

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO

EVELYN DE OLIVEIRA ARARIPE

**REFLEXÕES ACERCA DO ENSINO DE QUÍMICA VERDE E
SUSTENTÁVEL A PARTIR DE ESTUDOS DE CASO CONTROVERSOS
E PENSAMENTO SISTÊMICO**

SÃO CARLOS - SP
2025

EVELYN DE OLIVEIRA ARARIPE

**REFLEXÕES ACERCA DO ENSINO DE QUÍMICA VERDE E
SUSTENTÁVEL A PARTIR DE ESTUDOS DE CASO CONTROVERSOS
E PENSAMENTO SISTÊMICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Educação da Universidade Federal de São Carlos para
obtenção do título de Doutora em Educação.

Linha de Pesquisa: Educação em Ciências e
Matemática

Orientadora
Profa. Dra. Dra. Vânia Gomes Zuin Zeidler

SÃO CARLOS - SP
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Educação e Ciências Humanas
Programa de Pós-Graduação em Educação

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Evelyn de Oliveira Araripe, realizada em 25/07/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Dra. Vânia Gomes Zuin Zeidler (UFSCar)

Prof. Dr. Michel Pisa Carnio (UFSCar)

Prof. Dr. Luciane Fernandes de Goes Bazetti (UFSCar)

Profa. Dra. Daniela Cassia Sudan (USP)

Profa. Dra. Caroides Julia Corrêa Gomes (UFBA)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Educação.

*À minha mãe, quem me ensinou sobre o
poder da Educação e quem possibilitou
esse trabalho.*

“Trate bem a Terra. Ela não foi doada a você por seus pais. Ela foi emprestada a você por seus filhos.”¹

¹ Portal Geledés, Provérbios Africanos, 2012. <https://www.geledes.org.br/proverbios-africanos/>

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Dra. Dra. Vânia G. Zuin Zeidler pela orientação, que me ensinou a gostar de Química e a procurar entendê-la como uma ciência estratégica para a transição para sociedades mais sustentáveis.

Aos meus pais, Carlos Alberto Araripe e Cleide Tavares de Oliveira Araripe, pela inspiração como educadores e por sempre me apoiarem na minha jornada.

À minha filha Nelly, que ressignificou a minha vida e me inspirou a seguir com esse projeto. E aos meus companheiros Dominique Chasseriaud e Ben van Impelen, que tornaram o gestar, maternar e pós-graduar ao mesmo tempo uma missão possível.

Aos meus irmãos, familiares e amigos, pelo amor e pela torcida constante. Em especial aos amigos de Lüneburg, Aymara Llanque Zonta, Emanuela e Rafael Weidlich pelos cafés e almoços regados a conselhos e ideias e às amigas do Brasil, Aline Cavalcante e Marília Moschkovich, pelas longas conversas de apoio, incentivo e inspiração.

Aos meus amigos do Grupo de Pesquisa em Química Verde, Sustentabilidade e Educação (GPQV, UFSCar), pelos encontros, trocas, acolhidas e conversas inspiradoras, em especial Mateus Segatto, Caroides Gomes e Rosivânia Andrade.

Aos meus colegas do Instituto de Química Sustentável (INSC) da Universidade de Leuphana, em Lüneburg, na Alemanha agradeço pelo espaço cedido e pelas trocas disponibilizadas, em especial à Karen Kratschmer pelo apoio e paciência com questões burocráticas e à Lotta Hohenk-Danzouma.

Ao Programa de Pós-Graduação em Educação da UFSCar e todo o seu corpo docente que propiciaram muitos momentos de aprendizado.

À Dra. Daniela Cássia Sudan e ao professor Dr. Hylio Laganá Fernandes pelas valiosas contribuições na qualificação.

E à CAPES e Fundação Alexander von Humboldt pelos apoios financeiros, incluindo visitas de campo na Alemanha.

RESUMO

Este trabalho reflete sobre o potencial pedagógico do uso de estudos de caso socioambientais controversos para integrar os princípios da Química Verde (QV) e da Química Sustentável (QS) em cursos universitários de Química, Ciências Ambientais e áreas correlatas. A pesquisa envolveu o desenvolvimento, aplicação e análise de dois estudos de caso (“Infância Plástica” e “Desembalando Hambúrgueres”), criados pela orientadora desse trabalho no âmbito do grupo de pesquisa GPQV, sob sua liderança (UFSCar, Brasil), com o objetivo de provocar reflexão crítica sobre os impactos de produtos cotidianos à luz da sustentabilidade. Com base em observações de sala de aula – nas aulas ministradas no âmbito de 5 módulos voltados à introdução de QV e QS entre 2021 e 2024 –, relatórios reflexivos e análise textual e discursiva foram aplicados. Os resultados obtidos indicam que o uso didático de estudos de caso controversos pode gerar desconforto inicial, mas pode atuar como ferramenta de fomento ao pensamento sistêmico. A análise mostrou que abordagens centradas apenas na substituição de materiais (lógica da QV) tendem a respostas mais técnicas e limitadas, enquanto propostas baseadas na QS emergem quando os estudantes mobilizam visões mais amplas e inter- e transdisciplinares. Observou-se ainda o potencial dessas vivências em inspirar propostas potencialmente aplicáveis ao mundo real. Por fim, os resultados apontam desafios práticos e conceituais, como a noção restrita de “atividade prática” e as dificuldades iniciais de lidar com controvérsias. Esta tese buscou, então, contribuir para a reflexão sobre como a QS pode ser ensinada de forma mais transformadora, destacando a centralidade do pensamento sistêmico na formação de profissionais da área de Química e Ciências Ambientais para enfrentarem os desafios contemporâneos rumo à sustentabilidade.

Palavras-chave: Ensino de Ciências; Ensino de Química Verde e Sustentável; Estudos de Caso Controversos; Pensamento Sistêmico.

ABSTRACT

This work reflects on the pedagogical potential of using controversial socio-environmental case studies to integrate the principles of Green Chemistry (GC) and Sustainable Chemistry (SC) into university courses in Chemistry, Environmental Sciences and related areas. The research involved the development, application, and analysis of two case studies ('Plasticised Childhood' and 'Unpacking Hamburgers'), created by the supervisor of this work within the GPQV research group, under her leadership (UFSCar, Brazil), with the aim of provoking critical reflection on the impacts of everyday products in light of sustainability. Based on classroom observations – in classes taught as part of five modules focused on introducing GC and SC between 2021 and 2024 – reflective reports and textual and discursive analysis were applied. The results obtained indicate that the didactic use of controversial case studies may generate initial discomfort, but can act as a tool to foster systemic thinking. The analysis showed that approaches focused solely on replacing materials (GC logic) tend to elicit more technical and limited responses, while SC-based proposals emerge when students mobilise broader, interdisciplinary and transdisciplinary perspectives. The potential of these experiences to inspire proposals that are potentially applicable to the real world was also observed. Finally, the results point to practical and conceptual challenges, such as the narrow notion of 'practical activity' and the initial difficulties in dealing with controversies. This thesis sought to contribute to the reflection on how SC can be taught in a more transformative way, highlighting the centrality of systemic thinking in the training of professionals of Chemistry and Environmental Sciences to face contemporary challenges towards sustainability.

Keywords: Science Education; Sustainable Chemistry Education; Controversial Case Studies; Systems Thinking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Os 12 Princípios da Química Verde (extraído de (Júnior; Jesus; Júnior, 2022)	21
Figura 2	Modelo de caminho metodológico de pesquisa bibliográfica	39
Figura 3	Modelo de caminho metodológico “Infância Plastificada”	47
Figura 4	Modelo de caminho metodológico “Desembalando Hambúrgueres”	58
Figura 5	Etapas da produção de óleo de soja refinado, proteína de soja concentrada e proteína de soja isolada	62
Figura 6	Relação entre códigos (categorias) no MAXQDA	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características de um bom caso de acordo com Herreid (1998)	36
Tabela 2	Integração de estudos de caso nos cursos da Universidade Leuphana	40
Tabela 3	Análise comparativa do estudo de caso Infância Plástica de acordo com Herreid (1998)	48
Tabela 4	Definição de brinquedos mais verde, saudáveis e sustentáveis	53
Tabela 5	Análise comparativa do estudo de caso "Desembalando Hambúrgues" de acordo com Herreid (1998)	59
Tabela 6	Pontos de discussão do estudo de caso "Desembalando Hambúrgues" e suas reflexões e principais referências.	68
Tabela 7	Relação de participantes por curso e por ano	70
Tabela 8	Quantidade de estudos de caso criados pelos alunos por curso e por ano	70
Tabela 9	Comparação entre Química Verde (QV) e Química Sustentável (QS)	86

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1	<i>Unboxing</i> da boneca L.O.L. Surprise!.	51
Imagem 2	Boneca L.O.L. Surprise! após <i>unboxing</i>	51
Imagem 3	Tabela nutricional e ingredientes de hambúrguer de carne da linha Seara Gourmet	64
Imagem 4	Tabela nutricional e ingredientes de hambúrguer a base de soja da linha Seara	64

LISTA DE SIGLAS

BBP – Ftalato de benzilbutila

BPA – Bisfenol A

BPF – Bisfenol F

BPS – Bisfenol S

CC – Comunidade que Sustenta a Agricultura

COP – Conferência das Partes

CSA – Comunidade que Sustenta a Agricultura

DBP – Ftalato de di-(n-butila)

DEHP – Ftalato de di(2-etilhexila)

DIBP – Ftalato de di-(isobutila)

EC – Educação Climática

ECO-92 – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92)

EDS – Educação para o Desenvolvimento Sustentável

EQS – Educação em Química Sustentável

EQV – Educação em Química Verde

GEE – Gases de Efeito Estufa

GPQV – Grupo de Pesquisa em Química Verde, Sustentabilidade e Educação, PPGQ-UFSCar (2010-2023)

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade

MEC – Ministério da Educação

MMA – Ministério do Meio Ambiente

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PC – Policarbonato

PET – Polietileno Tereftalato

PLA – Ácido Polilático

PNEA – Política Nacional de Educação Ambiental

PP – Polipropileno

PPP – Parceria Público-Privada

PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de Vinila (Cloreto de Polivinila)

QV – Química Verde

QS – Química Sustentável

RSC – Royal Society of Chemistry

SDGs – Sustainable Development Goals (ODS em inglês)

SSI – Integração de Questões Socioambientais

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

WoS – Web of Science

Sumário

1.	Breve introdução	17
2.	Contextualização: Ensino de Ciências, Química e Sustentabilidade	18
2.1	Relevância da Pesquisa.....	24
2.2	Objetivos da Pesquisa	26
2.3	Estrutura da Tese	27
3.	O campo da pesquisa: a Universidade Leuphana	28
4.	Fundamentação teórica.....	29
4.1	Estudos de Caso em Educação.....	30
4.2.	Estudos de Caso em Ensino de Química.....	32
5.	Metodologia.....	37
	Etapa 1: Pesquisa bibliográfica.....	37
	Etapa 2: Elaboração de estudos de caso controversos	39
	Etapa 3: Aplicação, observação e avaliação	41
6.	Estudo de Caso 1: Infância Plastificada	43
6.1.	Introdução ao problema	43
6.2.	Percurso metodológico	46
6.3.	Um ciclo de consumo e descarte insustentável	49
6.4.	A L.O.L. Surprise!: materialidade, marketing e consumo	50
6.5.	Proposição conceitual: brinquedos mais verdes, saudáveis e sustentáveis	52
6.6.	Perspectivas	54
7.	Estudo de Caso 2: Desembalando Hambúrgueres	54
7.1	Percurso metodológico	56
7.2	Produtos alternativos à proteína animal e suas controvérsias.....	61
7.3	Comparando produtos	63
7.4	Impactos dos hambúrgueres vegetais: do cultivo à disposição final.....	65
7.5	Química Verde e Química Sustentável: contribuições para o debate	67
8.	Discussão integrada dos dois estudos de caso propostos	69
8.1	Controvérsia positiva: “isso não é sobre você”	73
8.2	Repensando a prática.....	76

8.3 Do estudo de caso para o mundo real	78
8.4 Química Sustentável só é possível com o pensamento sistêmico	81
8.5 Desafios e limites de implementação	87
9. Conclusões e perspectivas	89
10. Recomendações	93
11. Referências	97
APÊNDICE	112
A. Caminho de Análise e Categorização	112

1. Breve introdução

A química sempre esteve presente em minha vida, ainda que, como muitos, eu a enxergasse como algo distante, restrito a fórmulas e laboratórios. No entanto, ela permeia nosso cotidiano: nos alimentos, nos brinquedos, no ar, nos sistemas naturais e industriais. Ela pode ser problema ou solução — e é esse paradoxo que me conduziu ao campo da Química Sustentável e da Educação. Minha trajetória começou como educadora em projetos sociais com crianças e jovens em São Paulo, onde a contradição entre um discurso de futuro sustentável e práticas cotidianas, especialmente as relacionadas às crises climáticas, me gerou inquietações profundas.

Essas experiências me levaram a questionar o papel da química no mundo contemporâneo e, sobretudo, como ela é ensinada. A mesma ciência e indústria capaz de gerar substâncias nocivas também cria alternativas regenerativas. O desafio não reside na química em si, mas nas escolhas que fazemos ao aplicá-la.

Esta pesquisa busca compreender como o ensino de química pode fomentar um pensamento mais sistêmico, formando profissionais preparados para os desafios da sustentabilidade, com foco em Química Verde e Sustentável. O ensino tradicional de química frequentemente ignora a complexidade dos problemas ambientais e sociais que envolvem essa ciência (Zuin; Kümmerer, 2021). No entanto, para enfrentar as crises do século 21, precisamos de abordagens que integrem o conhecimento químico com reflexões éticas, políticas e ambientais (Eilks; Zuin, 2018; Zuin; Farias; Freitas, 2009).

Esta tese, portanto, não é apenas sobre química sustentável, mas sobre como o ensino tem potencial de transformar nossa relação com o conhecimento científico por meio de estudo de casos e, conseqüentemente, com o mundo ao nosso redor. Se a química está em tudo, então que ela esteja também na solução dos desafios que enfrentamos.

2. Contextualização: Ensino de Ciências, Química e Sustentabilidade

Vivemos em um cenário de múltiplas crises interligadas: climática, ambiental, social e educacional. Essas crises colocam em xeque os modos de vida atuais e evidenciam a urgência de repensar profundamente as formas de produzir, consumir e educar (Santos, 2021). Eventos recentes no Brasil, como as enchentes no Rio Grande do Sul, a seca histórica no Rio Negro e a devastação do Cerrado, ilustram os impactos concretos dessas crises (Globo Reporter, 2024). Ao mesmo tempo, a educação tem sido reiteradamente apontada como um dos pilares para a transformação socioambiental, estando presente em compromissos internacionais como os ODS e o Acordo de Paris, e nas políticas públicas brasileiras desde os anos 1980 (BRASIL, 1981; UNESCO, 2020; UNFCCC, 2015; United Nations, [S.d.]). No entanto, mesmo com avanços legais e institucionais, a prática educativa ainda encontra limites para articular de forma crítica os saberes científicos, os conflitos socioambientais e os desafios contemporâneos (Santos, 2021).

O ensino de Ciências e, em particular, de Química, tem desempenhado papel central na formação de sujeitos capazes de compreender e intervir criticamente nas transformações da sociedade contemporânea. Nos últimos anos, esse campo tem se ampliado para incorporar questões emergentes como justiça climática, transições energéticas, sustentabilidade e complexidade dos sistemas socioambientais (Zuin; Mammino, 2015).

No entanto, os modelos pedagógicos tradicionais ainda predominam em muitos currículos, limitando a capacidade crítica dos estudantes e seu engajamento com problemas reais do mundo (Burmeister; Rauch; Eilks, 2012; Vieira; Leme; Zuin, 2015; Zuin et al., 2021a).

No contexto internacional, diversas iniciativas vêm sendo implementadas para integrar a sustentabilidade ao ensino de Ciências, em especial à Química, com destaque para a incorporação do pensamento sistêmico como competência chave. Na Alemanha, por exemplo, a Década da Educação para o Desenvolvimento Sustentável (2005–2014) proposta pela UNESCO incentivou reformas educacionais que atingiram diretamente o

ensino de Química, exigindo que todos os componentes curriculares contribuíssem para a Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS). No entanto, estudos indicam que professores de Química do ensino médio, embora apresentem atitudes positivas em relação à sustentabilidade, ainda carecem de fundamentação teórica e de propostas pedagógicas robustas para implementar esses temas em sala de aula (Burmeister; Schmidt-Jacob; Eilks, 2013; Zuin; Marques, 2015).

Além disso, a crescente valorização da Química Verde e da Química Sustentável como campos interdisciplinares tem reforçado sua relevância educacional em países europeus. No entanto, embora esses conceitos apresentem grande potencial para aproximar a Química das questões ambientais e sociais contemporâneas, sua inserção curricular ainda é limitada, muitas vezes descolada de abordagens epistemológicas e históricas que possibilitem uma compreensão crítica e integrada dos problemas (Celestino, 2023; UN Environment, 2019).

A Química Verde (QV) é compreendida como um conjunto de princípios voltados à minimização do uso e da geração de substâncias perigosas nos processos químicos, buscando tornar a produção mais segura dos pontos de vista da saúde e do meio ambiente (Anastas; Warner, 1998). Já a Química Sustentável (QS), embora dialogando com os princípios da QV, vai além ao incorporar uma perspectiva sistêmica que considera o ciclo de vida dos produtos, os contextos sociais e econômicos envolvidos, e as implicações éticas das decisões químicas (Zuin et al., 2021a; Zuin; Kümmerer, 2021; Zuin Zeidler, 2023). Enquanto a QV foca principalmente em soluções técnicas e tecnológicas, a QS propõe uma abordagem ampliada, que busca transformar a própria maneira como a química é ensinada e praticada, alinhando-a aos desafios contemporâneos da sustentabilidade.

No Brasil, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) apresenta competências que apontam para a necessidade de uma formação integrada, contextualizada e crítica dos estudantes, embora, na prática, a implementação dessas diretrizes ainda enfrente desafios significativos (Marques et al., 2023; Zuin; Marques, 2015). A Química, em especial, ainda é comumente tratada de forma fragmentada nos cursos de formação

docente, com pouca ênfase nas conexões entre ciência, sociedade e meio ambiente (Parga-Lozano; Pacheco De Carvalho, 2019). O documento das Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de Química (MEC, 2002) já reconhecia, desde sua formulação, a importância de uma formação que promova a “compreensão dos fundamentos científicos e tecnológicos dos processos produtivos” e a “capacidade de atuar com responsabilidade social e ambiental”, mas a operacionalização desses princípios no cotidiano das universidades ainda encontra limites, como mostram diversas análises críticas (Marques et al., 2023; Pitanga, 2016; Sjöström; Eilks; Zuin, 2016).

Diante da complexidade dos desafios contemporâneos, a proposta de articular o ensino de Química com a Educação para a Sustentabilidade² vem ganhando força. Podemos voltar aos anos 1990 quando o conceito de QV começou a ser moldado através de uma série de debates e regulamentações que exigiam atividades químicas com menos resíduos, menos uso de energia e mais segurança para os trabalhadores e para o meio ambiente (Zuin et al., 2021a).

Anastas e Warner (1998) definiram QV como "a utilização de um conjunto de princípios que reduz ou elimina o uso ou geração de substâncias perigosas no design, fabricação e aplicação de produtos químicos" (Anastas; Warner, 1998). Os autores definiram os 12 princípios da Química Verde que servem como indicadores para se analisar e medir o nível de “verde” que um produto, processo ou serviço químico possui. São eles: 1) Prevenção; 2) Economia atômica; 3) Síntese de produtos menos perigosos; 4) Desenvolvimento de produtos seguros; 5) Solventes e auxiliares mais seguros; 6) Incentivo à eficiência energética; 7) Uso de matérias-primas de fonte renovável; 8) Reduzir a formação de derivados; 9) Catálise; 10) Desenvolvimento para degradação; 11) Prevenção à poluição em tempo real; e 12) Química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes.

² A Educação para a Sustentabilidade visa desenvolver competências que promovam mudanças de valores, atitudes e práticas em direção a uma sociedade mais justa, ecológica e economicamente viável. Vai além da mera transmissão de conteúdos, incentivando o pensamento crítico, a ação transformadora e o engajamento cidadão (Sterling, 2001; UNESCO, 2020).

Figura 1: Os 12 Princípios da Química Verde (extraído de JÚNIOR; JESUS; JÚNIOR, 2022)



Paralelamente à QV, surgiu o conceito de Química Sustentável (QS) para trazer uma visão mais ampla sobre como os processos químicos estão relacionados com questões socioambientais. Otto Hutzinger (1999) liderou um debate que definiu QS introduzindo abordagens com limites ecológicos, enquanto a QV é mais focada nos próprios produtos ou processos químicos e em sua viabilidade técnica (Hutzinger, 1999).

A Química Sustentável é um campo relativamente recente, combinando conhecimento de diversas áreas, incluindo as Ciências Sociais, Administração e Educação. Quando discutimos soluções e inovações no setor químico para alcançar maneiras mais sustentáveis de entregar produtos e serviços, estas não são necessariamente soluções oriundas da Química, mas também de novos modelos de negócios, serviços de leasing, estudos de caso e educação (Gomes Zuin, 2014; Rezende; Zuin, 2014; Zuin et al., 2021a).

A incorporação da QV e da QS na educação brasileira ainda enfrenta desafios estruturais e metodológicos. Embora ambas tenham sido reconhecidas como abordagens fundamentais para alinhar a química com os princípios da sustentabilidade, sua inserção nos currículos acadêmicos tem ocorrido de maneira fragmentada e, muitas vezes, restrita a disciplinas isoladas. A ambientalização curricular, entendida como a

integração das questões ambientais aos conteúdos disciplinares, ainda está longe de ser uma realidade consolidada na formação de professores de química no Brasil (Corrêa et al., 2013; Parga-Lozano; Pacheco De Carvalho, 2019; Zuin; Pacca, 2012)

Uma das principais barreiras para a disseminação da QV e QS no ensino é, em geral, a falta de formação específica para os docentes. Estudos mostram que muitos professores universitários de química não possuem conhecimento didático aprofundado sobre esses temas, o que dificulta sua abordagem de maneira integrada e interdisciplinar (Parga Lozano, 2015). Além disso, os currículos de Licenciatura em Química no Brasil frequentemente tratam a química ambiental e a química verde como tópicos periféricos, sem uma abordagem sistemática voltada para a formação de professores capazes de lidar com os desafios da sustentabilidade (Rodrigues De Almeida et al., 2019; Zuin; Pacca, 2009).

