

ANÁLISE DE PADRÕES DE HERANÇA E DOMINÂNCIA EM CRUZAMENTOS DE *TROPAEOLUM MAJUS* (CAPUCHINHA)

Luísa de Campos da Cunha, Igor Vargas Gonzaga, Sofia Soliman de Conto, Tiago Cassol Severo, Colégio Scalabriniano Nossa Senhora Medianeira

RESUMO: A dificuldade em visualizar conceitos abstratos de genética, como a influência direta do genótipo sobre o fenótipo e os padrões de herança, representa um desafio persistente na biologia. Este trabalho objetivou demonstrar essa relação de maneira acessível e prática, analisando os fenótipos de hibridização em *Tropaeolum majus* (capuchinha), conectando a genética mendeliana clássica a conceitos mais amplos de interações. A metodologia experimental consistiu em um cruzamento controlado e manual entre duas linhagens puras (P) com fenótipos contrastantes: P1 (flores vermelhas e caule alto, genótipo CV CV AA) e P2 (flores amarelas e caule baixo, genótipo CA CA aa). O cultivo em ambiente controlado visou isolar as variáveis genéticas para uma observação clara. Após emasculação e polinização cruzada, a Geração F1 (n=142) foi cultivada e observada. Os resultados principais revelaram 100% de uniformidade fenotípica na F1, que apresentou um fenótipo intermediário de flores laranjas e um fenótipo dominante de caule alto. A análise destes dados permitiu evidenciar, simultaneamente, dois padrões de herança: o surgimento das flores laranjas (genótipo CV CA) é uma demonstração visível de dominância incompleta, tornando tangível um conceito teórico. Paralelamente, a expressão de 100% de caules altos (genótipo Aa) confirmou o modelo de dominância completa. Embora fenotipicamente uniforme, a F1 mostrou-se 100% di-híbrida (CV CA Aa). Conclui-se que o experimento foi eficaz em materializar a teoria, validando a capuchinha como um excelente e acessível recurso didático para a aprendizagem significativa de conceitos genéticos complexos.

Palavras-Chave: Genética Mendeliana; *Tropaeolum majus*; Dominância Incompleta; Hibridização; Ensino de Genética.

ABSTRACT: The difficulty in visualizing abstract genetic concepts, such as the direct influence of genotype on phenotype and inheritance patterns, represents a persistent challenge in biology education. This study aimed to demonstrate this relationship in an accessible and practical manner, analyzing hybridization phenotypes in *Tropaeolum majus* (nasturtium), connecting classic Mendelian genetics to broader concepts of ecological interactions, and aligning with the objectives of SDG 4 (Quality Education). The experimental methodology consisted of a controlled manual cross between two pure lines (P) with contrasting phenotypes: P1 (red flowers and tall stems, genotype CV CV AA) and P2 (yellow flowers and short stems, genotype CA CA aa). Cultivation in a controlled environment aimed to isolate genetic variables for clear observation. Following emasculation and cross-pollination, the F1 Generation (n=142) was cultivated and observed. The main results revealed 100% phenotypic uniformity in the F1, which exhibited an intermediate phenotype of orange flowers and a dominant phenotype of tall stems. The analysis of this data made it possible to simultaneously demonstrate two inheritance patterns: the emergence of orange flowers (genotype CV CA) is a visible demonstration of incomplete dominance, making a theoretical concept tangible. Concurrently, the expression of 100% tall stems (genotype Aa) confirmed the model of complete dominance. Although phenotypically uniform, the F1 was shown to be 100% dihybrid (CV CA Aa). It is concluded that the experiment was effective in materializing the theory, validating nasturtium as an excellent and accessible didactic resource for the meaningful learning of complex genetic concepts.

Keywords: Mendelian Genetics; *Tropaeolum majus*; Incomplete Dominance; Hybridization; Genetics Education.

INTRODUÇÃO

A genética constitui uma das áreas centrais da Biologia, sendo fundamental para a compreensão dos mecanismos que determinam a herança de características e dos próprios processos evolutivos em plantas. Um desses mecanismos, a hibridização, é uma força potente que pode gerar variação adaptativa crucial, contrapor-se à divergência ou até mesmo originar novas linhagens. No âmbito das interações ecológicas, essa variação genética se manifesta em traços florais (como cor, forma e odor), que não evoluem isoladamente, mas formam síndromes de polinização complexas, moldando o fluxo gênico através da seleção exercida por polinizadores.

