

“Fluxo vital de átomos” como abordagem da materialidade no Ensino de Ciências

“Vital flow of atoms” as an approach to materiality in Science Teaching

Alexandre Antunes^a

^a Departamento de Química, Colégio Pedro II, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo. Sob um contexto complexo de multicrises ambientais de origem antrópica em escala planetária, propõe-se, com vistas ao ensino básico, um novo quadro conceitual para a abordagem da matéria corpórea vivente. Ao compreender o ser vivo em função dos intercâmbios de fluxos atômicos com seu entorno, a entidade “átomo” é situada como articuladora e portadora de sentido fundamental. Em analogia ao conceito de genoma, utiliza-se a recente terminologia “elementoma” junto à associação entre a corporeidade vivente e os ciclos biogeoquímicos. A vinculação coletiva dos seres vivos e a incorporação material das diferentes temporalidades históricas (geológica, biológica e humana) permitiu propor concepções como o *fluxo vital de átomos* e a *descendência atômica planetária*. Ainda, sob a perspectiva de um novo “letramento interdisciplinar” (Povinelli, 2023), implicamos eticamente o humano ao abordarmos a crise global de poluição química em conjunto com a “permeabilidade” do corpo vivente através de conceitos como transcorporeidade (Alaimo, 2010) e “regime químico da vida” (Murphy, 2008). Por fim, a criação de uma alternativa pedagógica que inverte a tradicional abordagem nas Ciências da Natureza do submicro como explicação para o macro, apontamos uma visão mais ética, horizontal, complexa e aberta de interdependência entre os viventes.

Palavras-chave:

Ensino de Química, antropoceno, ecologia atômica, poluição química, interdisciplinaridade.

Submetido em

28/09/2025

Aceito em

12/06/2026

Publicado em

03/07/2026

Abstract. Under a complex context of anthropogenic multiple environmental crises on a planetary scale, a new conceptual framework for approaching living corporeal matter is proposed with a view to basic education. By understanding the living being in terms of the exchange of atomic flows with its surroundings, the entity “atom” is positioned as an articulator and carrier of fundamental meaning. In analogy to the concept of the genome, the recent terminology “elementome” is used alongside the association between living corporeality and biogeochemical cycles. The collective connection of living beings and the material incorporation of different historical temporalities (geological, biological, and human) allowed for the proposal of concepts such as the *vital flow of atoms* and *planetary atomic descent*. Furthermore, from the perspective of a new “interdisciplinary literacy” (Povinelli, 2023), we ethically implicate the human when addressing the global crisis of chemical pollution in conjunction with the “permeability” of the living body through concepts such as transcorporeality (Alaimo, 2010) and the “chemical regime of life” (Murphy, 2008). Finally, by creating a pedagogical alternative that inverts the traditional approach in the Natural Sciences of the submicro as an explanation for the macro, we point to a more ethical, horizontal, complex, and open vision of interdependence among living beings.

Keywords:

Chemistry Teaching, anthropocene, atomic ecology, chemical pollution, interdisciplinarity.

Introdução

As bases deste texto foram gestadas durante o ano letivo de 2024 em uma escola pública de uma capital brasileira e, dentre os vários elementos que instigaram sua produção, é importante ressaltar o desenvolvimento de novos vínculos colaborativos relacionados à comunidade escolar. As ausências de tais vínculos estão no cerne da incapacidade de respostas articuladas para o enfrentamento das múltiplas crises ambientais em curso

globalmente e, apesar da maior incidência dos eventos climáticos extremos ser apenas um de seus aspectos, as chuvas intensas na região Sul do Brasil em 2024, dispararam um gatilho que resultou nesta proposta pedagógica que tenta oferecer possibilidades renovadas para um discurso disciplinar com vínculos planetários mais orgânicos em Ciências da Natureza, em especial na Química.

Através da materialidade, buscou-se, por meio do emprego da perspectiva de fluxos atômicos, amadurecer diálogos entre as diferentes temporalidades históricas do planeta, dos seres vivos, da espécie humana e do indivíduo. Assim, sob uma expectativa ambiental interdisciplinar situada no Antropoceno, a abordagem que aqui se apresenta objetivou contemplar: uma compreensão inicial mais simples da composição corpórea vivente; o desenvolvimento de categorias de semelhanças e vínculos entre seres vivos; o entrelaçamento das diferentes temporalidades da materialidade viva; e a interdependência da sua coconstrução material com seu entorno ambiental.

Este texto fundamenta-se no conceito de *fluxo vital de átomos* e em seus desdobramentos mais evidentes no que tange às trocas atômicas necessárias ao metabolismo do ser vivo. Ainda na chave de leitura dos fluxos atômicos, há um segundo artigo produzido onde se realizou o desenvolvimento conceitual dos deslocamentos atômicos em função da dinâmica de produção industrial-capitalista e propôs-se o conceito de *fluxo antropocêntrico de átomos*.

O entendimento do grau de comprometimento e vulnerabilidade do contexto socioambiental global da atualidade, assim como suas consequências no presente e futuro, é condição necessária ao desenvolvimento de articulações sociais mais amplas e plurais que, por sua vez, são necessárias na busca por soluções reais (Scarano et al., 2024). Como não parece haver dúvidas sobre o papel central que a visão de mundo da ciência moderna exerceu para alcançarmos o atual estágio pungente de danos em nosso planeta (Gilbert, 2023), a relevância do presente trabalho é promover novas elaborações teóricas com olhar pedagógico que antagonizam com um(a): visão da materialidade inerte; conhecimento disciplinarmente fechado que visa a respostas conhecidas pelo docente; sequência de objetos de conhecimentos associados linearmente por causalidade ou explicações.

A elaboração de pontuações teóricas dotadas de dimensão pedagógica, isto é, desenvolvidas como ação decorrente de processos de questionamentos compartilhados, possibilita estabelecer relações mais consistentes entre os debates de grande envergadura e a vida cotidiana. Além disso, no enfrentamento a questões de alta complexidade, esse tipo de encaminhamento representa uma possibilidade de abordagem capaz de acionar diferentes áreas de pesquisa que, no caso das transformações climáticas e dos desafios associados à questão ambiental, reforcem a importância de os conhecimentos específicos de uma disciplina como a Química estarem em interrelação direta com outros campos de saber, como a ecologia, antropologia, educação, divulgação científica e epistemologia.

Sobre essas bases, se definiu a pergunta motriz do trabalho investigativo que deu origem ao presente artigo:

Como a reelaboração de conceitos das Ciências da Natureza, no contexto do Antropoceno, pode reconstruir novos diálogos e vínculos com o planeta em sala de aula?

Ainda que o singular contexto escolar latino-americano seja um ambiente marcado por ritmos e necessidades produtivistas da contemporaneidade neoliberal, este texto concorda com os organizadores de um recente livro publicado sobre o papel da Educação em Ciências no Antropoceno (Wallace, 2022), os quais destacam que as distintas instituições participantes da estrutura da educação em ciências como a ciência escolar, as políticas governamentais, as práticas em sala de aula, a pesquisa educacional e os laboratórios de pesquisa estão mal equipados e não foram concebidos para “lidar com os contextos expansivos e urgentes do Antropoceno” (p.1).

Diante do objetivo de propor novas categorias conceituais originadas da práxis pedagógica da docência em Ciências da Natureza que pudessem ser desenvolvidas no próprio ambiente escolar, considerou-se o átomo como informação básica de forma a evidenciar as associações entre os seres vivos e o equilíbrio do sistema Terra. Com base no reconhecimento das mobilidades atômicas geradas pelo metabolismo do corpo vivente, formulou-se o conceito de *fluxo vital de átomos* e, por desdobramentos conceituais levantados, propôs-se a existência de novas formas de parentescos e de extensão entre os seres vivos através de sua materialidade corpórea. Como se buscará demonstrar, essa abordagem conceitual, provocada e pensada pedagogicamente adquire, enquanto discurso científico, potência criativa e persuasiva.

Os átomos no Ensino de Química e nas Ciências da Natureza

Sob uma perspectiva atômica, os seres vivos são formados fundamentalmente por seis (bio)elementos chamados de primários – carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre – que são fulcrais na produção das moléculas bioquímicas indispensáveis ao metabolismo de todos os seres vivos: água, lipídeos, carboidratos, aminoácidos e ácidos nucleicos.