Outros desafios apontados por professores e pesquisadores é a ausência ou pequeno acervo relacionados aos materiais didáticos e estratégias de ensino adequadas. A revisão sistemática realizada por Pereira, Lima e Sampaio (2024) mostrou que, apesar do crescimento nas publicações sobre Educação em Química Verde (EQV), os estudos ainda se concentram em experiências pontuais e pouco se discute sobre sua incorporação em nível curricular (Pereira; Lima; Sampaio, 2024). Esse cenário também é visível nos dados analisados por Chkirida, Chanteux e Lu (2024), que apresentam uma comparação entre diferentes países europeus e indicam como a formação contínua de professores e o desenvolvimento de recursos pedagógicos específicos têm sido cruciais para consolidar a presença da sustentabilidade nos cursos de Ciências e Engenharia Química (Chkirida; Chanteux; Lu, 2024).

No ensino superior brasileiro, a fragmentação entre teoria e prática, a compartimentalização dos saberes e a ênfase em conteúdos técnicos ainda dificultam a inserção de abordagens mais integradas e críticas. Há também limitações estruturais, como a carga horária excessiva de disciplinas convencionais, a escassez de formação continuada dos docentes e a cultura de ensino transmissivo, centrado no professor e na memorização de conteúdos (Rodrigues De Almeida et al., 2019; Tozoni-Reis; Campos, 2014; Zandonai et al., 2014). Tais aspectos comprometem a formação de profissionais

aptos a compreender o papel da química nas transformações socioambientais e tecnológicas do mundo atual.

No entanto, há iniciativas que buscam superar essas limitações. A criação da Escola Brasileira de Química Verde, por exemplo, representa um esforço para fortalecer a formação em QV e promover sua aplicação na indústria e na academia (Corrêa; Zuin, 2012; Marques et al., 2023). A própria União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) criou a sua Escola de Verão (*Summer School*) em Química Verde promovendo uma imersão para estudantes em nível de pós-graduação em todo o mundo nos conceitos e práticas da QV e da QS (Chkirida; Chanteux; Lu, 2024). Já a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) criou uma página focada em informação e materiais relevantes para introduzir profissionais do setor químico e de engenharia aos conceitos de QV e QS (OECD, [S.d.]).

Além disso, a experimentação tem sido apontada como uma estratégia pedagógica eficaz para ensinar os princípios da QV, possibilitando que os alunos compreendam sua aplicabilidade em contextos reais. Pesquisas mostram que práticas experimentais alinhadas aos princípios da QV podem incentivar um pensamento mais crítico e reflexivo sobre os impactos ambientais dos processos químicos (Andrade; Zuin, 2021; Eilks; Sjöström; Zuin, 2017; Zuin et al., 2019).

Outro ponto relevante é a necessidade de estratégias pedagógicas inovadoras para tornar a QV e a QS mais acessíveis aos estudantes. O uso de metodologias ativas, como o *Design Thinking*, tem se mostrado promissor ao incentivar a aprendizagem criativa e participativa, permitindo que os alunos explorem problemas reais e busquem soluções inovadoras dentro do campo da química sustentável (Nascimento; Leite, 2024). Essas abordagens podem contribuir significativamente para aproximar a teoria da prática e aumentar o engajamento dos estudantes.

A reforma curricular e a interdisciplinaridade são elementos essenciais para a consolidação da QV e QS na educação brasileira. Em vez de manter a divisão rígida entre as áreas tradicionais da química (analítica, orgânica, inorgânica, físico-química e bioquímica), é necessário integrar os princípios da QV em todas as disciplinas, promovendo uma formação mais holística e alinhada às demandas da sustentabilidade

(Maximiano et al., 2009). Isso exige não apenas uma revisão dos conteúdos programáticos, mas também mudanças na estrutura dos cursos e no planejamento pedagógico dos docentes.

Por fim, a valorização das questões socio-científicas no ensino de química é um aspecto crucial para fortalecer a abordagem da QS. Temas como a poluição ambiental, a transição energética e a economia circular podem ser explorados em sala de aula para conectar os princípios da QV com desafios concretos da sociedade (Araripe; Zuin Zeidler, 2024). A adoção de uma Educação em Química Verde crítica, que vá além da substituição de substâncias tóxicas e inclua discussões sobre justiça ambiental e ética na ciência, pode ser um caminho promissor para transformar a forma como a química é ensinada globalmente (Pitanga, 2016; UN Environment, 2019; Zuin et al., 2021b; Zuin; Kümmerer, 2021).

Nesse íterim, entra o Pensamento Sistêmico, entendido como a capacidade de compreender fenômenos a partir das inter-relações entre seus componentes. Ele é um elemento central para conectar Química e Sustentabilidade. Mais do que analisar partes isoladas, trata-se de reconhecer padrões, ciclos e interdependências nos sistemas naturais, tecnológicos e sociais de forma integrada (Zuin; Kümmerer, 2021). Assim, desenvolver o Pensamento Sistêmico no ensino de Química implica criar oportunidades para que os estudantes relacionem ciência, sociedade e meio ambiente, favorecendo aprendizagens mais críticas e contextualizadas (Sjöström; Eilks; Zuin, 2016).

Dessa forma, embora existam desafios significativos, há também oportunidades concretas para expandir a presença da QV e QS na educação brasileira. O fortalecimento da formação docente, a reformulação curricular e a adoção de metodologias ativas podem contribuir para que a química seja ensinada não apenas como uma ciência da transformação, mas também como uma ciência da regeneração e da sustentabilidade.

2.1 Relevância da Pesquisa

Embora tenhamos atravessado três décadas versando sobre a teoria e a prática de QV e QS, e estas tenham influenciado modificações em alguns currículos acadêmicos e cursos oferecidos, as conexões entre QV e QS com a crise climática ainda não são tão

claras. Considerando que as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) estão concentradas na exploração de petróleo e gás, no uso da terra para agricultura e pecuária (e conseqüentemente nas atividades de desmatamento relacionadas a esses campos) e na produção têxtil (IPCC, 2014), é possível observar que os setores químico e petroquímico têm participação relevante na produção de produtos e serviços para atender às demandas desses setores, tendo participação em todos eles. Reagentes, fertilizantes, corantes, solventes e muitos outros aditivos são necessários para sustentar tais setores, e todos dependem da indústria química (Ritchie, 2020).

Inclusive um dos grandes marcos do movimento ambientalista global é o livro de 1962 “Primavera Silenciosa”, da bióloga norte-americana Rachel Carson, com a sua denúncia ao uso de pesticidas e os seus impactos à natureza e à saúde humana, em especial o Diclorodifeniltricloroetano - DDT ($C_{14}H_9Cl_5$) (Carson, 2021). No próprio âmbito das Nações Unidas (ONU) o único documento a ser ratificado por todos os 197 Estados membro foi o Protocolo de Montreal (1987), que regula a produção e o consumo de cerca de cem produtos químicos feitos pelo ser humano, chamados de substâncias destruidoras da camada de ozônio (UNEP, [S.d.]).

Portanto, é essencial que os cursos de Química e disciplinas subsequentes, como Química Verde, Química Sustentável e cursos relacionados com ciências ambientais e sustentabilidade, repensem e reformulem seus currículos com o objetivo de construir uma geração de profissionais preparados para os desafios deste século. Nesse sentido, os estudos de caso controversos³, utilizados nesta pesquisa, se propõem como ferramentas pedagógicas potentes para a promoção do engajamento crítico, trabalho colaborativo, contextualização e vínculo com a realidade dos estudantes. Ao utilizar estudos de caso como “Infância Plastificada” e “Desembalando Hambúrgueres”, foi possível observar como o debate sobre QS se amplia e se torna mais significativo quando

³ Estudos de caso controversos são aqueles que abordam temas com múltiplas dimensões e perspectivas, frequentemente ligados a dilemas socioambientais ou ético-científicos, promovendo a argumentação, o pensamento crítico e a contextualização do conhecimento. Esse tipo de abordagem permite explorar tensões reais entre ciência, sociedade, economia e meio ambiente, a partir da vivência de situações desafiadoras (Reis; Galvão, 2004; Zeidler et al., 2005).

se conecta com as experiências pessoais e sociais dos alunos, respeitando os princípios da *Bildung* (educação formadora) (Sjöström et al., 2017). Tais experiências convergem com as abordagens de ensino orientadas por problemas socioambientais, capazes de aproximar a ciência das problemáticas cotidianas e, ao mesmo tempo, favorecer uma leitura crítica da realidade (Blatti et al., 2019; Burmeister; Rauch; Eilks, 2012).

Mesmo com os avanços nos marcos legais e nas diretrizes curriculares, ainda é necessário investir no fortalecimento institucional da formação de professores em temáticas como QS, clima, energia e justiça ambiental. Para isso, é essencial que se combinem políticas públicas, recursos pedagógicos adequados e mudanças na cultura institucional das universidades. Também é preciso valorizar a pesquisa em ensino de ciências como campo estratégico para a produção de conhecimento e inovação didática. Como destacam Zuin e Kümmerer (2021), formar profissionais que compreendam as dimensões éticas, políticas e ambientais da Química é uma tarefa urgente e essencial para o enfrentamento dos desafios que definem o presente século.

2.2 *Objetivos da Pesquisa*

Considerando o cenário exposto, esse trabalho busca refletir e avaliar o impacto de abordagens educativas baseadas em estudos de caso socioambientais controversos na aprendizagem de conceitos de Química Verde (QV) e Química Sustentável (QS) em cursos universitários de Química e Ciências Ambientais. A pesquisa busca compreender como a utilização dessas abordagens contribuem para o desenvolvimento do pensamento sistêmico e da formação de futuros profissionais preparados para enfrentar desafios de sustentabilidade.

Já os objetivos específicos da pesquisa são:

1. Implementar estudos de caso socioambientais controversos que contextualizem a química verde e sustentável a partir de uma perspectiva de pensamento sistêmico promovendo a conexão entre ciência, sociedade e sustentabilidade.

2. Analisar as contribuições de estudos de caso socioambientais controversos na promoção de uma aprendizagem significativa⁴ em relação às relações entre química, meio ambiente e sociedade.
3. Investigar as potencialidades e limitações desses estudos de caso na aprendizagem dos estudantes, analisando suas percepções, engajamento e relacionado à compreensão de conceitos de QV e QS, bem como sua capacidade de aplicar esses conceitos na resolução de problemas complexos relacionados à sustentabilidade.
4. Analisar como os estudantes podem desenvolver habilidades associadas ao pensamento sistêmico, observando sua capacidade de conectar diferentes dimensões da química e suas implicações socioambientais, com base na análise dos relatórios e produções resultantes dos estudos de caso.

Considerando os objetivos delineados, esta pesquisa se orienta pela seguinte questão central: “Como o uso de estudos de caso controversos inspirados em cenários do mundo real pode contribuir para a formação de uma educação química baseada no pensamento sistêmico e nos princípios da Química Verde e Sustentável, formando profissionais preparados para enfrentar os desafios socioambientais contemporâneos?”

2.3 Estrutura da Tese

Em relação à estrutura deste trabalho, ao longo desta pesquisa, dois estudos de caso socioambientais controversos foram trabalhados em sala de aula com estudantes de Ciências da Sustentabilidade e de Química Sustentável em níveis de bacharelado, mestrado e MBA, na Universidade Leuphana Lüneburg, Alemanha. Os capítulos subsequentes abordarão o Estado da Arte com o referencial teórico que inspirou esse trabalho, bem como o percurso metodológico para se criar os estudos de caso, trabalharlos em sala de aula e analisa-los. Por fim, o trabalho é concluído com uma discussão geral, seguida pelas conclusões e aprendizados gerados ao longo da pesquisa.

⁴ A aprendizagem significativa, conforme proposto por (Ausubel, 1963), ocorre quando novos conteúdos são incorporados a estruturas cognitivas já existentes de maneira relacional e compreensiva, promovendo a construção de sentido para quem aprende.

3. O campo da pesquisa: a Universidade Leuphana

A escolha da Universidade Leuphana, localizada em Lüneburg, Alemanha, como campo de pesquisa para este doutorado se baseou nas condições oferecidas para o desenvolvimento de trabalhos transdisciplinares. Desde sua reestruturação em 2006, a Leuphana tem se destacado como uma universidade inovadora e comprometida com a sustentabilidade, posicionando-se como uma pioneira entre as instituições de ensino superior alemãs. Essa visão está enraizada em seus princípios orientadores, que integram ideias de humanismo, sustentabilidade e ação prática, criando um ambiente fértil para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a transformação socioambiental (Hobuß et al., 2023; Vilsmaier; Lang, 2015).

Em 2010, a Leuphana foi a primeira universidade da Alemanha a criar uma Faculdade de Sustentabilidade (Vilsmaier; Lang, 2015). Esse marco histórico representa um compromisso institucional profundo com a transformação sustentável, oferecendo um ambiente acadêmico propício à pesquisa interdisciplinar e transdisciplinar. A abordagem educacional da universidade valoriza a criação de espaços de aprendizado que integram diferentes disciplinas e promovem o trabalho colaborativo entre academia e sociedade. No contexto da sustentabilidade, essa interação é fundamental, pois visa a formação de profissionais capazes de enfrentar os desafios complexos do século 21 (Hobuß et al., 2023).

A Leuphana promove a sustentabilidade não apenas como um tema acadêmico, mas como uma prática que permeia toda a universidade. A instituição oferece programas de ensino que abordam essa temática sob diversas perspectivas, incluindo a economia, o meio ambiente e a sociedade. Cursos como o Mestrado em Ciências da Sustentabilidade e o Mestrado em Química Sustentável exemplificam a adoção de uma abordagem sistêmica para a solução de problemas globais (Birdman; Wiek; Lang, 2022; Elschami; Kümmerer, 2020; Vilsmaier; Lang, 2015). A Universidade reconhece a interdependência entre processos químicos e os sistemas socioeconômicos e socioambientais, integrando a química verde, a toxicologia e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) em seus programas educacionais para promover

práticas mais seguras e ecologicamente responsáveis (Elschami; Kümmerer, 2020; Vilsmaier; Lang, 2015).

A pesquisa desenvolvida encontra na Leuphana um espaço ideal; a universidade oferece um cenário acadêmico singular, onde é possível não apenas analisar as implicações práticas da química sustentável, mas também contribuir para a formação de uma nova geração de cientistas e profissionais conscientes dos impactos ambientais de suas escolhas. A Leuphana promove um modelo de ensino baseado na colaboração interdisciplinar e no engajamento com questões socioambientais reais, o que garante que a pesquisa científica tenha relevância prática e impacto positivo na sociedade (Baker-Shelley; Van Zeijl-Rozema; Martens, 2020; Hobuß et al., 2023).

Ao posicionar a sustentabilidade no centro de sua missão institucional, a Leuphana oferece um modelo transformador de ensino e pesquisa, que vai além das fronteiras acadêmicas convencionais, permitindo o desenvolvimento de soluções inovadoras para os desafios globais. Essa postura inovadora no fazer científico e a ênfase na transdisciplinaridade tornaram a Leuphana um local propício para o desenvolvimento da presente pesquisa, que visa contribuir para o avanço da química sustentável no contexto das ciências ambientais e da educação em Ciências.

4. Fundamentação teórica

Os estudos de caso são uma ferramenta relevante na pesquisa científica, especialmente nas ciências sociais e na educação (Freitas et al., 2005). Eles permitem uma análise aprofundada de fenômenos específicos dentro de seus contextos reais, proporcionando uma compreensão mais rica e detalhada dos objetos de estudo. Segundo Gerring (2004), um estudo de caso é definido como um estudo intensivo de uma única unidade com o objetivo de generalizar para um conjunto maior de unidades. Levy (2008) complementa ao afirmar que os estudos de caso são particularmente eficazes para desenvolver explicações causais, testar hipóteses e gerar novas teorias através da observação e análise detalhada de casos individuais.

Além disso, os estudos de caso são utilizados para a construção de teorias. Eles podem servir tanto para a geração de novas hipóteses quanto para a validação de teorias existentes. Flyvbjerg (2006) argumenta que os estudos de caso são essenciais para a aprendizagem contextualizada, pois permitem aos pesquisadores entender melhor os mecanismos subjacentes e as interações dentro de um contexto específico. Essa compreensão pode ser generalizada para outros cenários semelhantes, enriquecendo a teoria existente e contribuindo para o avanço do conhecimento científico.

Os estudos de caso também desempenham um papel crucial na prática educativa. Hamilton e Corbett-Whittier (2013) destacam que o uso de estudos de caso na pesquisa educacional ajuda a conectar teoria e prática, facilitando a aplicação dos conhecimentos adquiridos em situações reais de ensino. Isso é especialmente relevante na formação de professores e na educação para a sustentabilidade, onde é fundamental compreender como os princípios teóricos se traduzem em ações práticas no ambiente de sala de aula. Os estudos de caso fornecem exemplos concretos e aplicáveis que podem ser usados para ilustrar conceitos teóricos e metodologias educativas, tornando o aprendizado mais envolvente e significativo (Hamilton; Corbett-Whittier, 2013).

Por último, os estudos de caso oferecem uma abordagem metodológica flexível e adaptável. Eles podem ser utilizados em diversas fases da pesquisa, desde a exploração inicial até a validação de hipóteses. Essa flexibilidade permite que os pesquisadores ajustem suas metodologias de acordo com as necessidades específicas do estudo, aumentando a robustez e a relevância dos resultados obtidos. Gerring (2017) observa que os estudos de caso são notadamente eficazes para testar proposições teóricas e gerar evidências robustas em contextos não experimentais, o que é fundamental para a pesquisa em ciências sociais e para a formulação de políticas informadas.

4.1 Estudos de Caso em Educação

Não é recente o uso de estudos de caso como ferramenta e método de educar e ensinar (Freitas et al., 2005; Gomes Zuin; De Freitas, 2007). Bonney (2015) destacou a eficácia do método de ensino baseado em estudos de caso para melhorar o desempenho dos alunos e suas percepções sobre os ganhos de aprendizagem. Sua pesquisa

demonstrou que os estudos de caso são significativamente mais eficazes do que discussões em sala de aula e leitura de livros didáticos para promover a compreensão de conceitos biológicos essenciais, como ligações químicas, osmose e difusão, mitose e meiose, e estrutura e replicação do DNA. Além disso, os estudos de caso foram particularmente positivos ao aumentarem as habilidades de comunicação escrita e oral dos alunos, bem como a capacidade de conectar conceitos científicos com aplicações do mundo real. Esses achados sugerem que o uso de estudos de caso pode ser uma interessante abordagem para o ensino de uma variedade de conceitos em cursos de ciências, promovendo um aprendizado mais profundo e contextualizado (Bonney, 2015).

Já Bird e Erickson (2010) exploraram o uso de estudos de caso através de uma abordagem de controvérsia construtiva, que visa engajar os estudantes em debates e discussões críticas sobre temas controversos. Essa proposta não só ajuda os alunos a desenvolverem habilidades de pensamento crítico e resolução de problemas, mas também promove um ambiente de aprendizagem ativo e participativo. Os estudos de caso apresentados permitiram que os alunos observassem múltiplas perspectivas de um problema, ajudando-os a desenvolver uma compreensão mais holística e integrada dos conceitos científicos. A controvérsia construtiva, ao desafiar os estudantes a defender e criticar diferentes pontos de vista, contribuíram para o desenvolvimento de competências argumentativas e analíticas na formação científica (Bird; Erickson, 2010).

Na questão didática Cullen, Richardson e O'Brien (2004) enfatizam o potencial dos estudos de caso empiricamente fundamentados, que são construídos a partir de dados e eventos reais. Esses estudos de caso fornecem um contexto autêntico para a aprendizagem, permitindo que os alunos apliquem teorias científicas a situações do mundo real. Este tipo de abordagem mostrou-se particularmente eficaz em disciplinas de Ciências, pois ajudou a demonstrar a relevância e a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos. Ainda, a utilização de casos reais tornou o aprendizado mais interessante e motivador para os alunos, promovendo um maior engajamento e retenção de conhecimento (Cullen; Richardson; O'Brien, 2004).

Sáez Bondía e Cortés Gracia (2022) mostram como o desenho de estudos de caso podem ser usados em um contexto de pesquisa-ação educacional para melhorar as práticas pedagógicas e o aprendizado dos alunos. Ao documentar e analisar intervenções específicas em ambientes educacionais reais, os estudos de caso forneceram ideias e percepções importantes sobre o impacto de diferentes estratégias de ensino. Este processo reflexivo e iterativo não só apoia o desenvolvimento profissional dos educadores, mas também contribui para a construção de um corpo de conhecimento prático que pode ser compartilhado e replicado em diferentes espaços educacionais (Sáez Bondía; Cortés Gracia, 2022).

A conexão entre ensino e pesquisa através do método de estudo de caso é argumentada por Lapoule e Lynch (2018) que defendem que os estudos de caso servem como uma ponte entre a teoria e a prática, permitindo que os alunos desenvolvam habilidades de pesquisa ao mesmo tempo em que aprendem conteúdos curriculares. A integração de estudos de caso no ensino não só enriquece a experiência de aprendizagem, mas também fomenta uma cultura de investigação e curiosidade científica. Ao trabalhar com casos reais e complexos, os alunos são incentivados a pensar criticamente, formular hipóteses e buscar evidências, habilidades fundamentais para qualquer cientista em formação (Lapoule; Lynch, 2018).

4.2. Estudos de Caso em Ensino de Química

Nos últimos anos, a incorporação de métodos inovadores de ensino tem se tornado cada vez mais crucial no âmbito da Educação em Química Verde (EQV) e da Educação em Química Sustentável (EQS). As abordagens didáticas tradicionais geralmente não conseguem envolver os alunos ou transmitir o conhecimento complexo e interdisciplinar necessário para enfrentar os desafios ambientais modernos.

