Química Nova na Escola, artigo no prelo – http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160527



Os elementos da morte: uma abordagem CTSA

Iterlandes Machado Junior e Gabriel Henrique Sperandio

A raiz material de muitos conflitos do século XXI pode ser lida como disputa por elementos da tabela periódica, recursos minerais estratégicos presentes em objetos do cotidiano. No ensino de Química, porém, esses elementos são tratados como símbolos a memorizar, dissociados das dimensões geopolítica, histórica e ambiental que carregam. Este ensaio propõe uma estratégia narrativa que devolve origem e responsabilidade a tais materiais. Ancorado na perspectiva CTSA e nas questões sociocientíficas, conduz o leitor pela química do cobalto (Co), do lítio (Li), do titânio (Ti), das terras raras, do gálio (Ga), do antimônio (Sb), do nióbio (Nb), do urânio (U) e do ferro (Fe), discutindo os custos ambientais da extração e os limites do conhecimento químico, e argumentando que a responsabilidade remete a decisões humanas, não aos elementos. A contribuição é dupla: unir conteúdo e formação cidadã e apresentar uma sequência didática, ainda não aplicada.

▶ abordagem CTSA, recursos minerais estratégicos, narrativa no ensino de química ◀

Recebido em 15/06/2026; aceito em 01/10/2026

Os elementos químicos nos objetos do cotidiano

Olhe para o aparelho com que talvez esteja lendo estas linhas. Dentro dele há cobalto (Co) da lama do Congo, neodímio (Nd) refinado junto a um lago contaminado, gálio (Ga) que pode ter cruzado um embargo, além de lítio (Li), tântalo (Ta), ouro (Au) e terras raras. Nada chegou por acaso: cada elemento percorreu uma cadeia de extração, refino e transporte iniciada muito longe daqui. Ter consciência do que consumimos é conhecer a origem do material: de que solo foi retirado, por quais mãos e a que custo.

Na percepção de muitos estudantes, poucos conteúdos parecem tão áridos quanto a tabela periódica, tratada como uma parede de símbolos a memorizar, um mapa sem território. No entanto, esses mesmos símbolos sustentam o celular, o computador, o carro elétrico e o conforto de quem jamais verá a mina de onde foram extraídos. A proposta deste texto é olhar para os objetos do cotidiano a partir dos elementos que os constituem, devolvendo origem e responsabilidade a artefatos que nos chegam prontos. É uma das ideias centrais de uma educação química voltada para a formação cidadã (Santos e Schnetzler, 2010): conhecer um elemento não se reduz a decorar seu símbolo, mas implica compreender o que se põe em movimento quando ele é extraído, transformado e descartado.

Na percepção de muitos estudantes, poucos conteúdos parecem tão áridos quanto a tabela periódica, tratada como uma parede de símbolos a memorizar, um mapa sem território. No entanto, esses mesmos símbolos sustentam o celular, o computador, o carro elétrico e o conforto de quem jamais verá a mina de onde foram extraídos.

Cabe delimitar gênero e contribuição. Este é um ensaio teórico-propositivo de Ensino de Química, e não um relato de pesquisa empírica, com dupla contribuição: propor uma estratégia narrativa que una conteúdo químico e formação cidadã e apresentar, ao final, uma sequência didática. Um alerta percorre o texto: associar cada elemento a um problema social e a uma leitura ética é recurso narrativo, não relação de causa e efeito, pois as controvérsias são multifatoriais e a moldura ética deve ir à sala como objeto de debate.

Metais, poder e conflito

A história é velha. Desde que a humanidade aprendeu a

Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de Atribuição Creative Commons

fundir metais, há mais de sete mil anos, a mesma fornalha que produziu o arado produziu a espada. Por milênios, porém, o maior derramamento de sangue não veio dos metais úteis, e sim dos inúteis: o ouro (Au) e a prata (Ag), moles demais para ferramentas e quase inertes, foram cobiçados por essa inutilidade luminosa que os tornou símbolo do poder. A prata de Láurion financiou a frota de Atenas; Potosí sustentou um império às custas de milhões de vidas; o ouro de Minas Gerais foi arrancado por mãos acorrentadas (Kean, 2011). O século XXI inverteu a lógica: hoje matamos pelos metais úteis, porque a tecnologia os tornou a nova fonte de poder.

Sete casos, nove elementos

Percorro agora sete casos, que reúnem nove elementos. Em cada um há a química que o professor pode levar para a aula e, atrás dela, a história humana que lhe dá sentido. Os dois últimos retomam elementos já apresentados, para mostrar como esses fios se cruzam.

Uma observação conceitual: elemento, mineral, minério e recurso mineral não são sinônimos. O elemento (o ferro, Fe) define-se pelo número atômico; o mineral é um sólido natural de composição e estrutura cristalina definidas (a hematita, Fe_2O_3); o minério é a rocha da qual se extrai economicamente um elemento; e recurso mineral designa concentrações de aproveitamento viável.

***Caso 1** - O cobalto e o lítio: a bateria de íons de lítio e a mineração no Congo*

Antes de o sol firmar, um menino já está dentro da terra, num poço estreito e sem escora, enchendo um saco de pedra escura. Os compradores não perguntam a idade de quem cava, apenas o teor. Ele não sabe que o metal daquela rocha se chama cobalto.