Recentemente Jordi Sardans e Josep Peñuelas com outros pesquisadores (De la Casa et al., 2025; Fernández-Martínez, 2022; He et al., 2025; Hu et al., 2025; Peñuelas et al., 2019; Peñuelas et al., 2022; Sardans & Peñuelas, 2024) propuseram o termo “ecologia atômica” e sugeriram uma nova abordagem para conceitos basilares da ecologia como “nicho”, “competição”, “produção”, “teias tróficas” e “diversidade” a partir do emprego do “elementoma” (composição elementar de seres vivos) e de suas relações estequiométricas.

Tal proposta, ao implicar ferramentas e conceitos do campo da Química na revisão de temas da ecologia, dialoga com a demanda da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), ao estimular um olhar articulado da Biologia, da Física e da Química. Por exemplo, ao mobilizar estudos como estrutura da matéria, leis ponderais, cálculo estequiométrico e leis termodinâmicas para o desenvolvimento da habilidade EM13CNT105, propõe: “analisar os ciclos biogeoquímicos e interpretar os efeitos de fenômenos naturais e da interferência humana sobre esses ciclos, para promover ações individuais e/ou coletivas que minimizem consequências nocivas à vida.” (Brasil, 2018). Um outro exemplo, no mesmo sentido, é a habilidade EM13CNT209 que, associada à competência específica 2, dispõe em seu texto: “analisar a evolução estelar associando-a aos modelos de origem e distribuição dos

elementos químicos no Universo, compreendendo suas relações com (...) suas estruturas e composições e as possibilidades de existência de vida (...)” (Brasil, 2018).

Assim, o documento oficial indica claramente a mobilização de conhecimentos químicos na abordagem de questões socioambientais, o que vai ao encontro do caráter transversal necessário ao enfrentamento desse tipo de temática. Contudo, Ody e Menegat (2023) apontam dificuldades dos professores das Ciências da Natureza para trabalharem temas ligados a geociências, o que, por sua vez, poderia ser mitigado por ações de formação continuada interdisciplinares (Chaves et al., 2018; Oliveira & Vera, 2023). Em trabalho de revisão realizado entre 2001 e 2021, de Freitas e Coelho (2023) expõem a carência de estudos de temas da Educação Ambiental com participação de licenciandos em Química. Somado a isso, a ausência da interdisciplinaridade e as lacunas conceituais de docentes foram apontadas, na revisão de Tulio e Nagalli (2023), como alguns dos obstáculos para a inclusão do citado documento no trabalho do professor no ensino básico.

Diante disso, depreende-se que, apesar do reconhecimento da relevância do debate ambiental e da exigência por enfoques interdisciplinares como exemplificado nos trabalhos de Alves e Carvalho (2023) e Bañón (2024), não se tem observado a implementação efetiva de práticas que atendam a esse tipo de demanda na Educação Básica. Se, nos termos de Povinelli (2023), “um novo letramento interdisciplinar é a nossa única esperança para encontrar um modo de concatenar nosso arranjo atual de vida com a continuidade da vida humana e planetária enquanto tal” (p. 70), entende-se que a interdisciplinaridade deve constituir-se como parte de uma “polinização cruzada” tal como propõe Tsing (2019) ao compreender a “vivacidade das populações não humanas experimentadas como sujeitos e não objetos” (p. 33). Por esse caminho, pode-se atribuir ao espaço escolar a capacidade produtiva de conhecimento no que tange a novas articulações disciplinares e consequentes abordagens pedagógicas capazes de estimular atitudes eticamente compromissadas com a sustentabilidade ambiental.

Portanto, uma reestruturação de conceitos à luz da “ecologia atômica” busca favorecer o desenvolvimento de discursos que estimulem novas abordagens pedagógicas interdisciplinares no tema da educação ambiental por parte dos professores das Ciências da Natureza, em especial os de Química.

No que diz respeito, mais especificamente, ao estudo dos átomos no ensino básico, trata-se de assunto alocado no conjunto das Ciências quando tratam do tema da materialidade. Sua introdução ocorre, normalmente, no 9º ano do fundamental II e se estende pelo ensino médio quando é retomado no início dos estudos das Ciências da Natureza e revisitado como base explicativa ao longo desse ciclo escolar.

Sob o prisma da ciência moderna, a partir das diferentes proposições de modelos iniciados em 1808 pelas esferas maciças e indivisíveis de John Dalton, têm sido desenvolvidas várias estratégias para o ensino-aprendizagem que envolve a teoria atômica. Tornou-se usual incluir informações relativas à história e ao desenvolvimento da ciência, bem como o uso de jogos didáticos (Benedetti Filho et al., 2009) e modelos táteis (Mesquita & Vasconcelos, 2024). Por outro lado, a seleção e o enfoque dos objetos de conhecimento escolar da unidade “Teoria atômica” são orientados para o reconhecimento das características das partículas subatômicas (prótons, elétrons e nêutrons); a identificação e caracterização de alguns

modelos históricos propostos; a formação dos íons e os aspectos da eletrosfera que incluem a distribuição eletrônica. No ensino médio, a sequência tradicional de assuntos relacionados à Química parte da teoria atômica, segue com os estudos da tabela periódica e ligação química, estes dois últimos itens, por sua vez, determinam, de acordo com a base explicativa que demandam, os aspectos da atomística que serão fixados.

Apesar da complexidade histórico-conceitual que o modelo descontínuo da matéria ofereceu, e continua a oferecer, tal instrumentalização didática da teoria atômica comentada no parágrafo anterior, na contramão de uma “educação para a vida” proposta por John Dewey, influenciou o ensino escolar brasileiro a partir de 2ª metade do século XX com concepções estadunidenses de ensino de ciências que dentre outros aspectos: “valorizavam a seleção e a estruturação dos conteúdos com vistas à organização dos currículos escolares, o que possuía relação direta com a própria estrutura interna de cada campo disciplinar” (Valla et al., 2014)

Em tal estruturação disciplinar na escola, a célula e o DNA, ficaram como signos representantes da vida na Biologia enquanto o átomo permaneceu mais associado à matéria inanimada, inerte e passiva na Química.

Distinta orientação se apresenta nesse artigo ao conferir centralidade ao átomo na dinâmica de atividades fundamentais da matéria viva, e convertê-lo em eixo conceitual. Esse ponto de vista vai ao encontro de novas conceituações de “parentesco” que se aproximam tanto de cosmovisões indígenas quanto de formulações de pensadoras como Elizabeth Povinelli (2023) e Donna Haraway (2016 e 2023). Ainda que tais construções teóricas se distanciem de um cânone de signos científicos (inclusive escolares) a partir do qual se popularizou a versão de que a vida se baseia no DNA, o fluxo de átomos permite compreender de forma mais plural interconexões e interdependências cruciais com sistemas que associam todos os existentes do planeta.

O domínio genético sobre a vida

A concepção mecanicista

Embora a física quântica na primeira metade do século XX tenha colapsado a concepção mecanicista de mundo que enfatizava o reducionismo e o determinismo, de acordo com Nicholson e Dupré (2018), esta visão não apenas sobreviveu na biologia, mas foi “revigorada pelo crescimento meteórico da biologia molecular” (p. 140) na segunda metade do século XX. Ainda de acordo com os autores, o princípio central do mecanicismo biológico, representado pela redescritção metafórica do organismo como máquina, assumiu distintos formatos (“*plasticity*”) tendo sido largamente difundido em diferentes campos contemporâneos de pesquisa como a embriologia, a biologia evolutiva e a biologia molecular (p. 140-141). Apesar de tais metáforas terem importantes contribuições em situações experimentais, podem apresentar desdobramentos equivocados ao serem usadas na fundamentação dos conceitos de fenômenos biológicos (Nicholson, 2020).

A simultaneidade histórica das origens do desenvolvimento da fisiologia e termodinâmica em meados do século XIX somente encontrará uma conciliação teórica plausível entre o

organismo vivo e a 2ª lei da termodinâmica em 1944 no livro *O que é a vida*, de E. Schrödinger, no qual se atribui a manutenção da alta organização dos organismos vivos (baixa energia livre) à permanente entrada de matéria acompanhada da saída de substâncias resultantes de sua degradação e ao consequente aumento do grau de desordem do seu entorno ambiental. Sob esse ponto de vista, os organismos vivos são sistemas termodinâmicos abertos com estabilidade dinâmica em condições distantes do equilíbrio que são sustentados temporariamente pela troca constante de matéria e energia com o seu entorno ambiental. De acordo com Nicholson e Dupré (2018), tal visão processual de organismo como concepção de vida na relação dinâmica de contínua interação com o ambiente incorpora:

dois aspetos essenciais e complementares da dinâmica dos organismos: a troca contínua de matéria que se encontra no cerne do conceito de metabolismo, por um lado, e a surpreendente estabilidade da forma que se mantém apesar desta troca de material, por outro (p. 149).