Por exemplo, Juntunen e Aksela (2014) enfatizam a integração de questões socio-científicas (SSI) no ensino básico de química, propondo modelos pedagógicos que promovem uma compreensão mais holística da sustentabilidade. O estudo deles ressalta

a necessidade de os currículos de química irem além do mero fornecimento de conteúdo, defendendo métodos que aprimorem o pensamento crítico dos alunos e as habilidades de resolução de problemas, conectando conceitos científicos com aplicações no mundo real (Juntunen; Aksela, 2014).

Vários autores já demonstraram que o uso de estudos de caso é uma ferramenta pedagógica eficaz para a exploração de tópicos complexos, incluindo sustentabilidade, economia circular, bioeconomia e crise climática, no contexto dos cursos de QV e QS. Eles argumentam que a utilização de estudos de caso nesses campos para fins educacionais facilita o aprendizado experimental, incentivando estudantes e pesquisadores a se envolverem em investigações abrangentes que geram novas percepções. Já foi demonstrado como a incorporação de estudos de caso aos cursos de QV e QS estimula a criatividade, provoca questionamentos críticos e inspira a busca de soluções diferenciadas (Burmeister; Rauch; Eilks, 2012; Eilks; Zuin, 2018; Günter; Akkuzu; Alpat, 2017; Sjöström; Eilks; Zuin, 2016).

O uso do pensamento sistêmico no ensino de química é outra abordagem promissora, conforme explorado por Paschalidou, Salta e Koulouglotis (2022). A análise de escopo feita pelos autores revela o potencial do pensamento sistêmico para aprimorar a compreensão dos princípios da QV. Ao visualizar os processos químicos por meio de uma lente sistêmica, os alunos podem apreciar a interconexão das reações químicas, o impacto ambiental e as necessidades sociais. Essa estratégia não apenas enriquece a compreensão da química pelos alunos, mas também os equipa com as ferramentas para abordar questões ambientais complexas de forma abrangente (Paschalidou; Salta; Koulouglotis, 2022). Por isso, diferentes autores defendem a integração do pensamento sistêmico nos currículos de química para cultivar uma geração de químicos capazes de resolver problemas de forma inovadora e sustentável (Blatti et al., 2019; Mahaffy et al., 2019; Zuin et al., 2021c).

O pensamento sistêmico representa uma mudança de paradigma na prática da química, permitindo que os profissionais enfrentem desafios complexos relacionados aos princípios da sustentabilidade. Essa abordagem demonstrou benefícios quando aplicada à educação de alunos e futuros educadores de ciências, permitindo que a natureza

interdisciplinar da química seja abordada no contexto da sustentabilidade da Terra e dos sistemas sociais (Blatti et al., 2019; Mahaffy et al., 2019; Zuin et al., 2021c). A importância crescente do pensamento sistêmico em química para a sustentabilidade é evidenciada pelo projeto da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) intitulado “Pensamento sistêmico em química para a sustentabilidade: rumo à 2030 e além (STCS 2030+)”. Esse projeto visa promover a educação nessa área crítica (IUPAC, 2020).

Além disso, a implementação de estudos de caso no ensino de química demonstrou ser um método eficaz para envolver os alunos e aprimorar seus resultados de aprendizagem. De acordo com Bernardi e Pazinato (2022), ao fazer uma revisão sistemática da literatura sobre o assunto, foi possível concluir que o método de estudo de caso promove a aprendizagem ativa ao colocar os alunos em cenários realistas nos quais eles devem aplicar seus conhecimentos para resolver problemas. Para os autores, em diferentes estudos, esse método foi hábil para o desenvolvimento de habilidades de pensamento de ordem superior, como análise crítica e síntese (Bernardi; Pazinato, 2022).

A aplicação prática desses conceitos é também ilustrada por estudos de caso realizados por Zuin et al. (2019). Os autores realizaram uma investigação sobre a geração de resíduos no setor de processamento de cítricos em colaboração com estudantes de engenharia química da UFSCar. O estudo problematizou a geração de resíduos e examinou seu potencial de reutilização, explorando conceitos como biorrefinarias, bioeconomia circular e tecnologias verdes, bem como a disponibilidade de programas de treinamento vocacional voltados para a sustentabilidade. O estudo mostrou que 91% dos participantes relataram um aumento em sua compreensão e interesse em questões de sustentabilidade (Zuin et al., 2019).

Em sua avaliação da influência abrangente da QV no ensino de química, Haack e Hutchison (2016) destacaram as contribuições do campo para a segurança do laboratório, o avanço da infraestrutura e a modernização do currículo. Eles enfatizaram a necessidade imperativa de integrar a QV nos currículos acadêmicos para avançar na pesquisa futura e na inovação industrial, de acordo com as demandas da sociedade por produtos e processos mais sustentáveis (Haack; Hutchison, 2016).

Já Anastas e Zimmerman (2018) apresentaram o argumento de que a QS pode desempenhar um papel fundamental na realização dos ODS, integrando ferramentas de QV em sistemas abrangentes que abordam desafios fundamentais em alimentos, água, pobreza, materiais e capacitação. Bhandari (2018) apresenta uma análise detalhada do potencial dos princípios de QV, como o uso de catalisadores não tóxicos e recursos renováveis, para transformar a agricultura sustentável. Esses princípios têm a capacidade de reduzir os impactos ambientais e promover o desenvolvimento de produtos alimentícios de base biológica.

Um dos avanços significativos no ensino inovador de química é destacado por Wang, Li e He (2018) que discutem a disseminação de iniciativas de QV na China. Esse movimento levou ao desenvolvimento de programas educacionais que combinam princípios químicos tradicionais com práticas sustentáveis. Esses programas são projetados não apenas para educar os alunos sobre o impacto ambiental dos processos químicos, mas também para inculcar um senso de responsabilidade e inovação nos futuros químicos. Ao integrar a QV ao currículo, os educadores podem inspirar os alunos a seguir carreiras que priorizem a sustentabilidade, contribuindo assim para um setor mais sensibilizado em relação ao meio ambiente.

À luz dessas considerações, Zuin e Kümmerer (2021) propõem um currículo revisado nas áreas de química e ciências que incentive o desenvolvimento de habilidades de pensamento crítico como meio de promover a transformação social sustentável. Essa abordagem foi projetada para facilitar a geração de novas descobertas e conhecimentos, que, por sua vez, podem informar o desenvolvimento de produtos e processos ambientalmente conscientes e sustentáveis.

Aqui, então, a educação crítica no ensino de ciências emerge como uma proposta estratégica para formar cidadãos capazes de compreender e intervir em desafios socioambientais complexos. Diferente de um ensino tradicional que prioriza a memorização de conceitos e fórmulas, a educação crítica busca desenvolver nos estudantes a capacidade de questionar, analisar e tomar decisões informadas sobre problemas reais que envolvem ciência, tecnologia e sociedade (Burmeister; Rauch; Eilks, 2012). No contexto da QV e da QS, essa abordagem se torna ainda mais relevante, pois

permite que os alunos compreendam o papel da química na sustentabilidade, indo além dos princípios técnicos para explorar as implicações sociais, econômicas e ambientais da ciência química (Anastas; Zimmerman, 2018; Haack; Hutchison, 2016).

Assim, a incorporação de uma educação crítica em ciências na QV e QS representa um avanço significativo na formação de estudantes e profissionais preparados para enfrentar os desafios contemporâneos da crise climática e da sustentabilidade (Zuin et al., 2021c; Zuin; Kümmerer, 2021). O uso de estudos de caso, aliado ao pensamento sistêmico e a abordagens interdisciplinares, pode contribuir para um ensino de química mais crítico, engajador, significativo e transformador.

Portanto, para o desenhos dos estudos de caso que serão apresentados nas próximas sessões, esse trabalho se orientou pelos referências teóricos citados previamente e pelos critérios para a elaboração de estudos de caso propostos por Herreid (1998) (Tabela 1), procurou-se identificar os temas atuais que informam os debates não apenas dentro da comunidade acadêmica, mas também fora dela. Em particular, esse trabalho se concentrou em duas áreas principais: a sustentabilidade dos brinquedos e o nexos entre sustentabilidade, resiliência climática e alimentos. Para exemplificar o debate e facilitar a discussão com os alunos sobre o envolvimento do setor químico na composição de problemas sociais e ambientais e na solução desses desafios, foram selecionados produtos específicos para os dois estudos de caso. Os detalhes de cada estudo de caso serão fornecidos nas seções a seguir.

Tabela 1: Características de um bom caso de acordo com Herreid (1998)

1. Ele conta uma história
2. Ele se concentra em uma questão interessante e estimulante
3. Se passa nos últimos cinco anos
4. Cria empatia com os personagens centrais
5. Inclui citações
6. É relevante para o leitor

7. Deve ter utilidade pedagógica
8. O conflito é provocador
9. Orientador para a tomada de decisão
10. Tem generalidade

Fonte: adaptado de Herreid (1998)

5. Metodologia

Em 2020, durante um período de quatro meses como pesquisadora visitante na Universidade Leuphana de Lüneburg, com apoio da Fundação Alexander von Humboldt, foi possível testar a aplicação de um primeiro estudo de caso no módulo “Recursos, Reciclagem e Economia Circular” do Mestrado Profissional em Química Sustentável. A partir dessa experiência inicial, foi desenvolvido um segundo estudo de caso, aplicado na disciplina “Química Verde”. Esse processo de experimentação sob a responsabilidade da orientadora deste trabalho, à época professora visitante na Universidade Leuphana e responsável pelo desenho e oferta dos módulos supracitados, deu origem ao projeto de doutorado aqui apresentado junto ao PPGE-UFSCar, no Brasil.

A metodologia desta pesquisa foi dividida em três etapas para garantir uma abordagem abrangente para a aplicação e avaliação do uso de estudos de caso controversos no ensino de Química Verde (QV) e Química Sustentável (QS)⁵. São elas 1) Pesquisa bibliográfica (tanto para levantar o referencial teórico em que a pesquisa se baseia, quanto para a criação dos estudos de caso); 2) Implementação dos estudos de caso controversos em si; e 3) Observação e avaliação do uso dos estudos de caso controversos em ambiente de ensino universitário. A seguir, essas etapas metodológicas são detalhadas.

Etapa 1: Pesquisa bibliográfica

O estágio inicial envolveu a realização de uma pesquisa bibliográfica completa para estabelecer uma base sólida baseada em métodos inovadores na Educação em

⁵ Como o campo da pesquisa foi dentro da Universidade Leuphana, na Alemanha, a coleta e análise dos dados seguiram as instruções de ética em pesquisa da própria Universidade.
https://www.leuphana.de/fileadmin/user_upload/forschung/Files/Gremien/2022_English_version_Good_Scientific_Practice.pdf

Ciências, com ênfase especial no uso de estudos de caso, Educação em Química Sustentável e Educação em Química Verde. Essa fase teve como objetivo desenvolver estudos analíticos realizados por pares de áreas correlatas (Grazziotin; Klaus; Pereira, 2022; Ocaña-Fernández; Fuster-Guillén, 2021; Severino, 2021).

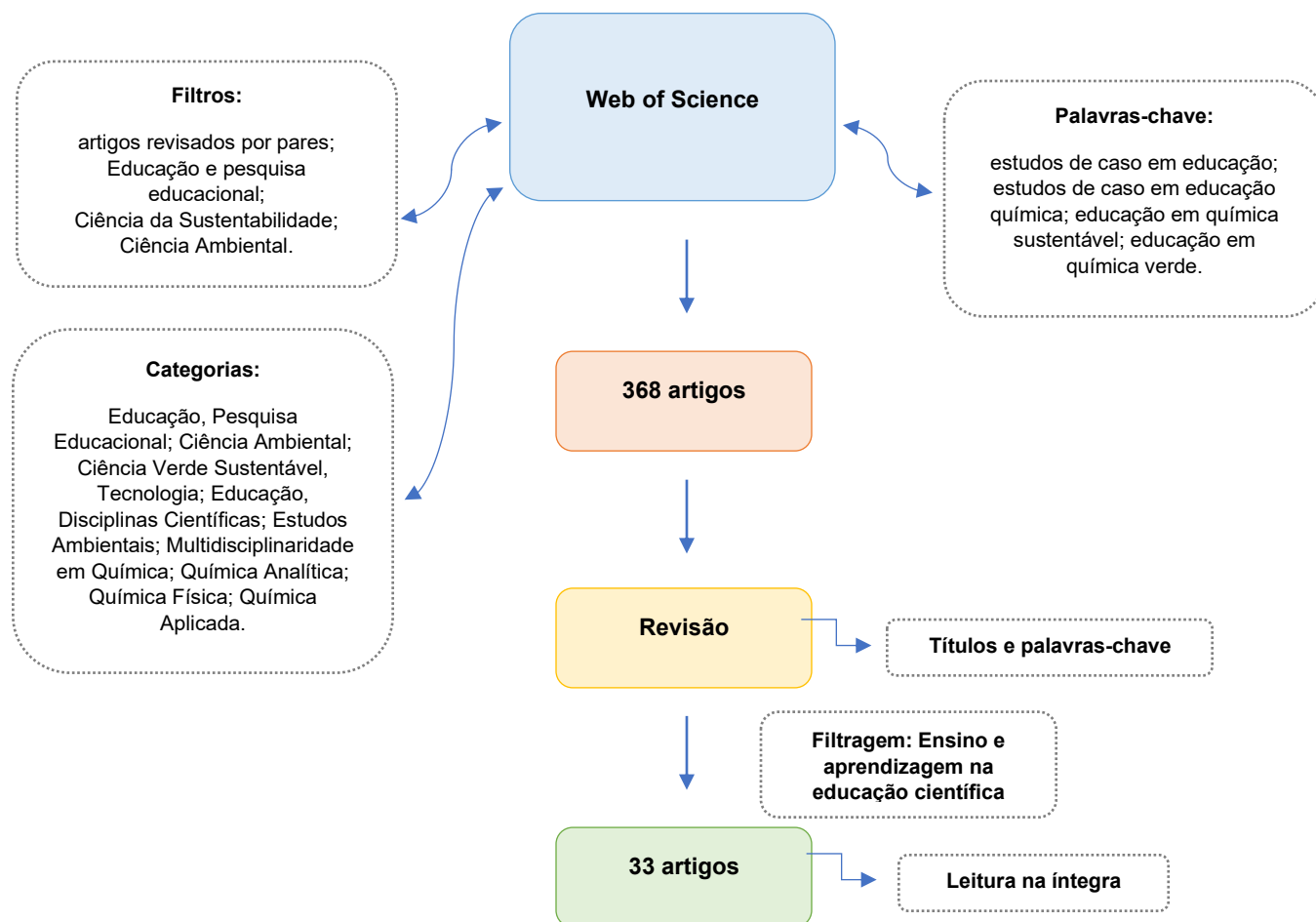
A literatura considerada nesta fase foi obtida do banco de dados Web of Science (WoS) da Clarivate Analytics devido à sua relevância e referências multidisciplinares, abrangendo o período de 2014 a 2024. Foram usadas as seguintes palavras-chave: "estudos de caso em educação", "estudos de caso em educação química", "educação em química sustentável" e "educação em química verde". A pesquisa foi filtrada para incluir apenas artigos revisados por pares e tópicos de citação relevantes, como Educação e Pesquisa Educacional, Ciência da Sustentabilidade e Ciência Ambiental. As categorias de busca incluíram Educação, Pesquisa Educacional, Ciência Ambiental, Ciência Verde Sustentável, Tecnologia, Educação, Disciplinas Científicas, Estudos Ambientais, Química Multidisciplinar, Química Analítica, Química Física e Química Aplicada.

Esse levantamento resultou inicialmente 368 artigos. Os títulos e resumos foram revisados para excluir artigos que se concentravam nos estudos de caso em si e não no uso de estudos de caso para fins educacionais. Além disso, foram excluídos estudos relacionados ao ensino em medicina e enfermagem. Esse processo resultou em uma seleção refinada de 33 artigos diretamente relacionados às práticas de ensino e aprendizagem no ensino de ciências, particularmente no ensino de química, que foram lidos na íntegra e forneceram a base científica para este trabalho. A Figura 2 apresenta um resumo do caminho descrito nesta seção.

Essa pesquisa bibliográfica já respondeu parcialmente a hipótese desse trabalho, sobre como estudos de caso têm se mostrado ferramentas importantes para se trabalhar tópicos de clima e sustentabilidade em cursos de Ciências, especialmente em Química e isso motivou a continuação do trabalho para a criação dos estudos de caso controversos a serem trabalhados no decorrer da pesquisa.

Importante destacar que para cada estudo de caso controverso criado nessa pesquisa também foi conduzida uma pesquisa bibliográfica alinhada com a temática do estudo de caso. Esses caminhos metodológicos serão melhores detalhados nas sessões reservadas ao aprofundamento em cada estudo de caso.

Figura 2: Modelo de caminho metodológico de pesquisa bibliográfica para a construção do referencial teórico da pesquisa



Fonte: elaborado pela autora, 2024.

Etapa 2: Elaboração de estudos de caso controversos

Com o referencial teórico construído, a segunda etapa envolveu a elaboração de dois estudos de caso controversos por membros do grupo de pesquisa GPQV, com base em referências relevantes para a elaboração de estudos de caso para fins educacionais (Gerring, 2017; Hamilton; Corbett-Whittier, 2013; Yin, 2014), são eles: 1) “Infância

Plastificada” (do inglês “*Plasticized Childhood*”) focada na temática de sustentabilidade em brinquedos, e 2) “Desembalando Hambúrgueres” (do inglês, “*Unpacking Burgers*”) como foco na temática de sustentabilidade e resiliência climática em sistemas alimentares. Esses estudos de caso foram integrados em diferentes módulos de cursos na Universidade Leuphana de Lüneburg, Alemanha, organizados na Tabela 2.

O desenho dos estudos de caso combinou fundamentos teóricos da literatura com discussões sociais atuais. Cada estudo de caso foi desenvolvido para abordar um tópico cujo conteúdo fazia parte dos módulos do curso e para isso foram desenvolvidas apresentações em PowerPoint e lista de literatura obrigatória para apoiar discussões aprofundadas com os estudantes. Mais detalhes sobre a literatura e as abordagens usadas em cada estudo de caso serão detalhados nas sessões subsequentes.

Os participantes da pesquisa foram estudantes de bacharelado, mestrado e MBA em cinco diferentes módulos ofertados entre 2021 e 2024 na Leuphana University of Lüneburg (Tabela 2). As turmas eram compostas por estudantes de diferentes nacionalidades, refletindo o caráter internacional do programa, totalizando 111 participantes oriundos da Europa, América Latina, Ásia e África. As aulas foram ministradas em inglês, favorecendo a troca de perspectivas culturais e científicas.

Tabela 2: Integração de estudos de caso nos cursos da Universidade Leuphana⁶

Curso	Programa	Estudo de caso
Química Verde	Mestrado Profissional em Química Sustentável	Desembalando hambúrgueres
Recursos, reciclagem e economia circular	MBA em Gestão da Química Sustentável	Infância plastificada
Química Sustentável 1	Mestrado em Ciência da Sustentabilidade e Mestrado em Ciência da Sustentabilidade Global	Desembalando hambúrgueres
Sistemas alimentares sustentáveis	Curso complementar para estudantes de bacharelado de todas as disciplinas	

⁶ A escolha de qual estudo de caso aplicar em cada disciplina foi feita com base na compatibilidade temática com os conteúdos previstos em cada curso e as respectivas grades curriculares.

--	--	--

Fonte: elaborado pela autora, 2024.

Etapa 3: Aplicação, observação e avaliação

A terceira etapa consistiu em trabalhar os estudos de caso criados no ambiente de ensino para os módulos dos cursos listados na Tabela 2, todos desenhados e ofertados pela orientadora desse trabalho, cujo acesso foi permitido para a condução do presente doutorado sob a sua orientação. Em todos os cursos, após participarem das discussões sobre os estudos de caso apresentados, os estudantes foram orientados a criar os seus próprios estudos de caso dentro da mesma temática. Ao longo dos cursos, desde a etapa de apresentação dos estudos de caso e de acompanhamento dos estudantes no desenho e apresentação de seus próprios estudos de caso, empregou-se o método de observação de sala de aula para monitorar o trabalho feito em sala de aula entre os anos de 2021 e 2024⁷ (DeMonbrun; Finelli; Shekhar, 2015; Finelli et al., 2014; O'Leary, 2020).

O método de observação em sala de aula consiste em criar protocolos de observação das interações que ocorrem no processo de ensino em sala de aula (DeMonbrun; Finelli; Shekhar, 2015; Finelli et al., 2014) e registrá-los em relatórios (O'Leary, 2020) para posterior análise. Este método tem sido empregado em diferentes disciplinas para se analisar interações, comportamentos e motivações de estudantes no ambiente de ensino.

No caso desta pesquisa, após os encontros com os estudantes, foram elaborados relatórios (13 no total) com base nas interações observadas e nas impressões da pesquisadora quanto ao impacto do uso de estudos de caso controversos para o ensino de Química Verde (QV) e Química Sustentável (QS). Ao final de cada curso, também

⁷ Para cada grupo participante, foram produzidos relatórios analíticos pela pesquisadora, elaborados ao longo dos quatro anos de aplicação dos estudos de caso. Esses relatórios consistem em textos reflexivos baseados nas observações de aula, anotações de campo e avaliações das produções escritas dos estudantes, buscando registrar percepções, engajamento e padrões emergentes de aprendizagem. Por conterem trechos descritivos que, mesmo anonimizados, poderiam expor características identificáveis de participantes individuais ou turmas específicas, os relatórios não foram incluídos como apêndice da tese, em respeito aos princípios éticos e à proteção dos envolvidos na pesquisa.

foram avaliadas as produções dos alunos e buscou-se conectá-las com os registros escritos das aulas, a fim de observar se as discussões que ocorreram ao longo do curso dialogavam com as entregas finais dos estudantes.

