Aval. Educ.**, v. 32, e07792, 2021.
- GARCIA, P. S.; FRANZOLIN, F. A.; BIZZO, N. Longitudinal Study on Biodiversity in Ten Years of National High School Exam. **Acta Scientiae**, v. 24, n. 2, p. 88-117, 2022.
- GLAZE, A. L. Evolution and pre-service science teachers: investigating acceptance and rejection. PhD Dissertation. Tuscaloosa, AL: University of Alabama, 2013.
- GLAZE, A. L.; GOLDSTON, M. J; DANTZLER, J. Evolution in the Southeastern USA: Factors Influencing Acceptance and Rejection in Pre-Service Science Teachers. **Journal Articles**, [s.l.]. v. 13, n. 6, p. 1189-1209, 2015.
- GLAZE, A. M. L. **Evolution and pre-service science teachers: investigating acceptance and rejection**. 2013. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Department of Curriculum and Instruction, University of Alabama, Alabama, 2013. Disponível em <https://ir-api.ua.edu/api/core/bitstreams/fa57bc94-fd7e-44ea-8db7-e28fc016f1b6/content>. Acesso em 25 jan. 2025.
- GREGORY, T. R. Understanding natural selection: Essential concepts and common misconceptions. **Evolution: Education and Outreach**, v. 2, n. 2, p. 156-175, 2009.
- GRIFFITH, J. A.; BREM, S. K. Teaching evolutionary biology: pressures, stress, and coping. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 41, p. 791-809, 2004.
- HARTELT, T.; MARTENS, H.; MINKLEY, N. Teachers' ability to diagnose and deal with alternative student conceptions of evolution. **Science Education**, v. 106, n. 3, p. 706-738, 2022.
- HERMANN, R. S. Breaking the Cycle of Continued Evolution Education Controversy: On the Need to Strengthen Elementary Level Teaching of Evolution. **Evolution: Education and Outreach**, v. 4, p. 267-274, 2011.
- HERMANN, R. S. Breaking the cycle of continued evolution education controversy: on the need to strengthen elementary level teaching of evolution. **Evolution: Education and Outreach**, v. 4, p. 267-274, 2011.
- HERMANN, R.S. Cognitive Apartheid: On the Manner in Which High School Students Understand Evolution without Believing in Evolution. **Evolution: Education and Outreach**, v. 5, p. 619-628, 2012.
- HILLIS, D. M. Making evolution relevant and exciting to biology students. **Evolution**, v. 61, n. 6, p. 1261-1264, 2007.

HOOKS, C. R. R.; PANDEY, R. R.; JOHNSON, M. W. Impact of avian and arthropod predation on lepidopteran caterpillar densities and plant productivity in an ephemeral agroecosystem. **Ecological Entomology**, v. 28, n. 5, p. 522-532, 2003.

INGRAM, E. L.; NELSON, C. E. Relationship between achievement and students' acceptance of evolution or creation in an upper-level evolution course. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 43, p. 7-24, 2006.

JAKOBI, S. R. "Littler monkeys on the Grass..." How people for and Against Evolution fail to understand the theory of Evolution. **Evolution: Education and Outreach**, v. 3, p. 416-419, 2010.

JAKOBI, S. R. Little monkeys on the grass. . . how people for and against evolution fail to understand the theory of evolution. **Evolution: Education and Outreach**, v. 3, p. 416-419, 2010.

KUSCHMIERZ, P.; MENEGANZIN, A.; PINXTEN, R. R.; PIEVANI, T.; CVETKOVIĆ, D.; MAVRIKAKI, E.; GRAF, D.; BENIERMANN, A. Towards common ground in measuring acceptance of evolution and knowledge about evolution across Europe: a systematic review of the state of research. **Evolution: Education and Outreach**, v. 13, n. 18, p. 1-24, 2020.

LANKA, J.; HILD, P.; BENIERMANN, A. Fit to teach evolution? Pre- and in-service teachers' knowledge and acceptance of evolution. **International Journal of Science Education**, p. 1-26, 2024.