Nesse contexto, a capuchinha (*Tropaeolum majus*) apresenta-se como um organismo de interesse excepcional. Ela não serve apenas como um modelo didático clássico, mas também como um exemplo prático desses processos ecológicos e evolutivos, por possuir variações morfológicas visíveis e de fácil identificação, especialmente a variação marcante na coloração floral. Esta característica a torna uma ferramenta ideal para investigações sobre padrões de herança, como a dominância incompleta, conectando o genótipo (a base alélica) à manifestação fenotípica (a cor observada) de uma forma visualmente clara.

O problema central que orienta esta pesquisa consiste em compreender de que maneira a análise genética da capuchinha pode evidenciar, na prática, a influência do genótipo sobre o fenótipo. O estudo busca responder como um experimento prático de cruzamento pode facilitar a visualização de processos hereditários que, muitas vezes, são de difícil assimilação apenas em nível teórico. Para investigar esta questão, o estudo parte de um cruzamento controlado entre duas linhagens puras da Geração P, selecionadas por seus fenótipos visivelmente distintos para duas características: P1 (flores vermelhas e caule alto) e P2 (flores amarelas e caule baixo).

A relevância do estudo justifica-se, portanto, por sua dupla contribuição. Do ponto de vista pedagógico, possibilita a criação de recursos didáticos acessíveis que auxiliam professores e estudantes no processo de ensino-aprendizagem da genética, promovendo práticas inovadoras alinhadas ao ODS 4 (Educação de Qualidade). Sob a perspectiva científica, reforça a importância da experimentação em modelos vegetais simples para consolidar conceitos clássicos da biologia, como a dominância mendeliana (completa e incompleta), e estimula o pensamento crítico ao ligar esses conceitos à sua relevância ecológica mais ampla.

O objetivo geral deste trabalho é analisar as possíveis combinações genéticas resultantes do cruzamento das plantas de capuchinha com essas duas características distintas, utilizando os princípios da genética mendeliana e da análise combinatória para demonstrar a relação genótipo-fenótipo. Como objetivos específicos, destacam-se: (i) aplicar as leis de Mendel na previsão das combinações genotípicas e fenótipos resultantes da Geração F1; (ii) utilizar ferramentas de análise combinatória para organizar e sistematizar os cruzamentos e prever suas complexidades; e (iii) discutir como os resultados obtidos podem ser aplicados em práticas educativas, contribuindo para uma melhor compreensão da herança genética.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A hibridização constitui um fenômeno central na compreensão da variabilidade genética e dos processos evolutivos em plantas. O fluxo gênico entre linhagens ou espécies distintas não é um evento de consequência única; em populações naturais, ele pode atuar de diferentes maneiras: pode contrapor-se à divergência (ao reintroduzir alelos e homogeneizar populações que estavam se separando), pode impulsionar o fortalecimento de barreiras reprodutivas (quando os híbridos são inviáveis, selecionando positivamente indivíduos que evitam o cruzamento) ou pode, de fato, originar novas linhagens através da especiação híbrida. Um de seus mecanismos mais potentes é a introgressão, o fluxo de alelos de uma espécie para o genoma de outra, que pode introduzir variação adaptativa crucial (Plant Physiology, 2017). Esses aspectos demonstram como a hibridização, ao gerar combinações genéticas inéditas e quebrar blocos de genes co-adaptados, contribui diretamente para o surgimento de novos fenótipos observáveis.

No âmbito das interações ecológicas, a expressão dessa nova variabilidade fenotípica é frequentemente mediada por animais. Especificamente, a diversidade de traços florais é um fator determinante na mediação da relação entre plantas e seus polinizadores (Shuttleworth & Johnson, 2010; Rosas-Guerrero et al., 2014; Bergamo et al., 2017; Ramos & Schiestl, 2019). A flor age como uma interface de comunicação, oferecendo tanto sinais (visuais, olfativos) quanto recursos (alimento). A seleção natural, exercida pelos polinizadores, atua sobre essa interface, favorecendo os fenótipos que maximizam o sucesso reprodutivo da planta.