Com base nesse material empírico, a análise dos dados seguiu os princípios da Análise Textual Discursiva (ATD), conforme proposto por Moraes e Galiuzzi, (2006). Inicialmente, os 13 relatórios foram lidos de forma exaustiva, com o intuito de identificar repetições, tensões e elementos significativos nos registros. A partir dessa leitura, foram elaborados meta-textos interpretativos que permitiram reorganizar os sentidos emergentes, buscando ir além da descrição factual. Em seguida, realizou-se a decomposição dos textos em unidades de sentido, agrupando trechos com temáticas similares ou convergentes. Esses núcleos de sentido deram origem às primeiras categorias provisórias, que foram refinadas progressivamente por meio da constante imersão nos dados e de um movimento dialético entre o todo e as partes. Esse processo de categorização foi orientado por perguntas analíticas vinculadas aos objetivos da pesquisa e ao referencial teórico, assegurando coerência entre os dados empíricos e as dimensões conceituais mobilizadas. O Apêndice A exemplifica o caminho metodológico usados para a criação das unidades de sentido, dos meta-textos, até se chegar às categorias.

Para apoiar esse processo, utilizou-se o software MAXQDA⁸, uma ferramenta especializada para análise qualitativa de dados, que permite codificar textos, organizar e agrupar unidades de sentido, gerar mapas conceituais e cruzar categorias analíticas com as fontes de dados. Os 13 relatórios gerados sobre os cursos foram inseridos no software e submetidos à codificação, permitindo a criação de um sistema de códigos que

⁸ O MAXQDA é um software de análise qualitativa e mista de dados, desenvolvido pela empresa alemã VERBI Software, sediada em Berlim. Lançado inicialmente em 1989 pelo pesquisador Udo Kuckartz, o programa foi projetado para apoiar pesquisas qualitativas em diversas áreas, como ciências sociais, educação, saúde, comunicação e administração. Ele permite a organização, codificação, visualização e interpretação de uma ampla variedade de dados, incluindo entrevistas, grupos focais, textos, áudios, vídeos, imagens e até dados quantitativos. O MAXQDA também oferece ferramentas robustas para análises comparativas, análise de conteúdo, análise temática, análise de discurso, *grounded theory* e integração de métodos qualitativos e quantitativos (métodos mistos). Além disso, a plataforma inclui funcionalidades de visualização como mapas de códigos, relações entre categorias, nuvens de palavras e cronogramas analíticos, facilitando a exploração aprofundada dos dados e a apresentação dos resultados. Devido à sua versatilidade e constante atualização, o MAXQDA tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas mundialmente em pesquisas qualitativas acadêmicas e aplicadas. Informações sobre o software estão no link: <https://www.maxqda.com/pt>

serviu como base para a categorização proposta pela ATD. Esse procedimento resultou na emergência de categorias interpretativas que serão apresentadas na seção “Discussão” desta tese.

A utilização conjunta da observação de sala de aula, da análise textual discursiva e do MAXQDA permitiu não apenas sistematizar e compreender os dados obtidos ao longo dos cursos, mas também reconstruir sentidos e compreender, em profundidade, os efeitos e limites das abordagens educativas desenvolvidas com foco na integração entre QV, QS, pensamento sistêmico e educação crítica em ciências.

6. Estudo de Caso 1: Infância Plastificada

6.1. Introdução ao problema

A presença dos plásticos no cotidiano é uma das marcas mais expressivas da sociedade contemporânea. A durabilidade, leveza, versatilidade e o baixo custo de produção transformaram os polímeros sintéticos em materiais centrais para as indústrias de bens de consumo. No entanto, esse protagonismo vem acompanhado de sérias implicações ambientais e de saúde pública, que se tornam especialmente alarmantes quando analisamos o universo infantil. Brinquedos, roupas, chupetas, mamadeiras, utensílios escolares e objetos diversos são majoritariamente compostos por plásticos e, muitas vezes, aditivos químicos potencialmente tóxicos (Aurisano et al., 2021; Wang; Qian, 2021).

Estima-se que aproximadamente 90% dos brinquedos comercializados atualmente no mundo sejam feitos de plástico (Zuin; Araripe; Fachina, 2020). Esse dado, embora amplamente citado, revela apenas parte do problema: os impactos desses materiais não se limitam à produção, mas se estendem ao uso, descarte e aos efeitos cumulativos sobre a saúde das crianças e o meio ambiente. Apesar disso, há ainda pouca atenção acadêmica e política direcionada ao setor de brinquedos dentro da agenda da sustentabilidade (Das; Kalita, 2023; Ellsworth-Krebs, 2023).

Em 2020, o Grupo de Pesquisa em Química Verde, Sustentabilidade e Educação da UFSCar (GPQV), em colaboração com o Instituto Alana⁹, desenvolveu um estudo sobre os efeitos dos brinquedos de plástico na saúde e no meio ambiente das crianças¹⁰ (Zuin; Araripe; Fachina, 2020). Esse relatório constituiu a base para o estudo de caso "Infância Plastificada" (*Plasticized Childhood*), que foi projetado para essa pesquisa¹¹.

A maioria dos brinquedos de plástico é fabricada com uma variedade de polímeros, incluindo polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), polipropileno (PP), cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), policarbonato (PC) e tereftalato de polietileno (PET). O LDPE e o PVC são valorizados por sua flexibilidade e alta resistência, enquanto o PP é preferido por sua relação custo-benefício e leveza. No entanto, o PVC é o polímero mais utilizado na fabricação de brinquedos, em grande parte devido à sua versatilidade (Etulain et al., 2011). Os polímeros em questão são derivados de fontes fósseis não renováveis, como o gás natural e o petróleo, o que gera preocupações ambientais significativas. A extração e o processamento dessas matérias-primas resultam na liberação de gases de efeito estufa nocivos, que contribuem para o aquecimento global (Amaroli; Balzani, 2011; Johnsson; Kjärstad; Rootzén, 2019).

Além do impacto ambiental, o uso de aditivos químicos, ou plastificantes, em brinquedos representa um possível risco à saúde. Os plastificantes, como os ftalatos, são frequentemente incorporados ao PVC para melhorar a flexibilidade. No entanto, a exposição excessiva aos ftalatos por inalação, ingestão ou absorção dérmica pode resultar em um espectro de resultados adversos à saúde, incluindo asma, desequilíbrios hormonais, atrasos no desenvolvimento e complicações reprodutivas (Wang; Qian, 2021). Um conjunto substancial de evidências indica que os brinquedos frequentemente

⁹ O Instituto é uma organização da sociedade civil sem fins lucrativos com impacto socioambiental, cuja missão é proteger e promover os direitos das crianças (Instituto Alana, 2024). Mais informações podem ser encontradas em <https://alana.org.br>.

¹⁰ A pesquisa "Infância Plastificada: o impacto da publicidade de brinquedos plásticos para crianças na saúde delas e no meio ambiente" é inédita no mundo por apresentar dados inéditos sobre o efeito do ciclo 'publicidade-desejo-consumo-descarte de brinquedos plásticos'. A pesquisa, lançada em 2020, foi realizada pelo Grupo de Pesquisa em Química Verde, Sustentabilidade e Educação (GPQV) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a pedido do Programa Criança e Consumo do Instituto Alana.

contêm ftalatos, inclusive ftalato de di(2-etilhexila) (DEHP), ftalato de benzilbutila (BBP), ftalato de di-(n-butila) (DBP) e ftalato de di-(isobutila) (DIBP), todos considerados tóxicos (European Chemicals Agency, 2016).

Os riscos à saúde associados aos brinquedos de plástico vão além daqueles referentes aos ftalatos. Os brinquedos fabricados com PC, por exemplo, podem conter bisfenol A (BPA), um composto que comprovadamente causa distúrbios hormonais, inclusive câncer de próstata e de mama (Gao et al., 2015). Apesar da proibição em 2011 do PC à base de BPA em mamadeiras infantis devido aos riscos mencionados acima, outros bisfenóis, incluindo o bisfenol S (BPS) e o bisfenol F (BPF), surgiram, representando ameaças comparáveis à saúde (Jacobson et al., 2019). Além disso, os brinquedos frequentemente contêm outros aditivos prejudiciais, incluindo metais tóxicos como cádmio (Cd), chumbo (Pb) e cromo (Cr). Esses metais podem precipitar distúrbios comportamentais e de aprendizado, doenças do sistema nervoso e dos rins e podem atuar como carcinógenos (Aurisano et al., 2021).

Do ponto de vista ambiental, o descarte de brinquedos de plástico representa uma contribuição significativa para o crescente problema do lixo plástico. A maioria dos brinquedos de plástico não é reciclável devido à composição complexa de seus materiais. Eles incluem uma mistura de vários plásticos, pigmentos, esmaltes, glitter, papel, papelão e metais. A complexidade mencionada acima torna a reciclagem impraticável ou impossível, contribuindo assim para o acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente (Fabris; Freire; Reyes, 2006).

Apesar da implementação de iniciativas destinadas a promover a reciclagem, a questão subjacente da superprodução, do consumo excessivo e do subsequente descarte excessivo continua sem solução. Isso exige uma mudança de foco para a criação de brinquedos que sejam sustentáveis durante todo o seu ciclo de vida (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024; Kümmerer, 2017; Kümmerer; Clark, 2016; Zuin, 2016; Zuin; Araripe; Fachina, 2020).

6.2. *Percurso metodológico*

Este estudo de caso partiu dos princípios da Química Sustentável (QS), considerando impactos sociais, econômicos e ambientais ao longo do ciclo de vida (Hutzinger, 1999; Kümmerer; Clark, 2016). A QS inclui abordagens sistêmicas e transdisciplinares, responsabilidade ética e inovação responsável, sendo especialmente adequada para discutir desafios complexos como o impacto dos brinquedos de plástico.

Além disso, a construção do estudo de caso foi orientada por uma abordagem pedagógica que defende o desenvolvimento da autonomia, do pensamento reflexivo e da formação cidadã dos estudantes. No contexto da educação científica, essa perspectiva busca não apenas ensinar conteúdos conceituais, mas promover o questionamento de práticas insustentáveis e a proposição de alternativas (Sjöström et al., 2017; Zuin et al., 2021c).

Para tanto, foi realizada uma revisão e integração teórico-conceitual-metodológica dos respectivos domínios científicos, juntamente com a coleta e análise crítica de dados, informações e categorias extraídas da literatura científica existente (Grazziotin; Klaus; Pereira, 2022; Ocaña-Fernández; Fuster-Guillén, 2021; Severino, 2021). Essa abordagem abrangeu, em particular, estudos atuais que dialogam sobre os amplos impactos dos brinquedos de plástico e para exemplificar a discussão foi usado como exemplo a boneca L.O.L. Surprise, que em 2017 e 2018 foi o brinquedo mais vendido em todo o mundo e até hoje segue entre as grandes tendências de venda de brinquedos pelo planeta (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024; Zuin; Araripe; Fachina, 2020).

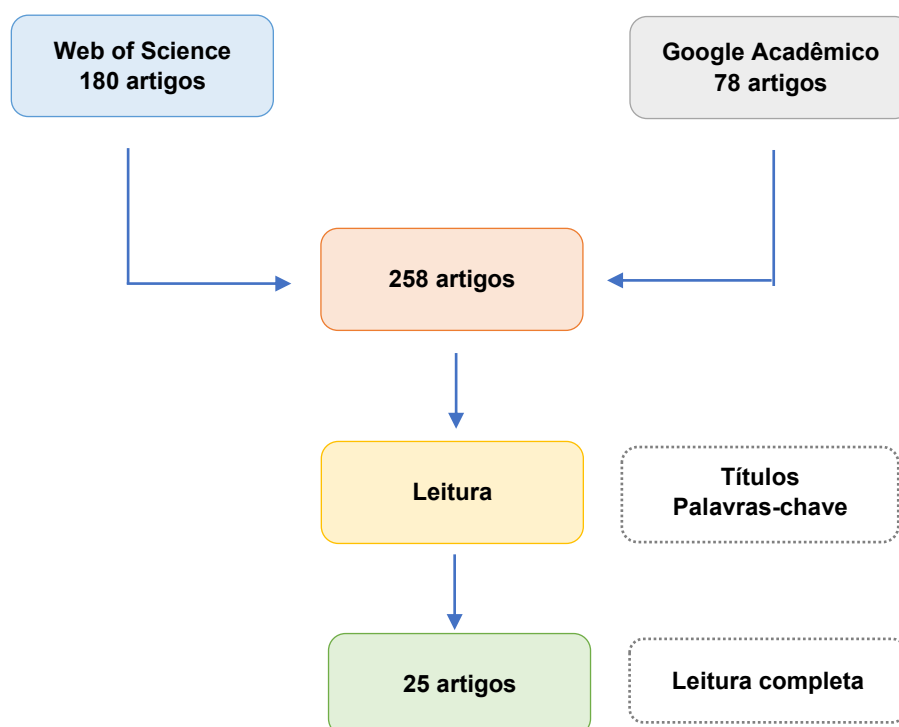
Os trabalhos considerados para o desenho desse estudo de caso foram extraídos do banco de dados Web of Science (WoS) da Clarivate Analytics e o período de consideração abrangendo de 2011 a 2021. As seguintes palavras-chave foram empregadas na pesquisa: *plastic toys*; *sustainable toys*; *green toys*; *L.O.L. Surprise!*; e os filtros: "*todos os campos*"; "*artigo*"; "*acesso aberto*" e publicados nos idiomas Inglês, Português, Alemão e Espanhol.

Um total de 180 artigos foram identificados, mas como o WoS não identificou nenhum artigo sobre a boneca L.O.L Surprise, o Google Scholar também foi utilizado,

identificando 78 artigos com os mesmos critérios. Após analisar os títulos e palavras-chave dos trabalhos (e excluindo trabalhos repetidos), foi feito um filtro para leitura completa apenas dos trabalhos que dialogassem com a proposta do estudo de caso: discutir o conceito de brinquedos verdes, sustentáveis e saudáveis. Esse processo resultou em uma redução da seleção para um conjunto bibliográfico de 25 artigos. A Figura 3 apresenta um resumo do caminho descrito nesta seção.

Após a leitura dos artigos selecionados começou o desenho do estudo de caso controverso “Infância Plastificada” abordando o cenário atual da produção de brinquedos de plástico pelo mundo, os fatores materiais por trás dessa produção (polímeros e aditivos químicos) e os fatores imateriais (estratégias de marketing). A boneca L.O.L. Surprise! Foi detalhada ao longo do estudo para exemplificar a discussão, que culminou em um debate sobre o que seria um brinquedo mais verde, saudável e sustentável pela ótica da Química Sustentável.

Figura 3: Modelo de caminho metodológico “Infância Plastificada”



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

De acordo com os critérios estabelecidos por Herreid (1998) para a concepção de um estudo de caso sólido, a Tabela 3 apresenta uma análise comparativa da concepção do estudo de caso Infância Plastificada com os critérios propostos pelo autor.

Tabela 3: Análise comparativa do estudo de caso Infância Plastificada de acordo com Herreid (1998)

Critérios de Herreid (1998)	Comparação com “Infância Plastificada”
1. Ele conta uma história	Ele narra uma história sobre como os produtos químicos usados em brinquedos de plástico podem colocar em risco o meio ambiente e a saúde das crianças.
2. Ele se concentra em uma questão interessante e estimulante	Envolve debates sobre consumo, saúde infantil, desigualdade socioambiental, desenvolvimento cognitivo e impacto ambiental. É uma questão que mobiliza famílias, educadores, formuladores de políticas públicas e profissionais da saúde, além de permitir reflexões interdisciplinares sobre como a Química pode contribuir para práticas mais sustentáveis.
3. Se passa nos últimos cinco anos	Essa é uma questão atual, especialmente durante a pandemia, quando a venda de brinquedos aumentou consideravelmente em todo o mundo (Kestenbaum, 2021).
4. Cria empatia com os personagens centrais	Ele promove a empatia com personagens centrais, como pais, educadores e organizações voltadas para os padrões de qualidade ambiental e de saúde dos produtos.
5. Inclui citações	Inclui citações de estudos anteriores e também análises publicitárias de brinquedos de plástico.
6. É relevante para o leitor.	É importante para o caminho de aprendizado e as reflexões dos alunos e educadores.
7. Deve ter utilidade pedagógica	Ele está sendo usado para atividades pedagógicas em aulas de Química Verde e Química Sustentável.
8. O conflito é provocador	É uma provocação de conflito sobre como os brinquedos estão sendo processados, produzidos e comercializados nas últimas décadas.

9. Orienta para a tomada de decisão	Orienta para a tomada de decisão sobre como projetar brinquedos mais verdes, saudáveis e sustentáveis (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024).
10. Tem generalidade	Ele tem generalidade e pode continuar sendo usado em diferentes atividades, discussões e estudos

Fonte: adaptado de Herreid (1998) e elaborado pela autora, 2024.

6.3. *Um ciclo de consumo e descarte insustentável*

A maioria dos brinquedos plásticos é composta por uma mistura de materiais – polímeros, colas, tecidos, pigmentos, glitter, partes metálicas – o que dificulta, ou mesmo inviabiliza, sua reciclagem (Fabris; Freire; Reyes, 2006; Kümmerer, 2017). Esse fator, somado à curta vida útil dos brinquedos, muitas vezes descartados poucos meses após a compra, contribui para o aumento da massa de resíduos plásticos de difícil gestão.

A lógica por trás desse descarte acelerado é amplificada por estratégias de marketing voltadas à infância, como os brinquedos colecionáveis, o lançamento de séries limitadas e o estímulo à compra contínua de acessórios e “novidades”. Tais estratégias induzem comportamentos de hiperconsumo, reforçando padrões insustentáveis desde a infância (Brum; Schimidt, 2017; Oliveira; Souza; Araujo, 2019; Sammur et al., 2019) (Brum & Schmidt, 2017; Oliveira et al., 2019; Sammur et al., 2019).

Esse problema é exacerbado quando esses produtos, comercializados como brinquedos, são carregados de estímulos consumistas e promocionais disfarçados de entretenimento e educação, disseminados por influenciadores digitais em plataformas como YouTube e TikTok (Zuin; Araripe; Fachina, 2020). Na era da cultura digital e do aumento da exposição à tela, crianças e adolescentes são consumidores e produtores ativos em um universo culturalmente mediado, criando conteúdo, significado e até mesmo riqueza (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024).

Os vídeos de "unboxing", uma tendência popular que consiste em se filmar e exibir a abertura de produtos e ir compartilhando os detalhes e impressões de quem desembala, joga com o elemento da surpresa e da antecipação, criando uma sensação de diversão. Essas estratégias são projetadas não apenas para influenciar mentes jovens, mas também para evocar sentimentos de satisfação e clímax. As linhas tênues entre publicidade, propaganda e entretenimento, especialmente quando os YouTubers

mirins se tornam o rosto dos produtos, resultam em publicidade sutil, muitas vezes invisível. Essa abordagem manipula efetivamente o público jovem (Brum; Schmidt, 2017; Oliveira; Souza; Araujo, 2019; Zuin; Araripe; Fachina, 2020).

Como resultado, surgiu um novo perfil de crianças e adolescentes, que vivem em um mundo em que compartilhar, notar e receber aprovação são fundamentais. YouTubers, blogueiros e influenciadores digitais moldam identidades, práticas, hábitos, estilos de vida, gostos e valores. Muitas dessas influências são consumistas e insustentáveis, impulsionadas por narrativas que incentivam a aquisição, a imitação e o rápido descarte para se adquirir a próxima novidade (Padilha; Palos; Veiga, 2022; Sammur et al., 2019).

6.4. A L.O.L. Surprise!: materialidade, marketing e consumo

Para aprofundar a análise crítica do consumo de brinquedos plásticos e explorar as dimensões materiais e imateriais desse fenômeno, este estudo de caso utilizou como exemplo central a boneca L.O.L. Surprise! – um dos maiores sucessos de vendas do setor de brinquedos na segunda metade da década de 2010. Lançada em 2016 pela empresa norte-americana MGA Entertainment, a boneca rapidamente se popularizou entre o público infantil por meio da mecânica do unboxing, com várias camadas de embalagens plásticas coloridas que escondem acessórios e pistas sobre o brinquedo final (Zuin; Araripe; Fachina, 2020). Pode-se dizer que a L.O.L. Surprise! foi o primeiro brinquedo desenhado para inspirar crianças a produzirem vídeos de unboxing no YouTube (Lieber, 2020). As Imagens 1 e 2 representam um unboxing do produto feito pela pesquisadora.

O brinquedo é vendido em diferentes versões e séries, com centenas de modelos distintos lançados ao longo dos anos. Muitas dessas versões incluem não apenas bonecas, mas casas, veículos, animais de estimação e outros acessórios que seguem a mesma lógica de embalagem excessiva e estímulo ao colecionismo. A estética vibrante e a narrativa construída em torno da surpresa e do “descobrimento” são fortemente exploradas em conteúdo online, como vídeos de unboxing em plataformas como YouTube e TikTok – frequentemente protagonizados por crianças influenciadoras (Archer; Delmo, 2023; Barbosa Lins De Almeida; Torres, 2020; Feller; Burroughs, 2022).



Imagem 1: *Unboxing* da boneca L.O.L. Surprise!. Acervo pessoal da autora, 2020



Imagem 2: Boneca L.O.L. Surprise! após *unboxing*. Acervo pessoal da autora, 2020

Essa estratégia de marketing baseada em hiperexposição e recompensas instantâneas fortalece uma cultura de consumo precoce, marcada pela fugacidade, pela busca por novidades constantes e pela valorização de produtos “ultra-raros” – elementos que reforçam desigualdades sociais e pressionam famílias a atender expectativas impostas por mecanismos de mídia e publicidade infantil (Brum; Schimidt, 2017; Padilha; Palos; Veiga, 2022; Sammur et al., 2019).

Do ponto de vista material, a boneca L.O.L. Surprise! é composta majoritariamente por plástico, com cinco (modelo básico) ou mais camadas de embalagens plásticas por unidade. A falta de transparência quanto à composição dos materiais – tanto da boneca quanto dos acessórios e embalagens – é um fator crítico. Em consulta realizada ao site do fabricante em 2024, verificou-se que não são divulgadas informações específicas sobre os tipos de polímeros utilizados, tampouco orientações claras sobre descarte ou reciclagem (MGA Entertainment, 2024; (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024). Esse padrão evidencia uma fragilidade em relação à responsabilidade socioambiental da empresa e ao direito dos consumidores à informação (Aurisano et al., 2021).

