

O conceito de gene em livros didáticos de Biologia Celular e Molecular do ensino superior

The gene concept in higher education Cell and Molecular Biology textbooks

Neima Alice M. Evangelista

Universidade Federal da Bahia
neimalice@hotmail.com

Vanessa C. Santos

Universidade Federal da Bahia
nessaoaks@yahoo.com.br

Charbel N. El-Hani

Universidade Federal da Bahia
charbel.elhani@gmail.com

Resumo

Em vista das dúvidas e controvérsias atuais na comunidade científica sobre o conceito de gene, nosso objetivo foi investigar como os genes são abordados em livros didáticos de Biologia Celular e Molecular utilizados em universidades ao redor do mundo. Cinco livros foram selecionados e submetidos à análise categórica como meio de entender os significados atribuídos ao conceito de gene e à função gênica. Os principais achados foram: (1) predomínio do conceito molecular clássico – gene como sequência de nucleotídeos codificante de um produto funcional, polipeptídeo ou RNA – nos livros didáticos analisados; (2) ausência de uma abordagem histórica e filosoficamente informada sobre genes; (3) favorecimento de ideias deterministas genéticas; (4) ausência na maioria dos livros de uma discussão das consequências dos desafios ao conceito molecular clássico para nosso entendimento atual sobre genes; (5) silenciamento sobre visões não deterministas sobre os papéis dos genes nos sistemas biológicos.

Palavras chave: Conceito de gene, livros didáticos, ensino de Biologia Celular e Molecular, ensino de Genética.

Abstract

Given current doubts and controversies about the gene concept in the scientific community, our goal was to investigate how genes are addressed in Cell and Molecular Biology textbooks used in universities around the globe. Five textbooks were selected and subjected to categorial

analysis, as a manner of understanding the meanings ascribed by them to the gene and to gene function. The main findings of this study show: (1) predominance of the classical molecular concept – gene as a sequence of nucleotides coding for a functional product, polypeptide or RNA – in the analyzed textbooks; (2) absence of a historically and philosophically approach to gene; (3) promotion of genetic determinist ideas; (4) absence in most textbooks of a discussion of the consequences of challenges to the classical molecular concept to our current understanding about genes; (5) silencing of non determinist views about the roles of genes in biological systems.

Key words: Gene concept, textbooks, Cell and Molecular Biology teaching, Genetics teaching.

Introdução

A história do conceito do gene teve início em 1909 quando Wilhelm Johannsen usou o termo para designar a unidade que constituiria o genótipo na esteira de sua distinção entre genótipo e fenótipo. Na genética mendeliana, o termo “gene” foi largamente usado para designar a unidade de herança responsável pela determinação e transmissão dos caracteres fenotípicos, num conceito que podemos denominar “mendeliano”. O gene era entendido, então, como um construto hipotético e abstrato, sem correlato material claro, predominando uma visão instrumentalista do gene como determinante de diferenças fenotípicas.

Com os estudos do grupo de Thomas Hunt Morgan, em particular, com a proposição dos mapas de ligação, foi atribuída aos genes uma localização no cromossomo, mas ainda como uma entidade abstrata, num conceito que Gericke e Hagberg (2007) denominam “clássico”.

Com a emergência de estudos combinando bioquímica e genética, uma visão realista do gene começou a ganhar mais espaço na comunidade científica. Estudos como os de Beadle e Tatum com o fungo *Neurospora* (BEADLE E TATUM, 1941) deram origem ao conceito “bioquímico-clássico” (GERICKE; HAGBERG, 2007), de acordo com o qual o gene seria um produtor de enzimas. O conceito de gene passou a priorizar aspectos funcionais, relativos ao papel das enzimas na determinação do fenótipo (SANTOS et al., 2012). Com esse conceito, surgiu a famosa máxima “um gene-uma enzima”. Posteriormente, com a compreensão de que nem todos os produtos gênicos são enzimas, a máxima foi alterada para “um gene-uma proteína” e depois para “um gene-um polipeptídeo”, quando ficou claro que havia proteínas formadas por vários polipeptídios. Posteriormente, sofreu nova modificação, tornando-se “um gene-um polipeptídeo ou RNA”, com o achado de que os produtos gênicos poderiam ser RNAs funcionais que não codificam proteínas, a exemplo dos RNAs ribossômicos (RNAr) e de transferência (RNAt).

A proposição do modelo de dupla hélice (WATSON E CRICK, 1953) fez com que uma visão realista do gene fosse largamente aceita e, com a hipótese da sequência e o dogma central da biologia molecular, emergiu o conceito denominado na literatura filosófica “molecular clássico” (NEUMANN-HELD, 1999). De acordo com esse conceito, o gene é uma sequência contínua de bases, com início e fim bem definidos e localização constante (características estruturais), com a função específica de produzir um único polipeptídeo ou RNA (característica funcional).

O “dogma central da biologia molecular”¹ e a “hipótese da sequência”², propostos por Crick (1958), deram ênfase à informação carregada pelos genes e, assim, à função de codificação de sequências de aminoácidos. Uma linguagem informacional foi adicionada à biologia (KAY, 2000), tornando-se comuns termos como “informação genética” e “código genético” (EL-HANI, 2016). Isso levou à chamada “concepção informacional”, que não está amparada, ainda, numa teoria da informação biológica largamente aceita (GRIFFITHS, 2001). Nessa visão, os genes são entendidos como uma mensagem única e específica no DNA, que conteria instruções para o funcionamento celular e o desenvolvimento dos organismos.