Em contraposição à concepção de organismo vivo baseada na metáfora da máquina presente em diversos textos ao longo dos séculos XX e XXI, os conceitos de fluxos constituem um modo de entender a ontologia dos organismos que, em diferença à visão maquinica, caracteriza corretamente os aspectos fundamentais termodinâmicos dos sistemas vivos e mostra um caminho de compreensão biológica mais abrangente e relacional dos organismos (Kearney & Rippel, 2023; Nicholson & Dupré, 2018).

As abordagens mecanicistas envolvem dois isolamentos ou reducionismos: o primeiro de caráter ontológico com a separação da “entidade material” das interconexões de seu entorno; e o segundo de dimensão temporal com o favorecimento de uma apresentação que privilegia “instantâneos estáticos”. Tais aspectos podem ser exemplificados no ensino de Ciências da Natureza (em especial Química e Biologia) no qual há uma aproximação da materialidade que parte do (sub)micro para se compreender o macro. Átomos e células têm valor equivalente nas abordagens iniciais de cada uma dessas disciplinas na medida em que em ambas, se explicam estruturas mais complexas (moléculas e tecidos) através de um encadeamento lógico desenvolvido desde unidades menores constituintes separadas no tempo e do entorno espacial.

Apesar dos atuais questionamentos levantados, a genética permanece pilar conceitual e midiático intimamente associado ao conceito de vida. Essa situação organiza os contornos da atual visão de pertencimento e modos de socialização entre viventes e não viventes, o que inclui a forma como compreendemos nosso passado.

A força genética

A relevância das informações provenientes da codificação genética é evidenciada pela existência de um mercado de laboratórios que realiza diversos tipos de análises de material genético que pode incluir um mapeamento de geolocalização da “ancestralidade” conforme exemplificado na Figura 1. Tal relatório laboratorial afirma que as “heranças ancestrais” do indivíduo analisado estariam distribuídas pelos continentes da seguinte forma: 92% na Europa (maior parte na península Ibérica) e 8% no Oriente Médio. Tais parâmetros permitem

ao leitor fazer um exercício de projeção, até de forma bastante eficiente, de alguns dos atributos do portador do material genético analisado como cor de cabelo e tom de pele.

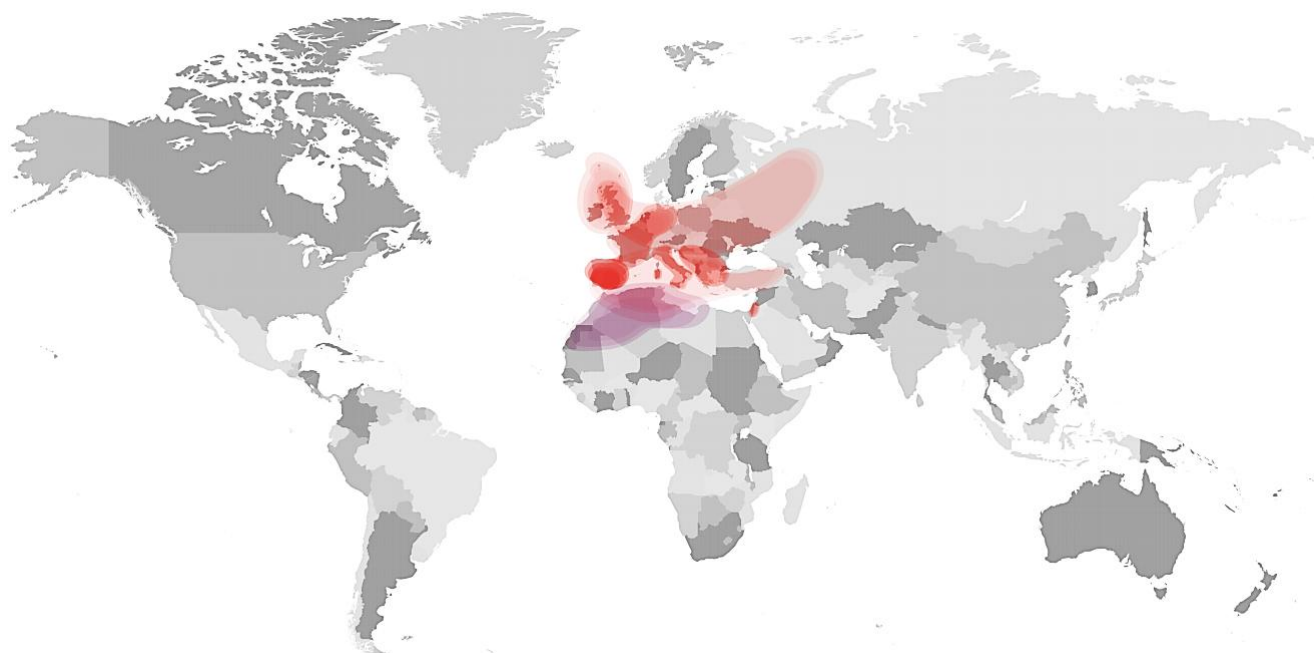


Figura 1. Mapa da geolocalização da “ancestralidade” emitido por laboratório especializado (elaborado a partir de laudo laboratorial de análise do material genético).

Para a maioria dos humanos, refletir sobre sua própria origem significa adotar um parâmetro genético, porém para além da análise laboratorial (como exemplificado acima) as informações de antepassados podem ser acessadas por intermédio de documentação primária (documentos históricos) e de relatos orais (testemunhos de familiares, amigos ou vizinhos). Em qualquer uma dessas fontes de informação, tem-se como eixo a árvore genealógica, o que em outras palavras, significa “sondar” o passado pelo fio condutor da molécula de DNA.

Nesse sentido, compreender o DNA como uma “âncora” nos fixa ao porto seguro (e evita a deriva); uma espécie de “raiz” que nos impede o nomadismo; ou ainda, um tipo de “religião” que assegure a paz interna. A imobilidade nos protege dos eventos “externos”, das derivas, das errâncias sem pertencimento e das incertezas do desconhecimento. Tal visão colide frontalmente tanto com a inexorável contingência termodinâmica metaestável da vida quanto com as multiplicidades temporais condensadas materialmente nos seres vivos.

Essa imobilidade/proteção se refletiu historicamente na modernidade com a consolidação do lugar conferido ao biológico na diferenciação de grupos humanos e a consequente naturalização do exercício da exclusão, do extermínio e da exploração como exemplificam práticas relacionadas ao colonialismo, a escravidão, aos holocaustos e genocídios (Daflon, 2022). Da mesma forma na relação com viventes não humanos, se multiplicam as manifestações da primazia da vida do antropos: as cobaias de laboratórios; os animais silvestres capturados e comercializados; as vítimas das queimadas, dos desmatamentos e das

extensas monoculturas; etc. Quanto mais familiar (maior proximidade genética), maior será a consideração e respeito, essa proporcionalidade se mantém no sentido inverso.

Ainda nessa linha de centralidade do DNA, Povinelli (2023) critica a precedência da vida sobre a não-vida enquanto decorrência do desenvolvimento, no pensamento ocidental, do conceito do “imaginário do carbono”, representado pelo conjunto de processos metabólicos: nascimento, crescimento/reprodução e morte. Na perspectiva da autora, esse imaginário explica as formas exploratórias de atuação do humano instituídas sobre o planeta com o advento da modernidade. Em contrapartida, para vários povos originários (americanos, australianos, europeus e asiáticos), a ancestralidade não está separada dos territórios que habitam e os existentes “não-vivos” destas localidades podem ter relações de pertencimento com os vivos criando uma teia complexa de relações, inclusive genealógicas (Povinelli, 2023). Logo, a associação proposta por Povinelli entre “imaginário do carbono” e formas predatórias de exploração deriva de um processo histórico-cultural que estaria relacionado à identidade como genealogia e, portanto, genética.

Uma vez que se entenda a genealogia como o estabelecimento de linhagens com base genética, é oportuno perguntar: será que podemos propor alternativas no campo científico às tais estruturas genealógicas? Se sim, de que forma apresentar uma estrutura relacional alternativa e pedagógica na Educação Básica de Ciências? Como reconhecer outras modalidades de parentesco? Talvez, conforme Donna Haraway (2023) nos convida a fazer, seja necessário mudar a narrativa centralizada no DNA com o alargamento da imaginação: “fazer parentes e fazer afins (categorias, cuidados, parentescos colaterais, sem laços de nascimentos e tantos outros ecos)” (p. 185-186).

