UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

ARIANE BRUNELLI

**O desenvolvimento do conceito de *linkage* (1902-1915): uma
contribuição histórica para o ensino de genética**

SÃO PAULO

2015

ARIANE BRUNELLI

**O desenvolvimento do conceito de *linkage* (1902-1915): uma
contribuição histórica para o ensino de genética**

Dissertação apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências, modalidade Ensino de Biologia.

Orientadora: Profa. Dra. Lilian Al-Chueyr Pereira Martins.

SÃO PAULO

2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Brunelli, Ariane

O desenvolvimento do conceito de *linkage* (1902-1915): uma contribuição histórica para o ensino de genética. São Paulo, 2015.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Lilian Al-Chueyr Pereira Martins

Área de Concentração: Ensino de Ciências

Unitermos: 1. Biologia – Estudo e Ensino; 2. História da Ciência; 3. Ensino; 4. Genética.

USP/IF/SBI-004/2015

Nome: Ariane Brunelli

Título: O desenvolvimento do conceito de *linkage* (1902-1915): uma contribuição histórica para o ensino de genética

Dissertação apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências, modalidade Ensino de Biologia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Aos meus queridos pais, Adilson e Angélica, maiores incentivadores em todos os desafios de minha vida.

Ao meu amado esposo Dalton, pelo companheirismo, parceria e compreensão pelas horas de convívio que nos foram “roubadas” durante esta trajetória.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos membros da banca de Qualificação, Prof^a Dr^a Maria Elice Brzezinski Prestes e Prof^a Dr^a Fernanda da Rocha Brando, por suas contribuições imprescindíveis na finalização deste trabalho.

À Prof^a Dr^a Maria Elena Infante-Malachias pelo apoio e auxílio no início desta trajetória.

Aos colegas de trabalho da Oficina Pedagógica na Prefeitura Municipal de Campo Limpo Paulista.

Aos diretores, coordenadores e colegas de trabalho da Escola Patelli, por todo incentivo e apoio.

Aos colegas do grupo Seminários em História da Biologia e Ensino (SHBE), Filipe Faria, Gerda Maisa Jensen, Luciana Nogueira, Rosa Andrea Lopes de Souza, Tatiane Braga e Tatiana Tavares pelo companheirismo e aconselhamentos.

Agradeço, em especial, à minha orientadora Lilian Al-Chueyr Pereira Martins, pelos valiosos ensinamentos, inestimáveis contribuições e atenção com a qual conduziu meu aprendizado na área da História da Ciência.

*“Quem é você?” - perguntou a Lagarta.
“Eu... eu não sei muito bem... A senhora
me desculpe, mas no presente momento
não tenho muita certeza. Pelo menos, eu
sei quem eu era quando levantei esta
manhã, mas acho que tenho mudado
muitas vezes desde então...”*

(Lewis Carrol, Alice no país das maravilhas)

RESUMO

BRUNELLI, Ariane. **O desenvolvimento do conceito de *linkage* (1902-1915): uma contribuição histórica para o ensino de genética.** 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Considerando que a história da ciência pode constituir uma ferramenta útil para o ensino de ciência, o objetivo desta dissertação é inicialmente apresentar um material histórico para o ensino e aprendizagem de genética no nível médio. Este diz respeito ao desenvolvimento do conceito de *linkage* no período compreendido entre 1902 e 1915. A partir deste estudo histórico foi elaborada uma sequência didática com o intuito de auxiliar no ensino e aprendizagem deste conceito. Na construção desta levou-se em conta tanto a dimensão epistêmica como a dimensão pedagógica, considerando o processo de elaboração, métodos e validação do conhecimento científico conforme proposto por Méheut (2005). Esta dissertação compreende uma introdução e três capítulos. O Capítulo 1 discute as relações entre história da ciência e o ensino e aprendizagem de genética. O Capítulo 2 apresenta um estudo histórico sobre as explicações para as características que eram herdadas juntas até da proposta do *linkage*. O Capítulo 3 oferece uma sequência didática. Espera-se que o material elaborado para ser trabalhado em sala de aula possa contribuir para o entendimento do conceito de *linkage* e mostrar aspectos sobre a natureza da ciência (NDC) tais como: os cientistas podem mudar de ideia; resultados experimentais semelhantes podem ser interpretados à luz de teorias diferentes; e o empreendimento científico é resultado de um trabalho coletivo.

Palavras-chave: História da genética; Ensino de ciências; *Linkage*; Morgan, Thomas Hunt; Bateson, William, sequência didática.

ABSTRACT

BRUNELLI, Ariane. **The growth of the concept of linkage 1902-1915): a historical contribution to the teaching of genetics**. 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Taking into account that history of science can be an useful tool for the teaching of science, the aim of this dissertation is firstly to present a historical material to the learning and teaching of Genetics in High school. It is related to the growth of the concept of *linkage*. Departing from this historical study, it presents a teaching-learning sequence, which may assist the teaching and learning of this concept. In the building of such teaching-learning sequence it was taken into account both the pedagogical and epistemic dimensions, considering the drafting process, methods and validation of scientific knowledge, proposed by Méheut (2005). This dissertation comprises an introduction and three chapters. Chapter 1 discusses the relations between history of science and the learning and teaching of genetics. Chapter 2 presents a historical study of the explanations for characteristics which are inherited together until the proposal of *linkage*. Chapter 3 offers a teaching-learning sequence. It is hoped that the historical material elaborated, to be worked in the classroom could contribute to the understanding of the concept of linkage showing aspects of nature of science (NDC) such as: similar experimental results may be interpreted according different theories; the scientists may change their mind; and that science endeavor results from a collective work.

Key-words: History of Genetics; science education; *linkage*; Morgan, Thomas Hunt; Bateson, William; teaching-learning sequence.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Critérios para a avaliação dos livros didáticos PNLD 2012	22
Tabela 2	Referências dos livros didáticos analisados	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esboço de Correns sobre a distribuição dos fatores no cromossomo	31
Figura 2	<i>Matthiola sp</i>	32
Figura 3	<i>Lathyrus odoratus</i>	32
Figura 4	William Bateson	34
Figura 5	Edith Rebecca Saunders	34
Figura 6	Thomas Hunt Morgan	35
Figura 7	Exemplos de mutações em <i>Drosophila</i>	37
Figura 8	Diagrama de Morgan ilustrando o mecanismo de <i>crossing-over</i>	39
Figura 9	Quadros dos grupos de ligação gênica em <i>Drosophila</i>	41
Figura 10	Interdependência das dimensões epistêmica e pedagógica em uma sequência didática	43
Figura 11	Representação de atividades desenvolvidas na sequência didática...	45
Figura 12	Exemplos de cartões ilustrativos com situações- problema	52
Figura 13	Modelagem de <i>linkage</i> utilizando canudos.....	56

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1 A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E O ENSINO DE GENÉTICA.....	15
1.1 Contribuições da História da ciência para o Ensino	15
1.2 A História da ciência nos livros didáticos de Biologia de Ensino Médio....	20
2. A LIGAÇÃO GÊNICA (<i>LINKAGE</i>)	28
2.1 Introdução	28
2.2 Histórico das explicações para características que eram herdadas associadas.....	30
2.2.1 As contribuições de Carl Correns	30
2.2.2 As contribuições de Bateson, Punnett e Saunders	31
2.3 As contribuições do grupo <i>Drosophila</i>	34
2.4 Algumas considerações	41
3 SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	43
3.1 Introdução	43
3.2 Sequência didática: <i>Linkage</i> , <i>crossing-over</i> e mapeamento cromossômico.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE A. Texto de apoio: Como se chegou ao conceito de <i>linkage</i> ?	65
APÊNDICE B. Resolução das atividades propostas na sequência didática	69
APÊNDICE C. Encartes dos cartões com situações-problemas	74

INTRODUÇÃO

Inserindo-se dentro da linha de pesquisa História, Filosofia e Cultura no Ensino de Biologia, esta pesquisa tem por objetivo oferecer uma contribuição histórica para o ensino-aprendizagem da genética, em relação ao conceito de *linkage*.

A motivação inicial para esta pesquisa surgiu de minha prática docente. Como professora de Biologia do ensino médio, venho me deparando com a dificuldade dos alunos na compreensão de conceitos da genética, particularmente, os conceitos de *linkage* e *crossing-over*. Ao mesmo tempo, percebo em minha prática, limitações e dificuldades em ensiná-los. A falta de compreensão desses conceitos impede a compreensão de outros aspectos importantes do conteúdo tratado e provoca baixa autoestima por parte dos alunos, que muitas vezes julgam-se incapazes e ficam desmotivados, desinteressando-se pelo assunto.

Diversos estudos têm mostrado que a história e filosofia da ciência podem constituir ferramentas úteis para o ensino da ciência (Matthews, 1994; Martins, 1998a; Lederman, 2007; Prestes & Caldeira, 2009; Carmo, 2011). Por outro lado, alguns dentre eles têm apontado a existência de dificuldades em relação ao ensino-aprendizagem de alguns conceitos da genética clássica que são tratados no ensino médio (Banet e Ayuso, 1995), o que se aplica especialmente ao conceito de *linkage* (Kinnear, 1991).

A análise da parte histórica relacionada à genética clássica de diversos livros didáticos destinados ao ensino médio mostrou que, na maioria deles, não há informações sobre o contexto científico em que o conceito de *linkage* foi elaborado. Mesmo nos livros que procuram contextualizar o assunto, ainda faltam informações referentes ao desenvolvimento do conceito em questão.

Procurando contribuir para sanar as dificuldades relacionadas ao ensino-aprendizagem deste conceito que, em nosso país, é abordado no ensino médio, a presente pesquisa propõe utilizar a história da ciência dentro de uma abordagem inclusiva¹. Será apresentado um material histórico com o intento de proporcionar uma visão do caminho percorrido até chegar ao conceito de *linkage*.

---

¹ Conforme proposto por Michael R. Matthews (1994) e descrito em Prestes & Caldeira (2009, p. 7), este tipo de abordagem consiste na introdução de episódios históricos específicos ou “estudos de caso” da História da Ciência, em unidades de um curso de ciência padrão, não histórico.

Em relação à parte histórica, a pesquisa procurará responder às seguintes perguntas:

- a) Quais foram os experimentos que inicialmente indicaram a existência de fatores que eram herdados associados contrariando o princípio da segregação independente de Mendel? Qual (Quais) o(s) organismo(s) utilizado(s)? Quais foram as evidências encontradas? Quais foram as explicações oferecidas? Quais foram as dificuldades encontradas? Como foi a reação da comunidade científica?
- b) Qual foi o contexto em que Morgan e colaboradores apresentaram a proposta do *linkage*? Qual foi o material experimental estudado? Em que evidências eles se basearam? Quais as dificuldades encontradas? Como Morgan e seu grupo viam a proposta anterior?

Este estudo será feito principalmente a partir da análise de fontes secundárias, mas também serão utilizadas algumas fontes primárias sobre o assunto. Como fontes secundárias, utilizaremos os estudos de Garland Allen, como por exemplo, Allen, 1975; Allen, 1978; e a tese de Doutorado, Martins, 1997. Como fontes primárias, utilizaremos por exemplo, Bateson, 1904; Bateson & Saunders, 1902; Bateson, Saunders & Punnett, 1905; Bateson, 1907; Bateson & Punnett, 1908. Morgan, 1910a; Morgan, 1911; Morgan, 1914; Morgan & Goodale, 1912; Morgan & Lynch, 1912; Morgan, Sturtevant, Muller & Bridges, 1915; Morgan & Bridges, 1916.

Com relação ao ensino de biologia, pretende-se contribuir com a elaboração de uma sequência didática sobre o conteúdo de *linkage*, que terá uma parte histórica elaborada a partir da pesquisa desenvolvida. Assim, procuraremos privilegiar não apenas a dimensão pedagógica, mas também a dimensão epistêmica considerando o processo de elaboração, métodos e validação do conhecimento científico, como proposto por Martine Méheut (2005).

A presente dissertação é constituída por esta introdução e três capítulos. O primeiro capítulo discute as relações entre a história da ciência e o ensino de genética e como ela vem sendo apresentada nos livros didáticos. O segundo capítulo apresenta um histórico das explicações para as características que eram herdadas juntas até chegar à explicação *linkage*, proposta pelo grupo *Drosophila*, abrangendo o período compreendido entre 1902 e 1915. O terceiro capítulo apresenta uma sequência didática sobre o assunto, estruturada em cinco aulas, com

sugestões e diferentes estratégias que poderão ser utilizadas no ensino deste conteúdo.

CAPÍTULO 1

A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E O ENSINO DE GENÉTICA

1.1 CONTRIBUIÇÕES DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS

Diversos estudos consideram que a história da ciência pode contribuir para a formação de uma visão mais adequada acerca da construção do pensamento científico, dos conceitos, métodos, propostas e da prática científica, mostrando aspectos relacionados à própria natureza da ciência. Pode ainda, tornar os conteúdos científicos mais interessantes e acessíveis aos alunos, possibilitando uma maior compreensão de conceitos, modelos e teorias atuais (Bizzo, 1991; Matthews, 1994; Martins, 1998b; Martins & Brito, 2006; Lederman, 2007; Prestes & Caldeira, 2009).

A discussão sobre o uso de história da ciência no ensino é antiga. Entretanto, nem todos autores consideram que isso deva ocorrer. Posicionamentos favoráveis à utilização da história da ciência no ensino foram defendidos no século XIX como Wilhelm Ostwald (1853-1932) e Ernst Walfried Wenzel Mach (1838-1916), além de John Dewey (1859-1952) no início do século XX. Entretanto, a partir da década de 1970, esse interesse pelo ensino contextual das ciências se tornou cada vez maior, tanto no nível básico como no nível superior, com o intuito de explorar componentes históricos, filosóficos, sociais e culturais da ciência (Jaffe, 1938; Freire Junior, 2002; Prestes e Caldeira, 2009).

Na Biologia, Física e Química, a crescente preocupação pela abordagem histórica no ensino de ciências pode também ser considerada como reflexo de diversos estudos sobre as concepções de professores e estudantes acerca da natureza da ciência, realizados por pesquisadores tais como: Glen S. Aikenhead (1973), Norman Lederman, Philip D. Wade e Randy L. Bell (1998), Daniel Gil-Pérez *et al.* (2001), Charbel N. El-Hani, Eraldo José M. Tavares e Pedro Luís B. Rocha (2004). Os resultados destes estudos indicam a existência de uma concepção empirista/indutivista sobre a produção do conhecimento científico, segundo a qual o conhecimento científico é obtido por generalização indutiva a partir de dados de observação destituídos de qualquer influência teórica e/ou subjetiva; uma concepção

inadequada que revela uma visão ingênua da ciência, entendida como conhecimento definitivo e inquestionável.