O cobalto (Co) e o lítio (Li) só se entendem juntos, porque juntos formam o coração da bateria de íons de lítio. Numa das construções de cátodo mais comuns, o lítio está intercalado numa estrutura lamelar de óxido de cobalto; durante a carga, os íons de lítio saem dessa estrutura e migram, pelo eletrólito, até o ânodo de grafite, forma alotrópica do carbono (C), enquanto o cobalto se oxida de mais três a mais quatro, e na descarga tudo se inverte (Atkins e Jones, 2012). Há outras arquiteturas, como os óxidos mistos de níquel (Ni), manganês (Mn) e cobalto (NMC) e o fosfato de ferro e lítio ($LiFePO_4$), livre de cobalto, todas com o mesmo princípio de intercalação. O lítio protagoniza a história por uma razão de tabela periódica: sendo o metal mais leve e o de potencial-padrão de redução mais negativo (cerca de –3,04 V), permite muita energia por unidade de massa. Discutir uma bateria é discutir oxirredução, potencial de eletrodo, intercalação e periodicidade. E a mão do estudante e a do menino seguram pontas opostas do mesmo fio de cobalto. Cerca de 70% a 75% da produção mundial de cobalto vem da República Democrática do Congo (USGS, 2024), parte por mineração artesanal associada ao trabalho infantil, num país dilacerado por um conflito que os próprios minérios financiam (Anistia Internacional, 2016).

***Caso 2** - O titânio: propriedades, aplicações e o conflito na Ucrânia*

O titânio (Ti) leva o nome de uma profecia: foi batizado em homenagem aos Titãs, gigantes derrotados pelos deuses (Kean, 2011). Um metal com o nome dos vencidos abre o capítulo de uma nação que luta para não ser vencida.

A química explica sua importância bélica. O titânio combina alta resistência e baixo peso com notável resistência à corrosão, devida à passivação: a formação espontânea de uma finíssima camada aderente e autorregenerável de dióxido de titânio (TiO_2), quimicamente estável, que isola o metal e interrompe a oxidação, reconstituindo-se na presença de oxigênio se danificada, o mesmo princípio que protege o alumínio (Al) (Atkins e Jones, 2012). É o metal das fuselagens, dos mísseis e dos submarinos, e, em tempos de paz, das próteses que devolvem a marcha a uma pessoa. A ironia é que foi a União Soviética que ergueu na Ucrânia um parque metalúrgico de titânio para sua máquina de guerra. Agora se luta por esse chão, e não só pelo titânio: a Ucrânia detém um dos maiores potenciais de lítio (Li) da Europa, boa parte em território disputado (USGS, 2024).

***Caso 3** - As terras raras: a química da separação e a concentração do refino*

O nome é a maior impropriedade da química. O grupo reúne dezessete elementos: os quinze lantanídeos, do lantânio (La) ao lutécio (Lu), mais o escândio (Sc) e o ítrio (Y). Ocorrem sempre combinados em minerais e várias são mais abundantes na crosta do que o chumbo (Pb). Raras, portanto, não pela escassez, mas pela dificuldade de separá-las umas das outras, por uma razão eletrônica. Nos lantanídeos os elétrons preenchem um subnível 4f interno, blindado pelas camadas externas; como a química de um átomo é governada pelos elétrons mais externos, que quase não mudam ao longo da série, esses elementos comportam-se como gêmeos, quase todos com estado de oxidação mais três, e separá-los exige a extração por solventes e a troca iônica (Lee, 1999; Sousa Filho e Serra, 2014). O mesmo preenchimento do subnível 4f explica a contração lantanídica. A aplicação que move o mundo é o magnetismo: a liga de neodímio, ferro e boro (B), designada NdFeB, produz os ímãs permanentes mais potentes que existem, presentes em motores elétricos, turbinas eólicas e discos rígidos (Martins e Isolani, 2005). Socialmente, o ponto crítico não é a posse do minério, e sim o domínio do refino por uma única nação. As reservas são menos concentradas do que se imagina (a China detém cerca de 48%, o Brasil 23% e a Índia 8%), mas a China responde por quase 70% da mineração e por cerca de 90% do refino mundial, e foi esse monopólio sobre a separação e a purificação que lhe permitiu converter um controle de exportação em arma econômica (USGS, 2024).

***Caso 4** - O gálio e o antimônio: semicondutores, munições e restrições de exportação*

Uma mulher tinha saído para comprar pão, numa cidade pequena perto da linha de frente, quando o céu, que estava limpo, deixou de estar. O que desceu sobre a feira era do tamanho

de um pássaro e era feito de dois elementos. Um a encontrou; o outro a matou. O primeiro é o gálio (Ga). Combinado ao nitrogênio (N) ou ao arsênio (As), forma semicondutores com largura de banda proibida maior que a do silício (Si), que operam em altas frequências e potências: é o coração dos radares, dos sistemas de orientação e dos sensores que enxergam no escuro (Atkins e Jones, 2012). O segundo é o antimônio (Sb), metaloide que endurece o chumbo dos projéteis, compõe a espoleta e atua como sinergista em retardantes de chama. São, em sentido literal, elementos da arma.

A China responde por cerca de metade da produção mundial de antimônio (USGS, 2024) e, depois de impor restrições de exportação, viu o preço do metal, na avaliação da Fastmarkets para o grau II em Roterdã, saltar de cerca de US$ 22 mil para mais de US$ 50 mil por tonelada em um ano (Fastmarkets, 2025). Desde a invasão em larga escala de fevereiro de 2022, o Alto Comissariado da ONU para os Direitos Humanos verificou, até o fim de 2025, mais de 12,6 mil mortes de civis na Ucrânia, número que considera subestimado (OHCHR, 2026). O gálio é o olho que mira; o antimônio, o golpe que rasga.