Embora a MGA tenha anunciado, a partir de 2019, compromissos ambientais como a substituição de embalagens plásticas por papel reciclado e o uso de plásticos de base biológica até 2025, os avanços ainda são incipientes (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024). A linha “L.O.L. Earth Love”, lançada em 2022, trouxe aspectos de caráter ambiental pontuais, mas manteve a lógica do consumo em massa, da surpresa e da

obsolescência simbólica rápida dos brinquedos. A linha Earth Love usava embalagem de papel, acessórios de jardinagem que segundo os fabricantes estimulariam o debate ambiental entre as crianças e seus cuidadores. Mas, ela permaneceu inserida na mesma lógica de estímulo ao consumo e era composta somente por duas bonecas frente aos mais de 160 outros produtos da L.O.L. Surprise ainda feitos de plástico (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024; Fromm, 2022).

Portanto, o uso da L.O.L. Surprise! como exemplo prático nesse estudo de caso controverso serviu para mostrar que ainda que o produto se reinvente e assume compromissos de sustentabilidade, a manutenção das práticas de marketing que estimulam o hiperconsumo de crianças fazem com que o produto possa ser verde pelo ponto de vista material, mas insustentável e insalubre do ponto de vista imaterial. Esse exemplo auxilia na ilustração das diferenças conceituas entre QV e QS, bem como estimula o olhar crítico sobre as práticas por trás dos produtos (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024; Kümmerer; Clark, 2016).

6.5. Proposição conceitual: brinquedos mais verdes, saudáveis e sustentáveis

Conforme discutido por Kümmerer et al. (2021) e Zuin Zeidler (2023), a QS pode ser conceituada como uma abordagem holística e multifacetada da química que visa alinhar a prática da química com os princípios de sustentabilidade. Essa proposta se estende por todo o ciclo de vida dos produtos e processos químicos, abordando seu impacto no meio ambiente, na sociedade e na economia. Ela inclui abordagens holísticas e de precaução, pensamento sistêmico, responsabilidade ética e social, colaboração e transparência, inovação sustentável e responsável, gerenciamento sólido de produtos químicos, circularidade, química verde e perspectiva de ciclo de vida.

Em essência, a QS é um princípio orientador que começa pela avaliação da necessidade de um produto ou processo químico, considerando alternativas não químicas e mais sustentáveis antes mesmo de decidir por uma solução química. Essa abordagem não se concentra apenas nos produtos químicos em si, mas inclui negócios baseados em serviços ou alternativas não químicas para funções específicas, visando a uma contribuição sustentável para a sociedade e o meio ambiente (Kümmerer et al., 2021; Zuin Zeidler, 2023).

Com base nas discussões realizadas ao longo da aplicação do estudo de caso, foi possível consolidar uma proposta conceitual para definir brinquedos mais verdes, saudáveis e sustentáveis sob a ótica da QS e da Educação Crítica. Essa definição parte do entendimento de que o brincar é uma prática essencial ao desenvolvimento infantil e deve ser respeitada em sua complexidade material, simbólica e sociocultural (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024; Kümmerer et al., 2021; Zuin Zeidler, 2023).

Portanto, um brinquedo mais verde, saudável e sustentável deve: 1) ter uma finalidade educativa e formativa que promove e incentiva a imaginação, a criatividade e a liberdade de ação da criança através do jogo; 2) não apresentar quaisquer riscos, tanto para a saúde (incluindo a saúde mental) como para o ambiente, tendo em conta as dimensões materiais e imateriais; 3) ter um ciclo de vida longo que dá prioridade à qualidade, durabilidade e reciclabilidade; 4) consistir idealmente apenas em um tipo de material (ex., polímero), sem complexidade desnecessária; 5) ser biodegradável; e 6) ser fácil de reparar (Das; Kalita, 2023; Karpudewan, 2024; Saini et al., 2023; Tu et al., 2022; Zuin; Araripe; Fachina, 2020).

A Tabela 4 compara a L.O.L. Surprise! com estes indicadores para ilustrar e discutir com os estudantes como a boneca não se adequa a nenhum dos indicadores propostos.

Tabela 4: Definição de brinquedos mais verde, saudáveis e sustentáveis

	Indicadores	Brinquedos mais ecológicos, mais saudáveis e sustentáveis	L.O.L. Surpresa!
1	Objetivo educacional	✓	✗
2	Sem ou minimizados riscos à saúde e ao meio ambiente	✓	✗
3	Ciclo de vida longo, durabilidade e capacidade de reciclagem	✓	✗
4	Um tipo de material (por exemplo, polímero)	✓	✗
5	Biodegradável	✓	✗
6	Fácil de ser consertado	✓	✗

Fonte: Adaptado de FACHINA; ARARIPE; ZEIDLER, 2024.

Essa definição não é fechada, mas sim um ponto de partida para que educadores, pesquisadores, designers e formuladores de políticas públicas possam repensar as práticas e os produtos voltados ao público infantil, à luz dos princípios da sustentabilidade e da justiça social.

6.6. *Perspectivas*

O estudo de caso Infância Plastificada evidenciou que o campo da QS oferece ferramentas conceituais e metodológicas potentes para uma análise crítica dos impactos da cultura de consumo infantil. Ao aproximar os conteúdos da QS e da educação científica de temas concretos e cotidianos, como os brinquedos, é possível promover aprendizagens mais significativas, engajadoras e interdisciplinares.

O estudo apontou a importância de ampliar o debate sobre consumo infantil, materiais sintéticos e os impactos invisibilizados das escolhas cotidianas, não apenas no contexto educacional, mas também na esfera pública. Se queremos construir sociedades sustentáveis, precisamos começar pela infância – mas não qualquer infância: uma infância menos plastificada, mais crítica, criativa e conectada à vida em todas as suas formas. Na sessão “Discussão” será retomado o debate sobre o trabalho em sala de aula com esse estudo de caso, seus resultados e aprendizados, somado com o próximo estudo de caso controverso dessa pesquisa, o “Desembalando Hambúrgueres”.

7. **Estudo de Caso 2: Desembalando Hambúrgueres**

O conceito de “Desembalando Hambúrgueres” (do inglês, "*Unpacking Burgers*") foi derivado da convergência de nossos interesses de pesquisa em QS e sistemas alimentares sustentáveis (Zuin Zeidler, 2024). Em contraste com o estudo de caso "Infância Plastificada", esse estudo de caso controverso não foi iniciado como resultado de uma parceria específica ou de um documento externo. Em vez disso, ele foi impulsionado por nossas observações das tendências do mercado (IPES-Food, 2022) e comportamentos dos estudantes, especialmente o aumento do consumo de proteínas alternativas à carne com a expectativa de que essas escolhas beneficiam significativamente o planeta (Heijnk; Espey; Schuenemann, 2023). Identificamos que esse é um tópico relevante para os estudantes e que dialoga com o comportamento e

interesses deles. Desenvolvemos, portanto, um estudo de caso para explorar o papel da QV e da QS na transição para sistemas alimentares sustentáveis e favoráveis ao clima¹².

Nas últimas décadas, dietas baseadas em vegetais, como o vegetarianismo e o veganismo, têm se expandido globalmente, tanto em termos de adeptos quanto de visibilidade nos mercados alimentares e nas mídias digitais. Segundo dados de busca do Google Trends entre 2004 e 2019, o veganismo e o vegetarianismo lideraram o interesse público entre os diversos tipos de dietas pesquisadas, superando inclusive dietas tradicionais como a mediterrânea ou a paleolítica (Kamiński et al., 2020). Esse interesse é impulsionado por múltiplos fatores, incluindo preocupações com o bem-estar animal, os impactos ambientais da pecuária e os potenciais benefícios para a saúde humana (Bryant, 2019; Subhan; Chan, 2016). No Brasil, observa-se um fenômeno similar: segundo pesquisa do IBOPE (2018), cerca de 14% da população adulta já se identifica como vegetariana, e cresce o número de pessoas interessadas em reduzir o consumo de carne, mesmo que não adotem dietas estritamente vegetarianas (flexitarianismo).

Essa transição alimentar, no entanto, não tem sido acompanhada apenas por uma valorização de alimentos *in natura* como grãos, vegetais e frutas. Paralelamente, houve uma explosão no mercado de produtos a base de plantas (*plant-based*), como hambúrgueres à base de proteínas vegetais que imitam cor, textura e sabor da carne tradicional. Esses produtos atendem a uma demanda híbrida: são buscados não só por vegetarianos e veganos, mas também por onívoros interessados em reduzir seu consumo de carne sem abrir mão de certos hábitos alimentares e sensoriais (Basso et al., 2021; Bryant, 2019). No Brasil, pesquisa recente com vegetarianos e veganos indicou que a maioria não rejeita produtos que simulam carne, e muitos os consomem regularmente, desde que haja transparência na composição, valores acessíveis e compromisso com os princípios éticos e ambientais que motivaram sua mudança alimentar (Basso et al., 2021).

A escolha por produtos análogos à carne também pode ser compreendida a partir de uma lógica de transição gradual e simbólica. Estudos mostram que mudanças alimentares tendem a ocorrer de forma progressiva, e que a familiaridade com alimentos “parecidos” com os anteriores — como hambúrgueres a base de proteínas vegetais — pode reduzir barreiras sociais, culturais e sensoriais (Pfeiler; Egloff, 2018; Waters, 2018). Além disso, ao ocupar o lugar simbólico da carne nos pratos, esses alimentos contribuem para manter práticas culturais (como o churrasco ou o hambúrguer do fim de semana) em formatos que são vendidos como mais sustentáveis e menos impactantes à saúde e ao meio ambiente (Satija et al., 2016, 2017). No entanto, a composição nutricional desses produtos ainda é heterogênea, e pesquisas alertam para a necessidade de distinção entre dietas a base de plantas saudáveis e não saudáveis, pois o simples fato de serem de origem vegetal não garante qualidade nutricional ou baixo impacto ambiental (Satija et al., 2017).

O desenvolvimento do estudo de caso controverso “Desembalando Hambúrgueres” está fundamentado em estruturas teóricas que destacam a necessidade de práticas sustentáveis na produção de alimentos e o potencial da química para enfrentar esses desafios (Béné et al., 2019; FAO, 2018; IPES-Food, 2022; Zuin Zeidler, 2024). O setor de alimentos, especialmente a produção de carne, contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, o desmatamento e a perda de biodiversidade (FAO, 2019). Produtos alternativos à carne, como hambúrgueres à base de vegetais, são promovidos como soluções ecologicamente corretas (IPES-Food, 2022; Zuin et al., 2022). No entanto, esses produtos frequentemente passam por um processamento extenso e envolvem procedimentos químicos complexos, o que gera preocupações sobre sua sustentabilidade (Kumar et al., 2017). Essas controvérsias serão abordadas nas próximas subseções desse capítulo.

7.1 Percurso metodológico

Assim, como o estudo de caso anterior, o estudo “Desembalando Hambúrgueres” se baseou nos princípios da QS (Hutzinger, 1999; Kümmerer; Clark, 2016) e da Educação (Sjöström et al., 2017; Zuin et al., 2021c), mas a abordagem metodológica seguiu um percurso de caráter exploratório, com levantamento documental e bibliográfico

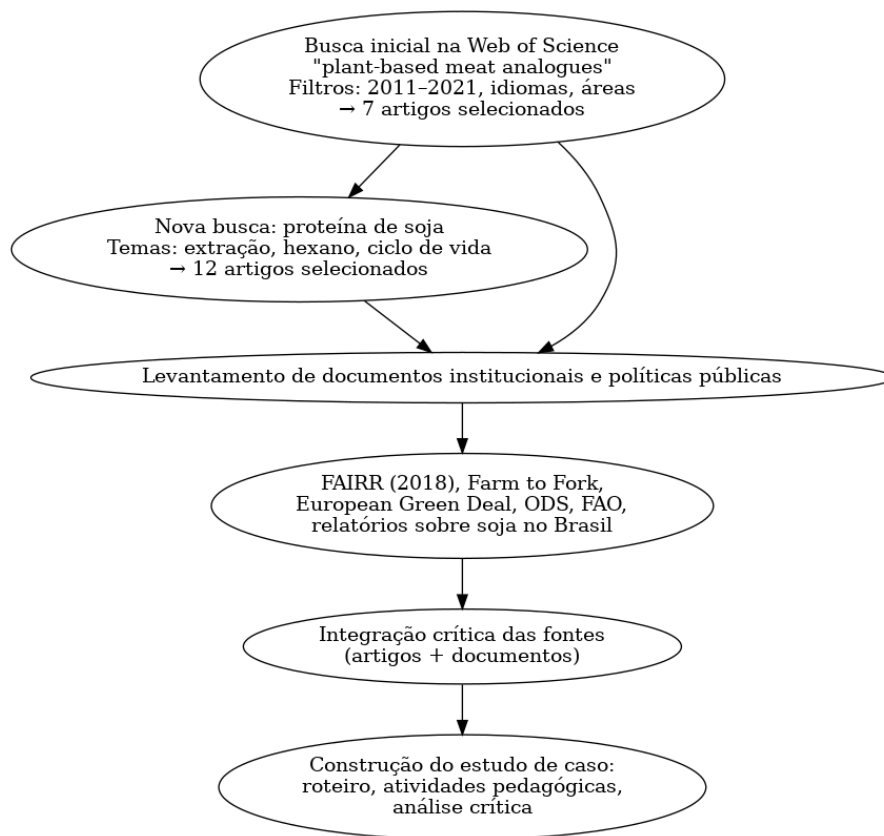
orientado por problema (Gil, 2008). Essa estratégia se mostrou adequada diante da vasta e dispersa literatura sobre o tema das proteínas vegetais (*plant-based meat analogues*), bem como da complexidade dos impactos associados à produção de soja no Brasil, aos processos de industrialização de alimentos ultraprocessados e aos discursos de sustentabilidade promovidos por esses produtos. Em vez de realizar uma revisão sistemática ou exaustiva, optou-se por uma revisão narrativa com curadoria temática, que possibilitou a seleção de fontes estratégicas para fundamentar uma análise crítica interdisciplinar (Snyder, 2019; Souza; Silva; Carvalho, 2010).

O ponto de partida foi uma busca exploratória também na base WoS, utilizando os descritores "*plant-based meat analogues*" com filtros de data (2011–2021), busca apenas por “artigos” e publicados nos idiomas português, inglês, espanhol e alemão. Também foi filtrado para as categorias de “Química Multidisciplinar”; “Ciência de Materiais Multidisciplinar”; “Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável”; e “Ciências Ambientais”. Essa etapa resultou na seleção de sete artigos científicos que abordavam as tecnologias, formulações, impactos ambientais e desafios regulatórios dos substitutos vegetais à carne. Posteriormente, realizou-se uma nova rodada de buscas voltadas especificamente à produção de proteína de soja, suas rotas de extração e o uso de solventes como hexano, o que resultou na identificação e leitura crítica de 12 artigos científicos relacionados, incluindo estudos de engenharia de processos, segurança alimentar e avaliação de ciclo de vida.

Além da literatura acadêmica, incorporaram-se ao levantamento documentos institucionais e políticas públicas reconhecidas internacionalmente, com destaque para o relatório “*Plant-Based Profits*” da FAIRR (2018), que discute riscos e oportunidades do setor de proteínas vegetais sob a ótica de investidores do setor. Também foram analisadas as diretrizes do *European Green Deal* e sua estratégia *Farm to Fork*, ambos documentos centrais para a transição ecológica dos sistemas alimentares na Europa (European Commission, [S.d.]; European Commission, 2019), bem como os ODS da Agenda 2030 da ONU. Complementarmente, foram utilizados documentos disponíveis na biblioteca virtual da FAO, além de relatórios nacionais e internacionais sobre o avanço da soja no Brasil, sua relação com o desmatamento e o uso de agrotóxicos.

Essa abordagem metodológica permitiu a articulação entre dados técnicos, políticos e socioambientais, possibilitando a construção de um estudo de caso que se propõe a problematizar o discurso de sustentabilidade atribuído a produtos ultraprocessados à base de plantas, com foco na realidade brasileira. A análise crítica das controvérsias foi conduzida a partir dos referenciais da Química Sustentável, da Educação Crítica em Ciências e do pensamento sistêmico, oferecendo subsídios para discussões em cursos de Química, Ciências Ambientais e Educação para a Sustentabilidade (Bowen, 2009; Eilks; Zuin, 2018; Zuin et al., 2021c). A Figura 4 ilustra o percurso metodológico adotado para o desenho desse estudo de caso.

Figura 4: Modelo de caminho metodológico “Desembalando Hambúrgueres”



Fonte: elaborado pela autora, 2025.

Esse estudo de caso foi implementado em diferentes cursos da Universidade Leuphana, incluindo o curso de Bacharelado Complementar (aberto a estudantes de todas as disciplinas da Universidade) intitulado "Sistemas Alimentares Sustentáveis" (do

inglês “*Sustainable Food Systems*”) e os programas de Mestrado Profissional em Química Sustentável e em Ciências da Sustentabilidade. O objetivo da atividade foi realizar uma análise crítica dos aspectos de sustentabilidade dos produtos alternativos à carne, com uma comparação de dois produtos (um à base de carne e outro à base de soja) do mesmo fabricante (Imagens 3 e 4). O exercício também exigiu a consideração das controvérsias e das possíveis contribuições da QV e da QS para esse campo. Os alunos tiveram de examinar todo o ciclo de vida dos hambúrgueres à base de vegetais que selecionaram, desde os estágios iniciais da extração da matéria-prima até o descarte final do produto. Em seguida, eles foram encarregados de propor soluções que estivessem alinhadas com os principais aspectos relacionados à química sustentável (KÜMMERER, 2017; ZUIN ZEIDLER, 2023).

De acordo com os critérios estabelecidos por Herreid (1998) para a concepção de um estudo de caso sólido, a Tabela 5 apresenta uma análise comparativa da concepção do estudo de caso "Desembalando Hambúrgueres" com os critérios propostos pelo autor.

Tabela 5: Análise comparativa do estudo de caso "Desembalando Hambúrgueres" de acordo com Herreid (1998)

Critérios de Herreid (1998)	Comparação de hambúrgueres sem embalagem
1. Ele conta uma história	O estudo de caso apresenta um argumento convincente sobre as implicações ambientais e de saúde das alternativas à carne de origem vegetal.
2. Ele se concentra em uma questão interessante e estimulante	Esse assunto é de interesse devido à sua relevância direta para as preocupações ambientais atuais e os comportamentos dos consumidores.
3. Se passa nos últimos cinco anos	O caso está situado no contexto das tendências contemporâneas do mercado e dos resultados de pesquisas, o que o torna altamente pertinente e oportuno.

4. Cria empatia com os personagens centrais	As principais figuras envolvidas neste estudo de caso são consumidores, ativistas ambientais e profissionais que trabalham no setor de alimentos.
5. Inclui citações	O estudo de caso incorpora citações dos principais participantes e especialistas da área, aumentando assim a autenticidade e a profundidade da narrativa.
6. É relevante para o leitor	Tendo em vista o crescente interesse em sistemas alimentares sustentáveis e a proliferação de alternativas à carne no mercado, este estudo de caso é particularmente relevante para estudantes e profissionais envolvidos nas áreas de química, sustentabilidade e ciência dos alimentos.
7. Deve ter utilidade pedagógica	Permite discutir no ambiente educativo temas como o ciclo da soja, monoculturas, uso de agrotóxicos, rastreabilidade de ingredientes, certificações de sustentabilidade, impactos da industrialização de alimentos a base de plantas, além de questões éticas, sociais e econômicas relacionadas à produção e ao consumo de alimentos.
8. O conflito é provocador	O caso é inerentemente provocador de conflitos, pois aborda a natureza controversa das alternativas de carne à base de vegetais.
9. A decisão está forçando	Os alunos devem tomar decisões com relação à sustentabilidade dos hambúrgueres à base de vegetais, propondo soluções alternativas que se alinhem aos princípios de GC e SC.
10. Tem generalidade	O estudo de caso aborda as questões mais amplas de sustentabilidade e processos químicos que podem ser aplicados a vários setores além dos setores químico e alimentício.

Fonte: adaptado de Herreid (1998) e elaborado pela autora, 2024.

7.2 Produtos alternativos à proteína animal e suas controvérsias

A busca por dietas mais sustentáveis e saudáveis impulsionou o crescimento dos chamados produtos à base de plantas, especialmente os substitutos de carne, como os hambúrgueres vegetais. A soja, amplamente cultivada no Brasil, tornou-se o principal insumo proteico dessas alternativas alimentares devido à sua alta disponibilidade e valor nutricional. No entanto, a dependência dessa matéria-prima levanta uma série de controvérsias que vão desde impactos ambientais e sociais até questões relacionadas ao processamento industrial dos produtos finais.