Fluxo vital de átomos

O fator de escalabilidade

O envolvimento e entrelaçamento da submicroscopia e da macroscopia da matéria são constitutivos do estudo da Química de forma que, por exemplo, átomos, moléculas e ligações químicas se associam por representações simbólicas aos aspectos macroscópicos como os tipos de misturas, as propriedades físicas e os fenômenos químicos diversos. Dessa forma, a compreensão dos processos químicos deve ser analisada tendo em vista três níveis de conhecimento: submicroscópico, macroscópico e representacional (Johnstone, 2000).

O contraste de escalas tão discrepantes não fica restrito ao ensino de ciências da Natureza ou da Educação Ambiental, por exemplo, ao consideramos a rede de comunicações e dispositivos eletrônicos, “vivemos em um mundo em escala não humana, onde o consumo de massa diminui a responsabilidade individual” (Freire, 2022, p. 196); o que significa um maior impacto humano sobre o planeta ao mesmo tempo que há menor responsabilidade do indivíduo:

Os efeitos escalares em relação às mudanças climáticas são confusos (...) quanto maior o número de pessoas envolvidas nas formas modernas de consumo, menor é a influência relativa ou a responsabilidade de cada uma, mas o impacto cumulativo de sua insignificância é pior.

Como resultado de efeitos escalares, o que é auto evidente ou racional em uma escala pode ser destrutivo ou injusto em outra (Clark & López, 2019, p. 22).

Tsing (2019) desenvolve de forma original, a partir da implementação da *plantation* pelos europeus nos séculos XV, XVI e XVII, a noção de escalabilidade como a expansão de um projeto que, ao crescer, deve manter seu design original. Assim, a autora desenvolve a teoria da não escalabilidade que permite visualizar o que escapa à expansão (escalabilidade) ao usar “articulações com formas não escaláveis, ao mesmo tempo que as nega ou apaga” (p. 176). O progresso compreendido como “ganhar escalas” é característico dos projetos da modernidade em que o triunfo da técnica sobre a natureza performa a limpeza de “relações sociais transformadoras” (p. 12).

Em relação à escalabilidade de projetos que têm por base conhecimentos científicos, não seria diferente. Ao tomar como exemplo o caso dos organismos geneticamente modificados, Stengers (2023) afirma que um conhecimento para ser científico deve ter validade em qualquer escala, o que significa ser independente das circunstâncias, dos encontros e das criações de relação. Assim, os resultados reprodutíveis obtidos a partir de ensaios de controle, de testes laboratoriais e de medidas instrumentais cuidadosas, ao ganharem escala global pelas mãos do capital, ignoram pontos cegos relacionados a dimensões políticas, epistêmicas e ontológicas.

Além de conhecimentos omitidos no processo de “ganhar escalas” da ciência, há uma diferença importante sobre as questões que movem os temas de pesquisa. Em virtude de vivermos urgências ambientais globais, há uma miríade de discussões e conflitos éticos, políticos e epistêmicos relacionados a essa agenda. Devido à importância da área científica, cria-se a expectativa de soluções com abrangência global, porém as instituições de pesquisa, além de formularem suas próprias “questões de fato” (muitas vezes) desvinculadas de necessidades locais, parecem não ser capazes de oferecer respostas adequadas com a agilidade de que se necessita (Stengers, 2023).

Em função dos desafios postos pela realidade contemporânea e as questões aqui assinaladas, as categorias conceituais formuladas e propostas, operam sob uma necessidade externa ao da lógica das práticas científicas. Assim, não se trata de um conceito resultante do ambiente laboratorial, mas sim o desenvolvimento de um modelo teórico-pedagógico como resposta demandada pelo papel ativo que a escola e o docente devem assumir.

No caminho desta construção conceitual, recai sobre o professor de Ciências da Natureza, um hábito disciplinar (de construção histórico-social) de homogeneizar o ser vivo, mas, na condição de educadores latino-americanos, há de se ter um compromisso ético com o combate às expropriações de vidas e não-vidas, às injustiças e desigualdades sociais associadas a um território de passado colonial. Para tanto, é necessário dialogar e respeitar os distintos corpos-territórios na escola, bem como com suas histórias, narrativas e experiências devem ser parte indissociável deste compromisso.

Nesse sentido, o historiador indiano Dipesh Chakrabarty (2025), ao debater o cenário de crise ambiental planetária, levanta tanto as dificuldades quanto as necessidades de diálogos que envolvem as histórias dos seres humanos e as globais. Além disso, entende que, ao recorrer à história da espécie (uma história mais “profunda”), não se exclui a do capitalismo e, a

reboque, do colonialismo e do racismo. Esse seu texto, o historiador propõe uma renovação das ações sociopolíticas e desenvolve o debate sobre o problema do antropocentrismo do pensamento ocidental ao explicitar que a Ciência do Sistema Terra atribui ao humano multicamadas temporais de existência, na medida em que o situa:

na conjuntura de três histórias (agora interdependentes de várias maneiras) cujos eventos são definidos por escalas temporais muito distintas: a história do planeta, a história da vida no planeta e a história do globo criado pelas lógicas dos impérios, do capital e da tecnologia (p. 112).

Para Chakrabarty, é importante a dimensão do indivíduo (fenomenológica) estar diretamente envolvida na análise, mas sem perder de vista o impacto da coletividade em sua feição multitemporal.

Matéria vivente reciclada

Chakrabarty (2025), ao analisar as três diferentes histórias da espécie humana, compreende o corpo vivente como um “ponto nodal” de interconexões planetária, o que inclui compassos de tempos muito distintos. Por exemplo, um jovem pode ser visto como: um corpo que nasceu há 20 anos; um modo socioeconômico global de 500 anos; uma espécie com 250 mil anos; ou, ainda uma materialidade com 4 bilhões de anos de incontáveis trânsitos. Pertencemos a essas diversas temporalidades que se encontram entranhadas nos diferentes movimentos atômicos que evocam distintas histórias da matéria e jogam luz sobre processos de distorção entre o que se percebe, em nível individual, como realidade sensível e aquilo que se passa em termos globais e planetários. A dificuldade de se perceber “na carne” os distintos tempos obstaculiza o reconhecimento da dinâmica de interdependência que caracteriza os participantes do Sistema Terra, o que resulta em um modo limitado e perigoso de pensar e agir sobre o mundo decorrente de o humano não perceber, nem assumir, a importância das relações de interdependência entre os existentes planetários.

No campo da Biologia, tal interdependência é tema de novas descobertas que, de acordo com Kearney e Rieppel (2023), estabelecem uma visão simbiótica da vida que desafia o conceito de individualidade biológica e desempenha papel crítico sobre vários conceitos como genoma, espécie, evolução e comportamento.

Sob a perspectiva da ontologia dos processos, o organismo vivo é mais adequadamente conceitualizado através de fenômenos relacionados a seu entorno ambiental e que envolvem agrupamentos de mecanismos homeostáticos dinâmicos (Kearney & Rieppel, 2023). Os mecanismos que incluem troca de matéria (e energia) sugerem um conceito de individualidade distinto do tradicional na medida em que contestam as construções de limites tradicionalmente atribuídos ao ser vivo, ou seja, borra-se a separação entre os indivíduos viventes e entre vivos e não-vivos.

As partículas não-vivas nos ligam diretamente aos incontáveis bilhões de outros viventes do passado, presente e futuro deste planeta e, assim, a materialidade incorpora histórias que divergem: das semelhanças biológicas do DNA; da identidade que amalgama uma nação; dos limites territoriais de um país (Danvers, 2009). Dessa maneira, essas minúsculas partículas

colocam os corpos vivos como amostras planetárias, uma materialidade geobiológica em constante reconstrução que se estabelece em função das relações de troca de matéria com o entorno não apenas durante os 20 anos de vida de um jovem, mas também nos 300 mil anos de nossa espécie biológica ou 4 bilhões de anos de nossa matéria planetária.

