

Um modelo sistêmico das relações entre os conceitos de organismo, gene, genótipo, fenótipo e ambiente

Fernanda Aparecida Meglhioratti *

Lourdes Aparecida Della Justina #

Mariana Aparecida Bologna Soares de Andrade [♯]

Ana Maria de Andrade Caldeira ^δ

Resumo: O objetivo deste trabalho é propor um modelo representativo das relações entre conceitos centrais da epistemologia da biologia, entre eles, os conceitos de organismo, gene, genótipo, fenótipo e ambiente. Para tanto, apresenta-se uma retomada histórica desses conceitos, ao buscar uma superação de visões reducionistas que tradicionalmente se estabeleceram na Biologia e explicar como a noção do organismo se perdeu na história da Biologia, principalmente, com a ênfase na Biologia Molecular no decorrer do século XX. Ao final, é proposto um modelo sistêmico que articula os conceitos de gene, genótipo, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental, ambiente e o próprio organismo como agente do desenvolvimento e participante das dinâmicas que influenciam os regimes seletivos, contribuindo para retomar a centralidade do conceito de organismo na discussão biológica.

Palavras-chave: epistemologia da biologia; gene; genótipo; fenótipo; organismo

* Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua Universitária, 2069, Jardim Universitário, Cascavel, PR. CEP: 85819-110. E-mail: meglhioratti@gmail.com

Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua Universitária, 2069, Jardim Universitário, Cascavel, PR. CEP: 85819-110. E-mail: lourdesjustina@gmail.com

♯ Universidade Estadual de Londrina. Rodovia Celso Garcia Cid, 445, Londrina, PR. CEP: 86051-990. E-mail: mariana.bologna@gmail.com

δ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Avenida Luís Edmundo Carrijo Coube, s/n, Vargem Limpa, Bauru, SP. CEP: 17033-360. E-mail: anacaldeira@fc.unesp.br

Systemic model of the relations between the concepts of organism, gene, genotype, phenotype and environment

Abstract: The aim of this work is to propose a representative model of the relations between central concepts of the epistemology of biology, among them, the concepts of organism, gene, genotype, phenotype and environment. In order to do so, we present a historical resumption of these concepts, seeking to overcome the reductionist views traditionally established in Biology and explain how the notion of the organism was lost in the history of biology, especially with the emphasis on Molecular Biology in the course of XX century. Finally, a systemic model is proposed that articulates the concepts of gene, genotype, developmental noise, environmental inheritance, environment and the organism itself as development agent and participant in the dynamics that influence the selective regimes, contributing to retake the centrality of the concept of the organism in the biological discussion.

Key-words: epistemology of biology; gene; genotype; phenotype; organism

1 INTRODUÇÃO

Em uma visão bastante difundida a partir da segunda metade do século XX, marcada pela molecularização das explicações biológicas, o organismo foi considerado como produto passivo da interação entre o genótipo – entendido como conjunto de genes – e seu ambiente (Lewontin, 2000, p. 17; El-Hani, 2002, p. 4). Como destaca Richard Lewontin, a visão tradicional da ciência, amparada em uma abordagem reducionista, criou uma imagem particular dos seres vivos e suas atividades:

Os seres vivos são vistos como sendo organismos determinados por fatores internos, ou seja, os genes. [...] O mundo fora de nós coloca certos problemas, que não criamos, mas que apenas experimentamos como objetos. Os problemas são: encontrar um cônjuge, encontrar alimento, vencer as competições com os rivais, adquirir uma grande parte dos recursos do mundo, e, se tivermos os tipos certos de genes, seremos capazes de resolver os problemas e deixar mais descendentes. Portanto, com essa visão, é realmente nossos genes que estão se propagando através de nós mesmos. (Lewontin, 2000, p. 17)

Para Lewontin, compreende-se o organismo como o desdobramento de características que já estavam presentes ou registradas em seu interior, ficando os organismos e suas capacidades de alterar seus ambientes à margem do conhecimento biológico. De acordo com

Kepa Ruiz-Mirazo e colaboradores (2000, p. 210), as pesquisas biológicas têm enfatizado tanto níveis hierárquicos mais restritos (por exemplo, a biologia molecular e a teoria evolutiva genecêntrica) como níveis mais globais (por exemplo, algumas partes da biologia evolucionária e da ecologia).

O organismo, em geral, não é entendido como um sistema do qual emergem propriedades e ações que impactam o ambiente e sua própria composição. Essa ausência do organismo nas explicações biológicas tem como consequência a configuração de dois extremos: um DNA-centrismo e uma visão ambiental estrita, sendo que, em ambos, o organismo caracteriza-se como um ente passivo, sujeito às ações de determinação interna e pressão externa. O DNA-centrismo é caracterizado por explicações biológicas que priorizam as informações presentes na sequência do DNA como determinantes das características dos seres vivos. Essa visão é apoiada por uma visão tradicional do conceito de gene; em específico, o conceito molecular clássico de gene (Santos & El-Hani, 2009). Em contraponto a um DNA-centrismo, percebe-se também uma visão ambiental estrita, na qual o ambiente é entendido como selecionador das histórias individuais e coletivas dos organismos. Nesse sentido, concorda-se com Lewontin (2002, pp. 57-61) ao destacar que a própria noção de ambiente precisa ser revista, já que ocorre uma confusão entre a afirmação de que existe um mundo físico externo a um organismo (que continuaria a existir mesmo na ausência de vida) e a afirmação incorreta de que existe ambiente sem organismo. Para o autor, o ambiente de cada organismo é formado pelas condições externas que são relevantes para ele, portanto, não existe ambiente sem organismo, uma vez que são os organismos que determinam quais fatores do ambiente externo são relevantes, alterando o mundo a sua volta e construindo constantemente o próprio ambiente (*ibid.*).