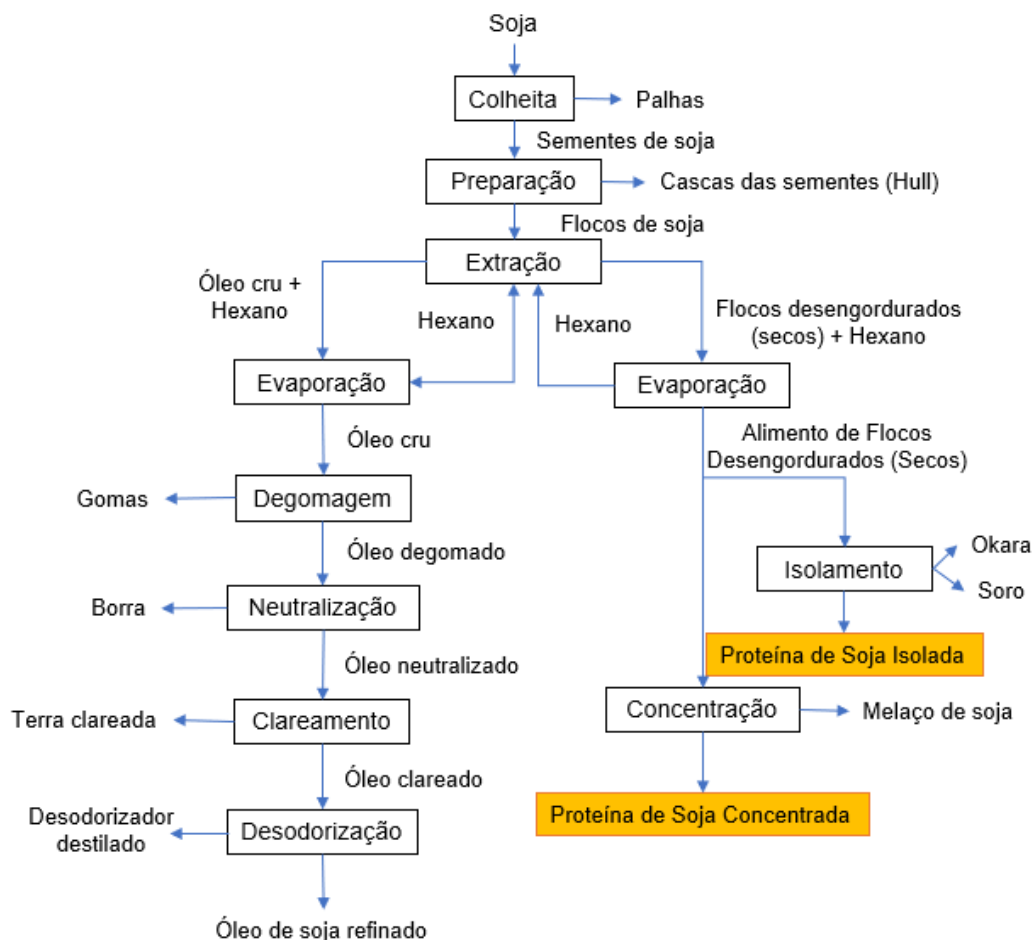
Apesar de sua imagem de alimento saudável, a cadeia de produção da soja está profundamente envolvida em práticas ambientalmente problemáticas. A cultura da soja ocupa cerca de 4% do território brasileiro e tem avançado principalmente sobre o Cerrado, um bioma com biodiversidade de extrema importância e cada vez mais pressionado pelo desmatamento e pela degradação do solo (Cattelan; Dall’Agnol, 2018; Rajão et al., 2020; Zappi et al., 2015). A monocultura intensiva também está associada ao uso excessivo de agrotóxicos, incluindo o glifosato, cuja aplicação compromete a saúde humana, a segurança alimentar e a qualidade da água e do solo (ANVISA, 2019; Bombardi, 2017). Além disso, a expansão da soja contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa no Brasil, especialmente devido à mudança do uso do solo e às queimadas associadas (Rajão et al., 2020; Ritchie, 2020).

Essas práticas contrastam com a narrativa de sustentabilidade frequentemente atribuída aos produtos à base de plantas. Para que essa proteína vegetal se transforme em hambúrgueres que imitam carne, são necessários diversos processos industriais que envolvem extração com solventes como o hexano (C_6H_{14}) - um composto derivado do petróleo, tóxico e volátil, considerado perigoso para a saúde humana e ambiental (De Pretto et al., 2018; Kumar et al., 2017). O processamento químico para obtenção de ingredientes como a proteína texturizada de soja (PTS), o concentrado proteico de soja (CPS) e o isolado proteico de soja (IPS) envolve altas temperaturas, reações com álcalis e ácidos, extrações com etanol e precipitações isoelétricas (De Pretto et al., 2018; Sui; Zhang; Jiang, 2021). Esses procedimentos demandam energia, geram resíduos e

utilizam reagentes nem sempre seguros ou renováveis, ampliando a pegada ambiental desses produtos supostamente “verdes” (Zuin et al., 2022). A Figura 5 ilustra as etapas desse processamento.

Ainda que as dietas à base de plantas apresentem menor impacto climático do que dietas com produtos de origem animal (Poore; Nemecek, 2018), o grau de processamento dos substitutos de carne levanta questionamentos sobre sua real sustentabilidade. Além da energia envolvida nos processos industriais, há preocupações sobre a composição final desses alimentos, que frequentemente incluem aditivos, conservantes, aromas artificiais e emulsificantes. Produtos ultraprocessados, como hambúrgueres vegetais, estão associados a riscos à saúde quando consumidos com frequência, incluindo obesidade, doenças cardiovasculares e inflamações crônicas (Monteiro et al., 2019; Satija et al., 2017).

Figura 5: Etapas da produção de óleo de soja refinado, proteína de soja concentrada e proteína de soja isolada



Fonte: Adaptado de De Pretto et al., 2018, tradução e ênfase da autora, 2025.

Portanto, o uso da soja como principal matéria-prima de substitutos de carne deve ser compreendido de forma crítica, considerando não apenas seus benefícios nutricionais, mas também os impactos cumulativos de sua produção e industrialização. A ideia de que a base de plantas é sinônimo de “natural” ou “sustentável” carece de uma análise mais profunda, especialmente no contexto de países como o Brasil, onde as contradições da cadeia da soja são particularmente evidentes (Zuin et al., 2022).

7.3 Comparando produtos

Para tornar essas discussões mais concretas em sala de aula, o estudo de caso propôs a análise comparativa de dois produtos da mesma linha comercial: hambúrgueres da linha Seara Gourmet, sendo um à base de carne bovina e outro à base de soja. Essa comparação permite discutir questões como rotulagem, grau de processamento, uso de

aditivos e transparência nas informações disponibilizadas ao consumidor. As imagens 3 e 4 mostram os rótulos que foram comparados.

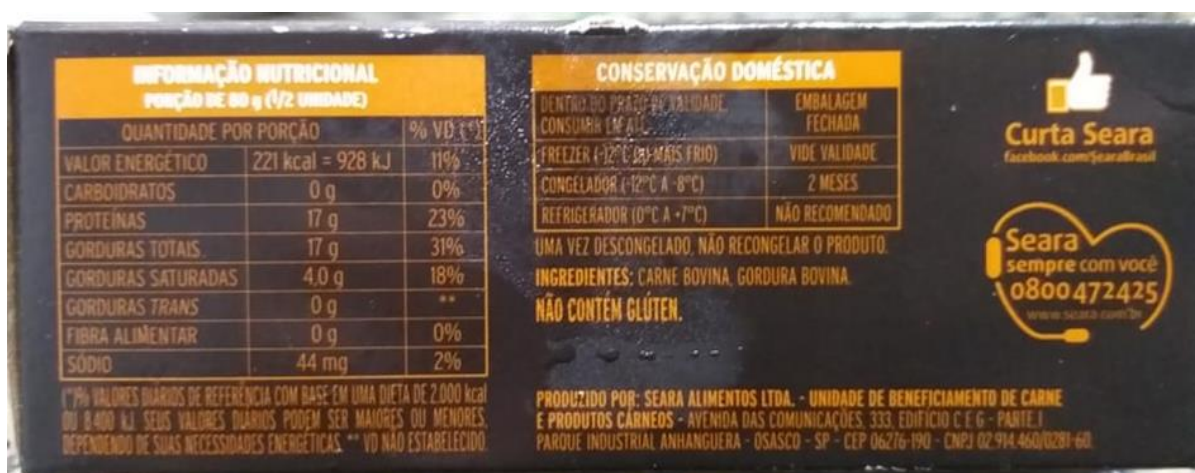


Imagem 3: Tabela nutricional e ingredientes de hambúrguer de carne da linha Seara Gourmet. Acervo pessoal da autora, 2020.



Imagem 4: Tabela nutricional e ingredientes de hambúrguer a base de soja da linha Seara Gourmet. Acervo pessoal da autora, 2020.

No rótulo do hambúrguer de carne bovina da Seara Gourmet constam basicamente três ingredientes: carne bovina, gordura bovina e sal. Já a versão vegetal, com apelo sustentável e rotulada como “à base de plantas”, apresenta mais de uma dezena de ingredientes, incluindo: água, proteína de soja, óleo de algodão, gordura vegetal, açúcar, metilcelulose, beterraba em pó (como corante), aromatizantes idênticos aos naturais, alho, sal, ferro e vitamina B12.

Essa discrepância em número e tipo de ingredientes ilustra o elevado grau de processamento envolvido na fabricação dos produtos substitutos à proteína animal. A presença da metilcelulose, por exemplo, é um indicativo importante. Esse aditivo é um emulsificante e agente texturizante utilizado para conferir viscosidade, coesão e suculência aos produtos vegetais, simulando a experiência sensorial da carne. Embora a metilcelulose seja autorizada por agências reguladoras como a ANVISA, seu consumo em excesso ainda suscita dúvidas quanto aos efeitos cumulativos à saúde, pois trata-se de uma fibra modificada que não é digerida pelo organismo humano e cuja função nutricional é praticamente nula (FAO; JECFA, 2006; Zuin et al., 2022).

Além disso, o teor de sódio nos hambúrgueres vegetais costuma ser mais elevado do que em produtos de carne *in natura*, uma vez que o sabor e a palatabilidade precisam ser compensados por meio de aditivos. Isso acende um alerta especialmente em um contexto no qual o consumo excessivo de sal já é um problema de saúde pública global. Como apontam Satija et al. (2016), nem todas as dietas a base de plantas são iguais: há uma diferença importante entre aquelas ricas em alimentos integrais e naturais e aquelas dominadas por produtos ultraprocessados. A adoção de rótulos frontais no Brasil, exigindo a declaração de “alto em sódio”, “alto em açúcares” ou “alto em gordura saturada”, é um passo importante, mas ainda não resolve o problema da opacidade da cadeia produtiva.

A análise crítica desses rótulos em sala de aula permite discutir com os estudantes a importância da transparência nos processos industriais e o papel do consumidor como agente informado e questionador. Também evidencia que a transição para dietas mais sustentáveis exige mais do que trocar carne por soja: é preciso transformar os sistemas produtivos, as escolhas de ingredientes e os modos de produção (Zuin et al., 2022; Zuin Zeidler, 2024).

7.4 Impactos dos hambúrgueres vegetais: do cultivo à disposição final

Para compreender a complexidade por trás dos hambúrgueres à base de plantas, é fundamental considerar seu ciclo de vida completo — desde a origem dos insumos até o descarte das embalagens. Embora esses produtos sejam promovidos como opções

sustentáveis, a análise de seus impactos precisa ser feita com base em dados científicos, considerando todas as etapas envolvidas.

A análise do ciclo de vida (ACV) permite comparar produtos com base em suas emissões de gases de efeito estufa (GEE), consumo de água, uso de energia, toxicidade e geração de resíduos. Estudos mostram que hambúrgueres vegetais, em geral, apresentam menores emissões de carbono e menor uso de recursos naturais do que hambúrgueres bovinos (Keoleian; Heller, 2018; Poore; Nemecek, 2018). Entretanto, isso não significa que sejam isentos de impactos. A produção de soja, como discutido anteriormente, está associada à perda de biodiversidade, contaminação ambiental e conflitos agrários em países como o Brasil, principal exportador mundial do grão (Cattelan; Dall’Agnol, 2018; Rajão et al., 2020).

Durante a etapa de processamento industrial, o uso de energia e reagentes químicos para a extração e purificação das proteínas vegetais — especialmente no caso do isolado proteico — amplia a pegada ambiental desses produtos. A obtenção da proteína isolada de soja, por exemplo, envolve extrações alcalinas e precipitações ácidas, com consumo significativo de energia térmica e geração de subprodutos, como o *okara* e águas residuais (De Pretto et al., 2018). Embora haja estudos que buscam criar processos mais verdes e/ou sustentáveis — como a aplicação de tecnologias de cavitação hidrodinâmica e o uso de biorefinarias —, o setor ainda opera majoritariamente em modelos convencionais e intensivos (Preece et al., 2017; Zanotti et al., 2022).

Já na etapa de distribuição e consumo, o desafio passa pelo armazenamento em cadeia refrigerada, embalagens plásticas multicamadas de difícil reciclagem e pela curta vida útil de alguns produtos, o que pode levar ao desperdício (Landim et al., 2016; Mendes et al., 2021). A lógica do marketing de “novidade” também impulsiona a obsolescência simbólica desses alimentos, em linha com o conceito de *eatertainment* — a transformação da alimentação em entretenimento, em que a experiência de consumo é frequentemente mais importante do que o valor nutricional (Elliott, 2010; Ritzer, 2005).

No pós-consumo, as embalagens descartadas desses hambúrgueres, em geral produzidas com materiais mistos (plástico, papel e metalizados), representam um problema logístico e ambiental. A taxa de reciclagem no Brasil é baixa e as embalagens

de produtos alimentícios tendem a ser rejeitadas por cooperativas de reciclagem devido à contaminação por resíduos orgânicos e à complexidade dos materiais (Landim et al., 2016).

Esses elementos demonstram que, embora os hambúrgueres a base de plantas possam representar um avanço em relação às carnes convencionais em termos de emissões de GEE, sua sustentabilidade não pode ser analisada de forma isolada. É necessário integrar aspectos ecológicos, sociais e econômicos, promovendo uma visão sistêmica do alimento — desde a origem da matéria-prima até o descarte final.

7.5 Química Verde e Química Sustentável: contribuições para o debate

Ao analisar as controvérsias e os desafios associados aos hambúrgueres à base de plantas, fica evidente a importância de se aplicar os princípios da QV e da QS ao setor alimentício (Kümmerer; Clark, 2016). Embora esses campos tenham sido historicamente mais associados à indústria química tradicional, sua aplicação à produção de alimentos — especialmente aos alimentos processados — é não apenas possível, como necessária (Zuin Zeidler, 2024).

A QV, conforme definida por Anastas e Warner (1998), propõe 12 princípios voltados à prevenção da poluição, eficiência energética, uso de matérias-primas renováveis e desenvolvimento de produtos seguros e biodegradáveis. Muitos desses princípios podem ser adaptados para repensar a formulação de hambúrgueres vegetais: substituição de aditivos sintéticos por naturais, escolha de matérias-primas de menor impacto ambiental, redução do número de etapas no processamento e reaproveitamento de subprodutos industriais (Anastas; Zimmerman, 2018).

Já a QS amplia essa visão, ao considerar também os aspectos sociais, culturais e políticos envolvidos nas cadeias produtivas. A QS reconhece que soluções tecnológicas, por si só, não garantem sustentabilidade, sendo necessário promover mudanças estruturais nos sistemas de produção e consumo (Kümmerer; Clark, 2016; Zuin et al., 2021c). Assim, a QS pode contribuir com diretrizes para reavaliar a dependência da soja transgênica, incentivar o uso de leguminosas regionais, fomentar a agroecologia e desenvolver novos métodos de extração proteica menos impactantes.

No âmbito educacional, a análise crítica de produtos como hambúrgueres a base de plantas oferece uma oportunidade rica para integrar conteúdos de química orgânica, bioquímica, engenharia de processos, toxicologia e sustentabilidade. Ao promover atividades baseadas em estudos de caso controversos, como o aqui apresentado, é possível desenvolver competências essenciais, como o pensamento sistêmico, a análise de ciclo de vida e a capacidade de tomar decisões informadas com base em múltiplos critérios (Burmeister; Rauch; Eilks, 2012; Eilks; Zuin, 2018).

A QS também incentiva a reflexão ética sobre o papel dos químicos e engenheiros na construção de futuros alimentares mais justos. É necessário questionar não apenas os ingredientes utilizados, mas também quem os produz, em que condições, com quais tecnologias e com quais consequências para os territórios envolvidos.

Portanto, o estudo de caso “Desembalando Hambúrgueres” buscou demonstrar como a QV e a QS podem servir como ferramentas analíticas e educativas para a compreensão e o enfrentamento dos desafios de um setor alimentício em transição. Ao desmistificar os discursos em torno dos alimentos a base de plantas, a QS nos convida a repensar o que significa, de fato, um alimento sustentável — para além da aparência e das promessas de marketing.

A Tabela 6 ilustra os pontos de discussão que o estudo de caso “Desembalando Hambúrgueres” propiciou:

Tabela 6: Pontos de discussão do estudo de caso "Desembalando Hambúrgures" e suas reflexões e principais referências.

Ponto de discussão	Reflexão	Principais publicações
Impacto ambiental	É indispensável avaliar o verdadeiro impacto ambiental dos hambúrgueres à base de vegetais, abrangendo a utilização da terra, o consumo de água, a demanda de energia e as emissões de gases de efeito estufa.	Fresán et al., 2019; Santo et al., 2020.

Implicações para a saúde	É necessário investigar as possíveis implicações para a saúde dos aditivos químicos utilizados em alternativas à carne, como a metil celulose e outros aglutinantes, que são essenciais para obter a textura e a estabilidade desejadas.	Nasatto et al., 2015; Ozturk & Hamaker, 2023.
Sustentabilidade dos métodos de processamento	É de grande importância analisar a sustentabilidade dos métodos de processamento atuais, incluindo o uso de solventes e processos que consomem muita energia.	De Pretto et al., 2018; Kumar et al., 2021; Ozturk & Hamaker, 2023; Zanotti et al., 2022; Zuin et al., 2022
Transparência do rótulo	Uma deficiência notável é a falta de transparência e adequação das práticas de rotulagem, que muitas vezes não divulgam totalmente os processos químicos envolvidos na produção dessas alternativas.	European Commission Comissão Europeia, n.d.; Comissão Europeia, 2019; Zuin et al., 2022

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A discussão dos resultados do trabalho em sala de aula desse estudo de caso e também do descrito anteriormente, “Infância Plastificada”, será apresentada na próxima sessão.

8. Discussão integrada dos dois estudos de caso propostos

A presente seção de resultados e discussão baseia-se na análise sistemática de dados empíricos gerados a partir da aplicação de estudos de caso controversos nos cursos selecionados entre os anos de 2021 e 2024. Esses estudos de caso - *Infância Plastificada* e *Desembalando Hambúrgueres* - foram integrados a disciplinas de cursos de graduação, mestrado profissional, mestrado acadêmico e MBA, a fim de investigar o

potencial da abordagem para o ensino de Química Sustentável (QS) e pensamento sistêmico. Ao todo os estudos de caso foram trabalhados em 13 momentos, envolvendo 111 estudantes e a criação de 45 estudos de caso pelos participantes, como mostram as tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Relação de participantes por curso e por ano

Participantes	2021	2022	2023	2024	Total
Mestrado Profissional Módulo F5	5	8	5	6	24
Mestrado Profissional Módulo F8	5	7	4	7	23
MBA			5	5	10
Mestrado Ciências da Sustentabilidade	20				20
Bacharelado: Sistemas Alimentares Sustentáveis			15	19	34
					111

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Tabela 8: Número de estudos de caso criados pelos alunos por curso e por ano

Estudos de Caso	2021	2022	2023	2024	Total
Mestrado Profissional Módulo F5	2	3	3	3	11
Mestrado Profissional Módulo F8	2	5	3	3	13
MBA			2	2	4
Mestrado Ciências da Sustentabilidade	4				4
Bacharelado: Sistemas Alimentares Sustentáveis			8	5	13
					45

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Como detalhado na seção de metodologia, os dados analisados emergiram da observação de sala de aula (DeMonbrun; Finelli; Shekhar, 2015; Finelli et al., 2014;

O’Leary, 2020), que envolveu o acompanhamento direto das interações pedagógicas durante os cursos, seguido da elaboração de relatórios reflexivos pela pesquisadora. Esses relatórios foram posteriormente organizados por disciplina e analisados segundo os procedimentos da Análise Textual Discursiva (ATD), conforme proposto por Moraes e Galiuzzi (2006). A ATD é uma abordagem qualitativa que busca construir sentidos por meio da desconstrução e reconstrução de textos, com foco nos discursos e nas articulações conceituais emergentes, sendo especialmente adequada para contextos educativos e complexos como os que envolvem QS e pensamento sistêmico.

Para operacionalizar a ATD, utilizou-se o software MAXQDA, uma ferramenta de apoio à análise qualitativa de dados textuais e audiovisuais. Através do MAXQDA, os 13 relatórios foram extraídos e submetidos a um processo de codificação aberta, no qual unidades de sentido relevantes foram identificadas e organizadas em códigos iniciais. Posteriormente, utilizando os recursos do software, especialmente o “*Code Relations Browser*” e o “*Smart Coding Tool*”, foi possível observar relações entre códigos, identificar recorrências, sobreposições e lacunas nos discursos analisados. Com isso, foi construído um sistema de categorias que orienta a presente discussão.

A análise revelou cinco categorias principais, que serão detalhadas nas próximas subseções. São elas:

1. Controvérsia positiva: “isso não é sobre você”

Esta categoria aborda como a introdução de estudos de caso controversos, como o de produtos à base de plantas, inicialmente causou desconforto entre os estudantes — especialmente na graduação — mas, posteriormente, atuou como um potente gerador de reflexão crítica. A categoria permite explorar como o desconforto pode ser didaticamente fértil, especialmente quando mediado por metodologias baseadas na Educação Crítica em Ciências e no pensamento sistêmico.

2. Repensando a prática

Esta categoria discute a tensão recorrente observada nos relatórios entre teoria e prática. Muitos estudantes demonstraram expectativa por “atividades práticas”, que geralmente eram associadas a experimentos de laboratório. No entanto, ao longo dos

cursos, desenvolveram atividades investigativas, criativas e aplicadas — como a criação de estudos de caso e propostas de brinquedos sustentáveis — que configuram práticas relevantes no campo da QS. Aqui, problematiza-se a noção tradicional de “prática” no ensino de ciências, ampliando-a para incluir práticas reflexivas, interdisciplinares e socialmente situadas.

3. Do estudo de caso para o mundo real

Uma das dimensões que surpreendeu durante a análise foi observar como muitos estudantes extrapolaram os limites da sala de aula ao desenvolver ideias que poderiam ser implementadas no mundo real. Projetos como brinquedos baseados em resíduos, livros infantis com base em processos químicos, aplicativos educativos e até vídeos institucionais produzidos por estudantes mostram que o trabalho com estudos de caso despertou não apenas reflexão, mas ação. Nesta categoria, discutimos o potencial formativo do protagonismo crítico e sistêmico, entendido aqui como a capacidade de propor soluções viáveis, éticas e integradas às necessidades sociais.