***Caso 5** - O nióbio: supercondutividade, microligas de aço e soberania mineral*

Termino em casa: o Brasil detém cerca de 90% da produção mundial de nióbio (USGS, 2024), e poucos estudantes sabem que pisam sobre o quase monopólio de um elemento estratégico. É um metal de transição refratário, com duas vocações notáveis. Ligas de nióbio (Nb) e titânio ou de nióbio e estanho (Sn) são supercondutoras do tipo II: abaixo de uma temperatura crítica a resistência elétrica se anula e, por admitirem penetração parcial do campo em estado misto, mantêm a supercondutividade sob campos intensos, o que as torna as bobinas de aparelhos de ressonância magnética e de aceleradores de partículas; e adições mínimas de nióbio formam carbonetos e nitretos que refinam o grão do aço (Lee, 1999). Que um país periférico detenha esse quase monopólio e ainda exporte o minério quase bruto é ponto de partida ideal para discutir soberania e cadeia de valor.

[...] o Brasil detém cerca de 90% da produção mundial de nióbio (USGS, 2024), e poucos estudantes sabem que pisam sobre o quase monopólio de um elemento estratégico. É um metal de transição refratário, com duas vocações notáveis. Ligas de nióbio (Nb) e titânio ou de nióbio e estanho (Sn) são supercondutoras do tipo II [...]

***Caso 6** - A Groenlândia: minerais críticos e disputa geopolítica no Ártico*

A Groenlândia, território autônomo do Reino da Dinamarca, habitado majoritariamente pelo povo inuíte, guarda sob o gelo minerais críticos: 25 das 34 matérias-primas assim classificadas pela Comissão Europeia podem ser encontradas na ilha (Reuters, 2025). A província de Gardar, no sul, abriga dois grandes projetos de terras raras fora da China: Kvanefjeld, rico nas terras raras dos ímãs permanentes, mas acompanhado de urânio (CSIS, 2026), e Tanbreez, com terras raras pesadas, gálio, zircônio (Zr) e nióbio (Atlantic Council, 2026). O urânio distingue este caso. Por pertencer aos actinídeos, série iniciada no actínio (Ac), cuja química do subnível 5f guarda analogias com a dos lantanídeos, ainda que o urânio (U) exiba estados de oxidação mais variáveis, ele cristaliza junto às terras raras; sendo radioativo, levou o parlamento groenlandês a aprovar em 2021 uma lei que, ao limitar seu teor no minério, paralisou Kvanefjeld (TECHPOLICY.PRESS, 2026).

O interesse dos Estados Unidos é antigo, mas com motivação renovada. Já em 1867 Washington cogitava comprar a ilha, e em 1946 Truman ofereceu cem milhões de dólares em ouro; a recusa abriu caminho para a base de Thule, hoje Base Espacial de Pituffik (Encyclopaedia Britannica, 2026; NPR, 2025). Antes a ilha valia pela posição no Atlântico Norte; agora vale também pelo subsolo. Em 2025, o governo americano reafirmou o desejo de adquirir o território e de participar de projetos de terras raras, para romper a dependência do quase monopólio chinês (CSIS, 2026; Reuters, 2025). Há ainda uma ironia climática: o degelo que torna urgente a transição energética destrava o acesso aos minerais de que ela depende.

O caso comporta lados legítimos: a segurança econômica e de defesa da potência que cobiça o território; a recusa de um povo que afirma que sua terra não está à venda (Atlantic Council, 2026); a soberania dinamarquesa; o risco ambiental do urânio para quem vive da pesca e da caça; e o potencial da mineração para financiar a autonomia groenlandesa. Há ainda o realismo geológico: o minério levaria mais de uma década e bilhões de dólares para chegar ao mercado e teria, por ora, de ser refinado na China (CSIS, 2026). Propor a compra de um país reduz um território à soma dos elementos de seu subsolo.

***Caso 7** - O ferro: impactos ambientais dos rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho*

Chego ao sétimo caso. Além do custo dos conflitos, há um custo ambiental que recai sobre as comunidades e os ecossistemas de onde esses elementos são arrancados. Para nós, brasileiros, ele tem um elemento, o ferro (Fe), e dois nomes, Mariana e Brumadinho. As duas barragens guardavam rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, e o ferro parece alheio aos elementos de bateria, radar e ímã que percorremos. No entanto, a análise da lama de Brumadinho encontrou, além de alumínio, manganês e titânio, terras raras, gálio e urânio, e a água do rio Paraopeba passou a exceder os limites legais para diversos metais (Vergilio *et al*., 2020). Os mesmos elementos deste ensaio estavam dentro daquele rejeito.

O primeiro golpe veio em 5 de novembro de 2015: a barragem de Fundão, da Samarco (Vale e BHP), rompeu-se e lançou dezenas de milhões de metros cúbicos de rejeito,

que percorreram cerca de 680 km até o oceano e mataram 19 pessoas (Fernandes *et al*., 2016), no maior desastre de barragem de mineração já registrado. O segundo veio em 25 de janeiro de 2019: a Barragem I da Mina do Córrego do Feijão, da Vale, desabou e matou 272 pessoas. Não foi acaso, mas desfecho de decisões: a estrutura fora erguida pelo método a montante, o mais barato e arriscado, e a TÜV SÜD assinou declarações de estabilidade que sabia frágeis (Freitas *et al*., 2019). Dezesseis pessoas viriam a responder criminalmente (MPMG, 2021).