Esse modo de pensar sobre os genes tende a nos levar a uma ideia determinista, de acordo com a qual um gene determinaria a função celular, por meio da codificação de proteínas, ou até mesmo as características fenotípicas, dado seu papel no desenvolvimento.

Moss (2001, 2003) propôs a ideia de gene-P e gene-D como duas formas de lidar com os conceitos de gene difundidos na genética. A ideia do “gene-P” entende o gene como um determinante de diferenças fenotípicas que não possui uma sequência correspondente específica no DNA, ou seja, trata-se de conceito instrumental, que assume visão distal sobre o gene, definido a partir do fenótipo, assumindo-se uma visão determinista para fins de simplificação, o que se mostra aceitável devido à sua natureza instrumental (EVANGELISTA, 2016; EL-HANI, 2016). Na natureza dual do gene na genética clássica (FALK, 1986, 2000), o gene-P seria correspondente ao gene que permite prever diferenças fenotípicas, enquanto o conceito mendeliano captura a ideia do gene como unidade de transmissão ou herança. Trata-se de conceito útil em algumas práticas epistêmicas, como a análise de padrões de herança em genealogias.

O gene-D, por sua vez, comporta uma visão realista, na qual o gene é entendido como uma sequência de nucleotídeos no DNA, que seria um recurso em paridade causal com outros recursos igualmente importantes no desenvolvimento e na função celular. Ou seja, é uma entidade molecular, entendido na perspectiva realista, porém que não determina fenótipos ou diferenças fenotípicas, que resultam da interação de genes e outros recursos celulares e desenvolvimentais (MOSS, 2001, 2003).

Como Moss afirma, não existe nada que seja, simultaneamente, gene-P e gene-D. A mistura desses dois conceitos favorece uma visão determinista genética, uma vez que reforça a ideia de que há genes que determinam características fenotípicas por meio da combinação de uma suposição determinista somente aceitável numa visão instrumentalista útil em certas práticas epistêmicas, a um entendimento realista do gene.

Os mesmos avanços das técnicas moleculares que permitiram uma compreensão cada vez mais aprofundada da estrutura e função dos genes também trouxeram à tona processos e anomalias, como o *splicing* alternativo, a edição do RNA, que nos levam a questionar o conceito molecular clássico de gene e até mesmo o que seria, de fato, o gene. Assim, há, nos dias de hoje, muitas dúvidas e controvérsias sobre o conceito molecular clássico.

É importante, assim, que os estudantes aprendam que o conceito molecular clássico, que forneceu as bases para sua aprendizagem sobre genes ao longo de sua educação científica, é hoje um conceito controverso e contestado, exatamente por causa de fenômenos que fazem parte dos próprios currículos que estão experienciando. Além disso, parece importante

¹ De acordo com esse dogma, há “um fluxo de ‘informação’ do DNA até as proteínas (mas não em sentido contrário) que nos permitiria entender como o DNA pode controlar o metabolismo celular” (EL-HANI, 2016, p. 39).

² “É a ideia de que uma sequência de nucleotídeos no DNA codifica uma sequência de aminoácidos em um polipeptídeo”. (EL-HANI, 2016, p. 39).

discutir a proliferação de novas ideias a respeito dos genes no contexto contemporâneo, como reações aos problemas enfrentados por esse conceito, todas elas ainda objeto de discussão (SANTOS et al., 2012; MEYER et al., 2013).

Também é importante discutir e colocar sob uma lente crítica as ideias deterministas genéticas, amplamente encontradas no ensino de ciências, por exemplo, nos conteúdos de livros didáticos da educação básica (ver DOUGHERTY, 2009; REDFIELD, 2012; REYDON et al., 2012; GERICKE et al., 2014; AVELO, 2015).

Materiais e Métodos

A escolha de livros didáticos de Biologia Celular e Molecular para compor o *corpus* da análise decorreu de estarem presentes na formação de diversos profissionais das áreas de Ciências Biológicas e Saúde, incluindo futuros professores, cientistas e profissionais como enfermeiros, médicos, nutricionistas, fisioterapeutas, entre outros. Isso torna um estudo a seu respeito mais abrangente do que uma análise de livros de Genética, outra escolha possível para a pesquisa que realizamos, mas menos comuns nesses currículos.

A seleção dos livros didáticos se deu através da busca por ementas das disciplinas de Biologia Celular e Molecular na ferramenta Google®, com as seguintes palavras-chave: Em inglês, Syllabus + “Cell and Molecular Biology”; em português, Ementas + “Biologia Celular e Molecular”; em espanhol, “Contenidos de las asignaturas” + “Biología Celular y Molecular”. Foram levantadas 100 ementas em português, 100 em inglês e 50 em espanhol³. Os livros foram analisados na sua língua original, ainda que fossem indicadas versões traduzidas nas ementas. Além disso, foram analisadas edições posteriores a 2006, de modo a situar o estudo após os debates sobre o conceito de gene terem se ampliado na comunidade científica, conforme indicado por editoriais em periódicos de alto impacto (PEARSON, 2006; PENNISI, 2007). A Figura 1 mostra os livros mais frequentes nas ementas levantadas.