Assim como a revisão que Kearney e Ripple (2023) realizam sobre a ontologia dos processos, questões relacionadas aos contornos da individualidade e da vida são desdobradas a partir do “ponto nodal” que se aproxima do conceito “espacotemporalmaterial” do realismo agencial da física e teórica feminista Karen Barad (2007). Segundo a autora, trata-se do entrelaçamento indissociável pela coconstituição dinâmica entre três dimensões – espaço, tempo e matéria – de forma que não existam entidades preexistentes. Tais estudos e posicionamentos críticos se alinham com outras cosmovisões, como as dos povos originários, a exemplo do que Ailton Krenak (2023, p. 11) declara: “Gosto de pensar que todos aqueles que somos capazes de invocar como devir são nossos companheiros de jornada, mesmo que imemoráveis, já que a passagem do tempo acaba se tornando um ruído em nossa observação sensível do planeta”.

Nesse sentido, uma discussão sobre os trânsitos atômicos introduz a materialidade vivente em escala planetária e vice-versa, pois, já nascemos em corpos de matéria reciclada: somos formados de átomos que percorreram um longo caminho e já participaram (e participarão) da constituição corporal de inúmeros outros seres vivos e existentes como bactérias, rios, peixes, ventos, árvores, solos, rinocerontes, oceanos, cobras e dinossauros, para citar alguns poucos exemplos.

Devido ao fluxo do ir e vir atômico característico de qualquer organismo vivo, cada átomo é emprestado a um corpo por um período de tempo, por vezes muito curto, do ciclo vital. A respiração, o suor, a eliminação de dejetos, a alimentação, a produção de lágrimas, a emissão de flatulências e tantas outras formas de trocas de matéria podem ser entendidas como fluxos atômicos que permitem a entrada e saída de componentes (reagentes e produtos) que sustentam inúmeros processos químicos que nunca alcançam o equilíbrio. A essa permanente e intensa permuta de espécies químicas com o entorno ambiental responsável pela manutenção dos processos estruturais e reacionais do metabolismo corpóreo do ser vivo, nomeamos *fluxo vital de átomos*.

Como a reação química consiste na quebra e formação de ligações interatômicas, incontáveis componentes químicos moleculares relacionados ao metabolismo orgânico como água, gás oxigênio e dióxido de carbono podem ser produzidos ou consumidos pelo ser vivo. Assim, uma outra chave de leitura pode ser oferecida ao focar no intercâmbio de átomos, pois, na impossibilidade de serem criados ou destruídos (com exceção dos processos nucleares), as quantidades atômicas de um elemento dependem exclusivamente do seu balanço entre entrada e saída. Em outras palavras, diferente das moléculas, os átomos estão sempre em trânsito.

Ainda na comparação das abordagens pedagógicas entre átomos e moléculas, há uma maior complexidade pedagógica no metabolismo molecular vivente por estar relacionado a uma extensa diversidade estrutural no ensino básico, enquanto ocorre uma simplificação com os átomos que se associam a poucos elementos químicos (bioelementos).

A quantidade de átomos intercambiados por um ser vivo é enorme, por exemplo ao fim de um dia, temos pela respiração de um adulto a saída de átomos de oxigênio em uma quantidade equivalente a 10 vezes o número de estrelas no universo. A grandeza das quantidades atômicas, apesar de extrapolar o contexto empírico do indivíduo, nos oferece uma ideia do imenso fluxo de átomos (e moléculas) necessário à manutenção da vida. Nesse mesmo sentido, o intercâmbio dessas espécies químicas é profundo e ocorre através de processos químicos, físicos e biológicos como a respiração, fotossíntese, evaporação e condensação e, tudo isso simultaneamente a uma grande movimentação e difusão de moléculas pela biosfera, em especial a troposfera. Esse cenário de intenso fluxo material pela biosfera, junto à expressiva quantidade de átomos intercambiados por seres vivos, permite enunciar a *descendência atômica planetária* nos seguintes termos: cada ser vivo possui em seu corpo átomos da maioria dos seres não microscópicos que habitaram no sistema Terra nos últimos 10 mil anos.

De acordo com tal hipótese, átomos que formaram árvores, mamíferos, humanos e peixes que habitaram nosso planeta após o término do último período glacial fazem parte da materialidade, por exemplo, dos corpos dos seres humanos vivos. A formulação não atende a uma “questão de fato” da ciência e, por conseguinte, não propõe explicações ou respostas em torno de resultados de experimentos ou outros dilemas da agenda científica que podem, sim, serem formulados a partir dessa publicação. Considera-se que a *descendência atômica planetária* propõe um tipo de integração orgânica e material dos seres vivos que, além de ser um tema desconsiderado no processo de “ganhar escalas” da ciência, envolve uma alta complexidade de relações entre viventes, ciclos biogeoquímicos, deslocamentos de matéria pela biosfera e aspectos climatológicos em escala planetária que apontaremos a seguir.

A plausibilidade de tal afirmação pode ser defendida em função do volumoso e intenso deslocamento de substâncias químicas na atmosfera, ilustrado, por exemplo, pelos transportes de poluentes a longas distâncias. Esses fluxos, não existem barreiras entre países, continentes ou hemisférios, o que há são orientações e preferências de movimentos atmosféricos que podem ser analisados e previstos por diversos modelos computacionais. A importância desse trânsito de substâncias intercontinentais é contemplada pela bem-sucedida convenção sobre poluição atmosférica transfronteiriça a longa distância que, desde 1979, com a participação de aproximadamente 50 países signatários do hemisfério norte, tem como base trabalhos e instituições científicas (Lisowska-Mieszkowska, 2020). Essa convenção propõe monitorar, estudar e mitigar poluentes (metais pesados, componentes produtores de chuva ácida, produtos orgânicos persistentes, entre outros) de origem antropogênica que podem ser transportados por grandes extensões com impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente.

Outro exemplo da intensa mobilidade do sistema atmosférico encontra-se no acompanhamento dos radionuclídeos liberados no desastre nuclear de Fukushima (Japão) em 2011 que, por suas características peculiares, apresentam o seu monitoramento analítico mais sensível quando comparado aos de outros poluentes. Assim, as espécies radioativas liberadas em 11 de março atravessaram o Pacífico e alcançaram a costa oeste dos Estados Unidos no dia 16 de março e, após atravessar o Atlântico, entre os dias 19 e 20, chegaram à

Europa. Em um total de 15 dias as partículas radioativas de Fukushima se espalharam por todo o hemisfério norte e, em 30 dias, também pelo hemisfério sul do planeta (Thakur et al. 2013; Leppänen et al., 2013).

Por fim, a relevância do ar atmosférico é central no ciclo biogeoquímico do oxigênio no qual todos os seres de origem vegetal e animal estão inseridos por processos de fotossíntese e respiração. Sob o viés proposto pela hipótese de uma *descendência atômica planetária*, todo ser vivo mantém parentesco com incontáveis outros que compõem a biosfera planetária, pois estão intimamente interligados pelos ciclos biogeoquímicos dos elementos químicos fundantes da materialidade de todos os corpos – oxigênio, carbono, hidrogênio, nitrogênio, fósforo e enxofre. Essa proximidade, distinta da molécula do DNA, ocorre pela composição atômica dos corpos que nos oferece uma história alargada em imaginação e parentescos que se associam a incontáveis outros existentes.

Como não lembrar do rio Doce? Tomado de um ponto de vista muito distinto do homem ocidental moderno, esse rio apresenta uma longa e estreita história de relação com os Krenak que conforme explica Ailton Krenak (2019, p. 21): “O rio Doce, que nós, os Krenak, chamamos de Watu, nosso avô, é uma pessoa, não um recurso, como dizem os economistas. Ele não é algo de que alguém possa se apropriar; é uma parte da nossa construção como coletivo que habita um lugar específico”.

Por ser intrínseco à vida, o *fluxo vital de átomos* associa todos os seres organicamente (como uma herança corpóreo-material) a partir de uma espécie de *ancestralidade atômica* formada por minúsculos resíduos, átomos inorgânicos sem vida, intercambiáveis em ciclos biogeoquímicos planetários que são continuamente transferidos entre seres e existentes. Apesar de preterido por Descartes, o corpo reciclado oriundo das sobras doadas por incontáveis e imemoriáveis seres, além de nos vincular de forma permanente às mais distintas entidades, também nos posiciona na rede de solidariedade que mantém de forma frágil e provisória o conjunto de seres constituintes da biodiversidade – Trata-se de uma *solidariedade atômica*.

A permeabilidade corporal

Para além das trocas metabólicas necessárias para manutenção do corpo vivente, existe a exposição de inúmeras outras substâncias em função de seu entorno ambiental. Nesse sentido, inúmeros contaminantes e/ou poluentes podem ser “absorvidos” ainda que não associados ao funcionamento “padrão” do metabolismo. A maior parte destas substâncias tem origem na dinâmica (extração/produção/comercialização/utilização) da indústria química inserida no modelo capitalista de consumo de massa.