As cifras da reparação são enormes e ainda assim insuficientes: cerca de R$ 37,7 bilhões para Brumadinho em 2021 (Vale, 2021) e cerca de R$ 170 bilhões para Mariana em 2024 (Vale, 2024). Os dois rompimentos reescreveram a regulação brasileira: a Lei Federal 14.066, de 2020, reformou a Política Nacional de Segurança de Barragens e proibiu o método a montante (Brasil, 2020); a lei mineira "Mar de Lama Nunca Mais" endureceu o licenciamento ambiental (Minas Gerais, 2019); e a Lei 14.755, de 2023, criou uma política de direitos para as populações atingidas (Brasil, 2023). Nos fatos, porém, a descaracterização avança devagar e boa parte dos atingidos segue esperando: uma lei escrita no luto vale o que vale a sua fiscalização.

Para o professor de Química, essas tragédias são um laboratório de cidadania. A contaminação do Paraopeba transformou um elemento banal, o ferro, em tema sociocientífico, e experimentos simples e baratos, como a detecção de íons ferro na água por complexação, trazem o desastre para a aula sem renunciar ao rigor (Ventapane e Santos, 2021). É o princípio que percorre o ensaio: ancorar a indignação num conceito químico concreto. E não só o ferro: o refino das terras raras gera resíduos por vezes radioativos, e a extração de lítio em salmouras disputa água com povos originários em regiões áridas.

Ética e direito internacional nos conflitos por recursos minerais

Diante de tanta destruição, é tentador concluir que a guerra não tem moral. A tradição mostra o contrário, e a verdade é pior: a humanidade gastou séculos construindo regras para o pior dos seus cenários. A Teoria da Guerra Justa fixou condições para iniciar um conflito e princípios de conduta, como a distinção e a proporcionalidade (Walzer, 1977), e as Convenções de Genebra definem o crime de guerra e proíbem armas inteiras, inclusive as químicas (Comitê Internacional da Cruz Vermelha, 1949). Daí a ironia: tornamos crime usar a química para fazer a guerra, mas não tornamos crime fazer a guerra para conquistar a química. A matéria é neutra, e o mesmo elemento serve ao implante e ao projétil. As guerras pelos elementos são traições de uma espécie que escreveu a lei e a quebrou por uma tonelada de minério.

As possibilidades e os limites da química

Aqui a interface química e sociedade se faz pergunta direta: por que a química é útil diante de tudo isto? Porque pode muito. A reciclagem e a mineração urbana recuperam cobalto, lítio, terras raras e ouro do lixo eletrônico, hoje uma das maiores jazidas do planeta. A substituição de materiais já oferece cátodos sem cobalto e pesquisa baterias de sódio (Na) e ímãs com menos terras raras. A Química Verde busca refino menos tóxico, e a economia circular projeta o produto para a recuperação de seus elementos. Mas a química é útil também porque reconhece os próprios limites.

A reciclagem esbarra na termodinâmica e na economia: uma vez disperso num dispositivo, separar um elemento custa caro, e as taxas de reciclagem de terras raras permaneceram abaixo de 1% (USGS, 2024). A substituição em geral desloca a dependência para outro elemento. E há um limite que a química não alcança: o motor desses conflitos é econômico e político. Nenhuma rota de síntese dissolve a ganância. A química pode reduzir a demanda e limpar os processos; a decisão de invadir ou repartir pertence a outra esfera. Ensinar isso é ensinar a potência e a humildade da ciência.

A proposta pedagógica: narrativa e abordagem CTSA

A forma deste texto, que prende o leitor com histórias antes de entregar conceitos, é a estratégia que proponho para a sala: ancorar a química rigorosa numa narrativa que importe, no espírito da abordagem CTSA (Santos e Mortimer, 2002; Auler e Bazzo, 2001). De Primo Levi (Levi, 1994) a Sam Kean (Kean, 2011), uma longa tradição mostra que a química ganha sentido quando narrada como história humana. Não é fácil: a abstração do conteúdo, a rapidez com que os dados geopolíticos mudam e a pressão do tempo curricular são dificuldades reais. A elas correspondem alternativas: ancorar cada discussão social num conceito químico concreto, para que o apelo do tema não esvazie o rigor; ensinar o estudante a avaliar fontes (Santos, 2007; Chassot, 2003); e separar o fato do juízo de valor (Ratcliffe e Grace, 2003; Aikenhead, 2006). Como moldura, adotam-se os três momentos pedagógicos (Delizoicov *et al*., 2011).

Convém explicitar a concepção de CTSA adotada, pois a mera presença de temas sociais não a caracteriza. Na vertente assumida (Santos e Mortimer, 2002; Auler e Bazzo, 2001), o conhecimento químico opera como instrumento de leitura e de intervenção sobre problemas reais, do que decorrem três compromissos: (i) a centralidade do conteúdo científico, com cada questão social ancorada em um conceito verificável (a oxirredução na bateria, os orbitais 4f nas terras raras); (ii) a problematização das relações ciência-tecnologia-sociedade-ambiente como teia de fatores em disputa, e não como cadeia linear do elemento ao culpado; e (iii) a tomada de decisão, que não busca veredito predefinido, mas capacita o estudante a posicionar-se de modo fundamentado (Ratcliffe e Grace, 2003; Aikenhead, 2006).