³ Estudos anteriores do nosso grupo de estudo verificaram que as ementas em língua espanhola aparecem em menor quantidade e, por isso, foram levantadas apenas 50 ementas.

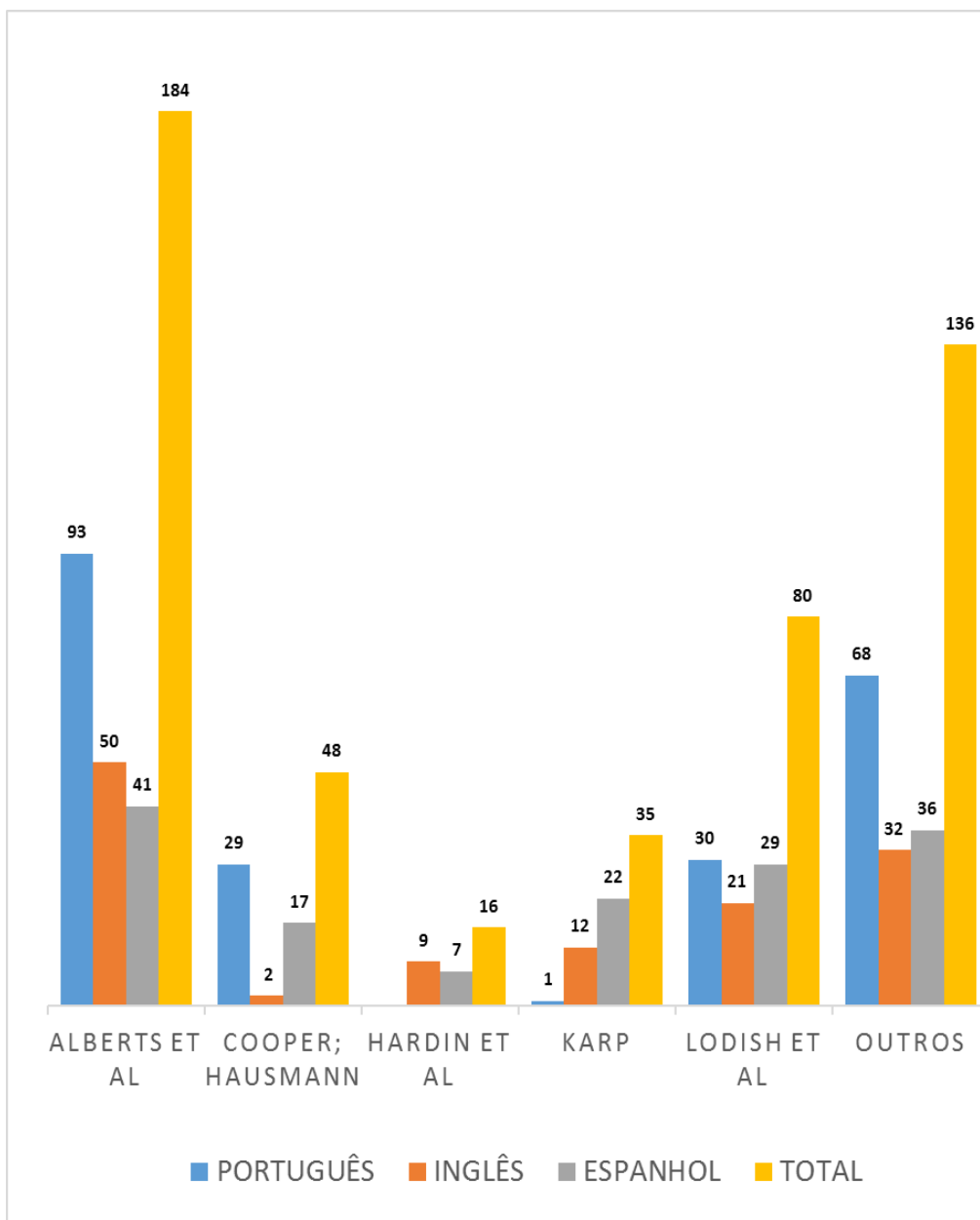


Figura 1: Livros didáticos mais frequentes nas ementas de disciplinas de Biologia Celular e Molecular em ementas em língua portuguesa, inglesa e espanhola levantadas através de Google®.

Cada livro foi submetido a uma leitura exploratória e, posteriormente, a uma análise categórica do conteúdo (BARDIN, 2000), desmembrando-se o texto em unidades de registro e realizando-se um reagrupamento analógico das unidades que compartilhavam características identificadas por meio de critérios semânticos, de modo a formar categorias. As unidades de registro foram também analisadas à luz de unidades de contexto, que correspondiam a diferentes áreas da Biologia Celular e Molecular abordadas nos livros.

A análise categórica foi em parte indutiva, baseada em interpretação do significado atribuído ao gene e à função gênica em cada unidade de registro, em parte baseada em categorias prévias relativas ao conceito de gene (Quadro 1) e à função atribuída ao gene (Quadro 2).