Traços como tamanho, forma, cor, odor e recompensas (néctar, pólen, óleos) (Simpson & Neff, 1981; Willmer, 2011; Schiestl & Johnson, 2013; Agostini et al., 2014) não evoluem isoladamente. Pelo contrário, eles frequentemente co-evoluem formando síndromes de polinização. Estas síndromes são definidas como conjuntos de características florais adaptadas a grupos específicos de polinizadores (por exemplo, flores vermelhas e tubulares para beija-flores; flores amarelas e com guias de néctar para abelhas). Essa especialização molda diretamente o fluxo gênico, pois um polinizador adaptado a uma síndrome tenderá a visitar flores semelhantes, e o potencial de hibridização fica, assim, dependente da capacidade do híbrido de se encaixar em uma dessas síndromes ou de atrair um novo polinizador.

Para que essa seleção ecológica possa atuar, deve haver variação genética herdável, e a forma como essa variação se traduz em fenótipos é o domínio da genética mendeliana. Os padrões de herança clássicos são fundamentais para prever os resultados da hibridização. Em um modelo de dominância completa, a presença de um único alelo dominante (A) é suficiente para mascarar completamente um alelo recessivo (a), resultando em um fenótipo idêntico ao homozigoto dominante (AA = Aa). Em contraste, no padrão de dominância incompleta, o heterozigoto (ex: CVCA) exibe um fenótipo intermediário, distinto de ambos os pais homozigotos (CVCV e CACA). Este último padrão é de particular interesse pedagógico, pois o fenótipo revela diretamente o genótipo subjacente.

Neste ponto, os conceitos se integram. O conjunto de características florais de uma planta (a síndrome) exerce papel decisivo no sucesso da polinização cruzada, favorecendo a produção de híbridos e possibilitando a expressão de fenótipos intermediários. É o caso da capuchinha (*Tropaeolum majus*): a espécie exibe variação marcante na coloração floral, atraindo diferentes polinizadores e facilitando a observação dos resultados da hibridização. Ela serve como um organismo-modelo ideal para análises de dominância incompleta, conectando o genótipo (a base alélica que define a cor) à manifestação fenotípica (a cor observada). Essa variação fenotípica é então submetida à pressão seletiva exercida pela preferência dos polinizadores no ambiente natural. Assim, ao integrar os conceitos da genética

mendeliana às interações ecológicas, compreende-se de forma aplicada os mecanismos que sustentam tanto a herança genética quanto a diversidade biológica.

METODOLOGIA

Esta pesquisa é de caráter experimental, tendo como objeto de estudo a observação prática de cruzamentos genéticos em plantas de capuchinha (*Tropaeolum majus*). A escolha deste organismo-modelo justifica-se por suas características didáticas, como o ciclo de vida relativamente curto, a facilidade de manejo e, principalmente, a expressão de fenótipos visivelmente contrastantes. O objetivo central foi demonstrar, de maneira acessível e prática, como os princípios da genética mendeliana se manifestam, servindo como ponte entre a teoria abstrata e a observação empírica.

O delineamento experimental iniciou-se com a seleção de duas linhagens puras da geração parental (P), que foram definidas com base em fenótipos visivelmente distintos e homozigotos para duas características-alvo: cor da flor e altura do caule. O genitor P1 (Pura) foi selecionado por exibir o fenótipo "Flores Vermelhas" e "Caule Alto". Em contrapartida, o genitor P2 (Pura) foi selecionado por apresentar "Flores Amarelas" e "Caule Baixo". Ambas as linhagens foram cultivadas individualmente em vasos pequenos com terra de jardim, mantidas em local com boa iluminação solar e recebendo regas frequentes. O objetivo desta padronização foi garantir condições de crescimento controladas e uniformes, neutralizando potenciais variáveis ambientais (como estresse hídrico ou nutricional) que pudessem influenciar ou mascarar o resultado fenotípico de origem genética.

O procedimento de cruzamento foi inteiramente manual para assegurar o controle absoluto do fluxo gênico. Primeiramente, para impedir a autopolinização, realizou-se a emasculação das flores designadas como genitor feminino (receptoras). Neste estudo, as flores do genitor P2 (Amarela/Baixa) foram escolhidas para essa função. O processo consistiu na remoção cirúrgica e cuidadosa das anteras (estruturas masculinas) das flores de P2, antes que estas atingissem a maturidade e liberassem pólen.

Em seguida, efetuou-se a polinização cruzada controlada. Utilizando um cotonete limpo, o pólen maduro das flores do genitor P1 (Vermelha/Alta), designado como genitor masculino (doador), foi coletado. Este pólen foi então transferido ativamente para o estigma receptivo das flores previamente emasculadas do genitor P2. Imediatamente após a polinização, as flores que passaram por esse processo foram identificadas com etiquetas amarradas ao caule, contendo a data e a descrição do cruzamento (P1 x P2), para evitar erros de coleta.