Proposta de sequência didática: inventário do celular e simulação de negociação sobre a Groenlândia

Descrevo a seguir uma sequência didática pensada para a

1ª ou a 2ª série do Ensino Médio, organizada em seis aulas de cerca de cinquenta minutos. Trata-se de proposta ainda não aplicada: não há dados de implementação ou de aprendizagem, desdobramento necessário em trabalhos futuros. Ela articula a bateria do Caso 1 e a Groenlândia do Caso 6 segundo os três momentos pedagógicos (Delizoicov *et al*., 2011).

Objetivos. Espera-se que o estudante (i) identifique elementos estratégicos em objetos do cotidiano; (ii) explique a oxirredução, a intercalação iônica e a periodicidade que fazem funcionar uma bateria de íons de lítio; (iii) relacione extração e refino a impactos sociais e ambientais; e (iv) posicione-se, com argumentos, diante de uma questão sociocientífica, distinguindo o fato do juízo de valor.

Núcleo conceitual. O ensaio percorre conteúdos amplos, mas a sequência não os toma todos como objeto de ensino. Elege-se um único núcleo, a oxirredução aplicada à bateria de íons de lítio, e dele se espera domínio efetivo: identificar as espécies oxidada e reduzida, reconhecer ânodo e cátodo, escrever as semirreações de carga e descarga e justificar, pela posição do lítio na tabela periódica, por que esse metal foi escolhido. Todo o restante orbita esse eixo em nível menor, como apoio ou contexto, conforme o Quadro 1. Lantanídeos, actinídeos e radioatividade não são objeto de estudo sistemático: entram apenas para responder a uma pergunta que o próprio caso levanta, a de porque urânio e terras raras saem juntos do mesmo minério. Mineração, complexação e geopolítica são contexto, e a complexação comparece só como fundamento qualitativo do teste de cor. O critério de corte é único: nenhum conteúdo entra se não for necessário para sustentar um argumento da mesa de negociação.

Adequação à série. Na 2ª série, em que a eletroquímica costuma estar prevista, a sequência serve de introdução ao tema, com as semirreações escritas e o potencial-padrão discutido de modo comparativo. Na 1ª série, o núcleo é mantido em linguagem qualitativa, apoiado na periodicidade já estudada, e suprimem-se os orbitais 4f e 5f, referidos apenas como a razão de esses elementos terem propriedades parecidas. Em ambos os casos se preservam os três momentos e a mesa de negociação, onde o conteúdo se converte em argumento.

Momento 1: Problematização inicial (aula 1). Cada estudante faz o inventário do próprio celular: a partir da ficha técnica ou de busca orientada, lista os elementos que ele contém e responde a três questões: De onde vem cada elemento? Por quais mãos ele passou até chegar às minhas? A que custo social e ambiental ele foi extraído? A pergunta-âncora, na lousa, é a que abre este ensaio: O que há dentro do seu celular? O objetivo não é respondê-las de imediato, mas instalar o incômodo de não saber.

Momento 2: Organização do conhecimento (aulas 2 a 4). Aqui entra a química propriamente dita. Em torno da bateria, trabalham-se oxirredução, eletrodos e periodicidade, com as semirreações de carga e descarga e a pergunta de por que o lítio é o protagonista. Em torno das terras raras e do urânio, trabalham-se os orbitais 4f e 5f e a razão eletrônica de esses elementos andarem juntos no mesmo minério e, portanto, de o refino gerar rejeito radioativo. Fecha o momento a atividade experimental descrita a seguir.

Atividade experimental. A detecção de íons ferro em água por complexação (Ventapane e Santos, 2021) é barata, segura e alinhada à Química Verde, mas sua função não é ilustrativa: é o ponto em que o eixo temático deixa de ser narrativa recebida e passa a ser evidência produzida pelo estudante. Comparam-se três amostras, água de torneira, água de um curso hídrico próximo à escola e uma preparada com solo e material ferruginoso que simula o rejeito, e o reagente revela pela cor a presença do íon. Três consequências a integram ao eixo temático. A primeira é epistêmica: o estudante verifica por conta própria a afirmação, recebida pela imprensa, de que a lama alterou a composição da água do rio (Vergilio *et al*., 2020). A segunda é conceitual: a palavra elemento, categoria abstrata no restante da sequência, torna-se algo detectável por uma reação específica, e é esse raciocínio de identificação que sustenta os laudos invocados nos processos de Mariana e Brumadinho. A terceira prepara o Momento 3: um resultado qualitativo indica presença, não concentração, e não autoriza afirmar que um limite legal foi excedido. Reconhecer essa fronteira é o exercício que se exigirá de cada delegação na mesa, e é a versão de bancada dos limites da química.

Momento 3: Aplicação do conhecimento (aulas 5 e 6). O que se aprendeu é posto à prova numa mesa de negociação sobre a Groenlândia, variante do júri simulado. A situação é definida com precisão, para que a discussão não se dissolva em opinião: o governo groenlandês convoca audiência

Quadro 1. Delimitação do núcleo conceitual da sequência e do nível de aprofundamento esperado em cada camada.