Conceito de gene	Breve definição
Conceito mendeliano	Gene como unidade de herança, responsável pela transmissão e determinação de caracteres.
Conceito clássico	Gene como partícula real e indivisível, localizada no cromossomo, responsável pela determinação de características fenotípicas.
Conceito bioquímico-clássico	Gene como unidade responsável pela produção de uma enzima.
Conceito molecular clássico	Gene como unidade estrutural e funcional no DNA, correspondendo a uma sequência contínua de bases, que codifica um único produto funcional (polipeptídio ou RNA).
Concepção informacional	Gene como unidade informacional no DNA, portador de uma mensagem única e específica no DNA.
Conceito de gene-P	Gene como determinante de fenótipos ou diferenças fenotípicas, sem corresponder a uma sequência específica no DNA.
Conceito de gene-D	Gene como sequência de DNA utilizada como recurso, em paridade causal com outros recursos, para o desenvolvimento e funcionamento celular, sem determinar fenótipos ou diferenças fenotípicas específicas.
Outros	Nesta opção classificamos aquelas unidades de registro que não se encaixam em nenhum dos conceitos anteriores e não têm frequência suficiente para formarem novas categorias de conceito de gene.

Quadro 1: Conceitos de gene considerados na análise categórica das unidades de registro obtidas em livros de Biologia Celular e Molecular.

Funções atribuídas aos genes
Transmitir caracteres hereditários.
Codificar estrutura primária de polipeptídios ou RNAs.
Programar ou instruir a função celular ou o desenvolvimento.
Causar ou determinar fenótipo ou diferença fenotípica.
Propiciar recurso para o desenvolvimento.
Controlar metabolismo celular.
Servir como unidade de seleção.
Outras.

Quadro 2: Funções atribuídas ao gene consideradas na análise categórica das unidades de registro obtidas em livros de Biologia Celular e Molecular.

A análise categórica foi feita por duas pesquisadoras de forma independente. A taxa de concordância na análise dos livros variou entre 83,15% a 89,41%, dando suporte à confiabilidade da categorização.

Resultados

Os conceitos de gene e as ideias sobre função gênica são abordados de modo semelhante nos cinco livros didáticos analisados. Como podemos perceber na Figura 3, o conceito de gene mais utilizado foi o molecular clássico, que variou entre 70% a 87% das unidades de registro/livro, seguido pelo conceito de gene-P (entre 4% a 17%) e pela concepção informacional (entre 2% e 5%).

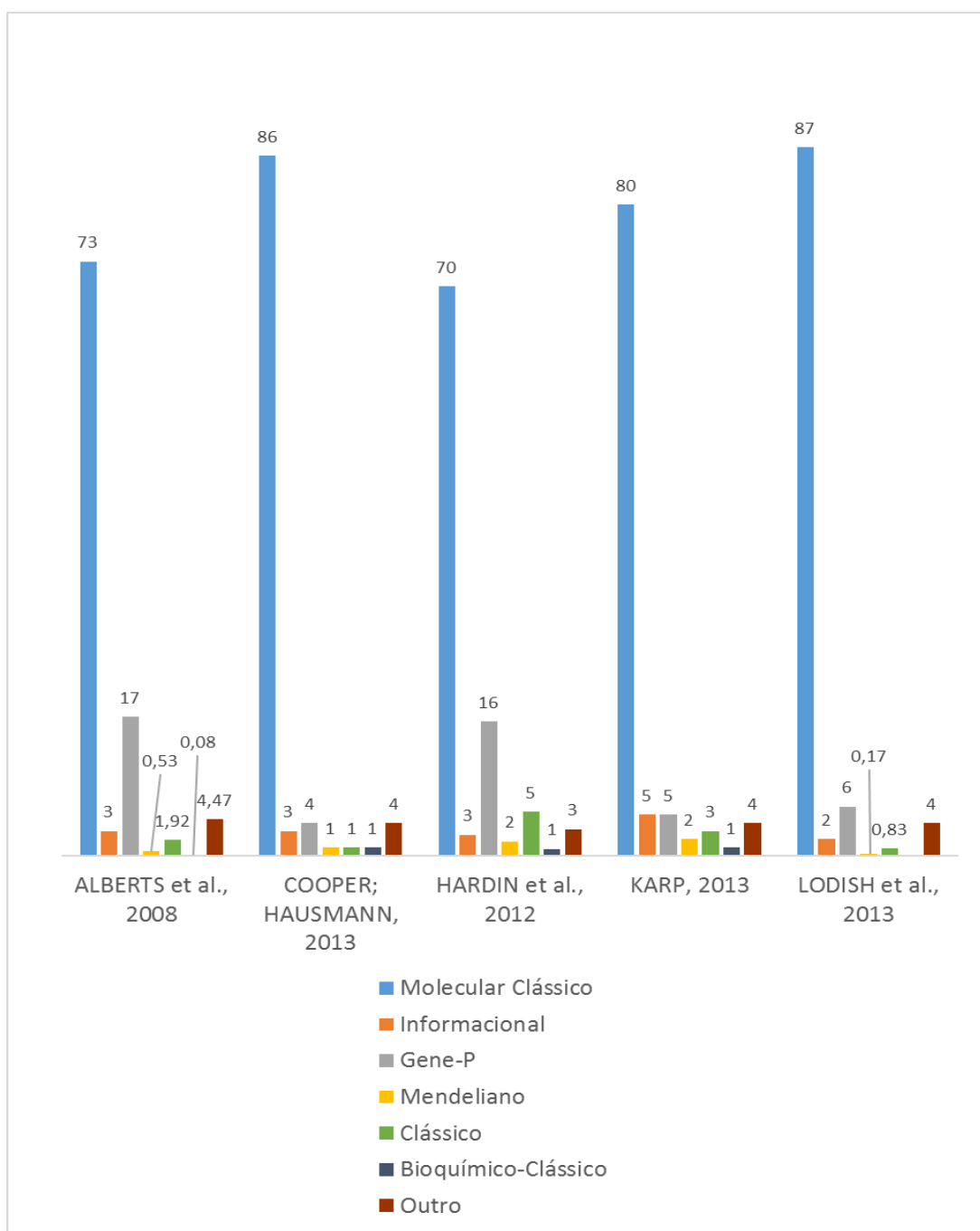


Figura 2: Frequência de ocorrência das categorias de conceito de gene nas unidades de registro encontradas nos livros didáticos de Biologia Celular e Molecular analisados.