Tal diagnóstico gerou importantes implicações para o ensino de ciências, sobretudo, no que diz respeito à mediação para a compreensão mais plena da natureza do conhecimento científico, favorecendo o desenvolvimento de uma postura crítica. Nesse sentido, a inserção da História da ciência no ensino se apresenta como uma ferramenta valiosa. Um dos defensores da inclusão do componente histórico no ensino de ciências, Michael Matthews assim se expressou:

A história, a filosofia e a sociologia da ciência (...) podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral dos assuntos científicos, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a conhecer o seu significado (Matthews, 1992, p.12).

Conforme apontado por Martins & Brito (2006, pp. 245-246), por meio da abordagem de episódios históricos no ensino, é possível mostrar que o empreendimento científico não é algo isolado, mas está inserido em um contexto histórico e cultural, sofrendo influência e ao mesmo tempo influenciando a sociedade; uma produção construída por seres humanos falíveis que podem aperfeiçoar o conhecimento, o que não significa que suas propostas possam ser consideradas definitivas.

A preocupação com a contextualização do ensino aparece também nas diretrizes curriculares, que passaram a valorizar uma abordagem diferenciada no ensino de ciências, que vai além do acúmulo de termos e conceitos. Os *Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio* (PCNs) sugerem que os elementos da história e da filosofia da Biologia possibilitam aos alunos compreender que há uma ampla rede de relações entre a produção científica e o contexto social, econômico e político:

Compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolveram por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando desenvolvimento científico com a transformação da sociedade. (Brasil, 1999, p. 217)

Esta sugestão também está presente no texto das “Orientações Educacionais Complementares” aos *Parâmetros Curriculares Nacionais* (PCNEM +):

Os PCNEM privilegiam as competências voltadas para o domínio das linguagens científicas e suas representações, para a **investigação e compreensão** científica e tecnológica e para os aspectos histórico-sociais da produção e utilização dos conhecimentos científicos no âmbito da Biologia. (Brasil, 2002, pp. 32-33; ênfase nossa)

Diante do que foi exposto, acreditamos que a história da ciência, em uma abordagem inclusiva, possa contribuir para minimizar dificuldades relacionadas ao ensino-aprendizagem de alguns conceitos relacionados à genética tratados no ensino médio.

Pesquisas realizadas com o objetivo de averiguar a compreensão dos estudantes em relação aos conceitos de genética apontam uma grande dificuldade dos alunos no entendimento até mesmo de conceitos básicos como gene, cromossomos e seu comportamento durante a divisão celular (Wood-Robinson, Leach & Lewis, 2000; Banet & Ayuso, 2003).

Pretendendo analisar algumas das causas que dificultam a aprendizagem dos conteúdos de genética abordados no ensino médio, Enrique Banet & Gabriel Enrique Fernandez Ayuso (1995) consideram que a maior dificuldade por parte dos alunos é compreender o significado que os professores pretendem atribuir a determinados processos, desde a simbologia que se utiliza para representar genes e alelos até a resolução de problemas que implicam na segregação dos genes. Eles interpretam de maneira equivocada muitos dos processos envolvidos no estudo da genética, como por exemplo, que a informação genética residiria apenas nos cromossomos sexuais de óvulos e espermatozoides, e não conseguem relacionar os processos de divisão celular (mitose e meiose) à transmissão da informação hereditária (Banet & Ayuso, 1995, pp. 149-150).

Especialmente quanto ao conceito de *linkage* e *crossing-over*, a dificuldade é ainda maior, como relatado por Kinnear (1991) e Banet e Ayuso (1995). O conceito

de *linkage* é primordial para o entendimento de muitos aspectos da transmissão hereditária. Como apontado por Judith F. Kinnear (1991), pode-se supor que a dificuldade dos alunos em entender o *linkage* deve estar relacionada com o fato do termo *linkage* (ligação) e seus derivados, por exemplo, herança ligada ao sexo, possuir diferentes significados dependendo contexto de seu uso. Como consequência, o entendimento dos alunos depende de suas habilidades em reconhecer e diferenciar as diversas situações em que o termo é usado em genética (Kinnear, 1991, p. 69).

De acordo com Marília Cid & António J. Neto (2005), um dos principais problemas para o ensino aprendizagem em genética é a natureza abstrata desta disciplina, cujos conteúdos escapam a um acesso sensorial direto e às experiências cotidianas dos alunos. Soma-se a isso, o fato de a genética ser uma área caracterizada por um vocabulário vasto e complexo cujos conceitos e terminologia como alelo, gene, homólogo e *linkage* e suas relações são de difícil compreensão, para os alunos (Cid & Neto, 2005, p. 2).

Esta dificuldade impede a compreensão de outros aspectos importantes do conteúdo tratado e provoca baixa autoestima por parte dos alunos, que muitas vezes julgam-se incapazes e ficam desmotivados, desinteressando-se pelo assunto.

Como sugerido por Jenny Lewis *et al.* (2000, p. 131), para que os alunos construam uma estrutura conceitual coerente, que lhes permita melhor compreensão sobre hereditariedade e genética, é preciso que estabeleçam claramente a relação entre as estruturas básicas, em particular, da ligação física entre os genes e cromossomos. Dessa forma, os conhecimentos que envolvem os processos de mitose, meiose e *linkage*, devem ser tornados explícitos pelos professores, para que os alunos consigam entender o processo de continuidade da informação genética no organismo.

Considerando a crescente discussão em educação sobre a necessidade de se trabalhar com abordagens pedagógicas, para as disciplinas do núcleo das ciências naturais, que favoreçam maior compreensão do mundo a partir da realidade vivenciada pelos alunos, a compreensão do *linkage* acaba sendo extremamente relevante neste aspecto. A aplicação de técnicas de DNA recombinante e utilização de marcadores genéticos para identificação de doenças hereditárias em humanos é uma tecnologia atual, muito posterior à proposta do *linkage*, que envolve diretamente os conhecimentos sobre *linkage* e mapas genéticos, e que possui aplicação clínica.

Ou seja, trata-se do estudo de um conceito cuja construção nos permite conhecer aspectos sobre a natureza da Ciência bem como refletir sobre sua relação com a tecnologia e sociedade.

O episódio histórico da construção do conceito de *linkage* poderá mostrar o caráter mutável, mas não relativista do conhecimento científico, já que os estudiosos são guiados por evidências, mesmo que algumas vezes possam interpretá-las de modo diferente; que a construção do conhecimento científico não é linear; que há vários métodos científicos.

Kinnear (1991, p. 71) enfatiza o quanto é valioso para os alunos, explorar o desenvolvimento de um conceito ou de um modelo ao longo do tempo. A experiência de traçar a evolução de um modelo explicativo pode, potencialmente, esclarecer aos alunos a própria compreensão dos conceitos inerentes, especialmente quando existem modelos explicativos rivais.

Não é incomum, durante as aulas, os alunos fazerem comentários referentes a um determinado modelo explicativo anterior, com as seguintes indagações: “Mas, como não perceberam isso ou aquilo?” ou “Fizeram tudo errado”. Desta forma, uma perspectiva histórica pode sensibilizar os alunos para o curso de tempo de desenvolvimento de modelos explicativos, percebendo a existência do conhecimento prévio, as restrições impostas no âmbito da exploração por suposições subjacentes, e os efeitos da metodologia. Contribui para combater a ideia de muitos alunos de que as verdades e explicações para fenômenos estão à espera de serem descobertas, como uma cerâmica sendo descoberta em uma escavação arqueológica. Tem o potencial de permitir que os estudantes reconheçam que modelos explicativos são construções desenvolvidas ao longo do tempo, e que um modelo desenvolvido por uma pessoa ou grupo particular pode, de fato, vir a ser falho ou inadequado (Kinnear, 1991, p. 71).

Logo, uma abordagem sobre o desenvolvimento de um modelo ou conceito do passado poderá contribuir para que os estudantes entendam melhor a ciência no presente.

1.2. A HISTÓRIA DA CIÊNCIA NOS LIVROS DIDÁTICOS DE BIOLOGIA

De um modo geral, a História da ciência é disponibilizada para professores e alunos nos livros didáticos ou livros-texto, o que se aplica ao ensino médio de Biologia. Não podemos dizer que todos os livros utilizados no ensino médio, voltados para os conteúdos de Genética, sejam completamente desprovidos de parte histórica, já que nos últimos anos vem aumentando a discussão no sentido de contemplar este aspecto. Contudo, estudos como o de Cecília H. V. dos Santos (2006) apontam que a história presente na maioria dos livros didáticos traz uma sequência dos conteúdos por grau de dificuldade, caracterizando uma forma linear do conhecimento, em sequência cronológica e de modo superficial, acabando por mencionar apenas nomes dos cientistas mais “famosos”, tidos como vencedores, omitindo fatos importantes em relação à situação de pesquisa. Na maioria das vezes não apresentam o momento histórico que levou determinado assunto a ser estudado e por quem foi estudado.

Lilian A.-C. P. Martins e Ana Paula Pereira de O. M. Brito (2006) encontraram resultados semelhantes em seus estudos e alertam sobre como a forma pela qual a história da ciência é apresentada nos livros didáticos pode acabar contribuindo para que o aluno acredite na existência de mitos científicos e forme falsas concepções acerca da natureza da ciência. Para Allchin (2004), esta abordagem se caracteriza como pseudo-história, na qual fragmentos do evento histórico são tratados de forma romantizada, enfatizando as contribuições de um único indivíduo, minimizando os percalços ou erros cometidos, ou seja, simplificando todo o processo de investigação.

No Brasil, o Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), desenvolvido pela Fundação Nacional para o Desenvolvimento da Educação (FNDE) do Ministério da Educação (MEC), orienta a aquisição e distribuição de livros didáticos de Biologia às escolas públicas de todo o país. Esta orientação ocorre por meio de uma avaliação, seguindo um protocolo de análise constituído por um conjunto de critérios, reunidos em cinco classes: (1) **Legislação e cidadania** - Respeito à legislação, às diretrizes e às normas oficiais relativas ao ensino médio e observância a princípios éticos e democráticos; (2) **Abordagem teórico-metodológica e proposta didático-pedagógica** - adequação metodológica e coerência; (3) **Projeto gráfico e editorial** – adequação do projeto gráfico aos objetivos didático-pedagógicos da obra, isenta

de erros de impressão; (4) **Conceitos, linguagens e procedimentos** – Atualização de conceitos, informações e procedimentos, respeitando as conquistas científicas, com adequada transposição didática; (5) **Manual do professor** – orientação aos docentes para o uso adequado da obra (Brasil, 2011).

Segundo os critérios de avaliação apresentados no guia dos livros didáticos do PNLD de biologia de 2012, a única menção, implícita e não muito clara sobre o uso de história da Ciência é feita nos itens 2.7 e 4.7, que prevê a construção de uma visão do conhecimento biológico de modo a superar a visão a-histórica de que a vida se estabelece como uma articulação mecânica de partes, sem influência social ou cultural (Brasil, 2011, p. 12); (ver tabela 1).

Fazendo uma comparação com os critérios de avaliação do livro didático do PNLD de 2007, podemos perceber algumas mudanças. O protocolo de análise dos livros do PNLD 2007, quando comparado ao de 2012, apresenta critérios mais precisos que envolvem a importância do uso história da Ciência no ensino. Este protocolo é constituído por um conjunto de critérios reunidos em quatro grandes classes: (1) correção conceitual e adequação, assim como precisão da informação básica, (2) adequação metodológica e coerência, (3) promoção de visão adequada sobre a construção do conhecimento científico e (4) princípios éticos. O critério número 3, além de discorrer sobre critérios eliminatórios, aborda de maneira mais pontual os critérios classificatórios que envolvem a promoção de uma visão adequada sobre a construção do conhecimento científico, tais como: uso adequado da História da Ciência, não limitado a biografias dos cientistas ou descobertas isoladas; abordagem adequada dos modelos científicos; discussão apropriada dos métodos científicos; proposta de atividades que estimulem a atividade investigativa; estímulo à compreensão dos problemas sociais atuais relevantes utilizando o conhecimento científico. Já no guia do PNLD 2012 não é feita nenhuma menção acerca de qualquer critério eliminatório na avaliação do ponto de vista da História da Ciência; e quando mencionado nos critérios classificatórios, aparece diluído, de forma implícita (Bittencourt, 2013, p. 23).

Tabela 1. Critérios para a avaliação dos livros didáticos – PNLD 2012

BLOCO 1 - LEGISLAÇÃO E CIDADANIA	
Critério: Respeito à legislação, às diretrizes e às normas oficiais relativas ao ensino médio (Constituição Brasileira; ECA; LDB 1996; DCNEM; Resoluções e Pareceres do CNE) e observância a princípios éticos e democráticos necessários à construção da cidadania e ao convívio social.	
1.1	Respeita o caráter laico e autônomo do ensino público.
1.2	Respeita a diversidade de credo, de regionalidade, local de moradia, gênero, sexo, etnia e classe social, princípio da igualdade.
1.3	Considera a proteção integral da criança e do adolescente (ECA).
1.4	Isenta-se da apresentação de ilustrações, fotografias, legendas, crônicas ou anúncios de bebidas alcoólicas, tabacos, armas e munições, pois desrespeitam os valores éticos e sociais da pessoa e da família (ECA).
1.5	Reconhece o Ensino Médio como etapa final da educação básica (LDB/DCNEM).
1.6	Favorece a preparação básica para o mundo do trabalho (LDB/DCNEM).
1.7	Favorece a autonomia intelectual e o pensamento crítico (LDB/DCNEM).
1.8	Favorece a compreensão dos fundamentos científicos e tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática no ensino das Ciências da natureza (LDB/DCNEM).
1.9	Adota metodologias de ensino e de avaliação que estimulam a iniciativa dos estudantes (LDB – artigo 36 parágrafo 2º)
1.10	Reconhece que todo conhecimento mantém um diálogo, permanentemente, com outros conhecimentos, que pode ser de questionamento, de negação, de complementação, de ampliação, de iluminação de aspectos não distinguidos (DCNEM, parágrafo 1º, artigo 8º).
1.11	Reconhece as disciplinas escolares como recortes das áreas de conhecimento que representam e não esgotam isoladamente a realidade dos fatos físicos e sociais, devendo buscar entre si interações que permitam aos alunos a compreensão mais ampla da realidade (DCNEM, parágrafo 3º, artigo 8º).
1.12	Isenta de ilustrações e/ou mensagens que veiculam publicidade difundindo marcas, produtos ou serviços comerciais.
BLOCO 2 - ABORDAGEM TEÓRICO-METODOLÓGICA E PROPOSTA DIDÁTICOPEDAGÓGICA	
Critério: Coerência e adequação da abordagem teórico-metodológica assumida na obra no que diz respeito à proposta didático-pedagógica explicitada e aos objetivos visados. Por mais diversificadas que sejam as concepções e as práticas de ensino envolvidas na educação escolar, a obra deve: • propiciar ao aluno uma efetiva apropriação do conhecimento através da escolha de uma abordagem metodológica capaz de contribuir para a consecução dos objetivos educacionais em jogo, respeitando-se as Diretrizes Curriculares para o Ensino Médio; • ser coerente com a escolha da abordagem metodológica realizada, do pondo de vista da proposição dos objetos e recursos propostos.	
2.1	Apresenta articulação e coerência entre a(s) fundamentação(ões) teórico-metodológicas(s) da(s) proposta(s) didático-pedagógica(s) explicitada(s) e o conjunto de textos, atividades, exercícios etc., que configuram o livro do aluno.
2.2	Apresenta organização tanto entre os volumes da obra quanto entre as suas unidades estruturadoras, de forma a garantir a progressão do processo de ensino e de aprendizagem.
2.3	Propõe objetos de ensino e de aprendizagem, favorecendo o desenvolvimento de capacidades básicas do pensamento autônomo e crítico e contribuindo para a apreensão das capacidades básicas do pensamento autônomo e crítico e contribuindo para a apreensão das relações que se estabelecem entre estes objetos e suas funções socioculturais.
2.4	Apresenta fundamentação teórico-metodológica que favorece a professores e alunos a evitarem a visão finalista e antropocêntrica do fenômeno biológico.
2.5	A abordagem teórico-metodológica possibilita que professores e alunos reconheçam as formas pelas quais a biologia está engendrada nas culturas, seja influenciando a visão de mundo, seja participando de manifestações culturais, literárias e artísticas.
2.6	Possibilita ao aluno a participação no debate de temas polêmicos contemporâneos que envolvem os conhecimentos da área de Biologia em articulação com outros saberes (filosófico, sociológico, e outros) como o uso de transgênicos, clonagem, reprodução assistida entre outros assuntos, visando contribuir para que o aluno se posicione frente a essas questões e outras do seu dia a dia.
2.7	Auxilia na construção de uma visão de que o conhecimento biológico e as teorias em Biologia se