Camada	Conteúdos	Nível de Aprofundamento Esperado	Aulas
Núcleo (aprofundado e avaliado)	Oxirredução e eletroquímica elementar na bateria de íons de lítio; periodicidade como critério de escolha do lítio	Escrever as semirreações, identificar ânodo e cátodo e justificar a escolha do lítio pela tabela periódica. Potencial-padrão em leitura comparativa, sem cálculo de força eletromotriz	2 e 3
Apoio (qualitativo)	Semelhança química dos lantanídeos e dos actinídeos; noção de radioatividade; complexação	Explicar por que urânio e terras raras ocorrem no mesmo minério e por que o refino gera rejeito radioativo. Sem distribuição eletrônica detalhada, equações de decaimento ou meia-vida	4
Contexto (não avaliado como conteúdo químico)	Mineração, cadeia de valor, geopolítica dos minerais críticos e legislação de barragens	Uso de dados de fontes indicadas para sustentar argumentos, distinguindo fato verificável de juízo de valor	1, 5 e 6

pública para decidir se autoriza a reabertura de Kvanefjeld, hoje impedido pelo limite legal de teor de urânio, e sob quais condições. A turma se divide nas cinco delegações do Quadro 2, e três estudantes formam a mesa diretora, que cronometra as falas e cobra a fonte de cada dado. Cada delegação recebe um dossiê de três a cinco documentos, prepara uma ficha de evidência por argumento, com dado, fonte, ano e a marcação de fato ou de juízo de valor, e deve empregar ao menos um argumento químico e um social, econômico ou ambiental. Dado sem fonte é anulado, e qualquer delegação pode contestar o dado de outra apresentando documento em contrário, o que obriga à leitura dos dossiês alheios. Não há veredito imposto nem posição correta atribuída de antemão: cada delegação defende um interesse legítimo e parcial, e o fechamento é uma roda de conversa sobre o que mudou na maneira de cada estudante olhar para o próprio celular.

Fontes disponíveis. Os dossiês reúnem material aberto e deliberadamente variado, para que avaliar a confiabilidade seja parte da tarefa: dados de produção, reservas e reciclagem do USGS (2024); análises geopolíticas da Reuters (2025), do CSIS (2026) e do Atlantic Council (2026); a lei groenlandesa de 2021 sobre o teor de urânio (Techpolicy.press, 2026); o relatório da Anistia Internacional (2016) sobre a cadeia do cobalto; e o artigo de Vergilio *et al*. (2020) sobre os metais da lama de Brumadinho. Somam-se, para o contraditório, materiais de interesse declarado, como comunicados de mineradoras e notas de organizações ambientais e inuítes. Antes do debate, cada delegação classifica suas fontes quanto à origem, à data e ao interesse envolvido, e a mesa pode rejeitar o dado cuja fonte não resista a esse exame.

Avaliação. Avalia-se em três frentes, sem prova única: o inventário individual, a participação na mesa, por rubrica que pontua o uso correto de ao menos um conceito químico do núcleo, a qualidade das fichas de evidência e a distinção entre fato e valor, e um texto final curto em que o estudante toma posição e a justifica. A correção do conceito e a qualidade do argumento pesam tanto quanto a posição defendida.

Articulação com a BNCC. A sequência inscreve-se nas competências específicas 1 e 3 de Ciências da Natureza e suas Tecnologias e mobiliza habilidades identificáveis em cada momento (BRASIL, 2018). O Momento 1 mobiliza a EM13CNT307, sobre propriedades dos materiais e adequação de seu uso, e a EM13CNT303, sobre seleção de fontes confiáveis. O Momento 2 mobiliza a EM13CNT107, sobre previsões qualitativas a respeito de pilhas e baterias, a EM13CNT101, sobre transformações e uso consciente dos recursos, a EM13CNT103, sobre riscos das radiações, exigida pelo urânio, e a EM13CNT301, sobre interpretar resultados experimentais. O Momento 3 mobiliza a EM13CNT304, sobre debater situações controversas distinguindo pontos de vista, a EM13CNT302, sobre promover debates socioambientais, e a EM13CNT309, sobre a dependência dos recursos não renováveis. As discussões sobre descarte de eletrônicos e rejeitos de barragens articulam-se à EM13CNT104 e à EM13CNT306, relativas à toxicidade, riscos e descarte responsável. Na interdisciplinaridade, o caso da Groenlândia aproxima-se da EM13CHS201, sobre a formação de territórios e o papel de diferentes agentes, e da EM13CHS306, sobre os impactos de modelos socioeconômicos no uso dos recursos naturais.

Síntese: dos elementos químicos às decisões humanas

Termino confessando o disfarce que pedi ao leitor para guardar. Você acompanhou um texto que parecia ser sobre química, e não foi disso que falamos. Os elementos eram

Quadro 2: Delegações da mesa de negociação sobre a Groenlândia, interesses em disputa, argumento químico esperado e fontes do dossiê.

Delegação	Quem representa e o que defende	Argumento químico esperado	Fontes do dossiê
Povo inuíte	Associações de pesca e caça e partidos pró-independência; exige consulta prévia e o limite de urânio	O urânio acompanha as terras raras por razões eletrônicas, e o refino gera rejeito radioativo junto à área de pesca	Techpolicy.press (2026); Atlantic Council (2026); notas inuítes
Reino da Dinamarca	Estado responsável pela defesa e pela política externa; busca preservar a autonomia local sem romper com aliados	A distinção entre reserva, mineração e refino: ter o minério não é dominar a separação por solventes e troca iônica	USGS (2024); Reuters (2025)
Estados Unidos	Governo interessado em segurança de suprimento e em reduzir a dependência do refino chinês	A dependência dos ímãs de NdFeB em motores, turbinas e defesa, sem substituto equivalente	CSIS (2026); USGS (2024)
Empresa de mineração	Concessionária que precisa de licença e capital; promete emprego e receita em prazo superior a uma década	O teor de urânio e as rotas de separação, com estimativa de rejeito por tonelada de óxido de terras raras	Comunicados da empresa; USGS (2024); CSIS (2026)
Organização socioambiental	Entidade que monitora impactos da mineração e representa comunidades atingidas	A água consumida na extração de lítio e os metais detectados na lama de barragens	Vergilio et al. (2020); Anistia Internacional (2016)

inocentes. O paralelo que se segue é recurso retórico, interpretação ética, não relação de causa e efeito verificável: o cobalto não enterrou o menino; a ganância o fez. O antimônio não matou a mulher na feira; a crueldade o fez. O urânio não comprou a ilha; a ambição o fez. O ferro não rompeu a barragem; a negligência o fez. Nenhum átomo teve jamais um pingo de vontade. A morte nunca esteve na tabela periódica, e o culpado desta história não tem número atômico.