Essa dicotomia entre gene/DNA e ambiente (entendido de modo tradicional) não expressa os diferentes modos que os organismos se desenvolvem e nem a multiplicidade de fatores envolvidos na ontogenia e filogenia (Oyama, Griffiths & Gray, 2001, p. 2). Como afirmam Webster e Goodwin (1999, p. 495), o organismo é o “próprio objeto da pesquisa biológica: um objeto real, existindo em seu pró-

prio modo e explicado em seus próprios termos”. Todavia, estudos têm mostrado que o conceito de organismo, devido principalmente à dicotomia gene/DNA-ambiente, tem perdido seu papel na discussão biológica (Almeida & El-Hani, 2010; El-Hani, 2002; Feltz, 1995; Goodwin, 1994; Gutmann & Neumann-Held, 2000; Lewontin, 2002; Ruiz-Mirazo et al., 2000; Webster & Goodwin, 1999), passando a ser entendido apenas como ente passivo.

Uma forma de trazer o debate a respeito do organismo para o cerne da discussão biológica é compreendê-lo mediante uma perspectiva sistêmica do desenvolvimento, com ênfase na complexidade e multiplicidade de fatores envolvidos no desenvolvimento orgânico e no organismo como uma totalidade que age e transforma o seu ambiente. Nesse contexto, Oyama, Griffiths e Gray (2001, pp. 2-6) destacam alguns pressupostos para uma perspectiva sistêmica das explicações biológicas: determinação por múltiplas causas, estando todo traço ou característica configurado pela interação de recursos do desenvolvimento, sendo a dicotomia gene/ambiente apenas um dos recursos; significância de qualquer causa como contingente em relação ao restante do sistema; herança ampliada, considerando que um organismo herda uma ampla variedade de recursos que interage na construção do seu ciclo de vida; desenvolvimento entendido como construção, pois nenhum traço/característica ou representações de traço/característica são transmitidos nas gerações, ao invés disso, são construídos/reconstruídos no desenvolvimento; controle distribuído, nenhum dos interagentes específicos controla o desenvolvimento; evolução como construção, na qual não se entende que organismos ou populações são moldados pelo ambiente, mas que o sistema constituído pela interação entre organismos e seus ambientes muda ao longo do tempo.

Ao considerar os pressupostos destacados, este trabalho tem por objetivo apresentar um modelo sistêmico que articula os conceitos de gene, genótipo, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental, ambiente e o organismo como agente do desenvolvimento e participante das dinâmicas que influenciam os regimes seletivos.

2 DA PROPOSIÇÃO DOS CONCEITOS DE GENE, GENÓTIPO E FENÓTIPO AO DESAPARECIMENTO DO ORGANISMO

Os conceitos de genótipo, gene e fenótipo foram propostos inicialmente por Wilhelm Ludwig Johannsen, em sua teoria genotípica em 1909, em uma tentativa de distinguir entre as características aparentes de um organismo e os elementos que são herdáveis na constituição do mesmo (Justina *et al.*, 2010, pp. 57-58). A partir de seus experimentos, Johannsen propôs novos termos e conceitos relacionados aos fatores que promovem a variação:

Por isso eu propus os termos “gene” e “genótipo” e mais alguns termos, como “fenótipo” e “biótipo”, a serem utilizados na ciência da genética. O “gene” é nada mais do que uma palavra muito aplicável, facilmente combinável com outras, e, portanto, pode ser útil como uma expressão para “fatores unitários”, “elementos” ou “alelomorfos” dos gametas, utilizadas por modernos pesquisadores mendelianos. O “genótipo” é a soma de todos os “genes”, em um gameta ou em um zigoto [...]. Todas as características de organismos, distinguíveis por inspeção direta da aparência ou por descrição dos métodos de medição, poderão ser caracterizadas como “fenótipo”. (Johannsen, 1911, pp. 132-133).

Johannsen não apresenta uma definição estrutural de gene, recomendando a utilização do termo como uma espécie de unidade de cálculo, que não corresponderia a uma estrutura morfológica. Consequentemente, o genótipo como conjunto de genes, também não estaria localizado em uma estrutura física particular. Por sua vez, a palavra fenótipo estaria relacionada às características aparentes de um organismo em todas as etapas de seu desenvolvimento sob a influência do ambiente. Segundo Nils Roll-Hansen (1978, pp. 277-278), a teoria genotípica de Johannsen inclui uma visão realista dos fatores hereditários, pois apesar de não estarem acessíveis à observação direta e nem concretizados em uma estrutura específica, o genótipo e os genes realmente existem como processos no organismo, agindo juntamente aos fatores ambientais e ao estado inicial do organismo na determinação do desenvolvimento.

Percebe-se na teoria genotípica de Johannsen a separação daquilo que é herdado (genótipo), correspondendo ao conjunto de processos

e reações que são transmissíveis de uma geração a outra, e os aspectos que são aparentes no organismo (fenótipo). Essa primeira distinção não leva ao abandono do organismo, uma vez que não delimita a herança a locais e partes específicas da célula ou do organismo, mas utiliza uma distinção instrumental entendendo a herança como aspectos e processos que permanecem e são herdados ao longo das gerações.

No início do século XX, ao mesmo tempo em que as ideias de Johannsen estavam sendo propostas, pesquisadores que defendiam uma herança particulada, buscavam associar os fatores mendelianos da herança ao movimento observado nos cromossomos. A teoria cromossômica da herança é corroborada pelos trabalhos de hereditariedade em drosófilas de Thomas Hunt Morgan e colaboradores, entre 1910 e 1915. Nesses trabalhos, além de estabelecer evidências para a hipótese cromossômica foram construídos os primeiros mapas indicando a localização e distância entre genes (Martins, 1998). Dessa forma, estabelece-se de maneira mais forte a relação entre genes (entendidos como fatores mendelianos de herança) e estruturas cromossômicas. O estabelecimento de um local para a herança, e a ideia associada de que esse local regula as características dos indivíduos, permitiu a passagem da visão da herança como algo processual e dinâmico para algo localizado, com o “controle” do desenvolvimento do organismo centralizado no material genético.