constituem em modelos explicativos, elaborados em determinados contextos sociais e culturais, superando a visão a-histórica de que a vida se estabelece como uma articulação mecânica de partes.
2.8 Propicia a relação dos conceitos da Biologia com os de outras ciências, para favorecer a compreensão da produção do conhecimento biológico.
BLOCO 3 - PROJETO GRÁFICO-EDITORIAL
Critério: Adequação da estrutura editorial e do projeto gráfico aos objetivos didático-pedagógicos da obra. O projeto gráfico-editorial da obra deve traduzir-se compatível com suas opções teórico-metodológicas, considerando-se, dentre outros aspectos, a faixa etária e o nível de escolaridade a que se destina.
3.1 Organiza a obra de forma clara, coerente e funcional, do ponto de vista da proposta didático-pedagógica.
3.2 Apresenta legibilidade gráfica adequada para o nível de escolaridade visado (desenho, tamanho e espaçamento das letras, palavras e linhas, formato, dimensões e disposição dos textos na página).
3.3 Apresenta impressão em preto do texto principal que não prejudique a legibilidade no verso da página.
3.4 Apresenta títulos e subtítulos claramente hierarquizados por meio de recursos gráficos compatíveis.
3.5 Isenta-se de erros de revisão e/ou impressão.
3.6 Apresenta referências bibliográficas, índice remissivo e indicação de leituras complementares.
3.7 Apresenta sumário que reflita claramente a organização dos conteúdos e atividades propostos, além de permitir a rápida localização das informações.
3.8 As ilustrações são claras, precisas e adequadas às finalidades para as quais foram elaboradas.
3.9 As ilustrações retratam adequadamente a diversidade étnica da população brasileira, a pluralidade social e cultural do país.
3.10 As ilustrações de caráter científico, respeitam e indicam as proporções entre objetos ou seres representados.
3.11 As ilustrações estão acompanhadas dos respectivos créditos e identificam claramente a localização das fontes ou acervos onde foram produzidas.
3.12 Os gráficos e tabelas apresentam títulos, fontes e datas e apresentam, ainda, no caso de mapas e outras representações gráficas do espaço, legendas, escalas, coordenadas e orientações em conformidade com as convenções cartográficas.
BLOCO 4 - CONCEITOS, LINGUAGENS E PROCEDIMENTOS
Critério: Correção e atualização de conceitos, informações e procedimentos presentes na obra respeitando tanto as conquistas científicas quanto aos princípios de uma adequada transposição didática.
4.1 Apresenta de modo correto, contextualizado e atualizado conceitos, informações e procedimentos.
4.2 Utiliza de modo correto, contextualizado e atualizado os conceitos e informações em exercícios, atividades, ilustrações ou imagens.
4.3 Apresenta a compreensão do fenômeno vida como manifestação de sistemas organizados e integrados, em constante interação com o ambiente físico-químico e cultural, abordando a diversidade dos seres vivos no nível de uma célula, de um indivíduo e de organismos interagindo no seu meio.
4.4 Apresenta temas polêmicos contemporâneos (tais como: transgênicos, clonagem, reprodução assistida, etc., que envolvem os conhecimentos da área de Biologia em articulação com outros saberes (filosófico, sociológico e outros).
4.5 Favorece a compreensão da biodiversidade do planeta, especificamente do Brasil, reconhecendo a sua influência na qualidade de vida humana e, conseqüentemente, no uso de seus produtos, apontando contradições, problemas e soluções respaldadas eticamente.
4.6 Apresenta a organização dos conteúdos em torno de temas estruturadores do conhecimento biológico, tais como: origem e evolução da vida; identidade dos seres vivos e diversidade biológica; transmissão da vida, ética e manipulação genética; interação entre os seres vivos e destes com o ambiente; e qualidade de vida das populações humanas.
4.7 Apresenta o conhecimento biológico de modo a superar a compreensão a-histórica de que a vida se estabelece como uma articulação mecânica de partes.
4.8 Propicia a relação dos conceitos da Biologia com os de outras ciências, para entender processos como os referentes à origem e à evolução da vida e do universo, o fluxo da energia nos sistemas

biológicos, a dinâmica para sustentabilidade dos ambientes naturais.
4.9 Apresenta, de forma organizada, o conhecimento biológico, utilizando as formas específicas de expressão da linguagem científica e tecnológica, bem como suas manifestação nas Mídias, possibilitando ao aluno a percepção e utilização dos códigos intrínsecos da cultura da Biologia.
4.10 Apresenta os conhecimentos e pressupostos biológicos como base para o reconhecimento de formas de discriminação racial, social, de gênero, etc., posicionando-se diante delas de forma crítica, respaldando-se em bibliografia de referência.
BLOCO 5 - MANUAL DO PROFESSOR
Critério: Observância das características e finalidades específicas do manual do professor. Este deve:
• Orientar os docentes para o uso adequado da obra didática;   • Constituir-se num instrumento de complementação didático-pedagógica e atualização para o docente;   • Organizar-se de modo a propiciar ao docente uma efetiva reflexão sobre sua prática;   • Colaborar para que o processo de ensino e de aprendizagem acompanhe avanços recentes, tanto no campo de conhecimento do componente curricular da obra, quanto no da pedagogia e da didática em geral.
5.1 Descreve a organização geral da obra, tanto no conjunto dos volumes, quanto na estruturação interna de cada um deles.
5.2 Explicita os objetivos da proposta didático-pedagógica efetivada pela obra e os pressupostos teórico-metodológicos por ela assumidos.
5.3 Apresenta o uso adequado dos livros, inclusive no que se refere às estratégias e aos recursos de ensino a serem empregados.
5.4 Indica as possibilidades de trabalho interdisciplinas na escola, a partir do componente curricular abordado no livro.
5.4 Indica as possibilidades de trabalho interdisciplinar na escola, a partir do componente curricular abordado no livro.
Discute diferentes formas, possibilidades, recursos e instrumentos de avaliação que o professor poderá utilizar ao longo do processo de ensino e de aprendizagem.
5.6 Propicia a reflexão sobre a prática docente, favorecendo sua análise por parte do professor e sua interação com os demais profissionais da escola.
5.7 Apresenta textos de aprofundamento e propostas de atividades complementares às do livro do aluno.
5.8 Apresenta para o(a) professor(a), em suas orientações pedagógicas, a disciplina escolar Biologia no contexto da área das Ciências da Natureza, ressaltando as aproximações e diferenciações das metodologias de produção e apreensão dos conhecimentos em relação a outras disciplinas escolares do ensino médio.
5.9 Considera o papel mediador do(a) professor(a) como auxiliar na condução das atividades didáticas, numa perspectiva de rompimento com uma visão finalista e antropocêntrica do fenômeno biológico e que não apresente uma visão de ciências meramente empirista e indutivista.
5.10 Oferece ao(a) professor(a) possibilidades de refletir sobre diferentes propostas pedagógicas no ensino de Biologia e suas implicações para os processos de ensino e de aprendizagem.
5.11 Oferece ao(a) professor(a) indicações de leituras diversificadas sobre educação em ciência, especificamente sobre o ensino de Biologia, bem como sugestões de atividades pedagógicas complementares.
5.12 Fornece possibilidades teórico-metodológicas ao(a) professor(a) de Biologia a fim de que este(a) tenha sustentação para lidar com o conhecimento biológico que favoreça no processo de ensino e de aprendizagem, o reconhecimento de formas de discriminação racial, social de gênero, etc.
5.13 Oferece bibliografia que possibilite ao(a) professor(a) de Biologia uma leitura crítica do conhecimento biológico e reconhecimento dos modos como esse, em alguns momentos da história da humanidade, favoreceu processos de exclusão e discriminação racial, de gênero, etc.

(Fonte: BRASIL, 2011)

Por outro lado, nas resenhas dos guias de 2012 elaboradas pelos avaliadores (professores e pesquisadores da área de Biologia e do Ensino) aparecem aspectos relacionados à exploração da dimensão histórica do conhecimento biológico. A

resenha da maioria dos livros avaliados menciona, de alguma forma, a apresentação de uma visão histórica sobre fenômenos, modelos e teorias, como auxiliares para o professor e o aluno na compreensão da construção do conhecimento científico.

Com o intuito de analisar a parte histórica dos livros didáticos de Biologia destinados ao ensino médio, procurou-se averiguar como é abordada a concepção de *linkage*, que faz parte da genética clássica. Optou-se pelos livros de Biologia aprovados pelo Programa Nacional do Livro didático (PNLD) de 2012. Dos oito livros didáticos aprovados pelo programa, foram analisados cinco, que constam na tabela a seguir.

Tabela 2. Referências das obras e trechos analisados

CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DAS OBRAS	TÍTULOS, AUTORES, EDITORAS E ANOS	PÁGINAS
LD 1	<i>BIOLOGIA – vol. 3</i> MARTHO, Gilberto R. & AMABIS, José M. Editora Moderna, 2010	99 - 111
LD 2	<i>BIOLOGIA – vol. 3</i> JÚNIOR, César, SASSON, Sezar & CALTINI JÚNIOR, Nelson. Editora Saraiva, 2010	143 – 155
LD 3	<i>BIOLOGIA HOJE – vol 3</i> GEWANDSNAJDER, Fernando & LINHARES, Sérgio Editora Ática, 2010	87 – 94
LD 4	<i>NOVAS BASES DA BIOLOGIA – vol. 3</i> BIZZO, Nélío Editora Ática, 2010	145 – 150
LD 5	<i>SER PROTAGONISTA – BIOLOGIA – vol. 3</i> SANTOS <i>et. al.</i> Edições SM, 2010	75 – 101

Nos capítulos que tratam de ligação gênica, buscou-se identificar informações relativas à biografia dos personagens envolvidos, ao contexto científico da época, considerando as possíveis teorias ou hipóteses alternativas, a reação da comunidade científica e as informações sobre o desenvolvimento da teoria, incluindo as dificuldades encontradas.

A primeira constatação foi que, na maior parte dos livros analisados, o histórico do *linkage* é tratado de maneira muito breve. Não constam informações

sobre os experimentos que foram feitos anteriores à proposta do *linkage* pelo grupo *Drosophila* e sobre as explicações que eram dadas anteriormente para as características que eram herdadas associadas, contrariando o princípio da segregação independente de Mendel. Também não são apontadas as dificuldades encontradas ou como foi a reação da comunidade científica na época, desconsiderando que havia outras explicações, a hipótese da reduplicação de William Bateson (1861-1926) e que era aceita pela comunidade científica da época. Não são mencionados outros personagens que fizeram parte desta história tanto os que trabalharam inicialmente sob outra perspectiva que não envolvia cromossomos como o grupo de Bateson (Bateson, Saunders & Punnett, 1906) ou os próprios colaboradores de Thomas Hunt Morgan (1866-1945), Alfred Henry Sturtevant (1891-1970) Calvin Blackman Bridges (1889-1938), e Herman Joseph Muller (1890-1967), que participaram ativamente destes estudos (Martins, 1997, cap. 5)².

O desenvolvimento da concepção de *linkage* é atribuído apenas a Thomas Hunt Morgan, salientando suas contribuições para a genética de *Drosophila* e teoria cromossômica, motivo pelo qual foi condecorado com o prêmio Nobel de Fisiologia ou Medicina em 1933. Nesse caso, são ignorados os estudos anteriores de Morgan sobre embriologia, regeneração, determinação de sexo e que ele não tinha uma formação em citologia ao contrário de seus colaboradores, Sturtevant, Muller e Bridges. As dificuldades também não são mencionadas. Além disso, que Morgan até 1910-1911 foi um crítico das teorias mendeliana e cromossômica (Martins, 2002a).

Um aspecto que dificulta o entendimento do *linkage* é o fato de ele já ser apresentado no nível microscópico. As narrativas ignoram que o fenômeno foi observado inicialmente nos resultados de cruzamentos experimentais que eram visíveis (nível macroscópico) e só depois foram oferecidas as interpretações microscópicas. Esse talvez seja um dos motivos que contribuam para as dificuldades encontradas conforme apontado por Banet & Ayuso, 1995.

Para Ernst Mayr (1998, pp. 21-22) uma forma satisfatória de tratar a história da ciência no ensino seria pela abordagem da história dos problemas, segundo a qual o estudante teria contato não com a história dividida por períodos, estudada de forma cronológica, mas sim um estudo dos problemas, apresentando não apenas a

---

² Nesta tese cada capítulo é numerado separadamente. Para evitar confusões, optamos por mencionar o número do capítulo e o número da página.

história bem sucedida, mas também as tentativas fracassadas para a solução da questão, considerando o contexto da época, os instrumentos conceituais e técnicos de que se dispunha, os métodos utilizáveis e as ideias influentes no período.

Maria Helena da Silva Carneiro & Maria Luiza Gastal (2005) chamam atenção para a necessidade de um esforço concentrado na produção de materiais que auxiliem a prática didática e que forneçam indicadores de como trabalhar com este tipo de abordagem. Dessa forma, acreditamos que a elaboração de sequência didática utilizando um estudo histórico sobre a construção do conceito de *linkage* possa constituir um material de fácil acesso que poderá ser útil para o ensino-aprendizagem deste conceito e de outros conteúdos relacionados à genética abordados no ensino médio.