O conceito molecular clássico foi encontrado em todas as unidades de contexto, ou seja, é um conceito central que perpassa todo o livro didático, estruturando o discurso sobre genes. Podemos ver um exemplo de ocorrência do conceito molecular clássico na seguinte unidade de registro:

Em termos moleculares, **um gene pode ser definido como um segmento de DNA que é expresso para produzir um produto funcional, que pode ser ou um RNA (e.g., RNAs de transferências e ribossômicos) ou um**

polipeptídio. (COOPER; HAUSMANN, 2013, p.155, **grifo nosso**)⁴

O conceito de gene-P, por sua vez, foi encontrado com bastante frequência no contexto “genética médica” (variando de 55% de suas ocorrências em ALBERTS et al., 2008, a 81% em KARP, 2013), embora tenha sido também usado em outros contextos abordados pelos livros. Esse achado não foi surpreendente, uma vez que esse conceito tem papel importante na pesquisa sobre genética médica.

Quanto às funções atribuídas ao gene, houve predomínio da função de “codificar estruturas primárias de polipeptídios ou RNAs”, característica do conceito molecular clássico, mostrando uma consistência entre os achados relativo ao conceito e à função do gene (Figura 4). Como exemplo, podemos citar:

Genes são melhor definidos como **unidades funcionais do DNA que codificam a sequência de aminoácidos de uma ou mais cadeias polipeptídicas** ou, alternativamente, um ou vários tipos de RNA que realizam funções outras que não a especificação da sequência de aminoácidos de cadeias polipeptídicas (HARDIN et al., 2012, p. 650, **grifo nosso**)⁵.

Uma frequência considerável de outras funções também foi encontrada, como, por exemplo, a de “causar ou determinar fenótipo ou diferença fenotípica” (variando de 16% em HARDIN et al., 2012, e LODISH et al., 2013, a 23% em KARP, 2013, e COOPER; HAUSMANN, 2013). Esse achado foi compatível com o fato de esta função estar associada ao conceito de gene-P, que foi o segundo mais frequente nos livros. Esta função, como esperado, foi mais frequente no contexto “genética médica”.

⁴ No original: In molecular terms, a gene can be defined as a segment of DNA that is expressed to yield a functional product, which may be either an RNA (e.g., ribosomal and transfer RNAs) or a polypeptide.

⁵ No original: Genes are best defined as functional units of DNA that code for the amino acid sequence of one or more polypeptide chains or, alternatively, for one of several types of RNA that perform functions other than specifying the amino acid sequence of polypeptide chains.