A busca por compreender a estrutura química do material hereditário se acentua por volta da metade do século XX, resultando na proposição do DNA como material genético e o estabelecimento de um modelo físico-químico para essa molécula em 1953. O modelo de dupla hélice do DNA ofereceu uma explicação para a estabilidade do gene ao longo das gerações, sendo ainda mais enfatizada a ideia de gene como unidade real e estrutural (Nascimento, 2003). Assim, estabelece-se o conceito de gene molecular clássico, no qual se entende o gene como uma unidade estrutural (um segmento da sequência de DNA) e funcional (correspondendo a um polipeptídeo ou RNA específico) (Santos & El-Hani, 2009). Essa ideia de gene passa a ser o dogma central da biologia molecular, entendendo que a informação genética segue da sequência de DNA que é transcrita para

o RNA e traduzida em polipeptídeos. Uma consequência desse modelo é que o controle do organismo passa a ser entendido como realizado por moléculas de DNA, o que configura um dos reducionismos que levou ao desaparecimento do conceito de organismo da maior parte do discurso biológico do século XX.

Associado ao DNA-centrismo, a teoria da evolução biológica forneceu uma compreensão de que o ambiente age selecionando variações genéticas na população. A maioria dos livros textos indica a evolução como “mudança na frequência de genes” (Griffiths & Gray, 2001, p. 195) ou “mudança ao longo do tempo nas proporções de organismos individuais que diferem em um ou mais traços” (Futuyama, 2009, p. 3), refletindo uma visão convencional da seleção natural e da herança. Essas definições trazem em suas formulações a ideia de que o ambiente seleciona os tipos de genes que estarão nas próximas gerações. Mesmo compreendendo que estas afirmações estão corretas, ao considerar que apenas o ambiente tem o papel de selecionar as características, o organismo novamente tem seu papel secundarizado em virtude de uma visão que descaracteriza tal organismo na constituição e agenciamento do ambiente.

Podem-se encontrar noções mais sistêmicas do conceito de evolução, por exemplo, a evolução entendida como “mudanças na forma e no comportamento dos organismos ao longo de gerações” ou como “mudança entre gerações de uma linhagem de populações” (Ridley, 2006, p. 28). Todavia, mesmo nessas noções, percebe-se que não existe uma explicação da ação do organismo como modificador do ambiente.

No contexto delineado, em que as ideias biológicas emergem da dicotomia gene/DNA e ambiente, têm-se as seguintes compreensões: 1) o gene corresponde a uma sequência de DNA que determina a expressão de proteínas que atuarão na expressão de determinadas características em ambientes específicos; 2) o genótipo corresponde ao conjunto de genes do organismo; 3) o fenótipo corresponde às características expressas no organismo, decorrentes da interação entre seu genótipo e o ambiente em que se encontra; 4) A evolução é entendida como um processo de seleção de traços ou características e não de organismos. Nesse panorama, não há uma explicação clara do organismo e sua ação no ambiente e não se inclui na explicação dos

fenótipos a multiplicidade de fatores, que não estão no DNA, mas que contribuem de forma decisiva para o desenvolvimento orgânico e para a modificação dos regimes seletivos constituídos pela dinâmica do sistema organismo-ambiente.

3 A ARTICULAÇÃO DOS CONCEITOS DE GENE, GENÓTIPO, FENÓTIPO, ORGANISMO E AMBIENTE

A predominância da visão DNA-cêntrica e ambiental começou a ser desafiada já na segunda metade do século XX (Keller, 2000). Os desafios foram colocados principalmente ao conceito de gene devido a uma maior compreensão da dinâmica celular, da expressão gênica e da identificação de processos que não permitem uma correlação direta entre uma sequência de DNA e um determinado polipeptídeo (Justina, Meglhioratti & Caldeira, 2012). Assim, configurou-se um entendimento mais complexo, no qual as formas dos organismos poderiam ser influenciadas, por exemplo, por fatores epigenéticos e alterações em mecanismos de regulação gênica. Para Sean Carroll (2008, p. 27), a compreensão de modos de regulação do desenvolvimento orgânico pode explicar alguns aspectos de alterações anatômicas ao longo da evolução que ocorreram mais por mudanças na regulação gênica do que por modificações nas sequências de proteínas.

No cerne da crise do conceito de gene – que teve o conceito molecular clássico de gene desafiado (Joaquim & El-Hani, 2010) – e na compreensão de que a teoria da evolução deve integrar as teorias do desenvolvimento (Ceschim, Oliveira & Caldeira, 2016) – ocorreu uma preocupação em se recuperar o organismo como unidade autônoma que age em seu ambiente, entendendo as interações internas de maneira sistêmica, sendo estas dependentes de uma multiplicidade de fatores, ultrapassando a ideia de que a hereditariedade está centrada no DNA. Nesse sentido, Griffiths e Gray (2001, p. 195) argumentam que, em uma perspectiva sistêmica do desenvolvimento, o DNA não possui supremacia em relação a outros recursos do desenvolvimento, sendo o conceito de *herança biológica* entendido como todo recurso que permanece em sucessivas gerações e que é parte da explicação do porquê cada geração se assemelhar à anterior. Nesse contexto, Eva Jablonka (2001) destaca a existência de diferentes sistemas de trans-

missão de herança, entendendo como transmissão “todo o processo que leva à regeneração de algum tipo de estado organizado ao longo das gerações” (Jablonka, 2001, p. 100). Isto inclui a transferência direta de recursos bem como as atividades que levam à reconstrução de um fenótipo ancestral.