CAPÍTULO 2

A LIGAÇÃO GÊNICA (*LINKAGE*)

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentaremos algumas explicações que foram dadas para a situação em que as características não eram herdadas de modo independente conforme Gregor Mendel (1822-1884) havia encontrado nos cruzamentos com ervilhas do gênero *Pisum* (Mendel, 1866). Trataremos inicialmente do período que antecedeu à explicação apresentada por Morgan e seus colaboradores (*linkage*) a partir do trabalho experimental feito com a mosca das frutas, *Drosophila*.

O período estudado inclui a primeira e vai até a metade da segunda década do século XX, quando estava ocorrendo o estabelecimento da teoria mendeliana-cromossômica. Focalizaremos nossa atenção principalmente no período compreendido entre 1902 (ocasião que marcou o início da proposta da “hipótese cromossômica de Sutton e Boveri”) e a publicação da obra de Morgan, Sturtevant, Müller e Bridges, *The mechanism of Mendelian heredity* (1915).

Desde a proposta da hipótese cromossômica até 1910-1911, ou mesmo depois, diversos cientistas não aceitavam que os fatores mendelianos estivessem localizados nos cromossomos e que fosse possível estabelecer um paralelo entre seu comportamento durante as divisões celulares (nível microscópico) e o resultado de cruzamentos experimentais (nível macroscópico). Essa atitude podia ser explicada pelos problemas e poucas evidências que a substanciassem. Por exemplo, para Walter S. Sutton (1877-1916) os cromossomos conservavam sua individualidade. Entretanto, durante a interfase eles pareciam desaparecer e depois reapareciam nos mesmos lugares. Como saber se sua individualidade era preservada? Não se sabia se os cromossomos pareavam ponta a ponta ou lado a lado e isso trazia implicações para a hipótese. Nem sempre era possível estabelecer relações entre cromossomos e princípios de Mendel ou entre cromossomos e característica externa visível. Nesse sentido, os diversos estudos sobre determinação de sexo em insetos desenvolvidos durante a primeira década do século XX puderam trazer contribuições para a teoria cromossômica (Martins, 1997. cap.3, pp. 25-27).

Havia aqueles que aceitavam os princípios mendelianos, mas não aceitavam que os fatores estivessem alocados nos cromossomos como Wilhelm Ludwig Johannsen (1857-1927), por exemplo. Outros não aceitavam nem a teoria cromossômica e nem os princípios de Mendel como no caso de Thomas Hunt Morgan (1866-1945) até 1910-1911 (Martins, 1998b, p. 105).

Por volta de 1900, algumas décadas após a publicação do artigo de Mendel sobre os padrões de herança em plantas híbridas, diversos pesquisadores como, por exemplo, Carl Correns (1864-1933), Hugo de Vries (1848-1933), Erich Tschermak-Seysenegg (1871-1962), William Bateson (1861-1926) e Lucien Cuénot (1866-1951), trabalhando com cruzamentos experimentais de outros organismos, constataram a aplicação dos mesmos princípios que Mendel encontrara nas ervilhas. Por outro lado, os estudos citológicos estavam sendo desenvolvidos por vários pesquisadores como, por exemplo, Thomas Montgomery (1861-1941), Edmund B. Wilson (1856-1939) Walter Sutton (1877-1916) e Theodor H. Boveri (1862-1915). Alguns deles procuraram relacionar os princípios que Mendel encontrara nas ervilhas ao comportamento dos cromossomos como, por exemplo, Walter S. Sutton.

O naturalista inglês William Bateson, que já trabalhava com cruzamentos experimentais que produziam híbridos desde o final do século XIX e vinha encontrando alguns resultados que se enquadravam nos princípios de Mendel, tomou contato com seu artigo sobre plantas híbridas em 1900. A partir daí, deu início ao programa de pesquisa mendeliano. Juntamente com seus colaboradores, como Reginald Crundall Punnett (1875-1967) e Edith Saunders (1865–1945), dentre outros, procurou testar se os princípios de Mendel se aplicavam a diversos organismos, tanto animais como plantas. Além disso, procurou averiguar as exceções, os desvios destes princípios propondo novos princípios ou leis (Martins, 2002b, p. 29).

O artigo de Mendel se tornou acessível aos povos de língua inglesa por meio de uma tradução feita por Druery, revista por Bateson e publicada em 1902 no livro *Mendel's principles of heredity: A defense* (Martins, 2002b, p. 36).

2.2 Explicações para as características que eram herdadas associadas

2.2.1 As contribuições de Carl Correns

Carl Franz Joseph Erich Correns (1864-1933), botânico alemão, considerado por alguns autores como um dos “redescobridores” dos princípios de Mendel, foi um dos cientistas que trabalhavam com cruzamentos experimentais desde o final do século XIX, como mencionamos na seção anterior. Segundo Alfred Henry Sturtevant, em 1900 Correns relatara casos em que algumas características eram herdadas associadas, contrariando o princípio da segregação independente de Mendel. Esses resultados foram obtidos a partir do cruzamento de duas linhagens da planta *Matthiola*. Uma das variedades possuía flores e sementes coloridas e folhas peludas. Já a outra apresentava flores e sementes brancas e folhas lisas. Na primeira geração (mais tarde chamada de F1), ele obteve plantas com flores e sementes coloridas e com folhas peludas. Ao cruzar os descendentes da primeira geração entre si, na geração seguinte (mais tarde chamada de F2) ele obteve somente duas das combinações parentais na proporção 3:1, ao contrário do esperado. Ele interpretou os resultados como sendo devidos a dois pares de fatores que pareciam estar associados (Sturtevant, [1965] 2001 p. 39). Além disso, Correns estudou casos de associação envolvendo características fisiológicas em ervilhas, como por exemplo, a correlação entre estatura e curvatura em uma variedade de ervilha de cheiro. Mas não havia estudado ainda a associação parcial como Bateson e seus colaboradores viriam a observar mais tarde.

Em uma de suas publicações onde apresentou resultados de cruzamentos experimentais que estavam de acordo com os princípios da segregação independente, Correns comentou: “Esta regra, entretanto, não se sustenta genericamente; existem linhagens com características acopladas” (Correns, 1900, p. 16, *apud*, Sturtevant, [1965] 2001, p. 40).

Dois anos mais tarde, Correns sugeriu que poderia haver uma relação entre os cromossomos e as “Leis” de Mendel. Ele supôs que os fatores mendelianos fossem transportados pelos cromossomos e propôs uma representação na qual cada cromossomo seria uma espécie de colar de contas onde cada conta representaria um fator (Sturtevant, [1965] 2001, pp. 35-36; Martins, 1997, cap. 3, p. 42). No entanto, os cromossomos representados por Correns como um colar duplo, de origem materna e paterna respectivamente, um ao lado do outro, a seu ver, iriam

se separar nas divisões mitóticas normais e não na situação de pareamento na meiose, como foi considerado posteriormente (Martins, 1997, cap. 3, p. 42).

Fig. 1. Esboço inicial de Correns sobre a organização sequencial dos fatores no cromossomo (Rheinberger, Hans-Jorg & Gaudillière, Jean-Paul. *Classical genetic research and its legacy: The mapping cultures of twentieth-century genetics*. New York: Routledge, 2004).

Correns, no entanto, não se dedicou a estudar detalhadamente este desvio do princípio da segregação independente limitando-se apenas a relatar o ocorrido.

2.2.2 As contribuições de Bateson, Punnett e Saunders

Em 1902, trabalhando com cruzamentos experimentais na planta *Matthiola* Bateson e Edith R. Saunders, de modo análogo a Correns, inclusive mencionando seus estudos, observaram que algumas características eram herdadas juntas, contrariando o princípio da segregação independente de Mendel. Parecia haver uma associação entre determinadas características. Eles perceberam que quando as flores eram de cor púrpura, as sementes apresentavam a coloração verde e que havia uma associação entre folhas peludas ou lisas e a cor da semente que era

verde ou marrom. Inicialmente eles apenas relataram o ocorrido, mas não propuseram uma explicação (Bateson & Saunders, 1902, pp. 68-81; Martins, 1997, cap. 5, p. 2). Mais tarde eles se depararam com o mesmo fenômeno ao estudar outros organismos como, por exemplo, as ervilhas de cheiro (*Lathyrus odoratus*), onde encontraram uma associação entre a cor das flores e formato do pólen: “Existe, portanto, alguma associação [*coupling*] entre forma do pólen e cores” (Bateson, Saunders & Punnett, 1905, p. 89; Martins, 1997, cap. 5, p. 2). Nessa época outro pesquisador que fazia parte do grupo de Bateson em Cambridge, Charles Chamberlain Hurst (1870-1947) encontrou associação de determinadas características em coelhos e na França Lucien Cuénot (1866-1951) observou o mesmo fenômeno em camundongos (Martins, 1997, cap. 5, p. 2).

Fig. 2. Imagem de planta *Matthiola* sp.
Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Matthiola>

Fig. 3. Imagem da flor de ervilha de cheiro *Lathyrus odoratus*.
Fonte: <http://nargil.ir/plant/houseplants>

Alguns anos mais tarde (1906) Bateson, Saunders e Punnett procuraram explicar os resultados obtidos em seus cruzamentos com *Matthiola*. Consideraram que os pelos que apareciam nas folhas de *Matthiola* eram o resultado da interação de vários fatores. O aparecimento de folhas peludas estava relacionado a dois fatores (H, h ; K, k). O aparecimento da cor das sementes também estava relacionado a dois fatores (C, c e R, r). Entretanto, os pelos só apareciam quando os

fatores para as cores estavam presentes. A característica só se manifestava quando apareciam juntos dois fatores dominantes independentes, na proporção de 9:7, como observaram nos resultados obtidos. Eles chamaram este fenômeno de “associação zigótica” (*zigotic coupling*), onde os fatores se distribuíam entre os gametas (Bateson, Saunders & Punnett, 1906, pp. 5-6; Martins, 1997, cap. 5, p. 2).

Foi nessa época que eles passaram a utilizar o termo *coupling* (associação) para se referir à vinculação entre caracteres. Esta terminologia está presente em seus trabalhos publicados entre 1904 e 1905.

Anos mais tarde, em 1907-1908, Bateson propôs a hipótese da presença-ausência. Considerou que os fatores poderiam exercer atrações entre si. O alelomorfismo (como ele se referia aos pares de fatores relacionados uma mesma característica, depois chamados de alelos) não seria constituído por fatores separados para as características dominantes e recessivas mas sim pela presença de algo que constitui a característica dominante que está ausente nos gametas recessivos (Bateson, 1907, Martins, 1997, cap. 5, p. 6). Em alguns casos haveria uma repulsão entre fatores, cujas características nunca apareciam juntas. Em outros casos haveria uma atração ou associação entre eles, o que fazia com que determinadas características sempre fossem herdadas juntas. Nessa explicação existe uma analogia com as forças físicas.

Anos mais tarde (1911), Bateson deu mais esclarecimentos sobre a repulsão. Ele supôs a existência de algum tipo de interação entre os dois fatores durante a gametogênese de modo que eles fossem para células distintas. Isso se aplicava aos casos estudados porque nunca os fatores dominantes correspondentes apareciam em um gameta (Bateson, 1909; Martins, 1997, cap. 5, p. 9).

Em 1911, procurando explicar os resultados encontrados, Bateson e Punnett (1911, p. 211) propuseram a hipótese da reduplicação relacionada às divisões celulares envolvidas na formação dos gametas. Bateson e Punnett consideraram que, após a fecundação, o ovo ou zigoto dividir-se-ia em duas células iguais que por sua vez se dividiriam em quatro células diferentes que conteriam todas as combinações possíveis de fatores. As células que contivessem as combinações parentais de fatores sofreriam um maior número de divisões (reduplicações), produzindo as séries numéricas que estavam de acordo com os fatos observados (Bateson & Punnett, 1911, pp. 212-213; Martins, 1997, cap. 5, p. 18). Assim, o comportamento dos fatores dependeria da forma pela qual eram herdados.

Como o fenômeno estava relacionado à proliferação diferente de dois tipos de células, Bateson e Punnett consideraram a terminologia “atração” e “repulsão” inadequada, passando a utilizar o termo “reduplicação” (Martins, 1997, cap. 5, p. 18).

Dois anos mais tarde, Bateson (Bateson, 1913) ainda se referia a essa hipótese, mostrando algumas exceções.

Fig. 4. William Bateson
Fonte: <http://www.genmedhist>

Fig. 5. Edith Rebecca Saunders
Fonte: <http://qspace.library.queensu.ca>

2.3 As contribuições do grupo *Drosophila*

O zoólogo norte-americano Thomas Hunt Morgan (1866-1945) até 1910-1911 era um forte opositor das teorias mendelianas e negava que os elementos responsáveis pela transmissão das características hereditárias estivessem localizados nos cromossomos³. Iniciou sua carreira como embriologista e se dedicou a vários tipos de estudo, desde regeneração até determinação do sexo em insetos partenogênicos (Brito, 2007, pp. 62-63).

Entusiasmado com a teoria da “mutação” de Hugo de Vries⁴, por ser o resultado de um trabalho experimental (Allen, 1981, p. 520), Morgan procurou investigar se o fenômeno detectado pelo botânico holandês na planta *Oenothera lamarckiana* poderia ocorrer em animais.

³ Para mais informações sobre a oposição de Morgan às teorias mendeliana e cromossômica, ver por exemplo, Allen, 1978; Martins, 1998b; Benson, 2001.

⁴ A teoria da mutação de De Vries admitia que grandes variações hereditárias espontâneas ocorridas em uma geração poderiam produzir descendentes de espécies diferentes daquela de seus progenitores (Martins, 2002a, p. 232).

Drosophila era um material adequado, pois as fêmeas são férteis o ano todo, produzindo grande número de descendentes, originando novas gerações a cada doze dias (Kandel, 2004).

Fig. 6. Thomas Hunt Morgan em seu laboratório. Ao fundo, ilustrações das *Drosophilas*.
Fonte: www.columbia.edu

Para auxiliá-lo, no início de 1910 Morgan admitiu em seu laboratório três estudantes Alfred Henry Sturtevant e Calvin Blackman Bridges, que ao contrário dele, tinham um treino em citologia⁵. Ao que tudo indica, após bombardearem as moscas com rádio, Bridges encontrou em uma das garrafas de cultura, uma mosca

⁵ Alfred Henry Sturtevant e Calvin Blackman Bridges, graduandos e Herman Joseph Muller, pós-graduando.

macho cujos olhos eram brancos (Moore, 1986, p. 682), sendo que a forma selvagem apresentava os olhos vermelhos. Muito provavelmente, acreditando estar diante de uma mutação (no sentido de De Vries), ou seja, uma nova espécie, Morgan resolveu fazer alguns testes, realizando alguns cruzamentos. Para isso, inicialmente isolou o macho de olhos brancos e cruzou-o com as fêmeas de olhos vermelhos para ver o que ocorria. Em F1 obteve 1237 descendentes de olhos vermelhos. Quando cruzou os híbridos de F1 ele obteve 2459 fêmeas de olhos vermelhos, 1011 machos de olhos vermelhos e 782 machos de olhos brancos mas não apareceu nenhuma fêmea de olhos brancos. Então, ele concluiu se tratar de um caráter limitado ao sexo. Mais tarde, percebeu que esse caráter também podia aparecer em fêmeas através de um cruzamento adequado, pois, do cruzamento do “mutante” de olhos brancos com algumas de suas filhas (de F1), nasciam fêmeas de olhos brancos. Nesse cruzamento, por exemplo, foram obtidos 132 machos de olhos vermelhos, 129 fêmeas de olhos vermelhos, 86 machos de olhos brancos e 88 fêmeas de olhos brancos. (Morgan, 1910b; Martins, 2002a, pp. 237-238).