Após a fecundação bem-sucedida, aguardou-se a formação e a maturação das sementes. Estas sementes (um total de 150) foram colhidas, secas e, posteriormente, plantadas em novos vasos, sob as mesmas condições controladas dos genitores. O monitoramento da germinação foi realizado, resultando em 142 plantas viáveis. Estas plantas, originadas do cruzamento P1 x P2, constituíram a geração F1 (primeira geração filial), cujas características fenotípicas foram o objeto central da análise subsequente.

A etapa de coleta de dados ocorreu por meio de anotações sistemáticas das características visíveis em cada uma das 142 plantas da geração F1 que atingiram a maturidade. Definiu-se como variável independente o cruzamento genético em si (a combinação dos alelos dos genitores P1 e P2). As variáveis dependentes foram os fenótipos da prole, especificamente a cor da flor e a altura do caule. As observações se concentraram em classificar o fenótipo de cada planta F1 e compará-lo diretamente com os fenótipos da geração P.

A escolha dessas duas variáveis dependentes foi estratégica e alinhada aos objetivos do estudo. A "cor da flor" foi selecionada por ser um exemplo canônico, conforme a fundamentação teórica, de dominância incompleta em *Tropaeolum majus*, permitindo a visualização de um fenótipo intermediário (laranja) que materializa o conceito. A "altura do caule", por outro lado, foi escolhida por seguir o padrão clássico de dominância completa. A inclusão de ambas permitiu uma análise comparativa robusta, demonstrando dois padrões de herança mendeliana distintos ocorrendo simultaneamente no mesmo organismo, o que enriquece significativamente o valor pedagógico do experimento. O referencial teórico para a análise partiu da Primeira Lei de Mendel (Lei da Uniformidade), que prevê os resultados do cruzamento entre linhagens puras. A hipótese central do trabalho era que, sendo P1 homozigoto dominante para altura e homozigoto para cor vermelha (AA CV CV) e P2 homozigoto recessivo para altura e homozigoto para cor amarela (aa CA CA), a Geração F1 seria 100% uniforme e di-híbrida (Aa CV CA). A expectativa, portanto, era que o genótipo heterozigoto "Aa" manifestasse o fenótipo dominante (Alto) e o genótipo "CV CA" manifestasse o fenótipo intermediário (Laranja), confirmando os dois padrões de dominância simultaneamente.

A análise dos dados consistiu, portanto, na comparação direta entre a proporção de fenótipos observados na prática (os dados coletados da F1) e a proporção esperada por este referencial teórico. Para a cor da flor, a análise focou em verificar o modelo de dominância incompleta (100% fenótipo intermediário esperado). Para a altura do caule, a análise verificou o modelo de dominância completa (100% fenótipo dominante esperado). Dessa forma, a metodologia permitiu dissecar como os alelos herdados (genótipo) determinam as características visíveis (fenótipo).



Figura 1: Vista geral do canteiro, demonstrando o hábito de crescimento da planta. (Fonte: Os autores, 2025).