O organismo não herda todas as características ou traços fenotípicos prontos ou codificados em uma molécula do DNA. Os traços ou características que um organismo exhibe são construídos e/ou reconstruídos ao longo do desenvolvimento orgânico pela interação de uma multiplicidade de fatores. Os elementos e redes de interações – herdados ao longo das gerações e que explicam a semelhança de forma em relação às gerações anteriores – presentes na célula ovo funcionam como indicativos do desenvolvimento para o próximo momento. Como apontam Susan Oyama, Paul Griffiths e Russel Gray, “o caminho pelo qual um organismo se desenvolve funciona como um recurso para seu próprio desenvolvimento futuro” (Oyama, Griffiths & Gray, 2001, p. 5).

Apesar dos indicativos de desenvolvimento apresentarem certa estabilidade, as características expressas pelo organismo ao longo de sua vida estão presentes na célula ovo apenas como potencialidade, necessitando ser construída e/ou reconstruída durante a vida de um organismo. Para Jablonka (2001), os diferentes sistemas de herança e os ciclos de retroalimentação formados entre as atividades dos organismos e seu ambiente ecológico e social, frequentemente, criam condições para a reconstrução de um fenótipo ancestral nas gerações descendentes.

Os recursos herdados, constituindo-se como indicativos do desenvolvimento, podem ser de diferentes tipos, tais como: sequências de DNA; estruturas celulares que são usadas como guia ou molde para a construção de estruturas similares; marcas da cromatina que afetam a expressão gênica (Jablonka, 2001; Jablonka & Lamb, 2005). O conjunto desses indicativos do desenvolvimento internos ao organismo e que permitem a construção do mesmo em caminhos em que ele se assemelhe às gerações anteriores é aqui entendido como o genótipo de um organismo. Desse modo, supera-se uma visão tradicional do genótipo como conjunto de DNA, ao reconhecer a presença de uma diversidade de informações no interior do organismo, sendo

essas informações estreitamente relacionadas com a interação do organismo em um dado ambiente e com a influência do ambiente no desenvolvimento (Taylor & Lewontin, 2017).

Além de uma herança genotípica, o organismo tem uma herança ambiental (ecológica e/ou social). Como destaca Jablonka (2001, p. 113), os organismos são ativos e constroem seus ambientes e, portanto, também modificam o regime seletivo no qual eles vivem. Por meio de suas atividades e comportamentos, os organismos constroem os nichos ecológicos que ocupam, possibilitando que as condições em que eles vivem possam ser regeneradas e reexperenciadas pelos descendentes. Nesse contexto, a compreensão de que os organismos constroem seus nichos implica que os organismos não só moldam a natureza do seu mundo, mas determinam, em parte, a quais pressões seletivas eles e seus descendentes serão expostos (Laland, Odling-Smee & Feldman, 2001, p. 124).

Alguns organismos aprendem um determinado comportamento a partir da interação com seu grupo, constituindo, portanto, elementos de um sistema de herança que emerge do ambiente no qual o organismo vive. Nesse sentido, cabe destacar que as ações do organismo sempre interferem no ambiente que será herdado pelas próximas gerações. Os organismos, como agentes não só interferem como modificam o ambiente que será apresentado para as novas gerações. Assim, define-se aqui a “herança ambiental” como os aspectos do ambiente que permitem a produção de determinados comportamentos e/ou modos de vida que se mantêm ao longo das gerações.

Apesar de herdar aspectos internos e, de algum modo, o nicho ecológico de seus ancestrais, o organismo, a partir de suas ações e da interação com seu entorno, modifica o meio externo e restringe e interfere em seu ambiente interno (interações moleculares, celulares e/ou tissulares) por uma variedade de caminhos, por exemplo, pelo tipo de alimentação. Assim, por meio de uma visão sistêmica, o organismo pode ser concebido como unidade autônoma e com capacidade de agência, uma vez que funciona como um sistema integrado que modifica seu entorno e cujas ações podem interferir no seu próprio desenvolvimento (Etxeberria & Moreno, 2007, pp. 30-31). É importante destacar que a autonomia do organismo é relativa, já que os organismos estão integrados em níveis superiores de organização, tais

como populações, comunidades e ecossistemas, sendo a inserção nesses níveis importante para a manutenção do próprio organismo. Assim, “os organismos podem ser concebidos como unidades autônomas coletivamente organizadas, inseridos em processos ecológicos e evolutivos que são fundamentais para a sua manutenção” (Meglhioratti, El-Hani & Caldeira, 2012, p. 11). Essa conceituação de organismo, centrado em sua agência, possibilita recolocar o organismo como elemento central na dinâmica dos fenômenos biológicos.

Discutiu-se, até o momento, aquilo que o organismo herda e que lhe possibilita regenerar aspectos das gerações ancestrais, o que se chamou de herança genotípica e herança ambiental. Também se destacou que a ação do organismo interfere sobremaneira não apenas no seu ambiente como no seu próprio desenvolvimento. Para completar esse quadro, é preciso ressaltar quais aspectos não constituem uma “herança”, mas que estão presentes e interferem no desenvolvimento. Os aspectos que não têm uma estabilidade e duração, configurando-se como mais aleatórios no desenvolvimento, são chamados por Richard Lewontin (2002, p. 43) de “ruídos do desenvolvimento”. Além disso, o organismo interage com o seu entorno, estabelecendo uma relação tanto com o ambiente que foi herdado das gerações anteriores como com fatores mais aleatórios que compõe o ambiente em determinado momento.

Os elementos hereditários, os ruídos do desenvolvimento (elementos aleatórios que são transmitidos sem se configurar em uma rede estável de relações ao longo das gerações), o momento em que o organismo se encontra em sua história de vida e a interação do organismo em um determinado ambiente possibilitará a constituição de um determinado fenótipo. Portanto, o “fenótipo”, ou seja, as características ou traços aparentes de um organismo em determinado momento do desenvolvimento, é fruto das interações entre herança genotípica, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental, aspectos aleatórios do ambiente e ação do organismo no seu meio. Cabe destacar que novidades de traços fenotípicos ao longo da evolução podem aparecer devido à complexa interação entre organismos e seus ambientes. Nesse contexto, como destacam Leandro Lofeu e Tiana Kohlsdorf (2015, p. 12), o ambiente não é um mero “agente seletor, que atua na

evolução adaptativa eliminando ou fixando fenótipos”, mas funciona como um dos elementos indutores da variação fenotípica.