Retire da tabela os elementos e veja o que sobra por baixo: uma outra tabela, que nenhum laboratório cataloga e que a humanidade refinou por mais tempo do que qualquer metal. O Quadro 3 a resume. A correspondência que ele propõe entre cada caso e um vício humano é leitura interpretativa, não classificação, e convém apresentá-la em aula como tal, separando o fato verificável do juízo de valor.

A cada caso associei o vício humano que, a meu ver, melhor o ilumina, mas cada associação é deliberadamente discutível. Por isso o professor fará bem em devolver o quadro à turma como pergunta, e não como gabarito: trocar os vícios de lugar, recusá-los ou propor outros é o exercício crítico que se quer provocar.

Numa leitura interpretativa, e não como afirmação factual, poder-se-ia dizer que os verdadeiros elementos da morte são humanos: a ganância, o orgulho, a indiferença, a crueldade, a covardia, a ambição e a negligência. Estavam dentro de cada conflito deste texto e dentro de cada um de nós. É por isso que ensinar a química desses elementos pode articular conteúdo e cidadania: ao estudar o que é uma terra rara, o estudante exercita a leitura do mundo que ela movimenta e o reconhecimento do que a ciência pode e não pode fazer. Formar o químico e formar o cidadão podem ser faces de um mesmo processo formativo, hipótese que pesquisas futuras poderão avaliar.

Iterlandes Machado Junior (iterlandes.junior@ufv.br) é licenciado em Química pela Universidade de Uberaba, com especialização em Educação Ambiental pelas Faculdades Integradas de Jacarepaguá, mestre e doutor em Química pela Universidade Federal de Viçosa, com período sanduíche na University of Warwick, junto ao Richard Walton Research Group. Atualmente é técnico-administrativo em Educação na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, Brasil. **Gabriel Henrique Sperandio** (gabriel.sperandio@ufv.br) é bacharel em Química pela Universidade Federal de Juiz de Fora, mestre e doutor em Química pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é professor no CAp-Coluni (Colégio de Aplicação) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, Brasil.

Quadro 3: Correspondência interpretativa entre os elementos químicos abordados e as leituras éticas propostas ao debate em sala.

Elemento	Aspecto Químico Central	Aplicação Estratégica	Problema Social	Elemento Humano
Cobalto (Co) e lítio (Li)	Oxirredução e intercalação iônica	Baterias de íons de lítio	Trabalho infantil e conflito no Congo	Ganância
Titânio (Ti)	Passivação e razão resistência/peso	Aeronáutica, mísseis, próteses	Disputa territorial na Ucrânia	Orgulho
Terras raras	Orbitais 4f e similaridade química	Ímãs permanentes potentes	Monopólio de refino e coerção	Indiferença
Gálio (Ga) e antimônio (Sb)	Semicondutores e ligas metálicas	Radares, sensores e munições	Restrições de exportação e vítimas civis	Crueldade
Nióbio (Nb)	Supercondutividade e microliga de aço	Ressonância magnética e aços	Soberania e exportação bruta	Covardia
Urânio (U)	Radioatividade e série dos actinídeos (5f)	Combustível e armas nucleares; coproduto das terras raras	Disputa pela Groenlândia e rejeitos radioativos	Ambição
Ferro (Fe)	Óxidos de ferro e oxirredução	Siderurgia e aço	Rompimento de barragens (Mariana e Brumadinho)	Negligência

Referências

AIKENHEAD, G. S. *Science education for everyday life: evidence-based practice*. New York: Teachers College Press, 2006.

ANISTIA INTERNACIONAL. *"This is what we die for": Human Rights Abuses in the Democratic Republic of the Congo Power the Global Trade in Cobalt*. Londres: Amnesty International, 2016.

ATKINS, P. W. e JONES, L. *Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ATLANTIC COUNCIL. *Greenland's critical minerals require patient statecraft*. Disponível em: <https://www.atlanticcouncil.org/dispatches/greenlands-critical-minerals-require-patient-statecraft/>, acesso em: jun. 2026.

AULER, D. e BAZZO, W. A. Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2001.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: MEC, 2018.

BRASIL. *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Altera a Lei nº 12.334, de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília: Presidência da República, 2020.

BRASIL. *Lei nº 14.755, de 15 de dezembro de 2023*. Institui a Política Nacional dos Direitos das Populações Atingidas por Barragens. Brasília: Presidência da República, 2023.

CHASSOT, A. *Alfabetização científica: questões e desafios para a educação*. Ijuí: Editora Unijuí, 2003.

COMITÊ INTERNACIONAL DA CRUZ VERMELHA. *As Convenções de Genebra de 12 de agosto de 1949*. Genebra: CICV, 1949.