Para explicar os resultados encontrados, Morgan propôs uma primeira hipótese. Nela, ele utilizava o termo “fator”, que fazia parte da teoria mendeliana que antes ele criticava. Considerou a existência de dois fatores: o fator para olhos brancos (W) e o fator sexual (X). Tratou os resultados como um caso de di-hibridismo (Moore, 1986, p. 682), mas não mencionou os cromossomos.

Morgan fez previsões e testes em relação a esta primeira hipótese⁶ (ver a respeito em Moore, 1986 e Martins, 2002a). Apesar de ser equivocada as previsões dessa hipótese foram confirmadas. Somente mais tarde Morgan percebeu problemas em relação à mesma e propôs outra, baseado no trabalho feito juntamente com Sturtevant, Muller e Bridges. Esta segunda hipótese não supunha que os alelos limitados ao sexo estivessem associados ao cromossomo X, mas que estavam localizados nele juntamente com os fatores responsáveis pela feminilidade. (Martins, 2002a, pp. 247-248).

A partir daí, Morgan e seu grupo se dedicaram à genética de *Drosophila*, concentrando-se apenas na transmissão. Em seus experimentos encontraram novos mutantes, além da coloração branca dos olhos. Eles registravam cuidadosamente esses mutantes e estudavam seus padrões hereditários através de cruzamentos e

---

⁶ Para uma explicação detalhada sobre as duas hipóteses, testes etc., ver a respeito em Moore, 1986 e Martins, 1997; Martins, 2002).

retrocruzamentos. Trabalhar com *Drosophila* conferia uma grande vantagem no sentido de permitir acumular grande quantidade de dados, que nunca havia sido produzido para nenhum outro tipo de organismo. Por exemplo, nos experimentos do grupo de Bateson, apesar de envolver algumas centenas de plantas, eram necessários um intervalo de tempo de alguns meses ou mais de uma geração para outra, já no caso de *Drosophila* tornou-se possível trabalhar com experimentos abrangendo cerca de 10.000 indivíduos, com estudos de várias gerações em apenas dois meses. (Martins, 1997, cap. 1, p. 24).

Entre as mutações encontradas podem ser mencionadas o corpo amarelo (em oposição ao corpo marrom) e as asas miniatura (em oposição às asas de tamanho normal). Morgan e seus colaboradores encontraram evidências que sugeriam que esses fatores estavam relacionados ao cromossomo X. Perceberam que em vários cruzamentos algumas características eram herdadas associadas, no decorrer de várias gerações. Constataram que quando os cruzamentos eram feitos entre heterozigotos a associação nunca era completa. A recombinação ocorria de tal modo que não era possível supor que os fatores estivessem presos ao cromossomo X (Allen, 1978, p. 156).

Fig. 7. Alguns exemplos de mutações em *Drosophilas*.
Fonte: <http://thebugsquad.com>

Como vimos anteriormente, tratava-se do mesmo fenômeno encontrado anteriormente por Bateson, Punnett e Saunders. Nas ervilhas-de-cheiro havia uma associação entre o formato do grão de pólen e a cor das flores. Eles também tinham percebido que nem sempre a associação era completa, pois ocasionalmente ocorria uma separação e recombinação das características.

Como vimos inicialmente eles descreveram o fenômeno e depois procuraram explicá-lo através da atração e repulsão. Essa hipótese, de acordo com Garland Allen, foi aceita até 1910 (Allen, 1978, p. 156). Posteriormente em 1911 Bateson e Punnett propuseram a hipótese da reduplicação, baseada principalmente em casos encontrados em plantas. Foi justamente nessa época que o grupo de Morgan começou a encontrar vários casos de características que eram herdadas associadas em *Drosophila*.

No entanto, Morgan e seu grupo denominaram o fenômeno de modo diferente adotando o termo *linkage* (ligação). Além disso, procuraram explicá-lo de modo diferente. O mesmo aconteceu em relação à recombinação. Ao contrário de Bateson, sua explicação envolvia os cromossomos.

Morgan havia tomado contato com o estudo citológico feito por Franz Alphonse Janssens (1909) em salamandra (*Batrachoseps attenuatus*). Estudando a meiose deste organismo, nas preparações das células germinativas o autor descreveu o que pareceu ser um entrelaçamento entre cromossomos homólogos de um mesmo par, durante os estágios iniciais da meiose. Ele chamou este fenômeno de *quiasmatipia* e interpretou estas torções entre membros homólogos de um mesmo par como envolvendo quebras e posterior junção, o que levaria a uma troca entre as regiões correspondentes de membros de um mesmo par. Ao processo de entrelaçamento e quebra ele chamou *crossing-over* (muitas vezes traduzido por permuta) (Allen, 1978, p. 160).

Nas palavras de Morgan o processo acima descrito teria como consequência:

Em consequência, os materiais originais que estiverem localizados mais proximamente irão cair do mesmo lado da separação, enquanto que os materiais localizados a distâncias maiores tenderão a se localizar em lados opostos. Consequentemente, iremos encontrar associação de determinados caracteres, e pouca ou nenhuma evidência de associação entre outros caracteres; a diferença dependerá da distância entre os materiais que representam os fatores [...] Os resultados são um simples resultado mecânico da localização dos materiais no cromossomo, e do método de união dos

cromossomos . [...] A citologia fornece o mecanismo solicitado pela evidência (Morgan, 1911, p. 384).

A representação do *crossing-over* que está reproduzida a seguir e que também explica o *linkage* (quando os fatores se localizavam proximalmente no cromossomo eram herdados associados) foi utilizada por Morgan no artigo de 1915, embora já fizesse parte de suas ideias em 1911. Contudo, foi o seu auxiliar, Alfred Henry Sturtevant quem introduziu uma técnica de cálculo, na tentativa de tentar descobrir as posições dos fatores ligados no cromossomo e comparar suas distâncias. Desta maneira, baseado na hipótese de Morgan, os cálculos de Sturtevant permitiriam fazer uma previsão quantitativa, que não havia sido sugerida antes⁷ (Allen, 1978, p. 161).

Morgan via os cromossomos como constituídos pelo arranjo linear de fatores mendelianos que estão representados pelos círculos, de modo semelhante às contas em um colar. Os círculos pretos e brancos representam os fatores dos cromossomos de origem materna e paterna.

Fig. 8. Diagrama de Morgan ilustrando o mecanismo de “*crossing-over*” entre os cromossomos homólogos (Morgan, Thomas Hunt. Localization of the hereditary material in the germ cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 1: 420-429, 1915, p. 426).

Veja que Morgan e seus colaboradores estavam desenvolvendo suas ideias baseados nos estudos citológicos de Franz Alphons Janssens (1909) em salamandra, em que se observava uma sobreposição de cromátides de cromossomos de um par de homólogos. Entretanto não havia a evidência citológica de que houvesse uma troca de partes entre os homólogos. Portanto, se tratava de

⁷ Para um maior detalhamento sobre os cálculos realizados por Sturtevant, ver a respeito em Sturtevant, 1913 e Martins, 1997.

evidências indiretas obtidas em outro organismo. Suas hipóteses sobre *linkage* e *crossing-over* dependiam do fato de que os cromossomos homólogos pudessem parear e trocar partes entre si. Por esta razão alguns autores as criticaram na época.

Os estudos do grupo *Drosophila* prosseguiram e após alguns anos, o grupo de Morgan havia acumulado grande quantidade de dados sobre fatores que eram herdados juntos. O grupo passou a organizar os dados da seguinte forma: conforme observavam casos de ligação entre dois fatores, estes eram agrupados em uma mesma lista; já para os casos em que se observava que dois fatores quaisquer segregavam independentemente, estes eram agrupados em listas separadas. Desta forma, com a quantidade de dados acumulados, Morgan e seus colaboradores conseguiram abrir quatro listas de grupos de genes ligados. Estes resultados mostravam concordância com os estudos citológicos de células de *Drosophila melanogaster*, no qual foram encontrados exatamente quatro pares de cromossomos. Assim, cada um dos grupos de *linkage* corresponderia a um dos pares de cromossomos homólogos. Este paralelismo foi, portanto, uma forte evidência não apenas de que os genes são partes integrantes dos cromossomos, mas também que genes localizados em um mesmo cromossomo tendem a ser herdados juntos (Moore, 1986, p. 696).

Os resultados obtidos pelo grupo *Drosophila*, inclusive sobre os grupos de ligação, foram reunidos em 1915 no livro *The mechanism of Mendelian heredity*, de autoria de Morgan, Sturtevant, Müller e Bridges. Embora vários membros da comunidade científica da época tenham se convencido com as evidências apresentadas, houve vários críticos que apontaram muitos problemas como William Bateson, por exemplo. No livro, Morgan e colaboradores criticaram a hipótese da reduplicação de Bateson e Punnett que era aceita até então pela comunidade científica da época⁸.

---

⁸ Para uma análise detalhada desta obra ver, por exemplo, Martins, 2010.

GRUPO I	
Nome	Região afetada
<i>Abnormal</i>	Abdome
<i>Bar</i>	Olhos
<i>Bifid</i>	Veias das asas
<i>Bow</i>	Asas
<i>Cherry</i>	Cor dos olhos
<i>Chrome</i>	Cor do corpo
<i>Cleft</i>	Nervuras das asas
<i>Club</i>	Asas
<i>Depressed</i>	Asas
<i>Dotted</i>	Tórax
<i>Eosin</i>	Cor dos olhos
<i>Facet</i>	Omatídios
<i>Furrowed</i>	Olhos
<i>Fused</i>	Veias das asas
<i>Green</i>	Cor do corpo
<i>Jaunty</i>	Asas
<i>Lemon</i>	Cor do corpo
<i>Lethals, 13</i>	Morte
<i>Miniature</i>	Asas
<i>Notch</i>	Veias das asas
<i>Reduplicated</i>	Pernas
<i>Ruby</i>	Cor dos olhos
<i>Rudimentary</i>	Asas
<i>Sable</i>	Cor do corpo
<i>Shifted</i>	Veias das asas
<i>Short</i>	Asas
<i>Skee</i>	Asas
<i>Spoon</i>	Asas
<i>Spot</i>	Cor do corpo
<i>Tan</i>	Antenas
<i>Truncate</i>	Asas
<i>Vermilion</i>	Cor dos olhos
<i>White</i>	Cor dos olhos
<i>Yellow</i>	Cor do corpo

GRUPO II	
Nome	Região Afetada
<i>Antlered</i>	Asas
<i>Apterous</i>	Asas
<i>Arc</i>	Asas
<i>Balloon</i>	Veias das asas
<i>Black</i>	Cor do corpo
<i>Blistered</i>	Asas
<i>Comma</i>	Tórax
<i>Confluent</i>	Veias das asas
<i>Cream II</i>	Cor dos olhos
<i>Curved</i>	Asas
<i>Dachs</i>	Pernas
<i>Extra vein</i>	Veias das asas
<i>Fringed</i>	Asas
<i>Jaunty</i>	Asas
<i>Limited</i>	Faixa abdominal
<i>Littlecrossover</i>	Cromossomo II
<i>Morula</i>	Omatídios
<i>Olive</i>	Cor do corpo
<i>Plexus</i>	Veias das asas
<i>Purple</i>	Cor dos olhos
<i>Speck</i>	Tórax
<i>Strap</i>	Asas
<i>Streak</i>	Padrão do tórax
<i>Trefoil</i>	Padrão do tórax
<i>Truncate</i>	Asas
<i>Vestigial</i>	Asas

GRUPO III	
Nome	Região Afetada
<i>Band</i>	Padrão do tórax
<i>Beaded</i>	Asas
<i>Cream III</i>	Cor dos olhos
<i>Deformed</i>	Olhos
<i>Dwarf</i>	Tamanho do corpo
<i>Ebony</i>	Cor do corpo
<i>Giant</i>	Tamanho do corpo
<i>Kidney</i>	Olhos
<i>Low crossing</i>	
<i>-over</i>	Cromossomo III
<i>Maroon</i>	Cor dos olhos
<i>Peach</i>	Cor dos olhos
<i>Pink</i>	Cor dos olhos
<i>Rough</i>	Olhos
<i>Safranin</i>	Cor dos olhos
<i>Sepia</i>	Cor dos olhos
<i>Sooty</i>	Cor do corpo
<i>Spineless</i>	Cerdas
<i>Spread</i>	Asas
<i>Trident</i>	Padrão do tórax
<i>Truncate intensf.</i>	Asas
<i>Whitehead</i>	Cor pericelular
<i>White ocelli</i>	Ocelos

GRUPO IV	
Nome	Região Afetada
<i>Bent</i>	Asas
<i>Eyeless</i>	Olhos

Fig. 9. Quadros dos grupos de ligação gênica em *Drosophila melanogaster* (1915).
 Fonte: <http://dreyfus.ib.usp.br/bio203/texto10.pdf>

2.4 Algumas considerações

O estudo de caso apresentado permite conhecer vários aspectos relacionados à natureza da ciência. Por exemplo, que um mesmo fenômeno (características que eram herdadas juntas, contrariando o princípio mendeliano da segregação) foi interpretado de modos diferentes. Um deles envolvia os cromossomos e o outro não. Essas interpretações estavam relacionadas a teorias diferentes que muitas vezes adotavam uma terminologia diferente (*linkage*, *coupling*, *crossing-over*, reduplicação, etc). Isso mostra, como a observação não é desprovida de teoria, conforme aponta A. F. Chalmers (Chalmers, 2010, cap. 2).

Por outro lado, foi possível perceber que os cientistas podem mudar de ideia e isso pode ocorrer quando encontram explicações mais adequadas para determinados fenômenos. Por exemplo, as modificações ocorridas na teoria da

presença-ausência de Bateson & Punnett e a passagem para a teoria da reduplicação. Mas também pode acontecer por outras razões como no caso da mudança de atitude de Morgan em relação às teorias mendeliana e cromossômica, que pode ser interpretada como uma estratégia profissional (Martins, 1998b, pp. 118-119).

Além disso, que muitas vezes hipóteses equivocadas podem apresentar resultados numéricos que as confirmem como foi o caso das séries numéricas envolvidas na hipótese da reduplicação ou o primeiro teste feito por Morgan em relação aos cruzamentos com *Drosophila* referentes à sua primeira hipótese.