Percebe-se que se definiu genótipo e fenótipo aqui a partir de uma perspectiva sistêmica do desenvolvimento orgânico. Cabe agora perguntar qual o papel dos genes no quadro teórico construído. Primeiro, é preciso retomar a ideia defendida por Paul Griffiths e Russel Gray (2001, p. 5), na qual o organismo não recebe traços prontos ou codificados como herança, isto é, o organismo tem que reconstruir traços pela interação de múltiplos fatores. Desse modo, a informação para essa construção não está numa molécula específica como o DNA, mas numa rede de relações que é construída a partir de indicativos de desenvolvimento, espalhados por toda a célula ovo que dá origem a um determinado organismo, combinado com fatores aleatórios e pela interação com seu ambiente. Portanto, uma definição de gene, em uma perspectiva sistêmica, não pode estar centrada no DNA como tendo papel único ou central no desenvolvimento do organismo. Assim, adotou-se, no quadro teórico desenvolvido, a percepção de gene molecular processual apresentado por Eva Neumann-Held (2001) e Paul Griffiths e Eva Neumann-Held (1999).

Neumann-Held (2001) propõe um conceito de gene que enfatiza o processo envolvido para a produção de determinados polipeptídeos na célula. Nesse contexto, ao invés de enfatizar o papel do DNA na produção de polipeptídeos particulares, destaca o modo pelo qual a célula (no caso dos procariontes) e o núcleo celular (no caso dos eucariontes) utilizam sequências de DNA em caminhos específicos para a produção de polipeptídeos. Desse modo, o papel regulador está na célula como um todo, ou em níveis superiores da organização biológica, que utiliza moléculas de DNA e RNA como partes de um processo que envolve uma multiplicidade de elementos. O argumento utilizado é o de que a regulação de produção de polipeptídeos na célula necessita muito mais do que apenas sequências de DNA. Isso pode ser evidenciado nos casos “em que a mesma sequência de DNA é parte de muitos diferentes processos de expressão, levando a diferentes polipeptídeos” (Neumann-Held, 2001, p. 72).

Neumann-Held (2001, p. 74) estabelece um conceito de gene molecular processual que leva em consideração a distinção entre DNA e gene, nesta definição o gene pode ser entendido como: um processo

(curso de eventos) que liga DNA e todas as outras entidades relevantes que não estão no DNA na produção de um polipeptídeo particular. Esse conceito de gene é relacional e sempre inclui interações entre o DNA e seu ambiente (desenvolvimento) (Neumann-Held, 2001, p. 74). O entendimento de gene como processo deixa claro que os genes não são herdados de maneira acabada de uma geração a outra, mas reconstruídos ao longo do desenvolvimento do organismo por meio dos indicativos de desenvolvimento presentes no zigoto e de uma cadeia de eventos, no qual o sistema organismo-ambiente se desenvolve. Nesse sentido, pode-se dizer que os genes, por exemplo, na célula ovo inicial que origina um organismo multicelular, existem apenas como potencialidades, sendo construídos em momentos específicos do desenvolvimento. Esta explicação deve, necessariamente, incluir a emergência de características no nível do organismo.

Ao adotar o organismo como agente evolutivo, assim como já considerado por autores como Ernst Mayr (2005) e Richard Lewontin (2002), compreende-se seu papel como integrante do sistema de desenvolvimento, restringindo e influenciando fenômenos que ocorrem em níveis hierárquicos internos (tais como a expressão gênica) bem como atuando na produção de novas características emergentes que constituirão níveis hierárquicos superiores ao indivíduo (por exemplo, na constituição dos ecossistemas).

4 UM MODELO SISTÊMICO PARA A ARTICULAÇÃO DOS CONCEITOS DE GENE, GENÓTIPO, FENÓTIPO, ORGANISMO E AMBIENTE

Neste artigo propõe-se a articulação dos conceitos de gene, genótipo, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental, aspectos aleatórios do ambiente, organismo e fenótipo mediante um modelo representativo da interação organismo-ambiente em um dado momento ecológico (Fig. 1) e da relação população-ambiente ao longo do tempo (Fig. 2). Ressalta-se que a função dos modelos dentro da biologia teórica é dinâmica e não estática (Laubichler & Müller, 2007) e pode contribuir para a elaboração de redes conceituais.

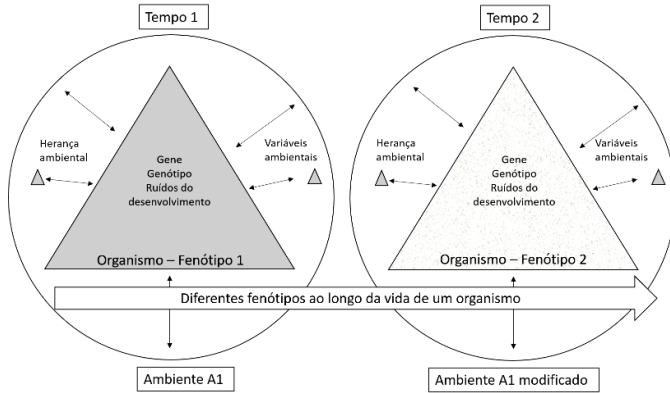


Fig. 1. Modelo Sistêmico de Processos Biológicos Organismo-Ambiente. Explicita a sucessão de fenótipos ao longo do desenvolvimento dos organismos, fruto das interações entre herança genotípica, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental, aspectos aleatórios do ambiente e ação do organismo sobre seu meio. Os triângulos representam organismos em interação.