LAWSON, A. E., THOMPSON, L. D. Formal reasoning ability and misconceptions concerning genetics and natural selection. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 25, n. 9, p. 733-746, 1988.

LAWSON, A. E., WORSNOP, W. A. Learning about evolution and rejecting a belief in special creation: Effects of reflective reasoning skill, prior knowledge, prior belief and religious commitment. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 29, p. 143-166, 1992.

MARQUIS, R. J.; WHELAN, C. J. Insectivorous Birds Increase Growth of White Oak through Consumption of Leaf-Chewing Insects. **Ecology**, v. 75, n. 7, p. 2007-2014, 1994.

MARQUES, F. C.; NASCIMENTO, B. C.; SOUZA, T. S. Distorções entre a BNCC e o ENEM: uma visão focada em ciências da natureza utilizando a taxonomia de Bloom revisada. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**, v. 7, n. 20, 2021.

MEAD, L.S.; BRANCH, G. 2011. Overcoming obstacles to Evolution education: why bother teaching evolution in high school? **Evolution: Education and Outreach**, v. 4, p. 114-116, 2011.

MCKEACHIE, W.J.; LIN, Y. G.; STRAYER, J. Creationist vs. evolutionary beliefs: effects on learning biology. **The American Biology Teacher**, v. 64, p. 189-192, 2002.

MCKENNA, D. D.; FARRELL, B. D.; MARVALDI, A. E.; SEQUEIRA, A. S. Temporal lags and overlap in the diversification of weevils and flowering plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 17, p. 7083-7088, 2009.

METTS, B. S.; SCOTT, D. E.; TUBERVILLE, T. D.; BUHLMANN, K. A.; HOPKINS, W. A. Maternal Transfer of Contaminants and Reduced Reproductive Success of Southern Toads

(Bufo [Anaxyrus] terrestris) Exposed to Coal Combustion Waste. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 6, p. 2846-2853, 2013.

MOORE, A. J. The Evolution Of Sexual Dimorphism By Sexual Selection: The Separate Effects Of Intrasexual Selection And Intersexual Selection. **Evolution**, v. 44, n. 2, p. 315-331, 1990.

NEHM, R. H.; SCHONFELD, I. S. Does increasing biology teacher knowledge of evolution and the nature of science lead to greater preference for the teaching of evolution in schools? **Journal of Science Teacher Education**, v. 18, n. 5, p. 699-723, 2007.

PANAYIDES, A.; SÁ-PINTO, X.; MAVRIKAKI, E. et al. Evolution content in school textbooks: data from eight European countries. **Evolution: Education and Outreach**, v. 17, n. 11, p. 1-16, 2024.

PENTEADO, P.R., KAVALCO, K.F., PAZZA, R. Influence of Sociocultural Factors and Acceptance of Creationism in the Comprehension of Evolutionary Biology in Freshman Brazilian Students. **Evolution: Education and Outreach**, v. 5, p. 589-594, 2012.

PERIS, D.; CONDAMINE, F. L. The angiosperm radiation played a dual role in the diversification of insects and insect pollinators. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, 2024.

RENFREE, M. B. Review: Marsupials: Placental Mammals with a Difference. **Placenta**, v. 31, S21-S26, 2010.

RIES, L.; MULLEN, S. P. A Rare Model Limits The Distribution Of Its More Common Mimic: A Twist On Frequency-Dependent Batesian Mimicry. **Evolution**, v. 62, n. 7, p. 1798-1803, 2008.

SANTOS, A. M. A.; MCDONALD, H. G.; DANTAS, M. A. T. Inferences of the ecological habits of extinct giant sloths from the Brazilian Intertropical Region. **Journal of Quaternary Science**, v. 39, n. 8, p. 1-7, 2023.

SANTOS, J. S.; CORTELAZZO, A. L. Os conteúdos de biologia celular no Exame Nacional do Ensino Médio – ENEM. **Avaliação**, v. 18, n. 3, p. 591-612, 2013.