Esse aspecto tem profunda importância na atualidade, visto que a crise global de contaminação promove transformações ambientais de forma a impactar a diversidade de seres submetidos a alterações em sua própria corporeidade auto-organizada vivente, implicada organicamente, porosa e dependente das trocas atômicas com seu entorno.

São abundantes as publicações que relatam a presença de substâncias químicas sintéticas como contaminantes em distintos sistemas naturais, como o artigo que identifica 19

pesticidas (entre fungicidas, herbicidas e inseticidas) na água da chuva em três cidades do estado de São Paulo (incluindo a capital). Segundo os autores, a água pluvial passa a funcionar como vetor de transporte dessa classe de substâncias no meio ambiente e como colaboradora na contaminação de sistemas de água doce, diante disso não se recomenda o seu consumo direto pela ausência de uma legislação que contemple situações de policontaminação (Dias et al. 2025). Em outro artigo recente (Pereira et al., 2025) releva a importância do transporte de longas distâncias de pesticidas após detectar e quantificar várias dessas substâncias em áreas intocadas de grandes altitudes em dois parques nacionais do sudeste brasileiro.

Nos dois casos acima, a chuva é um vetor de transporte da toxicidade o que contrasta com a nota técnica de dezembro de 2024 capitaneada pelo Instituto Serrapilheira (Mattos et al., 2024) cujos dados levantados mostram que a proteção das terras indígenas na região Amazônica é fundamental, não apenas na conservação do bioma local, mas na distribuição e frequência das chuvas que abastecem 80% da área das atividades agropecuárias no país, o que significa poder afirmar sua importância estratégica nas áreas da segurança hídrica, alimentar e econômica do Brasil. Assim, os “rios voadores” que nascem da reciclagem da água em terras indígenas na Amazônia e são a base de nossa segurança econômica e hídrica se transformam, ao longo de seu percurso pelo Brasil, em um novo tipo de esgoto químico a céu aberto.

Apesar de a poluição ser em muitos casos abordada como uma questão local (por ex. as zonas de sacrifício), o caso dos “rios voadores” citado mostra um silencioso e complexo cenário em outras escalas e, no sentido de viabilizar uma organização de combate à crise de poluição química que ameaça fortemente aos vivos do planeta, um recente artigo (Brack et al., 2022) com dezenas de pesquisadores de todos os continentes traz como proposta urgente a criação de um organismo político internacional de base científica que orientaria uma articulação entre pesquisas em âmbito global.

Um dos alvos frequentes em pesquisa sobre a crise de poluição são os contaminantes emergentes que representam um grupo diverso de poluentes não regulados e incrivelmente presentes no meio ambiente como microplásticos, produtos farmacêuticos e nanomateriais que por seus riscos desconhecidos e impacto generalizado representam um desafio à saúde pública (Li et al., 2024).

A onipresença de tais substâncias químicas sintéticas, industriais e poluentes com suas inevitáveis incorporações à materialidade vivente traz desafios em quadros clínicos como a sensibilidade química múltipla (Zucco & Doty, 2021) e na própria concepção de ser vivo que emerge em conceitos como transcorporalidade (Alaimo, 2017) em que a “corporalidade humana é inseparável da ‘natureza’ ou do ‘ambiente’” no tempo e espaço. Tal afirmação é ilustrada na citação de 2010 da teórica feminista Stacy Alaimo (2010) que escreve sobre o “tratamento” da sensibilidade química múltipla que ao:

(...) evitar todas as substâncias nocivas, sugere como essa condição personifica uma concepção da transcorporalidade do ser humano e, ao mesmo tempo, demonstra como a atenção aos fluxos e intercâmbios entre corpo e ambiente catalisa novos modos de pensar e estar dentro do mundo material emergente (p. 114, tradução própria).

Esse “mundo material” será chamado por Michelle Murphy (2008) de “Regime Químico da Vida” que, resultante de 100 anos de capitalismo industrializado, produziu uma realidade modificada que interfere e coproduz nossos corpos, novas modalidades de “encarnação química” que nos “vinculam molecularmente às economias locais e transnacionais” (p. 696).

Se por um lado, Murphy (2008) ao mencionar a carne com hormônios alterados, as plantações dependentes de pesticidas e a biosfera quimicamente recomposta destaca, um consenso que calcula os riscos das relações moleculares desse regime, por outro, muito esforço tem sido empregado para obscurecê-los o que estimula uma situação aceitável pelo viés jurídico (sem regulamentação estatal). Com essa transformação do inanimado - microplásticos, substâncias perpolifluoroalquiladas, nanopartículas e tantas outras – em animado, os contaminantes e poluentes passam à composição dos corpos viventes que, por sua vez, são convertidos a partícipes dos fluxos materiais de origem antropocêntrica/antropogênica.

Boa parte da inovação da indústria químico-capitalista se deve à geração de inéditas entidades moleculares resultantes normalmente de grandes investimentos privados que buscam atender a novas demandas do mercado com o menor custo de produção e impacto ambiental associado. A pesquisa que resulta na criação de novas moléculas, apesar de estar orientada a uma aplicação industrial, gera um conjunto de novos conhecimentos que estarão fundamentalmente relacionados a questões operacionais de produção/custo/aplicabilidade/mercado e aos impactos ambientais contemplados legalmente. Porém, concordamos com Zaterka e Mocellin (2024) quando afirmam que a produção de uma nova substância promove um maior aumento do desconhecimento em comparação com o ganho de conhecimento. Isso se deve às diversas propriedades ignoradas que a substância apresenta quando em contato com diferentes formas de vida e com outras moléculas para além das usadas pelas engrenagens do sistema produtivo.

Assim a potência criativa e inventiva da Química em diversas áreas, como agrícola, médica, energia renovável, polímeros e mineração, gira em torno das oportunidades econômicas e investimentos relacionados a síntese de novas entidades químicas. Em outras palavras, químicos desejam, imaginam e produzem um novo (e desconhecido) mundo pela criação de novas entidades moleculares como o vorasidenibe, medicamento da Royalty Pharma para um tipo de tumor cerebral com estimativa de vendas anual na ordem do bilhão de dólares ou o icafolin-metil anunciado pela Bayer como sucessor do glifosato com lançamento global previsto para 2028 no Brasil com vendas estimadas em 800 milhões de dólares.

Sob o aspecto dos fluxos atômicos, a Era do Antropoceno pode ser percebida como essa “nova” contribuição dos detritos externalizados (e não contabilizados) da indústria química na formação contínua da materialidade vivente de todo planeta. Os conceitos desdobrados a partir dos fluxos atômicos nos possibilitam analisar temas centrais e complexos relacionados ao Antropoceno como as escalas de tempo e a crise de contaminação química global, além de promover a implicação orgânica do corpo vivente em distintos aspectos, o que possibilita assumir a responsabilidade ética com a vida na medida em que somos capazes de enactuar (Barad, 2007) e coconstruir novas materialidades para as gerações porvir.

Diante das demandas representadas por um complexo contexto global neoliberal de enorme vulnerabilidade ambiental com crescente desigualdade social, está posto um desafio ético àquele educador de Ciências da Natureza que, comprometido com um bem-viver coletivo no futuro, busca construir vínculos coletivos humanos com o planeta e, em diálogo com o artigo-manifesto de Jesse Bazzul (2020, p. 1024), afirmar seu compromisso com uma postura transdisciplinar, ou seja, “olhar para fora da ciência – para a história, espiritualidade, economia etc. – para dar à ciência e à educação científica uma narrativa ética ou uma narrativa de qualquer tipo (boa, má, benevolente, violenta, etc.)”. Assim, tratar-se de fazer emergir novos campos exploratórios transdisciplinares de ensino-pesquisa, paridos das “questões de interesse” de educadores científicos que entrelaçam (e são entrelaçados) às mais distintas perturbações das comunidades locais.

Considerações finais

Em diálogo com a BNCC e tendo em vista os temas tradicionais explorados no ensino de Química, foram concebidas soluções conceituais capazes de facilitar a participação/colaboração significativa do professor de Ciências da Natureza em assuntos relativos à Educação Ambiental. A proposta, assim delimitada, visou à superação de obstáculos ao desenvolvimento de trabalhos desse campo de estudos em contexto escolar (Freitas & Coelho, 2023; Tulio & Nagalli, 2023). Simultaneamente, a formulação conceitual buscou atender a necessidade de um “letramento disciplinar”, como destacado por Povinelli (2023), e transformar a proposta da “ecologia atômica” em um terreno fértil para o desenvolvimento de novas perspectivas tanto conceituais quanto pedagógicas.