Os cientistas podem fazer relações sem terem evidências diretas. Por exemplo, os estudos de Janssens em salamandra não mostravam citologicamente que os cromossomos trocavam partes e Morgan os relacionou a outro organismo, *Drosophila* e a partir daí apresentou um modelo para explicar a recombinação e a associação de características.

Pode-se ainda acrescentar que o empreendimento científico é resultado de um trabalho coletivo que envolve acertos e erros. No caso estudado, houve a participação de Bateson e colaboradores, e Morgan e colaboradores.

CAPÍTULO 3

SEQUÊNCIA DIDÁTICA

3.1 INTRODUÇÃO

Como mencionado no capítulo 1, estudos realizados evidenciam preocupação quanto à dificuldade dos alunos no entendimento de conceitos importantes em genética, especialmente sobre ligação gênica (*linkage*). Esses artigos apontam a necessidade de desenvolver e aplicar metodologias e práticas didáticas especialmente voltadas para o ensino desses conteúdos. Nesse sentido, foi elaborada uma sequência didática (SD), com o propósito de contribuir para o entendimento e apropriação do conceito de *linkage* pelos alunos.

A sequência didática foi elaborada com base no referencial discutido por Martine Méheut (2005). A autora considera que ao elaborar uma sequência didática deve-se considerar quatro elementos fundamentais: professor, aluno, conhecimento científico e mundo material; de modo a contemplar tanto a dimensão pedagógica como a epistêmica (“construtivismo integrado”). A dimensão epistêmica envolve os processos de elaboração, métodos e validação do conhecimento científico, que podem torna-lo significativo com relação ao mundo real. Já a dimensão pedagógica, diz respeito aos aspectos inerentes ao papel do professor e às interações professor-aluno e aluno-aluno (MÉHEUT, 2005, pp.196-198).

Fig. 10. Representação gráfica proposta por Martine Méheut, considerando da interdependência das dimensões epistêmica e pedagógica na elaboração de uma sequência didática.

Diante do exposto, a sequência didática foi elaborada com a proposta de associar diferentes aspectos de cada uma das dimensões propostas por Méheut (2005). No que diz respeito à dimensão epistêmica, para aproximação do conhecimento científico com o mundo real, foi elaborado um texto didático, com base na pesquisa histórica, tratando do episódio sobre a construção do conceito de *linkage*. Este material será trabalhado na sequência didática, em uma abordagem do tipo *case-based learning (CBL)* (aprendizagem baseada em um caso), que permitirá discutir os processos de elaboração, métodos e validação do conhecimento científico, com relação ao assunto explorado. Como apontado por Douglas Allchin (2013) a CBL tem emergido como uma valiosa ferramenta para o ensino de ciências. Tal abordagem favorece o envolvimento dos alunos em sua própria aprendizagem, contribui para a motivação e significação por parte dos estudantes, além de permitir melhor entendimento sobre aspectos da natureza da ciência. Estudantes que trabalham com abordagens CBL, geralmente exercitam e aprimoram suas habilidades em pesquisa, análise, interpretação e criatividade (Allchin, 2013, p. 364).

Quanto à dimensão pedagógica, foram sugeridas atividades que favorecem as interações aluno-aluno e aluno-professor, pela utilização de métodos cooperativos. Além disso, será utilizado o recurso de modelos, prevendo maior envolvimento dos estudantes, de forma a tornar a aprendizagem significativa (Bouter & Buckley, 2000; Sampaio, 2000). Quando utilizamos um modelo, aprendemos sobre a situação representada por ele. Já quando o construímos, criamos um tipo de estrutura representativa e desenvolvemos uma forma científica de pensar semelhante àquela utilizada pelos cientistas na construção do conhecimento científico (Justi, 2006, p. 175). Cleonice Braga *et al.* (2010) acrescentam que, além de promover maior compreensão de conceitos e processos abstratos, o uso de modelos facilita a exposição do assunto pelo professor e promove o diálogo e a troca de significados entre professor e aluno durante o processo ensino-aprendizagem.

Fig. 11. Exemplificação das atividades desenvolvidas na sequência didática, com base no modelo proposto por Martine Méheut.

3.2 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Linkage, Permutação e Mapeamento Cromossômico – Entendendo melhor os conceitos que fundamentam a genética clássica.

Público-alvo: Alunos do 3º ano do Ensino Médio da rede Estadual de ensino, ou alunos de escolas privadas, cujo conteúdo de *linkage* deve ser trabalhado no ano letivo.

Tempo estimado: 6 aulas consecutivas, de aproximadamente 50 minutos cada⁹.

Duração: 3 semanas (considerando 2 aulas semanais de Biologia na grade curricular).

1ª aula – Episódio histórico

Objetivos:

- Apresentar o problema de investigação estudado por Carl Correns, William Bateson e Thomas Hunt Morgan (características que eram herdadas associadas, contraindo o princípio da segregação independente de Mendel).
- Apresentar o contexto histórico da proposta do conceito de *linkage* por Morgan.

⁹ Nas diferentes aulas foi sugerido um tempo para o desenvolvimento das atividades propostas.

- Discutir aspectos da natureza da ciência, tendo como base o episódio histórico apresentado.

Duração:

1 aula de aproximadamente 50 minutos

Material:

- Texto didático: O episódio histórico sobre a proposta do conceito de *linkage*. (Apêndice A)
- Quadro negro e giz

Procedimentos:

A abordagem dos conceitos de *linkage*, permutação e mapas genéticos, sucede o estudo da Segunda Lei de Mendel. A esta altura, os alunos já estudaram os processos de divisão celular, a primeira e a segunda lei de Mendel. Sendo assim, o professor deverá iniciar a aula apresentando a situação problema, que irá nortear o estudo através do episódio histórico. A situação problema apresentada, será justamente uma das restrições à segunda lei de Mendel, observada por Bateson e seus colaboradores.

Sugere-se que o professor escreva a situação problema a seguir no quadro negro:

Situação problema:

Na ervilha de cheiro (*Lathyrus odoratus*) as flores podem ser azuis ou vermelhas, e seu padrão na planta pode ser ereto ou pendente (capuz). O caráter azul é dominante em relação ao vermelho, assim como o ereto em relação ao pendente. Os resultados dos cruzamentos experimentais mostraram que os descendentes, na segunda geração, apresentavam apenas dois tipos de combinações: as flores vermelhas apresentavam padrão ereto, enquanto as flores azuis apresentavam caráter capuz; ou seja, esse resultado não estava de acordo com a segunda lei de Mendel, em que deveriam aparecer muito mais combinações. O que você imagina que possa ter ocorrido? Qual seria a proporção fenotípica esperada na geração F2, de acordo com os padrões lei da segregação independente de Mendel?

Essa situação problema é colocada com dois propósitos: O primeiro é fazer um levantamento dos conhecimentos prévios dos alunos; para que o professor

possa identificar se de fato os alunos compreendem qual seria o comportamento dos cromossomos durante a meiose e sua distribuição independente, de acordo com a segunda lei de Mendel. Como segundo propósito, esta situação irá motivar a leitura do texto didático, que mostra as hipóteses levantadas pelos pesquisadores da época para explicar este fenômeno.

Atividade 1:

O professor então irá solicitar que os alunos respondam a questão colocada em seu caderno (10 minutos).

Sugere-se que, após o tempo destinado para a resolução dos alunos, o professor realize os cálculos da proporção fenotípica no quadro, para que os alunos possam verificar se estavam certos em seu raciocínio. Desta forma, mesmo os alunos que não tiveram sucesso na resolução, terão uma oportunidade de rever o procedimento pela resolução do professor.

Atividade 2:

Dando continuidade, o professor fará uma rápida contextualização sobre o fenômeno descrito na situação problema, esclarecendo que esta situação foi de fato observada por um pesquisador – William Bateson, por volta de 1900, ao testar se os princípios de Mendel se aplicavam a diversos organismos. Bateson e seus colaboradores trabalhavam com cruzamentos experimentais de forma semelhante a Mendel e, em seus estudos, se depararam com situações que estavam de acordo com os princípios de Mendel, mas também encontraram casos que fugiam aos princípios de segregação proposto por Mendel, em que algumas características eram herdadas associadas.

O professor então irá apresentar o texto didático que trata deste episódio histórico (apêndice A) para que os alunos realizem a leitura (20 minutos).

Atividade 3:

Após a leitura do texto (apêndice A), o professor irá conduzir a discussão sobre o episódio histórico, procurando, através do diálogo com os alunos, colher suas impressões (20 minutos). Seguem algumas questões que podem ser apresentadas aos alunos pelo professor, para direcionar a discussão:

- Em sua opinião, qual dos pesquisadores ofereceu a explicação mais adequada para o fenômeno?
- A seu ver, é possível que resultados de experimentos possam ser interpretados de modos diferentes?
- O período histórico retratado se situa nas duas primeiras décadas do século XX, quando estava ocorrendo o estabelecimento da teoria-mendeliana cromossômica. Nesta ocasião, diversos cientistas não aceitavam que os fatores mendelianos estivessem localizados nos cromossomos (dentre eles Bateson e Morgan) e que fosse possível estabelecer um paralelo entre seu comportamento durante as divisões celulares. Havia dificuldades nos estudos citológicos, não se tinha conhecimento sobre a constituição dos fatores (genes), nem se dispunha dos recursos tecnológicos atuais. Você considera que as hipóteses e explicações dadas pelos cientistas estudados eram procedentes para a época?

O professor irá direcionar a discussão de modo a trabalhar com aspectos da natureza da ciência; para que os estudantes possam perceber que, a partir de um mesmo fenômeno podem surgir diferentes interpretações, e que estas interpretações podem estar relacionadas a teorias diferentes, mostrando como a observação não é desprovida da teoria. Possam perceber também que os cientistas podem mudar de ideia e isso pode ocorrer quando encontram explicações mais adequadas para determinados fenômenos. Além disso, favorecerá o entendimento da ciência como empreendimento coletivo, que envolve acertos e erros e que muitas ideias que não são aceitas pela ciência atual eram plausíveis no passado.

2ª aula – *Linkage* e taxa de permutação

Objetivos:

- Compreender o mecanismo do *linkage* (Explicação atual);
- Entender como as proporções mendelianas do dihibridismo alteram-se quando há ligação entre os genes.
- Compreender a relação entre o comportamento dos cromossomos na meiose, taxa de permutação e *linkage*.
- Diferenciar as posições *cis* e *trans* dos genes no cromossomo.

Duração:

1 aula de aproximadamente 50 minutos

Material:

- Quadro negro e gizes coloridos
- Folha de atividade

Procedimento:

Trata-se de uma aula mais expositiva, na qual o professor oferecerá a explicação atual sobre ligação gênica. É importante que seja enfatizado para os alunos que desde os estudos de Morgan até a interpretação atual sobre o fenômeno transcorreram algumas décadas e que, inclusive, a terminologia utilizada atualmente sobre a configuração dos genes nos cromossomos (posição cis e trans) foi adotada a partir de 1953, após os estudos de Watson e Crick para elucidação da estrutura da molécula de DNA.

O professor pode começar fazendo a representação na lousa do comportamento dos cromossomos durante a meiose de acordo com os conhecimentos atuais. Posteriormente, o professor representa dois genes situados no mesmo cromossomo e seu comportamento durante a meiose. O desenvolvimento da aula continua com a representação do fenômeno de *crossing-over*. Nesse momento, o professor pode relembrar ou explicar novamente a permutação, mostrando um caso em que esse fenômeno acontece entre os genes em questão. Desta forma, os alunos poderão perceber que, ainda que dois genes estejam localizados no mesmo cromossomo, pode haver produção de quatro tipos de gametas, caso ocorra permutação entre esses genes.

O professor deve enfatizar que a permutação é um fenômeno aleatório e que, quanto maior a distância entre os dois genes, maior a chance de ela ocorrer (30 minutos).

Atividade 4:

Após a explicação do professor, os alunos deverão responder a algumas questões, para que seja feita uma avaliação sobre entendimento dos alunos em

relação ao conteúdo exposto. Sugere-se que esta atividade seja realizada em folha à parte, para ser entregue ao professor, na mesma aula (20 minutos).

Leia o texto a seguir para responder às questões:

THOMAS MORGAN E A LIGAÇÃO GÊNICA

Estudando *Drosophila*, a mosca das frutas, na década de 1910, Thomas Hunt Morgan não encontrou as proporções genotípicas mendelianas esperadas no cruzamento que relacionava a cor dos olhos – púrpura/vermelho – e o tamanho da asa – longa/vestigial. A característica da cor dos olhos púrpura é dominante sobre a cor vermelha, assim como o tamanho da asa longa sobre a vestigial.

Ao cruzar uma mosca diíbrida (PpVv) com uma dupla recessiva (ppvv), Morgan obteve o seguinte resultado: 1339 moscas de olhos púrpura e asas longas; 1195 de olhos vermelhos e asas vestigiais; 151 moscas de olhos púrpura e asas vestigiais; 154 de olhos vermelhos e asas longas.

Morgan interpretou esse resultado (1:1:1:1), muito diferente do esperado, como se devendo à localização próxima dos fatores (mais tarde chamados genes) para a cor dos olhos e para o tamanho da asa no mesmo cromossomo. Morgan sugeriu ainda que no pareamento dos homólogos, durante a meiose, ocorria ocasionalmente uma troca entre as cromátides, o que explicava o surgimento de recombinantes (púrpura/vestigial e vermelho/longa). Porém, somente muitos anos mais tarde Curt Stern apresentou a evidência citológica (microscópica) em *Drosophila* de que isso ocorria.

2. De acordo com as explicações atuais discutidas nesta aula, nos espermatozoides de um indivíduo AB/ab (os genes **A** e **B** estão em um dos cromossomos homólogos e os genes **a** e **b** no outro) encontram-se necessariamente apenas as combinações AB e ab? E nas células da epiderme desse indivíduo? Justifique sua resposta

3. Considerando a localização anterior dos genes A e B no cromossomo. Supondo que não haja permutação entre eles, quais são os gametas produzidos pelo indivíduo portador desses cromossomos?

4. Se os genes A e B estão ligados com 30% de taxa de permutação, qual o resultado do retrocruzamento?

3ª aula – Calculando a taxa de permutação

Objetivos:

- Calcular a taxa de permutação com base nos resultados de cruzamentos;
- Determinar a posição (*cis* ou *trans*) dos genes nos cromossomos;

Duração:

1 aula de aproximadamente 50 minutos

Material:

- Calculadora
- Cartões ilustrativos com situação-problema

Procedimento:

Os alunos deverão se organizar em grupos. Visando favorecer a participação e envolvimento de todos os alunos, sugere-se que os grupos sejam de no máximo 5 alunos. Cada grupo irá receber um cartão ilustrativo, que apresenta os resultados de cruzamentos testes. Com base na análise dos resultados dos cruzamentos, os alunos deverão determinar se é um caso de segregação independente ou de genes localizados no mesmo cromossomo. Em se tratando de casos de *linkage*, os alunos devem determinar também a taxa de permutação e a posição dos genes no cromossomo.