SANTOS, J. M. C. T. Exame Nacional do Ensino Médio: entre a regulação da qualidade do Ensino Médio e o vestibular. **Educar em Revista**, n. 40, p. 195-205, 2011.

SODRÉ-NETO, L.; MEDEIROS, A. D. Considerações sobre contextualização e interdisciplinaridade na abordagem da microbiologia no novo exame nacional do ensino médio (ENEM). **Revista Ciências & Ideias**, v. 9, n. 1, p. 89-100, 2018.

SCOTT, E.; BRANCH, G. Don't call it "Darwinism. **Evolution: Education and Outreach**, v. 2, p. 90-94, 2009.

SELLAR, S; LINGARD, B. International large-scale assessments, affective worlds and policy impacts in education. **International Journal of Qualitative Studies in Education**, [s.l.], v. 31, n. 5, p. 367-381, 2018.

SETTLAGE JR, J. Conceptions of natural selection: a snapshot of the sense-making process. **Journal of Research in Science Teaching**, 31, n. 5, p. 449-457, 1994.

- SICKEL, A. J.; FRIEDRICHSEN, P. J. Examining the evolution education literature with a focus on teachers: major findings, goals for teacher preparation, and directions for future research. **Evolution: Education and Outreach**, v. 6, p. 1-15, 2013.
- SILVA, H. M.; MORTIMER, E. F. Teachers' Conceptions about the Origin of Humans in the Context of Three Latin American Countries with Different Forms and Degrees of Secularism. **Science & Education**, v. 29, p. 691-711, 2020.
- SIMONIN, K. A.; RODDY, A. B. Genome downsizing, physiological novelty, and the global dominance of flowering plants. **PLOS Biology**, v. 16, n. 1, e2003706, 2018.
- SOUSA, C. P.; FERREIRA, S. L. Avaliação de larga escala e da aprendizagem na escola: um diálogo necessário. **Psicologia da Educação**, v. 48, p. 13-23, 2019.
- SOARES, A. C.; ELIAS, M. A.; SOUZA, A. S. B. Sistemática Filogenética: um olhar panorâmico a partir do exame nacional do ensino médio – ENEM. **Ciência em Evidência, Revista Multidisciplinar**, v. 4 (FC), e023010, 2023.
- TRAVITZKI, R. **ENEM: limites e possibilidades do Exame Nacional do Ensino Médio enquanto indicador de qualidade escolar**. 2013. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- VIZZOTTO, P. Análise e classificação das questões de Biologia do ENEM segundo suas características psicométricas. **Revista de Ensino de Biologia da SBEnBio**, v. 15, n. 1, p. 314-332, 2022.
- WEATHERHEAD, P. J.; BARRY, F. E.; FORBES, M. R. L.; BROWN, G. P. Sex ratios, mating behavior and sexual size dimorphism of the northern water snake, *Nerodia sipedon*. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 36, n. 5, p. 301-311, 1995.
- YATES, T. B.; MAREK, E. A. Teachers teaching misconceptions: A study of factors contributing to high school biology students' acquisition of biological evolution-related misconceptions. **Evolution: Education and Outreach**, v. 7, n. 7, p. 1-18, 2014.
- YOUNG, H. S.; DUNBAR, R. B.; DIRZO, R.; MCCAULEY, D. J. Plants cause ecosystem nutrient depletion via the interruption of bird-derived spatial subsidies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 5, p. 2072-2077, 2010.
- ZYLINSKI, S.; JOHNSEN, S. Mesopelagic Cephalopods Switch between Transparency and Pigmentation to Optimize Camouflage in the Deep. **Current Biology**, v. 21, n. 22, p. 1937-1941, 2011.
- ZIADIE, M. A.; ANDREWS, T. C. Moving evolution education forward: A systematic analysis of literature to identify gaps in collective knowledge for teaching. **CBE—Life Sciences Education**, v. 17(1), ar11, 2018.