O quadro conceitual dos fluxos atômicos dialoga com a ontologia dos processos ao atenuar a primazia do DNA como representante do ser vivo e considerar explicitamente suas relações de interdependência em função dos intercâmbios materiais. O humano, como qualquer outro vivo, é partícipe, por seu metabolismo (*fluxo vital de átomos*), dos ciclos biogeoquímicos que, nomeados por elementos químicos, possibilitam abordar o corpo do ser vivo pelo fluxo de átomos permutados.

Os fluxos atômicos oportunizam uma perspectiva epistemológica complexa e interdisciplinar que se constitui na contramão de uma estrutura tradicional consolidada no ensino básico que, em relação ao encadeamento dos objetos de conhecimento, possui um caminho explicativo sequencial e causal do submicro ao macro. A esse respeito, o quadro conceitual dos fluxos atômicos contextualizado no Antropoceno oferece uma perspectiva que possibilita repensar os conteúdos conceituais tradicionalmente trabalhados no ensino médio e permitir de acordo com Moura (2025, p. 10), uma “revisão séria daquilo que deve sair e do que deve ficar na enorme lista de coisas que dos professores é esperado que ensinem”.

Além disso, ao deixar em segundo plano as moléculas como partes constituintes dos organismos vivos, temas submicroscópicos conceitualmente mais complexos como ligação química e interações intermoleculares poderiam ser abordados juntamente com a química orgânica, isto é, no 2º e/ou 3º anos do ensino médio em vez de serem tratados no início desse ciclo escolar como normalmente acontece.

Há um forte caráter coletivo na concepção dos ciclos biogeoquímicos que associam (em dependência) todos os seres vivos e outros existentes em escala planetária, o que confronta as ideias de centralidade, singularidade e individualidade do DNA. Essa associação reforça a hipótese da *descendência atômica planetária* em sua aspiração de dirigir o pensamento para além da explicação genética.

Nas ressignificações e reelaborações conceituais de complexos temas ambientais, o átomo como unidade básica de sentido, assumiu neste artigo, papel de articulador que buscou ser desenvolvido em diálogos com um discurso disciplinar na educação básica. Os deslocamentos atômicos, na contramão da visão tradicional da materialidade vivente, oferecem uma abordagem interligada e interdependente do ser vivo com seu entorno.

Em uma espécie de movimento circular, este artigo, que começou por inquietações movidas em ambiente escolar, deve retornar ao lugar de onde partiu para, então, mais uma vez gerar novas discussões. Para encerrar as reflexões aqui apresentadas, há de se perguntar: a escola pode assumir outros papéis de atuação no contexto de emergências climáticas? O percurso realizado no presente trabalho sugere uma resposta positiva na medida em que, no âmbito escolar, são apresentadas proposições conceituais renovadas e compromissadas com uma atitude ambiental ética em convergência com um discurso científico aberto aos diálogos com diferentes áreas de conhecimento.

Na contramão da transposição didática de celebrados conteúdos científicos ou de novas metodologias de ensino sobre tópicos canônicos da Química, aposta-se na ressignificação conceitual em diálogo com questões de interesse associadas à comunidade para, desse modo contribuir para o desenvolvimento de novos códigos de significação que possam estremecer o chão da sala do próprio ensino de Ciências.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro por meio de bolsa de pós-doutorado por seis (6) meses no exterior (proc. n. 200279/2025-4) inserida no projeto *Poéticas e políticas do fim na América Latina* contemporânea contemplado pelo edital MCTI/CNPq nº 14/2023.

Ao Programa de Doctorado en Literatura na Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) que, sob supervisão do professor Raul Rodriguez Freire, estimulou o alargamento do campo disciplinar relacionado ao estudo aqui apresentado.

Agradeço pelas sugestões e reflexões propostas pela professora Claudete Daflon dos Santos.

Referências

- Alaimo, S. (2010). *Bodily Natures: Science, Environment, and the Material Self*. Indiana University Press.
- Alaimo, S. (2017). Feminismos transcorpóreos e o espaço ético da natureza. *Revista Estudos Feministas*, 25(2), 909–934. <https://dx.doi.org/10.1590/1806-9584.2017v25n2p909>

- Alves, M. C. & Carvalho, D. F. (2023). Museus e obras de arte contemporânea: campo da experiência na pesquisa narrativa e ensino de ciências. *Revista Areté | Revista Amazônica de Ensino de Ciências*, e23030. <https://dx.doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v21.n35.3655>
- Bañón, M. L. R. (2024). Reimaginar a educação científica: o projeto tell-us, uma viagem à aprendizagem através da arte. *Revista Areté | Revista Amazônica de Ensino de Ciências*, e24023. <https://dx.doi.org/10.59666/Arete.1984-7505.v23.n37.3766>
- Barad, K. (2007). *Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning*. Duke University Press.
- Bazzul, J. (2020). Science education needs manifestos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 37(3), 1020–1040. <https://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2020v37n3p1020>
- Benedetti Filho, E., Fiorucci, A. R., Benedetti, L. P. & Craveiro, J. A. (2009). Palavras cruzadas como recurso didático no ensino de teoria atômica. *Química nova na escola*, 31(2), 88-95. https://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_2/05-RSA-1908.pdf
- Brack, W., Barcelo Culleres, D., Boxall, A. B. A., Budzinski, H., Castiglioni, S., Covaci, A., Dulio, V., Escher, B. I., Fantke, P., Kandie, F., Fatta-Kassinos, D., Hernández, F. J., Hilscherová, K., Hollender, J., Hollert, H., Jahnke, A., Kasprzyk-Hordern, B., Khan, S. J., Kortenkamp, A., ... Zuccato, E. (2022). One planet: One health. A call to support the initiative on a global science–policy body on chemicals and waste. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 21. <https://dx.doi.org/10.1186/s12302-022-00602-6>
- Brasil, S. (2018). Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf
- Chakrabarty, D. (2025). *O global e o planetário: A história na era da crise climática* (A. Renzo, Trad.). Ubu Editora.
- Chaves, R. S., Moraes, S. S. D. & Lira-da-Silva, R. M. (2018). Por que ensinar tempo geológico na educação básica? *Terrae Didactica*, 14(3), 233–244. <https://dx.doi.org/10.20396/td.v14i3.8652309>
- Clark, T. & López, Y. M. (2019) Escala. Perturbaciones escalares. *Revista de Filosofía Universidad Iberoamericana*, v. 51(146), 18-43. <https://dx.doi.org/10.48102/rdf.v51i146.3>
- Daflon, C. (2022). *Meu país é um corpo que dói*. Relicário. <https://www.relicarioedicoes.com/wp-content/uploads/2022/04/MIOLO-Meu-pais-e-um-corpo-que-doi-visualizacao.pdf>
- Danvers, J. (2009). Being-in-the-world. In A. Stibbe (Ed.). *The handbook of sustainability literacy: Skills for a changing world*. Bloomsbury Publishing.
- De La Casa, J., Nogué, S., De Cáceres, M., Pla-Rabés, S., Sardans, J., Benavente, M., Giralt, S., Hernandez, A., Raposeiro, P. M. & Peñuelas, J. (2025). Unveiling two millennia of ecosystem changes in the Azores through elementome trajectory analysis. *Ecological Indicators*, 176, 113630. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113630>
- Dias, M. A., Santos, V. S., Vizioli, B. C., Ferreira, B. S. & Montagner, C. C. (2025). Pesticides in rainwater: A two-year occurrence study in an unexplored environmental compartment in regions with different land use in the State of São Paulo – Brazil. *Chemosphere*, 372, 144093. <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144093>
- Fernández-Martínez, M. (2022). From atoms to ecosystems: Elementome diversity meets ecosystem functioning. *New Phytologist*, 234(1), 35–42. <https://dx.doi.org/10.1111/nph.17864>
- Freire, R. R. (ed.) (2022). *La naturaleza de las humanidades Para una vida bajo otro clima*. Mímesis.
- Freitas, R. A. D. & Coelho, G. R. (2023). Educação Ambiental na Formação Inicial de Professores de Química: Uma Revisão de Artigos Publicados em Periódicos Científicos Brasileiros. *Revista Debates em Ensino de Química*, 9(3), 265–279. <https://dx.doi.org/10.53003/redequim.v9i3.5602>
- Gilbert, J. (2023). Re-thinking science education for the Anthropocene. In S. Tolbert, M. F. G. Wallace, M. Higgins & J. Bazzul (Eds.), *Reimagining Science Education in the Anthropocene*, (V. 2, p. 9-22). Springer Nature. <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-35430-4>
- Haraway, D. (2016). Antropoceno, Capitaloceno, Plantationoceno, Chthuluceno: fazendo parentes (S. Dias, M. Verônica e A. Godoy, trad.). *ClimaCom Cultura Científica — Pesquisa, Jornalismo e Arte*,

3(5). <https://climacom.mudancasclimaticas.net.br/antropoceno-capitaloceno-plantationoceno-chthuluceno-fazendo-parentes/>

Haraway, D. (2023). *Ficar com o problema: Fazer parentes no Chthluceno* (A. L. Braga, Trad.). N-1 Edições.