CSIS. *Greenland, rare earths, and Arctic security*. Washington, DC: Center for Strategic and International Studies. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/greenland-rare-earths-and-arctic-security>, acesso em: jun. 2026.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. e PERNAMBUCO, M. M. *Ensino de ciências: fundamentos e métodos*. São Paulo: Cortez, 2011.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Pituffik Space Base*. Chicago: Encyclopædia Britannica. Disponível em: <https://www.britannica.com/topic/Pituffik-Space-Base>, acesso em: jun. 2026.

FASTMARKETS. *Antimony, MMTA standard grade II, in-whs Rotterdam: avaliação de preço (price assessment)*. Londres: Fastmarkets, 2025.

FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D. C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR., P. M.; GARCIA MILLAN, V. E.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A. e SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Natureza & Conservação*, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.

FREITAS, C. M.; BARCELLOS, C.; ASMUS, C. I. R. F.; SILVA, M. A. e XAVIER, D. R. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e saúde coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 5, e00052519, 2019.

KEAN, S. *A colher que desaparece: e outras histórias verdadeiras de loucura, amor e morte a partir dos elementos químicos*. Rio de Janeiro: Zahar, 2011.

LEE, J. D. *Química inorgânica não tão concisa*. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

LEVI, P. *A tabela periódica*. Rio de Janeiro: Relume-Dumará, 1994.

MARTINS, T. S. e ISOLANI, P. C. Terras raras: aplicações industriais e biológicas. *Química Nova*, v. 28, n. 1, p. 111-117, 2005.

MINAS GERAIS. *Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019*. Institui a política estadual de segurança de barragens. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2019.

MPMG (MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS). *Denúncia criminal relativa ao rompimento da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão (Brumadinho)*. Belo Horizonte: MPMG, 2021.

NPR. *What to know about Pituffik, the only U.S. military base in Greenland*. 2025. Disponível em: <https://www.npr.org/2025/03/26/nx-s1-5341505/greenland-pituffik-space-military-base>, acesso em: jun. 2026.

OHCHR (ALTO COMISSARIADO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA OS DIREITOS HUMANOS). *Ukraine: Civilian Casualty Update*. Genebra: OHCHR, 2026.

RATCLIFFE, M. e GRACE, M. *Science education for citizenship: teaching socio-scientific issues*. Maidenhead: Open University Press, 2003.

REUTERS. *Factbox: Greenland's rich but largely untapped mineral resources*. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/greenlands-rich-largely-untapped-mineral-resources-2025-01-13/>, acesso em: jun. 2026.

SANTOS, W. L. P. Educação científica na perspectiva de letramento como prática social: funções, princípios e desafios. *Revista Brasileira de Educação*, v. 12, n. 36, p. 474-492, 2007.

SANTOS, W. L. P. e MORTIMER, E. F. Uma análise de pressupostos teóricos da abordagem C-T-S (Ciência, Tecnologia e Sociedade) no contexto da educação brasileira. *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 2, n. 2, p. 110-132, 2002.

SANTOS, W. L. P. e SCHNETZLER, R. P. *Educação em química: compromisso com a cidadania*. 4ª ed. Ijuí: Editora Unijuí, 2010.

SOUSA FILHO, P. C. e SERRA, O. A. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. *Química Nova*, v. 37, n. 4, p. 753-760, 2014.

TECHPOLICY.PRESS. *Unpacking greenland's looming technology metals crisis*. Disponível em: <https://www.techpolicy.press/unpacking-greenlands-looming-technology-metals-crisis/>, acesso em: jun. 2026.

USGS. *Mineral commodity summaries 2024*. Reston: U.S. Geological Survey, 2024.

VALE S. A. *Acordo de reparação de Brumadinho firmado com o Estado de Minas Gerais e os órgãos de justiça*. Rio de Janeiro: Vale, 2021.

VALE S. A. *Acordo definitivo para a reparação integral relativa ao rompimento da Barragem de Fundão (Mariana)*. Rio de Janeiro: Vale, 2024.

VENTAPANE, A. L. de S. e SANTOS, P. M. L. Aplicação de princípios de química verde em experimentos didáticos: um reagente de baixo custo e ambientalmente seguro para detecção de íons ferro em água. *Química Nova na Escola*, v. 43, n. 2, p. 201-205, 2021.

VERGILIO, C. dos S.; LACERDA, D.; OLIVEIRA, B. C. V.; SARTORI, E.; CAMPOS, G. M.; PEREIRA, A. L. de S.; AGUIAR, D. B.; SOUZA, T. da S.; ALMEIDA, M. G.; THOMPSON, F. e REZENDE, C. E. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Scientific Reports*, v. 10, 5936, 2020.

WALZER, M. *Just and unjust wars: a moral argument with historical illustrations*. New York: Basic Books, 1977.

Abstract: *The elements of death: an STSE approach.* At their material root, many twenty-first-century conflicts can be read as disputes over periodic-table elements, strategic mineral resources present in everyday objects. In chemistry teaching, however, these elements are treated as symbols to be memorised, divorced from the geopolitical, historical and environmental dimensions they carry. This essay proposes a narrative strategy that restores origin and responsibility to such materials. Grounded in the STSE perspective and in socioscientific issues, it guides the reader through the chemistry of cobalt (Co), lithium (Li), titanium (Ti), the rare earths, gallium (Ga), antimony (Sb), niobium (Nb), uranium (U) and iron (Fe), discussing the environmental costs of extraction and the limits of chemical knowledge, and arguing that responsibility lies in human decisions, not in the elements. The contribution is twofold: to unite content and education for citizenship, and to present a didactic sequence that has not yet been implemented.
Keywords: STSE approach, strategic mineral resources, narrative in chemistry teaching