Procurando trabalhar também com a oralidade, sugere-se que cada grupo apresente para a sala a resolução de seu exercício, explicitando sua linha de raciocínio. Trata-se de uma situação oportuna para avaliação do professor sobre o entendimento dos estudantes em relação ao assunto abordado, além de favorecer intervenção imediata do educador, caso necessário.

Atividade 5:

Estes cartões apresentam situações-problema nas quais o aluno terá que relacionar os conceitos aprendidos até aqui. A dinâmica desta atividade permite trabalhar com exercícios para além a abordagem dita como “tradicional”. Ao invés de simplesmente responder ao exercício escrito proposto no livro, por exemplo, os alunos irão trabalhar de maneira colaborativa (em grupo), com um recurso um pouco mais atraente devido às ilustrações com cores chamativas, além de ter a

oportunidade de argumentar oralmente o raciocínio desenvolvido para resolver a questão.

São diferentes cartões, com situações distintas, que devem ser distribuídos para os grupos. Cada grupo receberá um cartão diferente.

Fig.12: Exemplos dos cartões ilustrativos com situações-problemas

4ª aula – Mapas genéticos

Objetivos:

- Compreender a relação entre a taxa de permutação e a distância entre os genes.
- Aplicar adequadamente a unidade de medida (morganídeos/unidades de recombinação) nos mapas gênicos.
- Determinar a distância relativa entre os genes na montagem de um mapa genético.

Duração:

1 aula de aproximadamente 50 minutos

Material:

- Quadro negro e giz
- Data show
- Animação representando o fenômeno de *crossing-over*. (<http://www.youtube.com/watch?v=qCrulK8PPAg>)
- Folha de atividade

Procedimento:

O professor deverá, inicialmente, oferecer a explicação sobre como determinar a distância entre os genes, e sua aplicação na elaboração dos mapas gênicos. (20 minutos). Durante a explicação, o professor poderá utilizar como recurso, animação disponível no *site youtube* (<http://www.youtube.com/watch?v=qCrulK8PPAg>), tornando mais visual para o aluno o fenômeno estudado.

Após a explicação do professor, os alunos deverão responder as questões da folha de atividade (20 minutos).

Os dez minutos finais da aula devem ser destinados à correção das atividades, esclarecendo as possíveis dúvidas apresentadas pelos alunos.

Atividade 6:

Esta folha de atividade propõe trabalhar o conhecimento sobre mapas gênicos, por meio de analogia, pretendo desta forma, facilitar a aprendizagem do conteúdo, uma vez que pode servir como um modelo mental, para a compreensão de um novo domínio. Estabelece relações entre o conhecido e o pouco conhecido.

1- A ilustração a seguir mostra a distância entre cidades, ao longo de uma estrada. Você seria capaz de descobrir quais são as cidades A, B, C e D no mapa?

CIDADES	DISTÂNCIA
São Paulo – Ribeirão Preto	316 km
Ribeirão Preto – Limeira	171 km
Limeira - Americana	27 km
Ribeirão Preto - Americana	198 km
Jundiaí – Campinas	40 km
Campinas – Limeira	55 km
Jundiaí – Limeira	95 km
Jundiaí – São Paulo	60 km
Campinas – Americana	38 km
Jundiaí – Americana	78 km
São Paulo - Limeira	148 km

2- Um pesquisador em seu laboratório de genética está tentando determinar a localização de quatro de genes (A, B, C e D). Em seus estudos, o pesquisador reuniu as seguintes informações: Não há permutação entre os genes A e B; a frequência de recombinação entre os genes A e C é de 33%; a frequência de recombinação entre os genes A e D é de 28%; a frequência de recombinação entre os genes C e D é de 5 %. Qual é a provável posição desses genes no cromossomo?

5ª e 6ª aula – Criando modelos para representação de *linkage*

Objetivos:

- Promover a compreensão e solidificação do conceito de *linkage*
- Representar um cromossomo e seus genes por meio de modelagem
- Determinar a distância relativa entre os genes no cromossomo, de acordo com a taxa de permutação.

Duração:

2 aulas de aproximadamente 50 minutos cada.

Material:

- Palitos de churrasco
- canudos coloridos
- fita adesiva
- etiquetas
- canetas hidrocor coloridas
- tesoura
- Cartão-questão
- Cartolina

Procedimento:

Esta aula propõe a utilização de uma atividade de modelagem colaborativa, visando, além da motivação e envolvimento dos alunos, melhor entendimento sobre os aspectos que envolvem o conceito de *linkage*, *crossing-over* e mapeamento gênico.

Solicitar que os alunos se organizem em grupos de aproximadamente 4 indivíduos.

Cada grupo receberá os seguintes materiais:

- 1 cartão-questão
- canudos coloridos
- 2 palitos de churrasco
- tesoura, cola, e fitas adesivas
- etiquetas com identificação dos genes

O cartão com uma situação problema deverá ser respondido, tendo como recurso a elaboração dos modelos cromossômicos para o mapeamento genético dos genes em *linkage*.

O professor deverá explicar que o palito representa o cromossomo, e os pedacinhos de canudos coloridos servirão para representar os genes a serem mapeados no cromossomo. Os alunos deverão realizar a montagem em cartolina, para posterior apresentação.

Atividade 7:

SITUAÇÃO PROBLEMA:

(Fuvest-SP) Um organismo homozigoto para os genes A, B, C, D, (AABBCCDD) todos localizados em um mesmo cromossomo, é cruzado com outro que é homozigoto recessivo para os mesmos alelos (aabbccdd). O retrocruzamento de F1 (com duplo recessivo) mostra os seguintes resultados: não ocorreu permuta entre os genes A e C; ocorreu 20% de permuta entre os genes A e B, e 30% entre A e D; ocorreram 10% de permuta entre os genes B e D.

a) Baseando-se nos resultados acima, represente, por meio de modelos, a sequência mais provável desses quatro genes no cromossomo, a partir do gene A.

b) Qual seria a consequência, em termos genéticos e evolutivos, das permutações descritas?

Fig. 13: Ilustrações do modelo cromossômico para *linkage*, criado com canudos.

Avaliação

É importante que a avaliação seja contínua e considere para nota não apenas uma prova escrita, mas todo o contexto em que o conteúdo foi desenvolvido. A sequência didática apresenta sete atividades a serem aplicadas aos alunos, às quais podem ser atribuídas notas. Houve uma preocupação em proporcionar diferentes oportunidades de envolvimento dos alunos: participação no debate coletivo, atividade escrita individual, atividades em grupo, exposição oral e construção do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMABIS, José Mariano; MARTHO, Gilberto Rodrigues. *Biologia das populações*. São Paulo: Moderna, 2004.

AIKENHEAD, Glen S. The measurement of High School students' knowledge about science and scientists. *Science Education*, New York, v. 57, n. 4, p. 539-549, 1973.

ALLCHIN, Douglas. Pseudohistory and pseudoscience. *Science & Education*, v. 13, n. 3, p. 179-195, 2004.

———. Problem-and case-based learning in science: an introduction to distinctions, values, and outcomes. *CBE-Life Sciences Education*, v. 12, n. 3, p. 364-372, 2013.

ALLEN, Garland E. The introduction of *Drosophila* into the study of heredity and evolution, 1900-1910. *Isis*, v. 66, n. 3, p. 322-323, 1975.

———. *Thomas Hunt Morgan: the man and his science*. Princeton: Princeton University, 1978.

———. Morgan, Thomas Hunt. In: GILLISPIE, Charles Colston (ed). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, v. 9. p. 515-526, 1981.

BANET, Enrique & AYUSO, Gabriel Enrique Fernandez. Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y bachillerato: contenidos de enseñanza y conocimientos de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, v.13, n. 2, p. 137-153, 1995.

———. 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.

BATESON, William. Presidential address to the Zoological Section, *British Association*, 1904, p. 233-259. In: BATESON, Beatrice. *William Bateson, FRS. Naturalist*. Cambridge: Cambridge University Press, 1928.

———. Facts limiting the theory of heredity. *Science*, v. 26, n. 1, 1907.

———. Mendel's principles of heredity. London Cambridge University Press, 1909.

———. Heredity. *British Medical Journal*, v. 2, n. 1, p. 350 – 63, 1913.

BATESON, William & PUNNETT, Reginald Crundall. Experimental studies in the physiology of heredity. *Reports to the Evolution Committee of the Royal Society* v. 4, n. 1, p. 1-40, 1908.

———. On gametic series involving reduplication of certain terms. *Journal of Genetics*, v. 1, n. 1, p. 293–302, 1911.

BATESON, William & SAUNDERS, Edith R. Experimental in the physiology of heredity. *Reports to the Evolution Committee of the Royal Society* v. 2, n. 1, p. 1-160, 1902.

BATESON, William; SAUNDERS, Edith & PUNNETT, Reginald Crundall. Experimental studies in the physiology of heredity. *Reports to the Evolution Committee of the Royal Society*, v. 2, n. 1, p.1-131, 1905.

BATESON, William; SAUNDERS, Edith & PUNNETT, Reginald C. Experimental studies in the physiology of heredity. *Reports to the Evolution Committee of the Royal Society* 3: 2-11, 1906

BITTENCOURT, Fabricio Barbosa. *O tratamento dado à História da Biologia nos livros didáticos brasileiros recomendados pelo PNLEM-2007: análise das contribuições de Gregor Mendel*. 2013. 80f. Tese de Doutorado – Programa Interunidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BIZZO, Nélío, M. V. Metodologia do ensino de ciências: a aproximação do estudante de magistério das aulas de ciências no 1º grau. In: PICONEZ, S. B. *A prática de ensino e o estágio supervisionado*. 1991.

———. *Novas bases da biologia*. São Paulo: Ática, 2010.

BOULTER, Carolyn.J; BUCKLEY, Barbara.C. Constructing a typology of models for science Education. In: John K. Gilbert, Carolyn J. Boulter *Developing models in Science Education*, New York: Springer, 2000. p. 41-57.

BRAGA, Cleonice Miguez da Silva; FERREIRA, Louise Brandes; GASTAL, Maria Luiza. O uso de modelos em uma sequência didática para o ensino dos processos de divisão celular. *Revista da SBEnBIO*, v. 3, p. 3789-3802, 2010.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnologia (Semtec). *PCN – Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino médio*. Brasília: MEC/Semtec, 1999.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação, Mídia e Tecnologia. *PCN+ Ensino Médio - Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília: MEC/ Semtec, 2002.

Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 11/07/2012.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Guia de livros didáticos - PNLD 2012: Biologia. – Brasília: MEC, 2011.

BRITO, Ana Paula Oliveira Pereira Moraes. Thomas Hunt Morgan e seu novo ponto de vista sobre a determinação de sexo (1909-1913). *Filosofia e História da Biologia*, v. 2, n. 1, p. 61-73, 2007.

CARMO, Viviane Arruda do. *Episódios da história da biologia e o ensino da ciência: as contribuições de Alfred Russel Wallace*. 2011. 199f. Tese de Doutorado – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARNEIRO, Maria Helena da Silva & GASTAL, Maria Luiza. História e Filosofia das Ciências no Ensino de Biologia. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 1, p. 33-39, 2005.

CHALMERS, Alan F. *O que é ciência afinal?* Tradução de Raul Fiker. São Paulo: Editora Brasiliense, 2010.

CID, Marília & NETO, António, J. Dificuldades de aprendizagem e conhecimento pedagógico do conteúdo: o caso da genética. *Enseñanza de Las Ciencias*, VII Congresso, número extra, p. 7002-554, 2005.

EL-HANI, Charbel N.; TAVARES, Eraldo José M.; ROCHA, Pedro Luís B. Concepções epistemológicas de estudantes de Biologia e sua transformação por uma proposta explícita de ensino sobre história e filosofia das ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 9, n.3, p. 265-313, 2004.

FREIRE JR., Olival. A relevância da filosofia e da história das ciências para a formação dos professores de ciências. In: SILVA FILHO, W. J. (ed.) *Epistemologia e ensino de ciências*. Salvador: Arcádia, 2002. p. 13-30.

GEWANDSZNAJDER, Fernando; LINHARES, Sérgio. *Biologia hoje*. São Paulo: Ática, 2010.

GIL-PÉREZ, Daniel. et al. Para uma imagem não-deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

JAFFE, Bernard. The history of chemistry and its place in the teaching of high-school chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 15, n. 1, p. 383-389, 1938.

JUSTI, R. La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 24, n. 2, p.173-184, 2006.

KANDEL, Eric R. Thomas Hunt Morgan at Columbia University. Genes, chromosomes, and the origins of modern biology. *Living Legacies*. 2004. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/cu/alumni/magazine/legacies/morgan>> Acesso em: 19/05/2012.

KINNEAR, Judith F. Using an historical perspective to enrich the teaching of linkage in Genetics. *Science Education*, v. 75, n. 1, p. 69- 85, 1991.

LEDERMAN, Norman G. Nature of science: past, present and future. In: ABELL, S. K.; LEDERMAN, N. G. (eds.). *Handbook of research on science education*. Mahwah, N.J.: Laurence Erlbaum Associates, 2007. cap. 28, p. 831-879.

LEDERMAN, Norman G.; WADE, Philip D.; BELL, Randy L. Assessing the nature of science: what is the nature of our assessments? *Science and Education*, Dordrecht, v. 7, n. 6, p. 595-615, 1998.

LEWIS, J., LEACH, J. e WOOD-ROBINSON, C. What's a cell? – young people's understanding of the genetic relationship between cells, within an individual. *Journal of Biological Education*, v. 34, n. 3, p. 129-132, 2000.

MARTINS, Lilian Al-Chueyr Pereira. *A teoria cromossômica da herança: proposta, fundamentação, crítica e aceitação*. 1997. 803 f. Tese de doutoramento – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

———. A história da ciência e o ensino de biologia. *Ciência & Ensino*, v. 5, n. 1, p. 18- 21, 1998a.

———. Thomas Hunt Morgan e a teoria cromossômica: de crítico a defensor. *Episteme*, v. 3, n. 6, p. 100- 126, 1998b.

———. Um achado inusitado no laboratório de Morgan: a *Drosophila* de olhos brancos. In: ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria & BELTRAN, Maria Helena Roxo (orgs.) *O laboratório, a oficina e o ateliê: a arte de fazer o artificial*. São Paulo: EDUC, 2002a. p. 227-256.

———. Bateson e o programa de pesquisa mendeliano. *Episteme* v. 14, n. 1, p. 27-55, 2002b.

———. The dissemination of chromosome theory of Mendelian heredity by Morgan and his collaborators around 1915: a case study of distortion of science by scientists. *Filosofia e História da Biologia*, v. 5, n.2, p. 327-367, 2010.

MARTINS, Lílían Al-Chueyr; BRITO, Ana Paula O. P. Moraes. A História da Ciência e o ensino de genética e evolução no nível médio: um estudo de caso. In: SILVA, Cibelle Celestino (org.). *Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. p. 245-264.