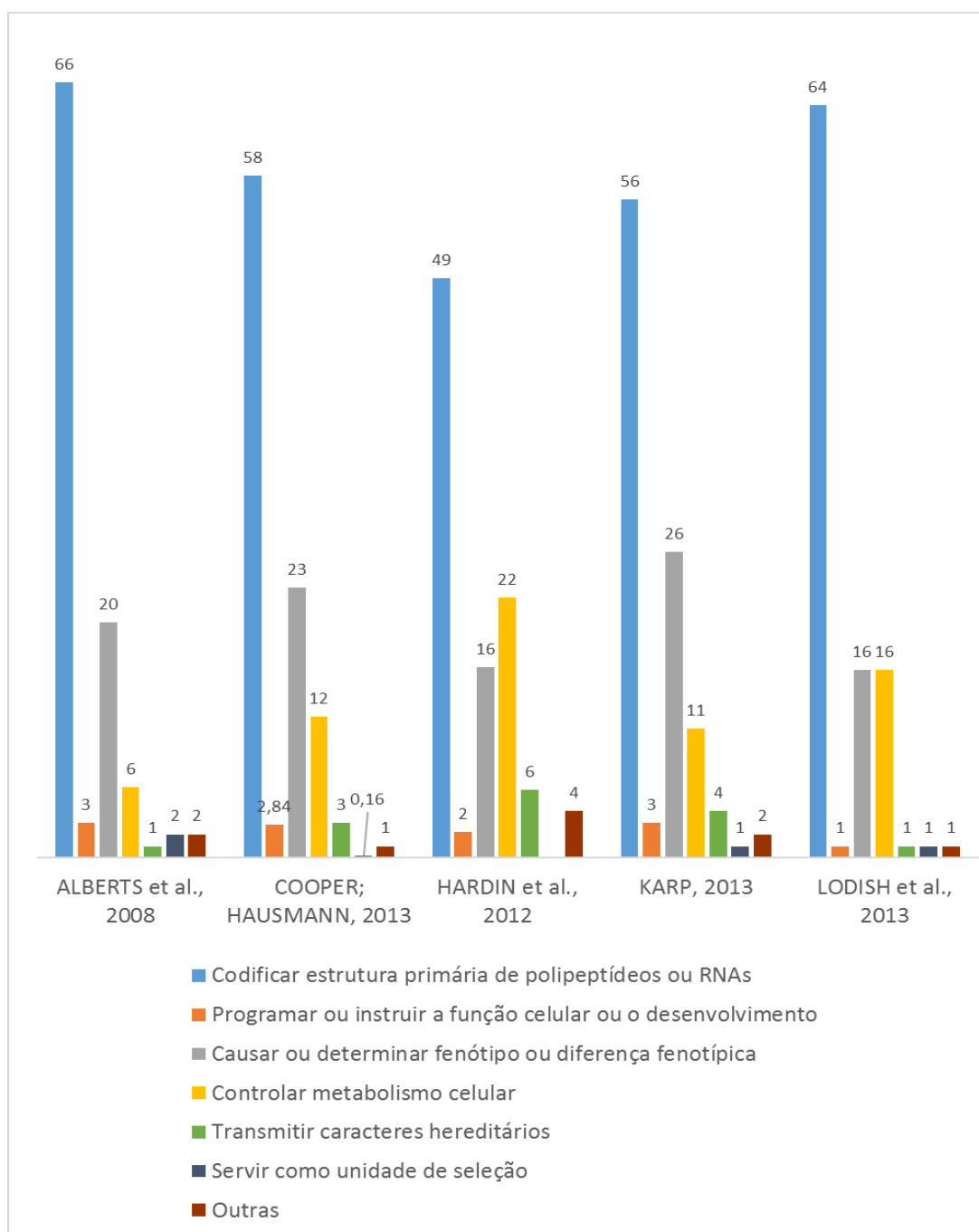


Figura 3: Frequência de ocorrência das categorias de função nas unidades de registro encontradas nos livros didáticos de Biologia Celular e Molecular analisados.

Discussão

O presente estudo analisou cinco livros didáticos de Biologia Celular e Molecular do ensino superior, amplamente utilizados em todo o mundo e indicados tanto para disciplinas introdutórias (HARDIN et al., 2012; KARP, 2013; COOPER; HAUSMANN, 2013) quanto para disciplinas avançadas (ALBERTS et al., 2008; LODISH et al., 2013).

Os principais achados desse estudo dizem respeito: à frequência de ocorrência dos diferentes conceitos de gene e ideias sobre função gênica nos livros; à ausência de uma abordagem

histórica e filosoficamente informada sobre genes; ao favorecimento de ideias deterministas genéticas pelos livros; à falta de uma discussão nos livros acerca dos desafios ao conceito molecular clássico; e ao silenciamento de visões não deterministas sobre os papéis dos genes nos sistemas biológicos.

Sobre a frequência da ocorrência dos diferentes conceitos de gene e ideias sobre função gênica, podemos dizer que, por si só, a predominância do conceito molecular clássico não constitui um problema, já que é um conceito útil para a significação dos genes em determinados casos. Trata-se de um conceito que pode ser usado para introduzir os estudantes à aprendizagem sobre genes, e ainda é um conceito válido para a maioria dos genomas de procariotos e para alguns genomas de eucariotos. O que nos preocupa aqui é a falta de uma progressão da aprendizagem sobre genes, na direção de conceitos e modelos mais complexos, e a ausência de discussão mais crítica a respeito do conceito molecular clássico, que o situe historicamente e que não leve a efeitos como a promoção de uma visão genocêntrica e determinista genética, ou até mesmo de uma compreensão simplista e equivocada dos sistemas genéticos.

O uso do conceito de gene-P também não representa em si um problema, visto que esse conceito também traz uma aproximação útil em certas interpretações e explicações comuns no campo da genética médica, como na busca de associações entre genes e fenótipos, especialmente no caso de patologias. Porém, o que representa um problema é a ausência de uma discussão clara sobre o fato de que se trata de um conceito instrumental, cujo uso se dá em escala populacional, e que, malgrado sua importância em alguns campos da pesquisa genética atual (na genética médica, na genética clínica, no melhoramento genético, entre outros), não recai de modo realista sobre a interpretação do gene molecular.

Por sua vez, a concepção informacional apresenta problemas que nos parecem mais difíceis. Ainda que possa ser utilizada para introduzir ideias básicas sobre os genes, ela está bastante ligada à visão determinista genética através da interpretação de que a informação biológica se situa exclusivamente em genes ou moléculas derivadas deles (RNAs, proteínas), além de estar associada a uma ideia sobre função gênica de natureza determinista, a de programar ou instruir a função celular ou o desenvolvimento. Estas dificuldades são agravadas pela inexistência de uma teoria da informação biológica que consiga dar conta de seus aspectos sintáticos, semânticos e pragmáticos (GRIFFITHS, 2001; EL-HANI et al., 2009).