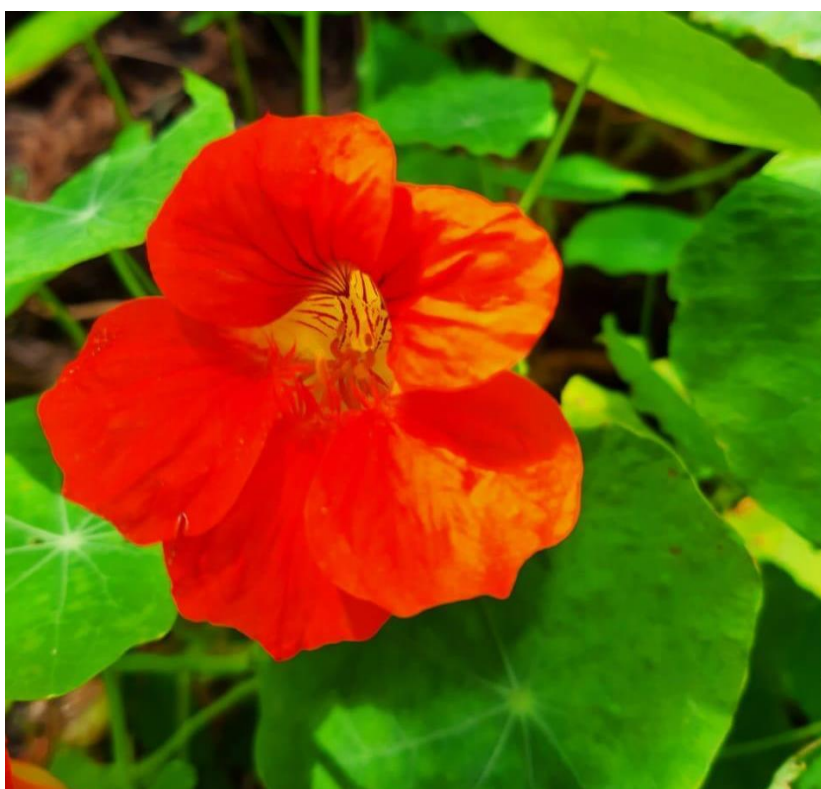


Figura 2: Detalhe da flor, evidenciando o fenótipo (cor) analisado no experimento. (Fonte: Os autores, 2025).

RESULTADOS E ANÁLISES

O foco primário desta seção recai sobre a Geração F1 (primeira geração filial), que é o produto direto do cruzamento experimental controlado entre as linhagens parentais puras (Geração P), conforme detalhado na Metodologia. Este cruzamento, realizado em *Tropaeolum majus*, foi desenhado especificamente para permitir a

observação direta da expressão fenotípica resultante da combinação de alelos contrastantes, em alinhamento com a Primeira Lei de Mendel (Lei da Uniformidade).

A Geração P consistiu em duas linhagens puras (homozigotas) selecionadas por seus fenótipos visivelmente distintos para duas características centrais do estudo: cor da flor e altura do caule. A linhagem P1 (Pura) foi definida pelo fenótipo "Flor Vermelha" e "Caule Alto", correspondendo ao genótipo esperado CV CV AA. Em contrapartida, a linhagem P2 (Pura) apresentava o fenótipo "Flor Amarela" e "Caule Baixo", correspondendo ao genótipo CA CA aa. O procedimento de polinização cruzada manual entre P1 e P2 visou combinar esses traços e gerar uma prole que seria, teoricamente, 100% di-híbrida.

O cruzamento resultou na coleta de 150 sementes. Destas, 142 sementes germinaram, desenvolveram-se em condições controladas de iluminação e rega, e atingiram a maturidade, formando o conjunto de dados final (n=142) para a análise fenotípica. As observações da prole F1 demonstraram uma uniformidade notável e completa, um achado que se alinha perfeitamente com a Primeira Lei de Mendel. Verificou-se que 100% dos indivíduos da Geração F1 (n=142) exibiram um fenótipo idêntico: "Flores Laranjas" e "Caule Alto". É crucial notar que os fenótipos parentais P1 (Flor Vermelha) e P2 (Flor Amarela e Caule Baixo) desapareceram completamente nesta geração, sendo substituídos por uma nova combinação uniforme.

Este resultado é o achado central do experimento e permite uma análise detalhada de dois padrões de herança distintos que ocorrem simultaneamente. O surgimento do fenótipo "Flores Laranjas" é particularmente significativo. Esta cor não estava presente em nenhuma das linhagens parentais puras (Vermelha ou Amarela). A expressão de um fenótipo intermediário é a evidência empírica e inequívoca do padrão de herança de dominância incompleta para esta característica. Isso demonstra que, no genótipo heterozigoto (teoricamente CV CA), nenhum dos alelos (vermelho ou amarelo) possui dominância sobre o outro, resultando em uma expressão fenotípica mista que materializa visualmente o conceito abstrato.

Paralelamente, a análise da segunda característica, a altura do caule, revelou um padrão de herança distinto, mas igualmente clássico. A observação de que 100% da prole F1 apresentou "Caule Alto" — um fenótipo idêntico ao do genitor P1 — confirma o modelo de dominância completa. Embora a prole tenha necessariamente herdado o alelo para "Caule Baixo" (a) do genitor P2, este fenótipo recessivo foi totalmente mascarado pela expressão do alelo dominante "Alto" (A). O fenótipo "Alto" manifestado pelo genótipo heterozigoto (Aa) demonstra que o alelo "Alto" (A) domina completamente o alelo "Baixo" (a), seguindo o padrão mendeliano clássico.