He, P., Ni, Y., Sardans, J., Ma, C., Liu, H., Wang, R., Peñuelas, J., Han, X., Jiang, Y. & Li, M.-H. (2025). Evolutionary history shapes plant elementome and biogeochemical niches in a forest-steppe ecotone. *Plant and Soil*, 513(2), 2827–2845. <https://dx.doi.org/10.1007/s11104-025-07353-2>

Hu, Z., Yan, P., Li, B., Song, X., Li, J., Peñuelas, J., Collalti, A. & Fernández-Martínez, M. (2025). Global Change Impacts on Forest Elementomes and Insights for Improved Management Practices. *Current Climate Change Reports*, 11(1), 4. <https://dx.doi.org/10.1007/s40641-025-00200-7>

Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry - logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 9–15. <https://dx.doi.org/10.1039/A9RP90001B>

Kearney, M. & Rieppel, O. (2023). A process ontology of organisms and its connection to biological individuality concepts. *Organisms Diversity & Evolution*, 23(1), 1–6. <https://dx.doi.org/10.1007/s13127-022-00584-6>

Krenak, A. (2019). *Ideias para adiar o fim do mundo*. Companhia das Letras.

Krenak, A. (2023). *Futuro Ancestral*. Companhia das Letras.

Leppänen, A.-P., Mattila, A., Kettunen, M. & Kontro, R. (2013). Artificial radionuclides in surface air in Finland following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, 273–283. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.08.008>

Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y. & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>

Lisowska-Mieszkowska, E. (2020). UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution—40 years of action for cleaner air. *Economics and Environment*, 72(1), 12–12. <https://ekonomiaisrodowisko.pl/journal/article/view/52>

Mattos, C., Bernardino, P. N., Stein, B., Carneiro, G. P., Tavares, J., Esquivel-Muelbert, A., Barreto, S., Junqueira, A. B., Staal, A. & Hirota, M. (2024). *Manutenção das Terras Indígenas é fundamental para a segurança hídrica e alimentar em grande parte do Brasil* (Nota Técnica de dez. 2024). Instituto Serrapilheira. https://serrapilheira.org/wp-content/uploads/2024/12/Nota-tecnica-TIs_Amazonia_2024_2_12.pdf

Mesquita, L. S. F. & Vasconcelos, A. K. P. (2024). Recursos pedagógicos acessíveis para o ensino de química de alunos com deficiência visual: Uma revisão sistemática entre 2007 e 2022. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 19(1), 11–26. <https://dx.doi.org/10.14483/23464712.19132>

Moura, C. B. D. (2025). Um turno sociopolítico para a educação em ciências? *Ciência & Educação (Bauru)*, 31, e25000B. <https://dx.doi.org/10.1590/1516-73132025000a>

Murphy, M. (2008). Chemical Regimes of Living. *Environmental History*, 13(4), 695–703. <http://www.jstor.org/stable/25473297>

Nicholson, D. J. & Dupré, J. (2018). *Everything flows: Towards a processual philosophy of biology*. Oxford University Press.

Nicholson, D. J. (2020). On being the right size, revisited: the problem with engineering metaphors in molecular biology. In S. Holm & M. Serban (Org.) *Philosophical Perspectives on the Engineering Approach in Biology: Living machines?* (p. 40–68). Routledge.

Ody, L. C. & Menegat, R. (2023). O tempo geológico e a leitura do lugar: Por que estão ausentes como temas de investigação escolar? *Terrae Didactica*, 19, e023030. <https://dx.doi.org/10.20396/td.v19i00.8673993>

Oliveira, V. C. G. D. & Vera, J. A. N. C. (2023). Diálogos entre a Astrobiologia e a Pedagogia da Terra: Uma proposta para a formação continuada de professores de ciências. *Terrae Didactica*, 19, e023033. <https://dx.doi.org/10.20396/td.v19i00.8674464>

- Peñuelas, J., Fernández-Martínez, M., Ciais, P., Jou, D., Piao, S., Obersteiner, M., Vicca, S., Janssens, I. A. & Sardans, J. (2019). The] bioelements, the elementome, and the biogeochemical niche. *Ecology*, 100(5), e02652. <https://dx.doi.org/10.1002/ecy.2652>
- Peñuelas, J., Sardans, J. & Terradas, J. (2022). Increasing divergence between human and biological elementomes. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(11), 935–938. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2022.08.007>
- Pereira, P. C. G., Parente, C. E. T., Guida, Y., Capella, R., Carvalho, G. O., Karásková, P., Kohoutek, J., Pozo, K., Příbylová, P., Klánová, J., Torres, J. P. M., Dorneles, P. R. & Meire, R. O. (2025). Occurrence of current-use pesticides in sediment cores from lakes and peatlands in pristine mountain areas of Brazilian national parks. *Environmental Pollution*, 372, 126005. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126005>
- Povinelli, E. (2023). *Geontologias* (M. Ruggieri, Trad.). Ubu Editora.
- Sardans, J. & Peñuelas, J. (2024). Atomic ecology: Coupling atoms and ecology. *Science Bulletin*, 69(1), 11–16. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scib.2023.11.037>
- Scarano, F. R., Brink, E., Carneiro, B. L. R., Coutinho, L., Fernandes, C., Holz, V. L., Salgado, M., Aguiar, A. C. P., Latawiec, A. E. hb, Pardini, R., Sampaio, M. C., Aguiar, A. C. F., Branco, P. D., Freire, L., Padgurschi, M. C. G., Pires, A. P. F., Soares, I. M. M. & Solórzano, A. (2024). Sustainability dialogues in Brazil: Implications for boundary-spanning science and education. *Global Sustainability*, 7, e30. <https://dx.doi.org/10.1017/sus.2024.25>
- Stengers, I. (2023). *Uma outra ciência é possível: Manifesto por uma desaceleração das ciências* (F. S. e Silva, Trad.). Bazar do Tempo.
- Thakur, P., Ballard, S. & Nelson, R. (2013). An overview of Fukushima radionuclides measured in the northern hemisphere. *Science of The Total Environment*, 458–460, 577–613. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.105>
- Tsing, A. L. (2019). *Viver nas ruínas: Paisagens multiespécies no antropoceno*. (T. M. Cardoso et al, trad.) IEB Mil Folhas.
- Tulio, L. D. & Nagalli, A. (2023). Dificuldades na realização da Educação Ambiental nas instituições brasileiras de ensino básico. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 18(4), 362–375. <https://dx.doi.org/10.34024/revbea.2023.v18.14774>
- Valla, D. F., Roquette, D. A. G., Gomes, M. M. & Ferreira, M. S. (2014). Disciplina escolar Ciências: Inovações curriculares nos anos de 1950-1970. *Ciência & Educação (Bauru)*, 20(2), 377–391. <https://dx.doi.org/10.1590/1516-73132014000200008>
- Wallace, M. F. G. (2022). *Reimagining Science Education in the Anthropocene* (J. Bazzul, M. Higgins, & S. Tolbert, Org.). Springer Nature.
- Zaterka, L. & Mocellin, R. (2024). A Química como parte da Cultura: uma reflexão filosófica acerca da imprevisibilidade, da temporalidade e da capilarização socioambiental das entidades químicas. *Revista da Sociedade Brasileira de Ensino de Química*, 5(01), e052423-e052423. <https://dx.doi.org/10.56117/resbenq.2024.v5.e052423>
- Zucco, G. M. & Doty, R. L. (2021). Multiple Chemical Sensitivity. *Brain Sciences*, 12(1), 46. <https://dx.doi.org/10.3390/brainsci12010046>