Para complicar mais ainda o fato de não termos uma discussão crítica sobre os conceitos de gene, os modelos de função gênica e a delimitação dos seus significados, encontramos uma sobreposição dos conceitos molecular clássico ao gene-P e à concepção informacional, o que resulta numa mistura de conceitos de gene que são usados de modos distintos na pesquisa e explicação genética. Em particular, a associação de um conceito de natureza instrumentalista (gene-P) a um conceito realista (molecular clássico) cria dificuldades para a compreensão de professores e estudantes, favorecendo um pensamento determinista genético que é um elemento frequente no discurso social sobre genes, com consequências importantes para a compreensão pública da ciência e para uma série de questões sociais, econômicas e políticas. A visão determinista pode levar as pessoas, por exemplo, a desvalorizarem o papel de fatores ambientais e experienciais em condições como doenças mentais, câncer, obesidade, diabetes, o que pode afetar negativamente sua prevenção, com impacto sobre a saúde pública (PARROTT et al., 2004), assim como promover práticas discriminatórias, por exemplo, em seleções para empregos ou contratações de seguros.

Outro achado do nosso estudo diz respeito aos aspectos silenciados no discurso dos livros sobre genes: a natureza do conhecimento abordado – com teorias e modelos sendo apresentadas como se fossem descrições da realidade; as consequências do desafio do

conceito molecular clássico; e visões não deterministas sobre os genes nos sistemas biológicos.

A ausência de uma abordagem histórica e filosoficamente informada sobre genes é o principal problema desses livros didáticos. Os conceitos de gene utilizados atualmente cumprem papéis epistêmicos específicos nos domínios em que são utilizados e foram construídos com esse intuito em contextos socio-históricos e científicos particulares. Para que professores e estudantes possam compreender o papel epistêmico dos conceitos de gene, seria necessária uma transposição desses conceitos para os livros didáticos de modo contextualizado, tanto histórica quanto filosoficamente, e no âmbito de um entendimento das práticas epistêmicas das quais participam, ainda que introdutória. Afinal, não podemos esperar que alunos e professores façam distinções entre conceitos de gene sem que seja propiciada a eles uma compreensão clara do significado e do uso de cada um deles.

Todos os livros didáticos discutem fenômenos que desafiam o conceito molecular clássico (como genes interrompidos, genes superpostos, *splicing* alternativo, modos alternativos de transcrição e tradução, entre vários outros), mas as implicações de tais fenômenos para o entendimento conceitual sobre genes recebem atenção muito menor do que os fenômenos em si. Não há nenhuma discussão acerca das implicações conceituais desses fenômenos nos livros de Hardin et al. (2012) e Cooper e Hausmann (2013). Em Karp (2013), quando os autores tratam de genes interrompidos e *splicing* alternativo, são consideradas tímidas implicações para o conceito de gene. Lodish et al. (2013) buscam acomodar esses fenômenos em uma diferenciação pouco clara entre uma definição “genética” e uma definição “genômica” de gene. Entre os livros didáticos analisados, Alberts et al. (2008) é o que apresenta uma discussão um pouco maior sobre as implicações de alguns fenômenos, apresentando uma definição modificada de gene em um trecho do livro que se aproxima de um desenvolvimento ocorrido posteriormente na literatura científica, a definição do gene como uma união de sequências genômicas que codifica um conjunto coerente de produtos funcionais potencialmente superpostos por Gerstein et al. (2007). No entanto, o conceito molecular clássico continua sendo o mais amplamente usado nessa obra e a modificação feita no conceito se presta mais a uma simples acomodação dos fenômenos que o desafiam do que à abertura de uma nova perspectiva para a compreensão dos sistemas genômicos, como discute El-Hani (2016).

No que diz às visões não determinísticas, vale notar a ausência de interpretações dos genes como recursos para o desenvolvimento em paridade causal com outros recursos, como proposto em teorias recentes como a teoria dos sistemas desenvolvimentais (OYAMA, 1985) e capturado por Moss (2003) no conceito de gene-D, e a limitada discussão acerca da natureza instrumental e populacional (e não realista e individual) da ideia de genes para traços fenotípicos em estudos de associação genótipo-fenótipo (EL-HANI, no prelo).

Em termos gerais, podemos concluir que não é o uso em si de diferentes conceitos de gene e ideias sobre função gênica que trazem problemas ao ensino de Biologia Celular e Molecular pautado nos livros analisados. Os problemas que identificamos decorrem sobretudo da ausência de uma abordagem histórica e filosoficamente informada sobre genes. Em particular, esses livros não criam condições para um ensino e uma aprendizagem sobre e com modelos, o que contribuiria sobremaneira para uma distinção apropriada de conceitos de gene e modelos de função gênica, de modo que seus pertencimentos históricos, papéis epistêmicos e limites como modos de explicação se tornassem mais claros para professores e alunos, promovendo uma melhor compreensão dos diversos discursos acerca do conceito de gene e a formação de cidadãos mais bem preparados para tomar decisões em questões sociocientíficas que envolvem o conceito de gene.

Agradecimentos e apoios

Agradecemos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAPESB pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa para realização desse trabalho.

Livros Didáticos Analisados

ALBERTS, B. et al. *Molecular biology of the cell*. New York, NY: Garland science, Taylor & Francis Group, 2008.

COOPER, G. M., HAUSMANN, R. E. *The Cell: A Molecular Approach*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc, 2013.

HARDIN, J. et al. *Becker's World of the Cell*. San Francisco, CA: Pearson Education, 2012.

KARP, G. *Cell and Molecular Biology: Concepts and Experiments*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc, 2013.

LODISH et al. *Molecular Cell Biology*. New York, NY: W. H. Freeman and Company, 2013.

Referências

AIVELO, T.; UITTO, A. Genetic determinism in the Finnish upper secondary school biology textbooks. *NorDiNa*, v.11, n. 2, p 139-52, 2015.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo** (Content analysis). Lisboa, Portugal: Edições 70, 2000.