Portanto, a Geração F1, embora fenotipicamente uniforme ("Laranja/Alto"), é geneticamente 100% di-híbrida (CV CA Aa). O experimento demonstra com sucesso dois mecanismos mendelianos distintos ocorrendo simultaneamente no mesmo organismo. A metodologia de controle rigoroso permitiu que essa relação direta genótipo-fenótipo fosse observada sem ambiguidades, cumprindo o objetivo central da pesquisa de tornar a teoria genética observável.

A Tabela 01, a seguir, organiza e compara sistematicamente os dados fenotípicos coletados da Geração F1 com os fenótipos e genótipos dos seus genitores (Geração P). A tabela serve como uma síntese visual dos resultados, quantificando as proporções observadas (100%) e conectando-as aos genótipos esperados que explicam esses fenômenos.

Tabela 01: Comparativo Fenotípico das Gerações P e F1 no Cruzamento de *Tropaeolum majus*

Geração	Genótipo (Esperado)	Fenótipo (Observado)	Quantidade Observada (n=142)	Proporção
P1 (Pura)	CV CV AA	Flor Vermelha, Caule Alto	N/A (Genitor)	N/A
P2 (Pura)	CA CA aa	Flor Amarela, Caule Baixo	N/A (Genitor)	N/A
F1 (Híbrida)	CV CA Aa	Flor Laranja, Caule Alto	142	100%
F1 (Esperado P1)	-	Flor Vermelha, Caule Alto	0	0%
F1 (Esperado P2)	-	Flor Amarela, Caule Baixo	0	0%

Fonte: (Autores, 2025)

A análise destes resultados permite responder diretamente à problemática central da pesquisa, que questionava como a prática pode evidenciar a influência do genótipo sobre o fenótipo. Os dados da Geração F1 são uma evidência prática e inequívoca dessa relação, conforme antecipado na fundamentação teórica. O achado mais expressivo é o surgimento de 100% de flores laranjas, conforme detalhado na Tabela 01. Este resultado é a manifestação visível do modelo de dominância incompleta, um conceito-chave que o estudo se propôs a demonstrar.

Neste padrão de herança, o genótipo heterozigoto CV CA, resultante da fusão dos gametas dos genitores puros (P1 "Vermelha" CV CV e P2 "Amarela" CA CA), não permite que um alelo mascare completamente o outro. Em vez disso, a expressão fenotípica é um intermediário (laranja), uma "mistura" visual das características parentais. Este achado é de extrema relevância pedagógica e atende diretamente ao objetivo (iii) do estudo. O conceito de dominância incompleta, muitas vezes abstrato na teoria, torna-se tangível. Os alunos podem observar diretamente que a herança

genética não é simplesmente uma relação binária de "dominante ou recessivo", mas sim um espectro de interações alélicas complexas.

Paralelamente, a análise da segunda característica (altura do caule) confirmou um modelo de herança distinto, mas igualmente fundamental. Todas as 142 plantas da Geração F1 apresentaram caule alto (Tabela 01), embora tenham herdado um alelo para "caule baixo" do genitor P2. Este resultado confirma o modelo clássico de dominância completa mendeliana. Ele indica que o alelo "alto" (A) domina completamente o alelo "baixo" (a), mascarando totalmente sua presença no genótipo heterozigoto Aa. A observação simultânea destes dois padrões — dominância incompleta para uma característica e completa para outra — enriquece enormemente o valor didático do experimento.

A análise conjunta das duas características permite uma síntese crucial. Embora a Geração F1 seja 100% fenotipicamente uniforme (100% Laranja/Alto), ela é, em contrapartida, 100% di-híbrida em seu genótipo (CV CA Aa). Esta uniformidade visual esconde uma complexidade genética subjacente que é a base para a Segunda Lei de Mendel. Este resultado valida o uso da análise combinatória, mencionado nos objetivos (ii), como ferramenta preditiva. A Geração F1, portanto, não é um ponto final, mas sim a base genética que estabelece o potencial para a complexa segregação de fenótipos na Geração F2.

A metodologia empregada, ao controlar rigorosamente as variáveis ambientais (cultivo em vasos, regas uniformes), foi essencial para que esses conceitos pudessem ser demonstrados de forma clara e acessível, alinhando-se ao ODS 4 (Educação de Qualidade). Além disso, o experimento reforça a hibridização como um mecanismo central, exatamente como descrito na fundamentação teórica. O surgimento do fenótipo "Laranja/Alto" é, em si, a criação de uma nova combinação fenotípica que, em um contexto ecológico, poderia (conforme a teoria) sofrer pressão seletiva distinta por polinizadores.