MATTHEWS, Michael R. History, philosophy and science teaching: the present rapprochement. *Science & Education*, v. 1, n. 1, p. 11-47, 1992.

———. *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York: Routledge, 1994.

MAYR, Ernst. *O desenvolvimento do pensamento biológico: diversidade, evolução e herança*. Brasília: Ed. UnB, 1998.

MÉHEUT, Martine. Teaching-learning sequences tools for learning and/or research. *Research and the quality of science education*. Springer Netherlands, 2005, p. 195-207.

MENDEL, Gregor. Versuche über Pflanzenhybriden. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn* (1865), Abhandlungen, IV, pp. 3-47, 1866.

MOORE, John. A. Science as a way of knowing – genetics. *American Zoologist*, v. 26, n. 3, p. 583-747, 1986.

MORGAN, Thomas Hunt. Chromosomes and heredity. *American Naturalist* v. 44, n. 1, p. 449-96, 1910a.

———. Sex limited inheritance in *Drosophila*. *Science*, v. 32, n. 1, p. 120- 122, 1910b.

———. An attempt to analyse the constitution of the chromosomes on the basis of sex-limited Inheritance in *Drosophila*. *Journal of Experimental Zoology* v. 11, n. 1, p. 365-413, 1911.

———. Sex limited and sex linked inheritance. *The American Naturalist*, v. 48, n. 1, p. 577-583, 1914.

———. Localization of the hereditary material in the germ cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 1, n. 7, p. 420-429, 1915.

MORGAN, Thomas Hunt. & GOODALE, Hubert Dana. Sex inheritance in poultry. *Annals of New York Academy of Science*, v. 22, n. 1, p. 113-133, 1912.

MORGAN, Thomas Hunt & LYNCH, Clara J. The linkage of two factors in *Drosophila* that are not sex linked. *Biological Bulletin*, v. 23, n. 1, p. 174-182, 1912.

MORGAN, Thomas Hunt. & BRIDGES, C. B. *Sex linked inheritance in Drosophila*. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1916.

MORGAN, T.H., STURTEVAN, A. H., MULLER, H.J. & BRIDGES, C. B. *The mechanism of Mendelian heredity*, New York: Henry Bolt, 1915; New York: Johnson Reprints, 1972.

PRESTES, Maria Elice Brzezinski Prestes. & CALDEIRA, Ana Maria Andrade. A Importância da história da ciência na educação científica. *Filosofia e História da Biologia*, v. 4, n.1, p. 1-16, 2009.

SAMPAIO, Fabio Ferrentini. Modelagem Dinâmica Computacional e o Processo de Ensino Aprendizagem: algumas questões para reflexão. Disponível em <<http://www.c5.cl/tise98/html/trabajos/modelag/index.htm>> Acesso em 02/07/2014.

SANTOS, Cecília H. V. dos. *História e filosofia da ciência nos livros didáticos de biologia do ensino médio: análise do conteúdo sobre a origem da vida*. 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2006.

SANTOS, Fernando Santiago et al. *Biologia Coleção Ser Protagonista*. São Paulo: SM Edições, 2010.

SILVA JÚNIOR, César da; SASSON, Sezar; CALDINI JÚNIOR, Nelson. *Biologia*. 9.ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

STURTEVANT, Alfred Henry. *A history of Genetics*, 1965. Reprint. Woodbury, New York: Cold, 2001.

WOOD-ROBINSON, Colin; LEWIS, Jenny; LEACH, John. Young people's understanding of the nature of genetic information in the cells of an organism. *Journal of Biological Education*, v. 35, n. 1, p. 29-36, 2000.

APÊNDICE A

O EPISÓDIO HISTÓRICO SOBRE A PROPOSTA DO CONCEITO DE *LINKAGE*

A partir de 1900, diversos pesquisadores como, por exemplo, como William Bateson (1861-1926) e Lucien Cuénot (1866-1951), trabalhando com cruzamentos experimentais em outros organismos diferentes de ervilha, encontraram desvios do princípio de segregação mendeliano. Ao mesmo tempo, estavam sendo desenvolvidos estudos citológicos por vários pesquisadores como, por exemplo, Edmund B. Wilson (1856-1939) Walter Sutton (1877-1916) e Theodor H. Boveri (1862-1915). Alguns desses pesquisadores acreditavam que era possível estabelecer uma relação entre o comportamento dos cromossomos durante a divisão celular e os princípios de Mendel.

Carl Correns, que trabalhava com cruzamentos experimentais desde o final do século XIX, em 1900 relatou alguns casos em que os resultados contrariavam o princípio da segregação independente. Eram casos em que algumas características eram herdadas associadas. Esses casos foram observados no cruzamento de duas linhagens da planta *Matthiola*: uma das variedades possuía flores coloridas com folhas peludas; já a outra apresentava flores brancas e folhas lisas. Na primeira geração (que atualmente chamamos de F1), Correns obteve apenas flores coloridas com folhas peludas. Ao cruzar os descendentes da primeira geração entre si, na geração seguinte (atualmente conhecida como F2), ele obteve somente duas das combinações parentais na proporção de 3:1, ao contrário do esperado. Ele interpretou os resultados como sendo devidos a dois pares de fatores que pareciam estar associados.

Em 1902, trabalhando com cruzamentos experimentais na planta *Matthiola*, o naturalista inglês Willian Bateson e Edith Saunders (1865-1945), de modo análogo a Correns, observaram que algumas características eram herdadas juntas, contrariando o princípio da segregação independente de Mendel. Ao estudar as ervilhas de cheiro (*Lathyrus odoratus*), encontraram uma associação entre a cor das flores e formato do pólen. Observaram que, quando as flores eram púrpura, possuíam pólen alongado, já as flores vermelhas possuíam pólen arredondado. Contudo, propuseram uma explicação diferente para o fenômeno. Bateson e seu grupo de colaboradores supuseram que os fatores poderiam exercer atrações entre si, elaborando a hipótese da presença-ausência. De acordo com esta hipótese, em

alguns casos haveria atração ou associação entre fatores, o que fazia com que determinadas características sempre fossem herdadas juntas; em outros casos, haveria repulsão entre fatores, cujas características nunca apareceriam juntas.

Anos mais tarde, por volta de 1911, Bateson e um de seus colaboradores, Reginald Crundall Punnett (1875–1967) propuseram outra explicação para o fenômeno: a hipótese da reduplicação, entendendo que poderia haver um mecanismo na gametogênese que levasse à produção de mais gametas de determinados tipos do que de outros.

Outro pesquisador que acabou estudando os mesmos fenômenos observados por Correns e Bateson foi Thomas Hunt Morgan (1866-1945). O cientista norte-americano começou a trabalhar com *Drosophila* em 1908, com o intuito de investigar a existência de herança de caracteres adquiridos neste inseto. Provavelmente, procurando induzir a formação de mutantes, expôs a cultura ao rádio. Na época (1910), Morgan havia admitido em seu laboratório três estudantes: Sturtevant, Bridges e Muller. Ao que tudo indica, Bridges encontrou em uma das garrafas de cultura, uma mosca macho cujos olhos eram brancos, sendo que a forma selvagem apresentava olhos vermelhos. Acreditando estar diante do aparecimento de uma nova espécie, Morgan resolveu fazer alguns testes, realizando cruzamentos. Para isso, inicialmente isolou o macho de olhos brancos e cruzou-o com as fêmeas de olhos vermelhos para ver o que o ocorria. Em F1 obteve 1237 descendentes de olhos vermelhos. Como havia uniformidade na primeira geração, a cor de olho branca podia, em termos mendelianos, ser interpretada como recessiva. Quando cruzou os híbridos de F1 ele obteve os seguintes resultados, como mostra a figura a seguir:

Os resultados não concordavam com a segregação independente prevista por Mendel, pois se assim fosse, seria esperado uma proporção de 25% de cada um

dos fenótipos, e não foi o que ocorreu. O fato de não aparecer nenhuma fêmea de olhos brancos levou Morgan a concluir que se tratava de uma herança limitada ao sexo. Mais tarde percebeu que esse caráter não era incompatível com o sexo feminino, e poderia aparecer em fêmeas, através de um cruzamento adequado.

O resultado de cruzamentos posteriores levou Morgan a supor que na verdade, os fatores relacionados à cor dos olhos na *Drosophila* estivessem localizados juntamente com os fatores responsáveis pela feminilidade. Assim, o fator R, representaria olhos vermelhos, enquanto o seu alelo, fator W, olhos brancos. Nas *Drosophilas*, os machos possuem um cromossomo X e um cromossomo Y (XY), enquanto as fêmeas possuem o cromossomo X em dose dupla (XX). Desta forma, os machos, como só possuem um cromossomo X, só poderão possuir um R ou um W, em dose simples. Já as fêmeas, por serem XX, para apresentar olhos brancos, deverão possuir os fatores W também em dose dupla (X^wX^w) o que justifica o aparecimento de fêmeas de olhos brancos em menor proporção nos cruzamentos.

Morgan e seu grupo se dedicaram à genética de *Drosophila*, concentrando na hereditariedade. Em suas investigações se depararam com o aparecimento de novos mutantes, além da coloração branca dos olhos; e em muitos dos casos em que não ocorria segregação independente, os genes pareciam estar ligados. Morgan chamou o fenômeno de *linkage* (ligação). Eles registravam cuidadosamente esses mutantes e estudavam seus padrões hereditários através de cruzamentos e retrocruzamentos. Entre as mutações encontradas, podem ser mencionadas o corpo amarelo (em oposição ao corpo preto) e as asas vestigiais (em oposição às asas normais de tamanho maior).

Os estudos com *Drosophila* avançaram e em após alguns anos, o grupo de Morgan havia acumulado grande quantidade de dados. O grupo passou a organizar os dados da seguinte forma: conforme observavam casos de ligação entre dois fatores (atualmente denominados genes), estes eram agrupados em uma mesma lista; já para os casos em que se observava que dois fatores quaisquer segregavam independentemente, estes eram agrupados em listas separadas. Desta forma, com a quantidade de dados acumulados, Morgan e seus colaboradores conseguiram abrir quatro listas de grupos de genes ligados.

A hipótese levantada por Morgan de que os fatores (que foram mais tarde chamados genes) são partes integrantes dos cromossomos e que quando localizados proximamente no mesmo cromossomo tendem a ser herdados juntos tinha evidências citológicas indiretas (os estudos de Janssens com salamandra) e evidências genéticas (resultados dos cruzamentos experimentais). Ao prosseguir seus estudos, Morgan e seu grupo puderam detectar os grupos de ligação encontrados nos cromossomos de *Drosophila* e somente cerca de duas décadas mais tarde (1932) Curt Stern (1902-1981) apresentou as evidências citológicas em *Drosophila* de que os cromossomos trocavam partes.

Através deste episódio histórico, é possível perceber que um mesmo fenômeno (características que eram herdadas juntas, contrariando o princípio mendeliano da segregação) pode ser interpretado de modos diferentes, como aconteceu com Bateson e Morgan. Além disso, ilustra como o empreendimento científico é resultado de um trabalho coletivo que envolve acertos e erros.

APÊNDICE B

RESOLUÇÃO DAS ATIVIDADES PROPOSTAS NA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

1ª aula : Atividade 1 – p. 46

azul: VV / Vv

vermelho: VV

ereto: PP / Pp

pendente: pp

geração P

VVPP x vvpp

geração F1

100 %

VvPv

Geração F2

9 V_ P_ (azul/ereto)

3 vvP_ (vermelho / ereto)

3 V_ pp (azul / pendente)

1 vvpp (vermelho/pendente)

2ª aula: Atividade 4 – p. 50

1. Não necessariamente, pois, dependendo da distância entre esses genes no cromossomo, pode ocorrer permutação (*crossing-over*). Já nas células da epiderme desse indivíduo sim, os por não serem células germinativas, não sofrem meiose, apenas mitose. O fenômeno de *crossing-over* ocorre na prófase I da meiose.

2. Apenas gametas AB e ab

3.

AaBb x aabb

30% **com** permutação 70% **sem** permutação

Assim teremos como resultado do retrocruzamento:

15% Aabb

15% aaBb

35% AaBb

35% aabb

3ª aula: Atividade 5 – p. 52

Lathyrus odoratus

FLOR PÚRPURA / PÓLEN ALONGADO   FLOR VERMELHA / PÓLEN REDONDO

$PpLl$ $ppll$

x

481   51   52   480

Com base nos resultados deste cruzamento responda:

- Trata-se de um caso de ligação gênica ou de segregação independente?
- Em caso de ligação gênica, calcule a porcentagem de permutação entre os genes e determine a posição (*cis* ou *trans*) dos mesmos no cromossomo.

a) Trata-se de um caso de ligação gênica.

b) ~45 % P_ L_ → parentais

~ 5 % P_ ll → recombinantes

~ 5 % pp L_ → recombinantes

~ 45 % ppll → parentais

A taxa de permutação é de 10%. Posição Cis.

Solanum lycopersicum

FRUTO ARREDONDADO/FOLHA NORMAL

AaMm

x

FRUTO OVAL / FOLHA MANCHADA

aamm

74

125

129

72

Com base nos resultados deste cruzamento responda:

- Trata-se de um caso de ligação gênica ou de segregação independente?
- Em caso de ligação gênica, calcule a porcentagem de permutação entre os genes e determine a posição (*cis* ou *trans*) dos mesmos no cromossomo.

a) Ligação gênica

b) ~18,5% - aamm → recombinante

~ 31% - A_mm → parental

~32,5% - aaM_ → parental

~18% - A_M_ → recombinante

A taxa de permutação é de 36,5%. Posição Trans.

a) Trata-se de um caso de segregação independente.

b) Não há ligação gênica.

4ª aula: Atividade 6 – p. 54

1-

A = Jundiaí

B= Campinas

C = Americana

D = Limeira

2-

6ª aula: Atividade 7 – p. 56

a)

b) A consequência das permutações é o aumento da variabilidade genética.

APÊNDICE C

ENCARTES DOS CARTÕES (AULA 3 – ATIVIDADE 5)

Lathyrus odoratus

FLOR PÚRPURA / PÓLEN ALONGADO PoU	x	FLOR VERMELHA / PÓLEN REDONDO poll	→	481	51	52	480

Com base nos resultados deste cruzamento responda:

- Trata-se de um caso de ligação gênica ou de segregação independente?
- Em caso de ligação gênica, calcule a porcentagem de permutação entre os genes e determine a posição (*cis* ou *trans*) dos mesmos no cromossomo.

Solanum lycopersicum

Com base nos resultados deste cruzamento responda:

- Trata-se de um caso de ligação gênica ou de segregação independente?
- Em caso de ligação gênica, calcule a porcentagem de permutação entre os genes e determine a posição (*cis* ou *trans*) dos mesmos no cromossomo.

Psim sativum

Com base nos resultados deste cruzamento responda:

- Trata-se de um caso de ligação gênica ou de segregação independente?
- Em caso de ligação gênica, calcule a porcentagem de permutação entre os genes e determine a posição (*cis* ou *trans*) dos mesmos no cromossomo.