BEADLE, G. W.; TATUM, E. L. Genetic control of biochemical reactions in *Neurospora*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States** 27, p. 499-506, 1941.

BURIAN, R. M.; KAMPOURAKIS, K. Against “Genes For”: Could an Inclusive Concept of Genetic Material Effectively Replace Gene Concepts? In: K. Kampourakis (ed.), **The Philosophy of Biology: A Companion for Educators Dordrecht**: Springer, 2013, p. 597-628.

DOUGHERTY, M. J. Closing the Gap: Inverting the Genetics Curriculum to Ensure an Informed Public. **The American Journal of Human Genetics**, v. 85, n. 1, p. 6-12, 2009.

EL-HANI, C. N. Between the cross and the sword: The crisis of the gene concept. **Genetics and Molecular Biology**, v. 30, n. 2, p.297-307, 2007.

EL-HANI, C.N. **Repensando o gene na era pós-genômica**. Salvador, BA: Universidade Federal da Bahia, Tese para promoção a Professor Titular, 2016.

_____, QUEIROZ, J. & EMMECHE, C. **Genes, Information, and Semiosis**. Tartu: Tartu University Press, 2009.

_____, & MEYER, D. The concept of gene in the twenty-first century: What are the open avenues? **Contrastes: Revista Internacional de Filosofia**, Suppl. XVIII, p. 55-68, 2013.

EVANGELISTA, N. A. M. **O Conceito de Gene em Livros Didáticos de Biologia Celular e Molecular do Ensino Superior**. Salvador, BA: Programa de Pós - Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, UFBA/UEFS, Dissertação de mestrado, 2016.

FALK, R. What is a gene? **Studies in the History and Philosophy of Science** 17: 133-173,

1986.

FALK, R. The gene – a concept in tension. In P. Beurton, R. Falk & H. - J., Rheinberger (Eds.), **The Concept of the Gene in Development and Evolution: Historical and Epistemological Perspectives**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 317-348, 2000.

GERICKE, N. M.; HAGBERG, M. Definition of Historical Models of Gene Function and their Relation to Students' Understandings of Genetics. **Science & Education**, v.16, p. 849-881, 2007.

_____, et al. Conceptual Variation or incoherence? Textbook discourse on genes in six countries. **Science & Education**. v. 23, p. 381-416, 2014.

GERSTEIN, M. B. et al. What is a gene, post-ENCODE? History and updated definition. **Genome Research**, v. 17, p. 669-681, 2007.

GRIFFITHS, P. E. Genetic information: a metaphor in search of a theory. **Philosophy of Science** 68: 394-403, 2001.

KAY, L. E. **Who wrote the book of life? A history of the genetic code**. Stanford, CA: Stanford, 2000.

KELLER, E. F. **The century of the gene**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000.

_____. **The mirage of a space between nature and nurture**. Durham: Duke University Press, 2010.

_____, & Harel, D. Beyond the Gene. **PLoS One**, v. 2, 2007.

MEYER, L. M. N.; BOMFIM, G. C.; EL-HANI, C. N. How to understand the gene in the 21st century. **Science & Education**, v. 22, n. 2, p. 345-374, 2013.

MORGAN, T. H. **The Theory of the Gene**. New Haven: Yale University Press, 1928.

MOSS, L. Deconstructing the gene and reconstructing molecular developmental systems. In S. Oyama, P. Griffiths,; R. Gray (Eds.), **Cycles of contingency: Developmental systems and evolution**. Cambridge, MA: MIT Press, p. 85-97, 2001.

_____. **What Genes Can't Do**. Cambridge-MA: MIT Press, 2003.

NEUMANN-HELD, E. The Gene is dead – Long live the gene: Conceptualizing genes the constructionist way. In P. Koslowski (Ed.). **Sociobiology and bioeconomics: The theory of evolution in biological and economic thinking**. Berlin: Springer, p. 105-137, 1999.

OYAMA, S. **The Ontogeny of Information: Developmental Systems and Evolution**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

PARROTT, R. et al. Deriving lay models of uncertainty about genes' role in illness causation to guide communication about human genetics. **Journal of Communication**., v. 54, n. 1, p. 105-122, 2004.

PEARSON, H. What is a gene? **Nature** 441: 399-401, 2006.

PENNISI, E. DNA study forces rethink of what it means to be a gene. **Science** 316: 1556-1557, 2007.

REDFIELD, R. J. “Why Do We Have to Learn This Stuff?”—A New Genetics for 21st Century Students. **PLoS Biol**, v. 10, n. 7, 2012.

REYDON, T.; KAMPOURAKIS, K.; PATRINOS, G. P. Genetics, genomics and society: the responsibilities of scientists for science communication and education. **Personalized**

Medicine, v. 9, n. 6, p. 633-643, 2012.

SANTOS, V.C.; et al. Hybrid deterministic views about genes in biology textbooks: a key problem in genetics teaching. **Science & Education**, v. 21, p. 543-578, 2012.

WATSON, J. D.; CRICK, F. A structure for deoxyribose nucleic acid. **Nature**, v. 171, p. 737-738, 1953a.

_____. Genetical Implications of the Structure of Deoxyribonucleic Acid. **Nature**, v. 171, p. 964-967, 1953b.