Contudo, como limitação do estudo, reconhece-se que os cruzamentos foram realizados em ambiente controlado. A garantia da uniformidade dos dados, essencial para o objetivo pedagógico, impediu a observação das pressões ecológicas reais mencionadas na fundamentação teórica (como a preferência de polinizadores específicos pelo fenótipo laranja). Além disso, a análise foi deliberadamente focada na Geração F1 para responder à pergunta central sobre a visualização da dominância incompleta.

Como perspectiva para estudos futuros, recomenda-se fortemente avançar a pesquisa para a Geração F2, que seria obtida pelo cruzamento da F1 consigo mesma (autopolinização). Nessa etapa, a análise combinatória se tornaria ainda mais crítica para explicar e prever as proporções fenotípicas segregadas. Seria esperado, por exemplo, o reaparecimento das cores parentais (vermelha e amarela) e do caule baixo, seguindo as proporções mendelianas clássicas (como o 1:2:1 para a cor). No entanto, para o objetivo proposto neste trabalho — demonstrar a relação direta genótipo-fenótipo de forma prática na F1 — os resultados obtidos foram conclusivos e confirmaram integralmente as expectativas teóricas.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral analisar as possíveis combinações genéticas em plantas de capuchinha (*Tropaeolum majus*), utilizando os princípios da genética mendeliana e da análise combinatória. A pesquisa foi orientada pela problemática central de como a análise prática da herança pode facilitar a visualização da influência do genótipo sobre o fenótipo, tornando conceitos teóricos abstratos em algo tangível. Pode-se afirmar que os objetivos foram plenamente alcançados, com a metodologia experimental fornecendo respostas diretas e visuais à questão da pesquisa.

O dado de maior destaque do estudo foi a observação direta e inequívoca de dois padrões de herança distintos na Geração F1. O cruzamento controlado entre as linhagens puras P1 (flores vermelhas/caule alto, genótipo CV CV AA) e P2 (flores amarelas/caule baixo, genótipo CA CA aa) resultou em uma prole F1 (n=142) com 100% de uniformidade. O surgimento do fenótipo intermediário (flores laranjas) confirmou o modelo de dominância incompleta para a cor da flor, resultante do genótipo heterozigoto CV CA. Paralelamente, a expressão de 100% de caules altos confirmou o modelo clássico de dominância completa para a altura, com o alelo "alto" (A) mascarando o alelo "baixo" (a) no genótipo heterozigoto Aa.

Dessa forma, o estudo cumpre seus objetivos específicos (i) e (ii) ao aplicar com sucesso as leis de Mendel para prever e analisar os resultados da Geração F1, que se revelou 100% di-híbrida (CV CA Aa). A principal contribuição do trabalho, alinhada ao objetivo (iii), é sua inequívoca relevância pedagógica. A pesquisa valida a capuchinha como um organismo-modelo eficaz e acessível para o ensino-aprendizagem de genética, promovendo práticas inovadoras alinhadas às metas do ODS 4 (Educação de Qualidade). A metodologia desenvolvida serve como um recurso didático prático que "materializa" o conceito abstrato da dominância incompleta, permitindo aos alunos observar diretamente a relação entre genótipo e fenótipo.

É importante ressaltar que o sucesso em "materializar" esses conceitos está diretamente ligado ao rigor da metodologia que foi expandida anteriormente. Ao realizar o experimento em ambiente controlado (vasos) e com polinização manual, todas as variáveis ambientais e a interferência de polinizadores aleatórios foram neutralizadas. Isso permitiu que a Primeira Lei de Mendel (Uniformidade da F1) e os padrões de dominância se manifestassem de forma clara e inequívoca, servindo como uma base fundamental antes de se introduzir as complexidades da seleção natural.

Este estudo, portanto, serve como uma ponte fundamental entre duas grandes áreas da biologia: a genética e a ecologia. A Fundamentação Teórica estabeleceu a hibridização como um motor de variação, criando novos fenótipos que são então testados por pressões seletivas (como as síndromes de polinização). A Geração F1, com seu fenótipo di-híbrido uniforme de "Flor Laranja/Caule Alto", representa exatamente essa nova combinação fenotípica — a matéria-prima — que, no ambiente natural, estaria agora sujeita à preferência de polinizadores. O experimento, portanto, isola o *mecanismo genético* (como a variação surge) do *mecanismo ecológico* (como a variação é selecionada).