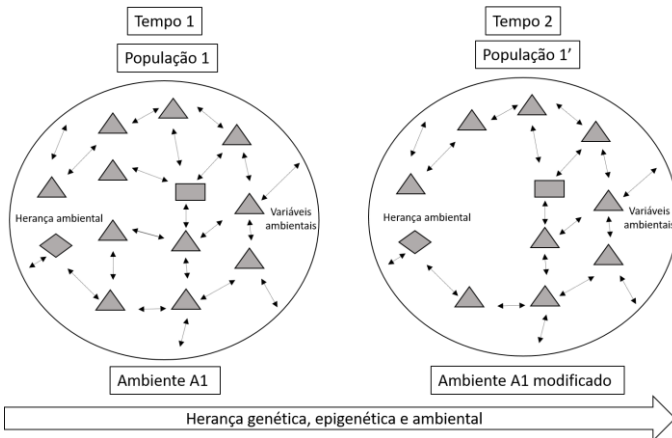


Fig. 2. População-Ambiente. Evidencia como as gerações descendentes de uma população herdam aspectos genéticos, epigenéticos e ambientais ao mesmo tempo em que sofrem influências de aspectos aleatórios do ambiente. Os triângulos constituem uma população de organismos de uma determinada espécie. O losango e retângulo representam organismos de outras espécies.

A concepção de modelo adotada segue a perspectiva apresentada por Sabina Leonelli (2007), no qual se entende que é possível especificar as relações entre os componentes (comportamento, existência e estrutura) das entidades e dos processos, contribuindo o modelo para mediar os aspectos teóricos e os fenômenos a serem compreendidos.

O modelo apresentado está configurado pela articulação das Figuras 1 e 2 e busca representar estruturas e processos biológicos de modo a superar explicações biológicas fragmentadas. A Figura 1 explicita a relação do organismo com o seu ambiente em um período curto de tempo e a Figura 2 evidencia alguns resultados das interações entre os organismos e seus ambientes para as gerações seguintes. O modelo utiliza os seguintes conceitos:

- 1) Gene: processo (curso de eventos) que liga DNA e todos as outras entidades relevantes que não estão no DNA na produção de um polipeptídeo particular (Neumann-Held, 2001, p. 74).
- 2) Genótipo: conjunto de indicativos do desenvolvimento, internos ao organismo, que permitem a construção do mesmo em caminhos em que ele se assemelhe às gerações anteriores.
- 3) Ruídos do desenvolvimento: aspectos aleatórios do desenvolvimento orgânico (Lewontin, 2002, p. 43).
- 4) Organismo: unidade autônoma e agencial, inserida em processos ecológicos e evolutivos que são fundamentais para a sua manutenção (Etxeberria & Moreno, 2007, p. 27).
- 5) Variáveis ambientais: aspectos aleatórios do ambiente que podem ser relevantes ao organismo em determinados momentos do seu desenvolvimento.
- 6) Herança ambiental: aspectos do ambiente (físico, químico e interações com outros seres vivos) que permitem a produção de determinados comportamentos e/ ou modos de vida que se mantêm ao longo das gerações.
- 7) Fenótipo: conjunto de características aparentes de um organismo em determinado momento do desenvolvimento, fruto das interações entre herança genotípica, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental, aspectos aleatórios do ambiente e ação do organismo sobre seu meio.

Na Figura 1, o primeiro círculo apresenta o organismo de fenótipo 1 (triângulo maior) interagindo no ambiente 1 no tempo 1. O círculo representa o ambiente do organismo, ou seja, fatores que são relevantes para o seu desenvolvimento e suas interações ecológicas, bem como o espaço que já apresenta modificações produzidas por gerações anteriores. Nesse ambiente estão presentes tanto fatores bióticos (interação com outros seres vivos, representados pelos triângulos menores) como fatores abióticos, tais como clima, umidade, entre outros. O ambiente do organismo pode ser entendido tanto como os aspectos que constituem sua herança ambiental – e que permitem ao organismo reconstruir características e comportamentos que estiveram presentes em seus ancestrais – como por fatores aleatórios que apesar de não fazerem parte da herança ambiental recebida são utilizados pelo organismo para sua sobrevivência e desenvolvimento. Ainda na Figura 1 é possível perceber que as características do desenvolvimento orgânico e a emergência de determinadas propriedades orgânicas estão relacionadas tanto com a constituição interna do organismo como pela interação do organismo com seu ambiente.

Na Figura 1, contudo, nota-se que o organismo não é fruto apenas da interação entre genótipo, ruídos do desenvolvimento, herança ambiental e variáveis ambientais. As características que emergem no nível orgânico fazem com que o organismo funcione como uma unidade autônoma e agencial, transformando o ambiente de modo direcionado. Desse modo, as ações do organismo também influenciarão sua sobrevivência futura, o seu desenvolvimento e seu fenótipo. As interações que ocorrem no sistema organismo-ambiente são representadas por setas bidirecionais, indicando que o organismo não apenas é influenciado pelo ambiente, mas também reconstrói seu ambiente.

O segundo círculo na Figura 1 apresenta as consequências das interações ocorridas no momento 1 e as interações que ocorrem no tempo 2, no qual o organismo apresenta um novo fenótipo. As modificações que ocorrem no decurso da vida de um organismo são fruto das expressões de diferentes genes processuais, dos fatores aleatórios do desenvolvimento, da emergência de características dos organismos, das interações que o organismo realiza com seu ambiente

e de fatores aleatórios desse ambiente. Desse modo, no segundo círculo vemos um organismo com características um pouco diferentes do primeiro momento (fenótipo 2). As modificações do organismo também alteram sua relação com o ambiente, modificando o sistema organismo-ambiente. As modificações geradas funcionam como restrições das potencialidades do próprio organismo, contudo, não se restringem apenas ao tempo de vida do organismo, mas, também, funcionam como uma herança ambiental para as próximas gerações de uma população.