4. Química Sustentável só é possível com o pensamento sistêmico

Esta categoria emergiu fortemente durante a análise cruzada dos códigos no MAXQDA, especialmente na ferramenta de relações entre códigos. Ficou evidente que sempre que os estudantes apresentavam maior profundidade crítica e articulação entre dimensões materiais e imateriais, estavam operando com o pensamento sistêmico e, conseqüentemente, trabalhando com Química Sustentável. Por outro lado, quando as análises ficavam restritas à troca de materiais ou à substituição direta (lógica típica da Química Verde), os resultados eram mais rasos e tecnicistas. Assim, propomos aqui que a QS só se efetiva quando acompanhada por uma visão sistêmica de mundo — ou seja, quando a química é compreendida como parte de sistemas sociotécnicos amplos, interdependentes e muitas vezes contraditórios.

5. Desafios e limites de implementação

Por fim, a última categoria reconhece que, apesar dos avanços e potenciais observados, persistem desafios importantes. Entre eles estão: a resistência inicial dos estudantes ao conteúdo provocador; a permanência de uma concepção reducionista da

prática científica; a dificuldade de alguns alunos em acessar fontes confiáveis e em construir argumentos mais consistentes; e as limitações de tempo e engajamento, especialmente nos cursos com estudantes profissionais em atividade. A análise desses desafios é fundamental para aprimorar as estratégias didáticas e para fortalecer a formação crítica em QS.

A seguir, cada uma dessas categorias será analisada em profundidade, com base nos dados empíricos codificados, nos trechos dos relatórios e nos referenciais teóricos que sustentam esta pesquisa. O objetivo é demonstrar como os estudos de caso controversos funcionaram como ferramentas pedagógicas para articular conteúdos de química, sustentabilidade e sociedade, potencializando o desenvolvimento do pensamento sistêmico e de uma educação crítica em ciências.

8.1 Controvérsia positiva: “isso não é sobre você”

Entre as categorias emergentes da análise dos treze cursos realizados entre 2021 e 2024, destaca-se de forma significativa o papel das controvérsias no processo de ensino-aprendizagem da QS. Em especial, os estudos de caso desenvolvidos, como *Infância Plastificada* e *Desembalando Hambúrgueres*, revelaram-se catalisadores potentes de debates, tensões e, sobretudo, aprendizagens críticas profundas. Essa constatação dialoga diretamente com a abordagem de controvérsias construtivas descrita por Bird e Erickson (2010), que argumentam que certos estudos de caso, ao desafiar os alunos a tomar posição diante de situações ambíguas e complexas, podem fomentar o pensamento crítico e o engajamento ativo com problemas reais e interdisciplinares.

Em especial, a análise dos relatórios referentes ao curso “Sistemas Alimentares Sustentáveis” no ano de 2023 revelou de forma particularmente vívida os impactos de uma controvérsia bem estruturada. O estudo de caso *Desembalando Hambúrgueres* causou inicialmente reações intensas entre os alunos de graduação. Muitos estudantes, identificando-se pessoalmente com os produtos criticados — seja por escolhas alimentares como vegetarianismo e veganismo, seja por crenças sobre sustentabilidade — reagiram defensivamente, sentindo-se ofendidos ou até acusados. Em alguns momentos, como descrito nos relatórios, a equipe docente chegou a ser nomeada como

“defensora da carne”, mesmo sendo composta por pessoas vegetarianas. Esse tipo de reação revela um mecanismo recorrente nas controvérsias: a tendência a personalizar os debates e a dificuldade de compreender que a crítica não é dirigida ao indivíduo, mas sim a sistemas e estruturas.

No entanto, foi justamente esse incômodo inicial que abriu espaço para um processo formativo profundo. À medida que os alunos compreendiam que a proposta do estudo de caso era analisar um sistema alimentar — e não os julgar individualmente — emergiu uma mudança significativa na postura e na compreensão coletiva. O incômodo passou a ser um ponto de partida para o deslocamento de uma perspectiva egocentrada para uma visão mais complexa, contextual e sistêmica. Essa transição representa um movimento crucial dentro da educação crítica em ciências, pois, como apontam autores como Paulo Freire em sua *Pedagogia do Oprimido*, não há transformação sem desconforto. O conflito, quando bem mediado, pode ser pedagógico (Freire, 2021).

A controvérsia, nesse contexto, não é vista como algo a ser evitado, mas sim como uma estratégia intencional de ensino. Como argumentam Bird e Erickson (2010), as chamadas “*constructive controversy case studies*” devem ser desenhadas de forma a desafiar consensos fáceis, incentivar a multiplicidade de interpretações e promover o engajamento dos alunos com dilemas que não têm respostas únicas. As controvérsias construtivas instigam os alunos a dialogar com diferentes perspectivas, analisar implicações e desenvolver argumentos próprios.

No caso desta pesquisa, os estudos de caso foram concebidos justamente com esse intuito. Ao invés de se restringirem à substituição de substâncias tóxicas por alternativas “verdes” (a lógica da Química Verde), os casos provocavam os estudantes a pensar em sistemas mais amplos, que envolvem marketing, consumo, cultura, acesso, justiça social, política e saúde pública. O estudo *Desembalando Hambúrgueres*, por exemplo, não se limitava a discutir o processo químico de extração de proteína de soja, mas abria questões sobre a rotulagem dos alimentos, a apropriação mercadológica de discursos ecológicos, o acesso desigual a produtos saudáveis, e os impactos socioambientais da monocultura de soja. Tal abordagem, embora desconfortável para

alguns estudantes no início, revelou-se fértil para ampliar os horizontes analíticos e éticos.

Outro elemento importante dessa controvérsia positiva foi o papel do pensamento sistêmico como chave de leitura para as tensões vividas em sala. A transição de uma leitura pessoal para uma análise estrutural só foi possível porque os cursos ofereceram ferramentas conceituais que permitiam aos estudantes localizar suas experiências em sistemas mais amplos. Assim, a afirmação “isso não é sobre você” não significa desconsiderar o envolvimento pessoal dos estudantes, mas sim convidá-los a observar como suas experiências estão inseridas em dinâmicas coletivas, históricas e estruturais. Esse deslocamento da experiência individual para a análise estrutural é um dos principais ganhos pedagógicos das controvérsias bem mediadas (Bird; Erickson, 2010).

Além disso, é importante reconhecer que o desconforto vivido pelos estudantes não foi um fim em si mesmo. Ao contrário, ele abriu espaço para um amadurecimento conceitual e comportamental que pôde ser observado nas entregas finais, nas reflexões escritas e nas discussões em sala de aula. Muitos estudantes que inicialmente se sentiram incomodados passaram a agradecer a oportunidade de repensar suas posições, ampliando seus olhares e compreendendo as limitações de soluções simplistas. Esse processo, embora não isento de tensões, foi altamente formativo, pois permitiu que os alunos desenvolvessem competências de escuta ativa e argumentação respeitosa — todas essenciais para a atuação profissional em contextos complexos e em transformação.

Nesse sentido, pode-se afirmar que as controvérsias assumiram um papel catalisador na promoção de uma educação em ciências crítica ao promover não apenas a compreensão de conceitos científicos, mas também buscando formar sujeitos capazes de intervir no mundo com responsabilidade social e ambiental (Fachina; Araripe; Zeidler, 2024; Zuin et al., 2021c). A experiência dos cursos analisados mostra que, quando bem planejadas e acompanhadas, as controvérsias não desagregam, mas sim integram — conectando saberes, vivências e valores.

Por fim, a categoria “controvérsia positiva” ilustra o potencial transformador de uma pedagogia que acolhe o conflito como parte do processo de ensino-aprendizagem.

Em vez de evitar temas polêmicos por medo de gerar desconforto, os cursos analisados demonstraram que é possível e desejável criar espaços seguros e desafiadores, nos quais os estudantes possam exercitar a empatia, a crítica e a imaginação sociocientífica. Afinal, como ficou evidente nos relatos dos cursos de graduação, a verdadeira aprendizagem começa quando os estudantes percebem que a ciência — inclusive a Química Sustentável — não é neutra nem distante de suas vidas, mas atravessa diretamente os sistemas nos quais estão inseridos.

8.2 Repensando a prática

Uma das tensões mais evidentes observadas na análise dos relatórios das disciplinas foi a compreensão e expectativa dos estudantes sobre o que constitui uma atividade prática no contexto do ensino de QS. Frequentemente, os alunos demonstraram certo desapontamento por não encontrarem nas disciplinas as chamadas “atividades práticas” – geralmente entendidas como experiências em laboratório, manipulação de substâncias químicas ou uso de equipamentos científicos tradicionais. Essa percepção, recorrente sobretudo entre estudantes de programas profissionalizantes ou com formação mais tradicional na química, revela uma concepção restrita e enraizada de “prática” no ensino de ciências.

No entanto, ao longo dos cursos, os estudantes foram engajados em atividades profundamente práticas, embora não laboratoriais, como a criação de estudos de caso, análise de produtos, desenvolvimento de protótipos de brinquedos, elaboração de propostas educacionais e a simulação de processos de design sustentável. Essas atividades exigiram pesquisa, criatividade, análise crítica e proposição de soluções aplicáveis – elementos essenciais da prática científica no campo da QS. Como destacam Armstrong et al. (2018), ensinar os estudantes a lidar com a complexidade da química sustentável exige muito mais do que reproduzir reações em laboratório; requer desenvolver competências analíticas, comunicativas e interdisciplinares para avaliar cenários reais com múltiplos fatores envolvidos.

Essa dicotomia entre a percepção do que é “prático” e o que efetivamente configura uma prática relevante no campo da QS foi evidenciada, por exemplo, nos cursos do Mestrado Profissional em Química Sustentável. Alguns estudantes

manifestaram frustração por não realizarem experimentos químicos em laboratório, enquanto, simultaneamente, desenvolveram projetos aplicáveis, como brinquedos sustentáveis criados a partir de resíduos de impressoras 3D, ou estudos sobre materiais alternativos à madeira na fabricação de brinquedos infantis. Tais iniciativas exigiram análise de materiais, viabilidade técnica, impacto ambiental, apelo educacional e até mesmo estratégias de design. Como discutido por Haack e Hutchison (2016), o ensino de QS deve ser repensado a partir de princípios e estratégias que preparem os estudantes para inovar, comunicar e intervir no mundo real – mesmo quando isso não envolve diretamente substâncias químicas ou experimentos tradicionais.

Essa desconstrução do conceito de prática é fundamental quando se trabalha com QS. A própria lógica da QS propõe ampliar o escopo da química para além da reação e da síntese, incorporando princípios de ecologia, economia circular, justiça social, toxicologia, política pública, design e educação (Zuin; Kümmerer, 2021). Portanto, as práticas educativas coerentes com essa abordagem precisam ser, elas próprias, interdisciplinares, socialmente situadas e voltadas à transformação. Práticas como pensar um brinquedo que respeite o ciclo de vida dos materiais, elaborar um roteiro educativo para trabalhar a química por meio de alimentos, ou produzir um vídeo institucional para uma iniciativa de agricultura comunitária, revelam uma aplicação real e complexa da química em contextos sociais e ambientais.

Além disso, há uma dimensão pedagógica importante nessa discussão. Quando os estudantes são convidados a investigar problemas reais, a construir conhecimento a partir de contextos controversos e a propor soluções, eles estão engajados em práticas investigativas e críticas, que dialogam com os pressupostos da Educação em Ciências baseada na crítica (Sjöström; Eilks; Zuin, 2016; Zuin et al., 2021c). Essas práticas promovem não apenas o entendimento conceitual da química, mas também a formação cidadã e ética, ao posicionar os estudantes como sujeitos capazes de intervir no mundo por meio do conhecimento científico (Armstrong et al., 2018).

É interessante notar que, em muitos cursos analisados, mesmo diante da resistência inicial à ausência de práticas laboratoriais tradicionais, os estudantes demonstraram engajamento crescente ao perceberem a aplicabilidade de suas

propostas. O feedback positivo recebido por um grupo de estudantes da graduação, por exemplo, cujo videodocumentário foi incorporado por uma organização de CSA local, ilustra esse reconhecimento do valor da prática desenvolvida no curso. Aqui, o ato de produzir um conteúdo audiovisual sobre um sistema alimentar comunitário local, articulando aspectos ambientais, sociais e econômicos, configura uma prática legítima e profundamente alinhada aos objetivos da QS.

O desafio, portanto, parece residir em ampliar a compreensão dos próprios estudantes sobre o que se entende por prática no contexto do ensino de química. A adoção de novos materiais e abordagens pedagógicas requer uma mudança de mentalidade, tanto institucional quanto curricular, para reconhecer que práticas relevantes para a sustentabilidade podem (e devem) transcender os limites do laboratório tradicional. A educação em QS, quando pensada a partir dos princípios de inovação, interdisciplinaridade e transformação social, redefine o que é fazer química de maneira prática (Haack; Hutchison, 2016; Zuin; Kümmerer, 2021).

Em síntese, esta categoria evidencia a necessidade de repensar o lugar da prática no ensino de QS. Mais do que oferecer oportunidades de manipulação de substâncias em ambientes controlados, trata-se de propor situações de aprendizagem nas quais os estudantes possam se envolver em práticas investigativas, reflexivas, interdisciplinares e aplicáveis a problemas concretos. Reconhecer e valorizar essas práticas é importante para a formação de profissionais capazes de enfrentar os desafios da sustentabilidade de forma crítica, criativa e transformadora.

8.3 Do estudo de caso para o mundo real

Uma das contribuições observadas nesta pesquisa foi o potencial dos estudos de caso para extrapolar os limites da sala de aula e fomentar nos estudantes o desejo e a capacidade de atuar no mundo real. Em diferentes contextos — desde cursos de graduação até programas de mestrado profissional e MBA —, emergiram iniciativas concretas com potencial de aplicação prática, demonstrando que o trabalho com estudos de caso controversos pode cultivar habilidades críticas, criativas e transformadoras. Esta constatação remete à ideia de um empreendedorismo sistêmico (Maas; Jones, 2015),

entendido aqui como a capacidade de propor soluções viáveis, éticas e contextualizadas a partir de reflexões desenvolvidas no ambiente educacional.

É importante destacar que o termo “empreender”, neste contexto, não se limita à criação de negócios ou startups, mas envolve a habilidade de transformar ideias em ações concretas com impacto real — seja no campo social, político, ambiental, educacional ou comunitário. Assim, considera-se empreendedora/protagonista a estudante que, ao ser mobilizada por um estudo de caso, sente-se instigada a investigar mais profundamente um tema, refletir sobre seus próprios hábitos e práticas, e produzir algo novo, relevante e alinhado com os princípios da QS e do Pensamento Sistêmico.

Exemplos dessa postura protagonista emergiram em diversos cursos analisados. Na graduação, um grupo de estudantes produziu um vídeo documentário sobre um sistema de agricultura apoiado pela comunidade (CSA) em Lüneburg. O vídeo alcançou tamanho nível de qualidade e sensibilidade que passou a ser utilizado pela própria organização como material institucional. Essa vivência revelou a potência de conectar conteúdos abordados em sala de aula com iniciativas reais do território, reforçando o papel do estudante como agente de transformação local e destacando a relevância de uma educação que dialoga com a comunidade.

No mestrado profissional, um grupo de alunas propôs um livro voltado ao público infantil e suas famílias, com receitas e explicações que utilizam a culinária como ponte para ensinar conceitos básicos de química e sustentabilidade. A proposta é especialmente inovadora por unir a educação científica com o afeto e o cuidado – tanto nas relações familiares quanto com o planeta. A ideia expressa uma sensibilidade rara ao traduzir os conteúdos do curso em uma linguagem acessível e lúdica, com potencial de impacto na formação de hábitos desde a infância.

Outro exemplo veio também do mestrado profissional, onde uma estudante propôs um brinquedo baseado em uma roda d’água, feito de madeira reaproveitada, com um cálculo completo da produção, viabilidade técnica e impacto ambiental. A proposta não apenas demonstrou domínio do conteúdo técnico, mas também um olhar ampliado para questões como recursos renováveis, durabilidade, função pedagógica do brinquedo e acessibilidade econômica. A entrega revelou a capacidade da estudante de transitar

entre teoria e prática, transformando conceitos abstratos em uma proposta concreta de aplicação no mundo real.

No contexto do MBA em Química Sustentável, outro grupo comparou brinquedos feitos de diferentes materiais e propôs indicadores próprios para avaliar sua sustentabilidade, levando em conta critérios ambientais, sociais, de saúde e econômicos. A criação desses indicadores, que partiu da análise crítica de diferentes produtos do mercado, ilustra bem como a atividade acadêmica pode gerar ferramentas úteis para o debate público e para a atuação profissional. Essa proposta, embora ainda em nível conceitual, poderia ser desenvolvida como base para ações de consumo consciente, iniciativas regulatórias ou mesmo projetos de certificação.

No contexto do mestrado acadêmico, observou-se outro tipo de protagonismo: aquele voltado à produção de conhecimento e investigação acadêmica. Uma aluna relatou que, após o contato com o estudo de caso "Desembalando Hambúrgueres", decidiu dedicar seu trabalho de conclusão de curso à temática da alimentação sustentável e dos sistemas alimentares. Nesse sentido, o estudo de caso não apenas mobilizou sua reflexão, mas impulsionou a elaboração de um projeto de pesquisa com implicações acadêmicas e sociais. Aqui, o protagonismo significou responder a um chamado ético e científico por meio da investigação, colocando o conhecimento a serviço da transformação.

Esse tipo de movimento — em que os estudantes transformam discussões em sala em projetos com potencial de aplicação real — reforça a discussão de Bonney (2015), que aponta os estudos de caso como ferramentas que ampliam o engajamento e a percepção de aprendizagem dos estudantes, especialmente quando há articulação entre o conteúdo e questões do cotidiano. Ao apresentar os conteúdos na forma de narrativas interativas e desafiadoras, os estudos de caso favorecem o desenvolvimento das habilidades de análise, síntese e tomada de decisão. Esse tipo de abordagem está fortemente associado à melhoria no desempenho acadêmico e na capacidade de comunicar ideias de forma clara e crítica (Bonney, 2015).

Juntunen e Aksela (2014), por sua vez, destacam que abordagens didáticas que envolvem questões sócio-científicas, como os estudos de caso apresentados nesta

pesquisa, são especialmente eficazes para o desenvolvimento de competências como argumentação ética, compreensão sistêmica, engajamento político e iniciativa cidadã. As autoras defendem que o ensino de química voltado à sustentabilidade precisa considerar o estudante como sujeito ativo, capaz de agir no mundo, e não apenas como receptor de conteúdo.

É importante frisar que o caráter protagonista das ações descritas não surgiu de forma imposta ou dirigida, mas sim como consequência do engajamento crítico proporcionado pelos estudos de caso. Isso reforça a ideia de que ações transformadoras não podem ser normativas, mas devem emergir da compreensão profunda dos problemas, do exercício do pensamento sistêmico e da mobilização de saberes interdisciplinares (Sjöström; Eilks; Zuin, 2016; Sjöström; Talanquer, 2018). Nesse processo, os estudantes não apenas aprendem sobre QS e sustentabilidade, mas também experimentam formas de se engajar com o mundo a partir desses conhecimentos.

Por fim, vale observar que o fomento a esse tipo de postura de protagonismo sistêmico demanda um ambiente educacional que valorize a criatividade, a autonomia e a interdisciplinaridade. Os cursos analisados nesta pesquisa, ao adotarem uma abordagem baseada em estudos de caso, possibilitaram a criação de espaços de experimentação e reflexão que transcenderam os limites tradicionais da educação em química. Como resultado, os estudantes não apenas compreenderam os conteúdos, mas também se sentiram instigados a agir — seja propondo a criação de um novo produto, propondo uma nova ferramenta ou elaborando uma nova narrativa sobre o mundo que desejam construir.

8.4 Química Sustentável só é possível com o pensamento sistêmico

Durante a análise qualitativa dos relatórios de cursos gerados a partir da implementação dos estudos de caso "Infância Plastificada" e "Desembalando Hambúrgueres", emergiu com grande força a associação direta entre a QS e o pensamento sistêmico. Essa associação se tornou evidente especialmente por meio da ferramenta de análise de relações entre códigos do software MAXQDA, que revelou a presença de 11 ocorrências entre os códigos "Pensamento Sistêmico" e "Química

Sustentável" (Figura 6). O gráfico de *Code Relations* gerado a partir da análise dos relatórios no software MAXQDA permite visualizar as co-ocorrências entre diferentes categorias (códigos) aplicadas ao *corpus* analisado, indicando com que frequência duas categorias aparecem relacionadas em um mesmo trecho de texto. Cada número no gráfico representa o total de vezes que duas categorias foram codificadas conjuntamente, revelando interconexões temáticas relevantes para a interpretação dos dados. No caso desta pesquisa, observou-se que a maioria das co-ocorrências apresentou valores baixos, refletindo uma distribuição mais pontual e específica dos temas nos relatórios. No entanto, destaca-se a forte conexão entre as categorias "Química Sustentável" e "Pensamento Sistêmico", com um número significativamente mais alto de co-ocorrências. Isso se deve ao fato de que muitos estudantes, ao refletirem sobre propostas mais amplas e críticas no âmbito da Química Sustentável, mobilizaram explicitamente elementos do pensamento sistêmico, como interdependência entre sistemas, visão de ciclo de vida e análise de impactos sociais, ambientais e econômicos integrados.

Essa recorrência nos dados sinaliza que os estudantes só foram capazes de operar criticamente com os princípios da QS quando também mobilizaram habilidades e atitudes relacionadas ao pensamento sistêmico — como a análise de causas-raízes, interconectividade entre dimensões materiais e imateriais e a consideração de múltiplas escalas de impacto e atores envolvidos.