Assim, a principal limitação do estudo é, na verdade, uma escolha metodológica deliberada. Reconhece-se que o ambiente controlado (vasos) não reflete as pressões ecológicas reais mencionadas na fundamentação teórica. Interações cruciais, como a seleção por polinizadores específicos, não puderam ser avaliadas. No entanto, essa abordagem foi essencial para isolar as variáveis genéticas e cumprir o objetivo pedagógico de demonstrar a herança de forma clara.

Como perspectiva para estudos futuros, recomenda-se avançar a pesquisa para a Geração F2, que seria obtida através da autopolinização (ou cruzamento) da F1 di-híbrida. Essa etapa permitiria aos alunos aplicar a análise combinatória e a Segunda Lei de Mendel de forma ainda mais crítica, prevendo as proporções da segregação fenotípica. Seria esperado o reaparecimento dos fenótipos recessivos (flores vermelhas e amarelas na proporção de 1:2:1 e caules baixos na proporção de 3:1), aprofundando a compreensão prática da herança genética.

Em suma, este projeto não apenas cumpriu seus objetivos de aplicar a teoria genética, mas também validou um recurso pedagógico de alto impacto. A jornada da Geração P pura para a F1 híbrida uniforme, e a projeção para a F2 segregada, encapsula os pilares da genética mendeliana, demonstrando que a capuchinha é um organismo-modelo que transforma a sala de aula em um laboratório eficaz de descoberta científica.

AGRADECIMENTOS

Nesta seção, gostaríamos de registrar nossos mais profundos e sinceros agradecimentos às Sras. Fernanda Maria Soliman e Fernanda Campos. Expressamos nossa imensa gratidão pelo apoio essencial, pela disponibilidade constante e pela colaboração efetiva que se provaram indispensáveis para que a realização deste projeto, em todas as suas etapas, se tornasse possível.

O seu incentivo e suporte inestimável foram fundamentais em todas as fases desta pesquisa. Agradecemos desde a concepção inicial do tema e o refinamento do problema de pesquisa, passando pelo complexo delineamento metodológico e a superação dos desafios práticos da experimentação, até a análise final dos dados e a redação deste manuscrito. As suas orientações valiosas e a leitura crítica e atenta do material contribuíram de forma decisiva para a qualidade e o rigor científico do trabalho.

É crucial destacar que o apoio recebido transcendeu imensamente as barreiras do trabalho escrito. Agradecemos de forma especial por toda a orientação e auxílio na preparação de nossa apresentação para a comunidade externa, em particular no estande que realizamos na Universidade de Caxias do Sul (UCS). O suporte logístico, as sugestões criativas para a montagem do material visual e o encorajamento para a divulgação de nosso experimento foram essenciais para o sucesso dessa etapa.

Sem essa parceria, a tarefa de traduzir os dados complexos do laboratório para um formato acessível e didático para o público do estande teria sido imensamente mais difícil. A paciência em nos ouvir e a disponibilidade para resolver problemas práticos demonstraram um comprometimento com o projeto que foi além de qualquer obrigação formal. Reconhecemos que o envolvimento direto, a paciência e o conhecimento compartilhado pelas Sras. Fernanda Soliman e Fernanda Campos foram cruciais não apenas para a conclusão bem-sucedida desta pesquisa, mas para o nosso crescimento como estudantes. A elas, portanto, dedicamos nosso mais sincero reconhecimento pelo papel decisivo que desempenharam em nossa jornada acadêmica e na concretização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MIRANDA, João Eustáquio Cabral de. **Análise genética de um cruzamento dialélico em pimentão (*Capsicum annuum* L.)**. 1997. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DOS SANTOS FILHO, Ronaldo et al. Representando Genótipos e Fenótipos: uma prática para visualizar as diferentes interações alélicas na Herança Monogênica. **Genética na Escola**, v. 16, n. 2, p. 258-271, 2021.

DE PLÁ, Hanaisa et al. Alelos e Cores: integrando transcrição, tradução e interações alélicas. **Genética na escola**, v. 15, n. 2, p. 142-163, 2020.

MALUF, Wilson Roberto; DE MIRANDA, João Eustáquio Cabral; DE CAMPOS, Joenes Pelúzio. Análise genética de um cruzamento dialélico de cultivares de tomate. I. Características referentes à produção de frutos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 633-641, 1982.

DE BIOMASSA, D. E.; SANGALLI, ANDRÉIA. CAMPUS DE DOURADOS PROGRAMA DE MESTRADO EM AGRONOMIA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PRODUÇÃO VEGETAL. 2003.