Em uma população as ações e transformações no ambiente produzidas pelos diferentes indivíduos afetam suas futuras linhagens. Nesse sentido, a Figura 2 evidencia a população de organismos de uma mesma espécie (triângulos – população 1) interagindo entre si, com organismos de outras espécies (losangos e quadrados) e com fatores físico-químicos em um ambiente 1. Nesse primeiro momento, as relações entre genótipos, organismos e ambiente, conjuntamente aos fatores aleatórios, acabam por modificar toda a dinâmica entre os mesmos. Essas modificações são transmitidas sistemicamente para as próximas gerações. Assim, a contingência configura-se como parte do processo de desenvolvimento e evolução dos organismos. Na Figura 2, o ambiente no qual a população 1' está estabelecida apresenta aspectos que foram modificados pelos organismos da população 1, ou seja, o ambiente é resultado da ação, também, dos organismos, que podem modificar os regimes seletivos das próximas gerações (Lewontin, 2002, p. 60).

Esse modelo dos fenômenos biológicos está em parte centrado no conceito de organismo (Figura 1) e como esse se articula aos conceitos de gene, genótipo, fenótipo e ambiente. Entende-se que esses conceitos estão situados em uma vasta rede de conhecimentos e não são isolados. Assim, para compreender esses conceitos em uma abordagem que considera as discussões atuais é preciso conceber o organismo como um sistema autônomo com agência e que articula processos que acontecem em diferentes níveis hierárquicos (internos e externos ao organismo). Contudo, é importante também diferenciar os processos que ocorrem em um período curto de tempo (tempo de vida de um organismo) daqueles que acontecem em um período longo que ultrapassa o tempo de vida de organismos individuais.

Assim, no caso da Figura 2, representa-se como elementos genéticos, epigenéticos e ambientais são herdados por linhagens de organismos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A exclusão do organismo e do seu desenvolvimento do conhecimento biológico impossibilita a compreensão do modo como a relação entre genótipo, organismo e ambiente permite a configuração de diferentes fenótipos. Uma compreensão sistêmica dessas relações esbarra em dificuldades epistemológicas ao entendimento dos fenômenos biológicos, tais como o DNA-centrismo e a visão do ambiente independente do organismo. A primeira dificuldade está associada à compreensão de que a ontogenia se configura como um desdobramento de formas determinadas pelos genes, enquanto sequências de DNA. A segunda dificuldade está relacionada a uma visão ambiental estrita, no qual o ambiente é tratado apenas como elemento selecionador de diferentes fenótipos (pré-programados por informações contidas no DNA). Embora essas ideias norteiem pesquisas científicas e mesmo o conhecimento apresentado no âmbito da divulgação científica, há a necessidade de uma expansão, uma vez que a relação entre gene, genótipo, organismo e ambiente é de interdependência e mais complexa.

Na perspectiva da biologia sistêmica, e considerando o conceito de gene molecular processual, o genótipo é flexível em seu desenvolvimento, permitindo fenótipos morfológicos e comportamentais diferentes. O fenótipo, por sua vez, depende das relações entre o organismo ao longo do seu desenvolvimento e seu meio interno e externo. Há, portanto, uma sucessão de fenótipos ao longo da vida do organismo, em que o fenótipo atual resulta da interação do fenótipo anterior, o meio em que o organismo vive e as ações do organismo nesse meio. Assim, a representação da complexa relação entre genótipo e fenótipo em um determinado momento do desenvolvimento do organismo, proposta no presente artigo, pode ser um recurso útil para a discussão conceitual em biologia. Também em termos de herança ao longo das linhagens de organismos, o modelo proposto contribui para o entendimento de que a herança não se restringe ao DNA, incluindo processos moleculares bem como uma herança ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Ana Maria Rocha de; EL-HANI, Charbel Niño. Um exame histórico-filosófico da biologia evolutiva do desenvolvimento. *Scientia Studia*, **8** (1): 9-40, 2010.
- CARROL, Sean B. Evo-Devo and an expanding evolutionary synthesis: a genetic theory of morphological evolution. *Cell*, **134** (1): 25-36, 2008.
- CESCHIM, Beatriz; OLIVEIRA, Thais Benetti de; CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. Teoria Sintética e Síntese Estendida: uma discussão epistemológica sobre articulações e afastamentos entre essas teorias. *Filosofia e História da Biologia*, **11** (1): 1-29, 2016.
- EL-HANI, Charbel Niño. Uma ciência da organização viva: organicismo, emergentismo e ensino de biologia. Pp. 199-242, in: SILVA FILHO, W. et al. (Orgs.). *Epistemologia e ensino de ciências*. Salvador: Arcádia, 2002.
- ETXEBERRIA, Arantza; MORENO, Álvaro. La idea de autonomía em biologia. *Logos. Anales del Seminario de Metafísica*, **40**: 21-37, 2007.
- FELTZ, Bernard. Le réductionnisme em biologie: approches historique et épistemologique. *Revue Philosophique de Louvain*, **93**: 9-32, 1995.
- FUTUYMA, Douglas Joel. *Evolution*. 2 ed. Massachussets: Sinauer Associates, 2009.
- GOODWIN, Brian. *How the leopard changed its spots: the evolution of complexity*. New York: Touchstone, 1994.
- GRIFFITHS, Paul E.; GRAY, Russel D. Darwinism and developmental systems. Pp. 195-218, in: OYAMA, Susan; GRIFFITHS, Paul E.; GRAY, Russel D. (eds.). *Cycles of contingency: developmental systems and evolution*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.
- GRIFFITHS, Paul E.; NEUMANN-HELD, Eva M. The many faces of the gene. *BioScience*, **49** (8): 656-662, 1999.
- GUTMANN, Mathias; NEUMANN-HELD, Eva M. The theory of organism and the culturalist foundation of biology. *Theory in Biosciences*, **119** (3-4): 276-317, 2000.
- JABLONKA, Eva. The systems of inheritance. Pp. 99-116, in: OYAMA, Susan; GRIFFITHS, Paul E.; GRAY, Russel D. (eds.).

- Cycles of contingency: developmental systems and evolution.* Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.
- JABLONKA, Eva; LAMB, Marion. *Evolution in four dimensions: genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in history of life.* Cambridge, MA: The MIT Press, 2005.
- JOAQUIM, Leyla Mariane; EL-HANI, Charbel Niño. A genética em transformação: crise e revisão do conceito de gene. *Scientiæ Studia*, **8** (1): 93-128, 2010.
- JOHANNSEN, Wilhelm Ludwig. The genotype conception of heredity. *The American Naturalist*, **45** (531): 129-159, 1911.
- JUSTINA, Lourdes Aparecida Della; MEGLHIORATTI, Fernanda Aparecida Meglhioratti; CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. A (re)construção de conceitos biológicos na formação inicial de professores e proposição de um modelo explicativo para a relação genótipo e fenótipo. *Revista Ensaio*, **14** (3): 65-84, 2012.
- JUSTINA, Lourdes Aparecida Della; CALUZI, João José; MEGLHIORATTI, Fernanda Aparecida; CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. A herança genotípica proposta por Wilhelm Ludwig Johannsen. *Filosofia e História da Biologia*, **5** (1): 55-77, 2010.
- KELLER, Evelyn Fox. *The century of the gene.* Cambridge: Harvard University Press, 2000.
- LALAND, Kevin N.; ODLING-SMEE, F. John; FELDMAN, Marcus W. Niche Construction, ecological inheritance and cycles of contingency in evolution. Pp. 117-126, *in*: OYAMA, Susan; GRIFFITHS, Paul E.; GRAY, Russel D. *Cycles of Contingency: developmental systems and evolution.* Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.
- LAUBICHLER, Manfred D.; MÜLLER, Gerd B. Models in theoretical biology. Pp. 3-10, *in*: LAUBICHLER, Manfred D.; MÜLLER, Gerd B. (eds.). *Modeling Biology: structures, behavior, evolution.* Cambridge, MA: The MIT Press, 2007.
- LEONELLI, Sabina. What is in a model? Combining Theoretical and material models to develop intelligible theories. Pp. 16-35, *in*: LAUBICHLER, Manfred D.; MÜLLER, Gerd B. (eds.). *Modeling Biology: structures, behavior, evolution.* Cambridge, MA: The MIT Press, 2007.

- LEWONTIN, Richard C. *Biologia como ideologia: a doutrina do DNA*.
Ribeirão Preto: FUNPEC-RP, 2000.
- . *A tripla hélice: gene, organismo e ambiente*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.
- LOFEU, Leandro; KOHLSDORF, Tiana. Mais que seleção: o papel do ambiente na origem e evolução da diversidade fenotípica. *Genética na Escola*, **10** (1): 11-19, 2015.
- MARTINS, Lilian Al-Chueyr Pereira Martins. Thomas Hunt Morgan e a teoria cromossômica da herança: de crítico a defensor. *Episteme*, **3** (6): 100-126, 1998.
- MAYR, Ernst. *Biologia, ciência única: reflexões sobre a autonomia de uma disciplina científica*. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.
- MEGLHIORATTI, Fernanda Aparecida; EL-HANI, Charbel Niño; CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. O conceito de organismo em uma abordagem hierárquica e sistêmica da biologia. *Revista da Biologia*, **9** (2): 7-11, 2012.
- NASCIMENTO, Maurino Loureiro. *O desencantamento do dom científico: a prevalência da “metáfora do programa genético” no Projeto Genoma Humano e o contexto histórico-social da industrialização das biociências*. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Saúde Coletiva) – Programa de Pós-Graduação em Saúde Coletiva, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- NEUMANN-HELD, Eva M. Let’s talk about genes: the process molecular gene concept and its context. Pp. 69-85, *in*: OYAMA, Susan; GRIFFITHS, Paul E.; GRAY, Russel D. (eds.). *Cycles of contingency: developmental systems and evolution*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.
- OYAMA, Susan; GRIFFITHS Paul E.; GRAY, Russel D. Introduction: what is developmental systems theory? Pp. 1-11, *in*: OYAMA, Susan; GRIFFITHS Paul. E.; GRAY, Russel D. (eds.). *Cycles of contingency: developmental systems and evolution*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.
- RIDLEY, Mark. *Evolução*. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- ROLL-HANSEN, Nils. The genotype theory of Wilhelm Johannsen and its relation to plant breeding and the study of evolution. *Centaureus*, **22** (3): 201-235, 1978.

- RUIZ-MIRAZO, Kepa; ETXEBERRIA, Arantza; MORENO, Alvaro; IBÁÑEZ, Jesús. Organisms and their place in biology. *Theory in biosciences*, **119** (3): 209- 233, 2000.
- SANTOS, Vanessa Carvalho dos; EL-HANI, Charbel Niño. Idéias sobre genes em livros didáticos de biologia do ensino médio publicados no Brasil. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, **9** (1): 1-23, 2009.
- TAYLOR, Peter; LEWONTIN, Richard. The genotype/phenotype distinction. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2017. Disponível em: <<https://seop.illc.uva.nl/entries/genotype-phenotype/#SettScenDiffKindMeanGenoPhen>>. Acesso em: 20 junho 2017.
- WEBSTER, Gerry; GOODWIN, Brian C. A structuralist approach to morphology. *Rivista di Biologia*, **92**: 495-498, 1999.

Data de submissão: 22/02/2017

Aprovado para publicação: 02/06/2017