Conforme argumentado por Zuin et al. (2021), a Química Sustentável, diferentemente da Química Verde, exige que se vá além da substituição de insumos e da eficiência técnica. Ela demanda uma perspectiva crítica, inter e transdisciplinar, com ênfase em processos educativos que promovam a reflexão ética e política sobre o papel da Química em sistemas sociotécnicos complexos. Essa visão está em sintonia com as premissas do pensamento sistêmico descritas por Blatti et al. (2019), que apontam a importância de reconhecer padrões, feedbacks, não linearidades e interdependência entre os elementos de um sistema. No campo educacional, a integração desses princípios potencializa o desenvolvimento de pensamento mais crítico (SJÖSTRÖM et al., 2017; EILKS; ZUIN, 2018).

Nos cursos analisados, observou-se que os momentos em que os estudantes alcançaram análises mais críticas e sistêmicas coincidiram com uma maior compreensão das diferenças entre QS e QV. Por exemplo, ao problematizar brinquedos produzidos com bioplásticos, alguns grupos foram além da substituição de materiais e passaram a investigar o ciclo de vida desses produtos, os contextos sociais e econômicos de sua produção e descarte, e as relações entre marketing, consumismo infantil e desigualdade social. Esse tipo de análise só foi possível quando os estudantes mobilizaram uma abordagem sistêmica, considerando variáveis interconectadas e reconhecendo a complexidade inerente à sustentabilidade.

Por outro lado, nos casos em que os estudantes se limitaram a análises técnicas focadas na substituição direta de materiais (por exemplo, trocar o PVC por PLA ou carne bovina por proteína de soja), os produtos finais foram pouco críticos e mais tecnicistas. Essa limitação está relacionada ao uso de uma lógica própria da QV, que, embora importante, não dá conta das múltiplas dimensões da sustentabilidade quando empregada de forma isolada. A QS só pode se concretizar quando a Química é concebida como parte de sistemas socioeconômicos mais amplos, e não como uma prática isolada de inovação técnica (Kümmerer, 2017; Zuin Zeidler, 2023).

Conseqüentemente, ao adotarem uma abordagem sistêmica, os estudantes demonstraram compreender que a QS envolve a articulação entre ciências naturais, ciências sociais e humanidades, exigindo pensamento crítico, reflexividade e responsabilidade ética. Essa compreensão se expressou, por exemplo, em discussões sobre os limites dos bioplásticos como solução para a crise dos resíduos, nas críticas à falta de regulamentação para os produtos ultraprocessados do mercado alimentício, e na análise dos impactos socioambientais da produção de soja ou outros grãos para o setor a base de plantas. Essas análises revelaram uma transição da visão linear da QV para uma abordagem mais holística e transformadora da QS.

Essa constatação é também reforçada pela literatura que aponta a centralidade do pensamento sistêmico na construção de uma ciência química voltada para a sustentabilidade. Como apontam Mahaffy et al. (2019) ao defenderem que o pensamento sistêmico é essencial para o entendimento das bases moleculares da sustentabilidade, promovendo uma visão integrada das interações entre escalas micro, meso e macro. Já Sjöström et al. (2017) argumentam que apenas por meio de uma formação potencialmente emancipatória os estudantes serão capazes de compreender os sistemas dos quais fazem parte e de agir sobre eles de forma transformadora.

Outro ponto que merece destaque é que, em diversas ocasiões nos relatórios, observou-se que quando os estudantes demonstraram ausência de pensamento sistêmico, suas soluções tenderam a reproduzir a lógica da substituição direta. Por exemplo, um grupo sugeriu a substituição de carne por um hambúrguer à base de ervilha, sem discutir a complexidade do processamento envolvido, os impactos ambientais e energéticos da cadeia de produção, ou os efeitos para a saúde humana. Nesses casos, ficou evidente que, mesmo quando os princípios da QV estavam sendo considerados, faltava um olhar mais crítico e contextualizado, típico da QS. A Tabela 9 sistematiza essa discussão comparando as abordagens da QV e QS tendo essa pesquisa como exemplo.

Tabela 9: Comparação entre Química Verde (QV) e Química Sustentável (QS)

Aspecto	Química Verde (QV)	Química Sustentável (QS)
Foco principal	Redução de impactos ambientais e riscos toxicológicos através da melhoria de processos químicos.	Transformação sistêmica dos modos de produção, consumo e descarte, considerando impactos sociais, éticos e ambientais.
Objetivo	Tornar a Química "mais limpa", segura e eficiente.	Tornar a Química um vetor de sustentabilidade e justiça socioambiental.
Estratégia	Substituição de substâncias perigosas por alternativas menos tóxicas; uso de catalisadores, economia atômica etc.	Redesenho de sistemas e processos com base em abordagens inter e transdisciplinares, visando a regeneração e a equidade.
Referencial teórico	12 princípios da Química Verde (Anastas; Warner, 1998).	Abordagens integradas com pensamento sistêmico, educação crítica e princípios de desenvolvimento sustentável (Anastas; Zimmerman, 2018; Kümmerer, 2017; Zuin Zeidler, 2023)
Dimensão abordada	Técnica e material.	Técnica, material e imaterial (ética, política, cultural, econômica).
Exemplo típico de solução	Substituir PVC por PLA em brinquedos; usar solvente verde em uma reação química.	Questionar o próprio modelo de consumo de brinquedos, seus ciclos de vida e impactos sociais.
Nível de inovação esperado	Inovação incremental.	Inovação transformadora.
Abordagem educacional	Conteúdos técnico-científicos com foco em química segura e eficiente.	Educação para a sustentabilidade com ênfase em pensamento crítico, interdisciplinaridade e cidadania ativa.
Articulação com o pensamento sistêmico	Limitada ou ausente.	Central, estruturante.
Tipo de práticas pedagógicas mais alinhadas	Ensino baseado em problemas técnicos.	Estudos de caso controversos, aprendizagem baseada em projetos, análise de sistemas complexos.

A análise realizada também permitiu perceber que o pensamento sistêmico precisa ser trabalhado de forma intencional nos cursos. A simples apresentação dos

estudos de caso não garante que os estudantes desenvolverão essa habilidade. Foi nos cursos que ofereceram mais espaço para debate, trocas entre colegas de diferentes áreas e momentos de reflexão coletiva que se observou maior articulação sistêmica. A transdisciplinaridade dos grupos também se mostrou um fator positivo nesse sentido, pois a diversidade de olhares enriqueceu as análises e desafiou perspectivas mais tecnicistas e normativas.

Como proposta para reforçar essa relação entre QS e pensamento sistêmico na educação química, retoma-se a ideia de uma Educação para a Química Sustentável baseada na reflexividade crítica. Tal proposta alia o desenvolvimento de competências técnicas com habilidades críticas e éticas, formando profissionais capazes de questionar o *status quo* e propor alternativas realmente sustentáveis.

Finalmente, cabe destacar que esta categoria não é apenas uma observação empírica dos dados, mas também uma proposta de orientação para futuros currículos de Química Sustentável. Apresenta-se a ideia de que não é possível trabalhar QS de forma adequada sem incorporar o pensamento sistêmico como condição estruturante. Isso significa, por exemplo, revisar o que se entende por “conteúdo prático” (como discutido na categoria anterior), incorporar questões socioambientais de forma transversal e abrir espaço para metodologias participativas que promovam o pensamento mais crítico sobre os impactos da Química e ciências em geral na sociedade.

8.5 Desafios e limites de implementação

Embora os resultados dos cursos analisados tenham revelado o potencial transformador do uso de estudos de caso controversos para promover o pensamento sistêmico e a QS, também foi possível identificar, e é importante destacar, uma série de desafios enfrentados ao longo do processo. Tais desafios ocorreram em diferentes níveis — pedagógico, institucional, cultural e metodológico — e são importantes não apenas como obstáculos a serem reconhecidos, mas também como pontos de aprendizagem para futuros trabalhos na área.

Um dos desafios mais recorrentes observados nos relatórios foi a dificuldade de alguns estudantes em compreender ou aceitar a proposta sistêmica dos estudos de caso.

Sobretudo entre alunos com formação técnico-científica mais tradicional, percebeu-se uma tendência a valorizar abordagens centradas em eficiência de processos, substituição direta de materiais e melhoria incremental — aspectos mais alinhados à lógica da QV. Em vários cursos, especialmente no mestrado profissional e no MBA, surgiram comentários de que os conteúdos eram "muito básicos" ou que faltavam "atividades práticas" — o que, na concepção de muitos estudantes, significava práticas de laboratório. Essa visão restrita de “básico” e de “prática” desconsidera a complexidade das atividades propostas, como o desenvolvimento de estudos de caso próprios, a análise de sistemas e os exercícios de tomada de decisão em contextos reais. Isso revela uma lacuna formativa importante e aponta para a necessidade de uma ressignificação do que é considerado “básico” e “prático” em cursos que buscam integrar ciência, sociedade e sustentabilidade.

Outro desafio observado foi o tempo limitado disponível para o aprofundamento dos temas. A complexidade dos estudos de caso e das discussões exigia mais tempo de imersão do que os módulos permitiam. Isso foi especialmente evidente nos cursos de curta duração, como os oferecidos nos módulos de mestrado profissional e MBA, em que apenas uma ou duas sessões foram dedicadas aos estudos de caso. Ainda assim, os resultados mostraram que mesmo com esse tempo reduzido, foi possível provocar deslocamentos importantes nos modos de pensar dos estudantes. No entanto, para alcançar transformações mais profundas, é necessário que essas abordagens sejam incorporadas de forma mais contínua e estruturada nos currículos.

As relações com a docente e a pesquisadora desta tese também foram apontadas como ponto de atenção. Em algumas turmas, estudantes relataram que gostariam de ter tido mais trocas com ambas, sentindo falta de espaços mais horizontais de discussão e acompanhamento. Isso sinaliza que, para além do conteúdo e da metodologia, a dimensão relacional do processo de ensino-aprendizagem também é fundamental para fomentar o pensamento sistêmico. Criar espaços seguros, dialógicos e acolhedores é uma condição essencial para que os estudantes possam expressar dúvidas, resistências e percepções pessoais sem medo de julgamento — especialmente em cursos que trata, de temas controversos.

Outro ponto relevante foi a tensão entre o compromisso de pensamento crítico e o desejo de agradar. Em vários momentos, sobretudo quando os estudantes sabiam que os estudos de caso haviam sido elaborados a partir de publicações das próprias professoras, como o relatório “Infância Plastificada”, houve um certo receio em discordar, propor contrapontos ou inovar nas análises. Isso levou alguns grupos a reproduzirem o conteúdo dos materiais de referência em vez de desenvolverem ideias próprias. Esse movimento, embora compreensível, reduziu o potencial de algumas produções e ilustrou um desafio metodológico comum em abordagens mais autorais ou baseadas em produção colaborativa de conhecimento.

Também cabe mencionar a dificuldade de articular o pensamento sistêmico com propostas concretas. Alguns estudantes demonstraram grande habilidade em mapear complexidades, reconhecer relações entre variáveis e identificar dilemas éticos e políticos. No entanto, ao propor soluções, acabavam retornando a lógicas mais simplificadas, como a substituição de insumos ou o apelo ao consumo consciente. Isso indica que, embora o pensamento sistêmico tenha sido mobilizado em nível analítico, sua transposição para a ação ainda encontra barreiras. Esse é um desafio maior da QS como um todo: transformar diagnósticos complexos em práticas concretas sem agir de forma reducionista.

Apesar dessas limitações, é importante observar que os desafios enfrentados reforçam a necessidade de um trabalho contínuo, dialógico e reflexivo — tanto por parte dos educadores quanto dos estudantes — para que a QS se consolide como um campo verdadeiramente transformador. Mais do que obstáculos, os desafios aqui apresentados devem ser entendidos como parte do próprio processo de aprendizagem e como pontos de partida para o aprimoramento de futuras experiências formativas.

9. Conclusões e perspectivas

Ao longo do desenvolvimento deste projeto, dois estudos de caso foram aplicados em diferentes contextos formativos: Infância Plastificada, que problematiza os impactos dos brinquedos plásticos na saúde infantil e no meio ambiente; e Desembalando Hambúrgueres, que aborda as controvérsias em torno de produtos à base de plantas

como solução aos impactos socioambientais do consumo de proteína animal. Ambos os estudos foram incluídos em aulas de diferentes módulos do bacharelado e pós-graduação da Universidade Leuphana, cujo desenho, implementação e coordenação ocorreu no campo de trabalho e pesquisa de Zuin Zeidler, com vistas à integração dos princípios da QV e QS e pensamento sistêmico. Tal oportunidade de entrada nos módulos descritos para o desenvolvimento deste trabalho de doutorado, temporal e espacialmente, possibilitou uma análise comparativa e aprofundada sobre os efeitos dessa abordagem em diferentes perfis de educandos.

O uso da análise textual e discursiva (Moraes; Galiazzi, 2006), com apoio do software MAXQDA, permitiu identificar cinco categorias centrais que emergiram dos dados e atravessaram transversalmente os cursos observados: (1) Controvérsia positiva: “isso não é sobre você”; (2) Repensando a prática; (3) Do estudo de caso para o mundo real; (4) Química Sustentável só é possível com pensamento sistêmico; e (5) Desafios e limites de implementação. Essas categorias formaram a espinha dorsal da discussão dos resultados e, em conjunto, apontam para uma série de aprendizagens e implicações.

Primeiramente, ficou evidente que a controvérsia, longe de ser um obstáculo, pode ser uma aliada poderosa da aprendizagem crítica. Em especial, os relatos dos estudantes de graduação mostram como o incômodo inicial gerado por críticas aos produtos a base de plantas levou a reflexões profundas sobre consumo, sistema alimentar, ciência e política. O estudo de caso, quando conduzido com espaços para escuta e debate, cria um espaço de fricção produtiva, que permite deslocar o foco do indivíduo para o sistema — ponto central para a Química Sustentável.

Em segundo lugar, a análise mostrou que a noção de “prática” precisa ser ampliada na educação em ciências. Embora muitos estudantes tenham inicialmente solicitado mais atividades laboratoriais, os próprios cursos revelaram múltiplas práticas significativas: investigação, pesquisa, argumentação, criação de novos estudos de caso e até produção de materiais com impacto real fora da sala de aula, como foi o caso do documentário feito por alunos para uma iniciativa local de CSA. Isso convida à revisão do que entendemos por prática na educação química — não como sinônimo exclusivo de bancada, mas como ação situada e transformadora.

Em terceiro lugar, observou-se o potencial dos estudos de caso como uma ponte entre a universidade e o mundo real. Muitas propostas elaboradas pelos estudantes indicaram um claro caráter empreendedor/protagonista — entendido aqui como a capacidade de imaginar, projetar e estruturar iniciativas que possam ser implementadas com os recursos certos. Essas iniciativas não necessariamente implicam em negócios, mas em ações que articulam ciência, sociedade e sustentabilidade. A análise mostrou que, quando os estudantes são convidados a criar estudos de caso a partir de problemas reais, eles desenvolvem ideias com viabilidade, propósito e impacto.

O eixo mais denso desta pesquisa, no entanto, concentrou-se na relação entre QS e pensamento sistêmico. O cruzamento de códigos realizado no MAXQDA revelou uma associação constante entre essas duas dimensões. Sempre que os estudantes mobilizavam uma análise mais complexa, abrangente e crítica, eles estavam operando com uma visão sistêmica do problema. Por outro lado, as abordagens mais limitadas, presas à substituição direta de substâncias ou soluções tecnicistas, revelavam uma mentalidade ainda centrada na QV. A QS, tal como defendida nesta tese, só se realiza plenamente quando acompanhada por uma compreensão das múltiplas dimensões envolvidas nas decisões químicas, ambientais, sociais, econômicas, políticas e culturais. Essa é uma das principais contribuições deste trabalho: defender que QS e pensamento sistêmico são indissociáveis.

Ainda assim, o processo revelou inúmeros desafios. Nem todos os cursos tiveram o mesmo grau de engajamento ou profundidade. Algumas entregas dos estudantes demonstraram ainda dificuldade em superar lógicas lineares e tecnicistas. Além disso, houve tensões metodológicas, como o desconforto inicial com as controvérsias e o esforço necessário para deslocar o foco do indivíduo para o coletivo.

Pode-se inferir, portanto, que os estudos de caso controversos representam uma estratégia pedagógica aliada à promoção de uma educação química reflexiva e alinhada com os desafios contemporâneos da sustentabilidade. Ao conectar química com questões do cotidiano, ao fomentar o pensamento sistêmico e ao estimular a criação de soluções, essa abordagem amplia o escopo da educação em ciências e fortalece sua

relevância social. Em vez de apenas formar técnicos, forma-se cidadãos com maior capacidade de compreender e transformar o mundo ao seu redor.

No campo específico do Ensino em Química Sustentável, esta tese busca contribuir ao propor uma abordagem didática que integra QS, pensamento sistêmico e controverso de maneira estruturada. Os resultados aqui apresentados oferecem indícios teóricos e práticos de que é possível contribuir para o ensino de química baseado no pensamento sistêmico no ensino superior. Mais do que ensinar conteúdos, trata-se de formar sujeitos capazes de compreender a complexidade.

Os achados desta pesquisa indicam que a proposta teórico-metodológica apresentada — pautada na integração entre estudos de caso socioambientais controversos, QS e pensamento sistêmico — demonstrou-se pertinente e efetiva. A análise qualitativa evidenciou que, embora em graus variados, todos os cursos analisados apresentaram momentos de aprendizagem significativa e deslocamentos importantes na forma como os estudantes se relacionam com os conteúdos da Química e com os desafios da sustentabilidade. Com isso, valida-se a premissa central deste trabalho: o uso de controvérsias contextualizadas, ancoradas em casos reais e relevantes, amplia as possibilidades de engajamento e de desenvolvimento do pensamento sistêmico no ensino superior em Ciências e Química.

A análise das categorias emergentes permite, ainda, constatar que os objetivos específicos delineados no início da pesquisa foram contemplados. Os estudos de caso implementados proporcionaram conexões entre ciência, sociedade e sustentabilidade (Objetivo 1); promoveram uma aprendizagem situada, crítica e interativa (Objetivo 2); revelaram potencialidades e limitações em relação à internalização de conceitos de QV e QS (Objetivo 3); e, sobretudo, mostraram como o pensamento sistêmico pode ser instigado e desenvolvido de forma progressiva, conforme o grau de profundidade das discussões propostas (Objetivo 4).

No entanto, os próprios resultados desta pesquisa também abrem espaço para novas questões por exemplo: como consolidar esse tipo de abordagem em diferentes contextos institucionais e culturais? Qual formação docente seria mais adequada para fomentar a adoção crítica de estratégias baseadas em controvérsias? Como sistematizar

indicadores de avaliação que reflitam não apenas o conteúdo aprendido, mas também o grau de envolvimento ético, político e criativo dos estudantes? Essas perguntas, que emergem da prática e da análise crítica, apontam caminhos para pesquisas futuras que desejem aprofundar o debate sobre a transformação do ensino em Química e Ciências na direção da sustentabilidade.

Assim, esta tese procurou apresentar contribuições à área: a primeira delas é metodológica: o uso de estudos de caso controversos como ferramenta central para provocar o pensamento sistêmico no ensino universitário em QS começa a ser ainda mais difundido, especialmente em contextos de ensino técnico e científico. A segunda contribuição é de natureza epistemológica: ao defender a indissociabilidade entre QS e pensamento sistêmico, este trabalho tensiona as fronteiras entre conhecimento disciplinar e ação transformadora. Por fim, há uma contribuição formativa: ao produzir materiais didáticos, estratégias e evidências empíricas, esta pesquisa oferece subsídios para educandos, educadores e instituições que desejem alinhar seus currículos com os desafios éticos, ambientais e sociais do século 21.

Por fim, como apontado por alguns estudantes, talvez ainda não saibamos exatamente qual o sistema que nos levará à sustentabilidade, mas está claro que ele não será fruto de ações isoladas, tecnocráticas ou descontextualizadas. Ele exigirá integração, colaboração e coragem para fazer diferente, de maneira ética.

10. Recomendações

A partir das análises e reflexões desenvolvidas nesta tese, percebe-se que a integração entre QS, pensamento sistêmico e estudos de caso controversos representa uma estratégia pedagógica para a formação de profissionais críticos e preparados para os desafios do século 21. Contudo, para que essa integração se torne prática efetiva em diferentes contextos educacionais, são necessários esforços articulados em múltiplas frentes. Este último capítulo apresenta um conjunto de recomendações fundamentadas na experiência da pesquisa realizada, com vistas à transformação do ensino de Química e Ciências em direção à sustentabilidade.

1. Formação docente: base para a mudança

A transformação do ensino começa pela formação de quem ensina. Os resultados desta pesquisa indicam que muitos dos desafios enfrentados pelos estudantes têm origem nas limitações estruturais da formação docente em Química, que ainda tende a privilegiar abordagens tecnicistas, conteudistas e descontextualizadas (Santos; Lima; Junior, 2020; Zuin, 2011).

Recomenda-se, portanto:

- Revisar os currículos dos cursos de licenciatura e bacharelado em Química, procurando a inclusão sistemática de temas relacionados à QS e ao pensamento sistêmico.
- Oferecer formação continuada para docentes em serviço, com foco em metodologias ativas, controvérsias socioambientais e desenvolvimento de estudos de caso. Tais formações têm maior potencial quando se dão de forma interdisciplinares e colaborativas.
- Incentivar o trabalho docente em rede, promovendo intercâmbio de práticas e experiências entre professores que já atuam com QS e sustentabilidade, em especial por meio de programas institucionais de apoio pedagógico, a exemplo de organizações como a *Beyond Benign*¹³ que fornece aos professores informação, oportunidades de educação continuada, redes de contato e apoio para tornar a QV e a QS uma parte importante do ensino da química em âmbito local e global.

A construção de uma base docente sólida é uma estratégia a garantir que as inovações pedagógicas propostas não sejam pontuais, mas estruturais e duradouras.

2. Currículo e materiais didáticos: transversalidade com intencionalidade

Outro ponto central identificado nesta pesquisa diz respeito à fragmentação curricular. QS e sustentabilidade, quando aparecem nos cursos de Química, muitas vezes são tratadas como tópicos isolados ou complementares, e não como eixo estruturante da formação (Burmeister; Rauch; Eilks, 2012; Zuin, 2011).

¹³ <https://www.beyondbenign.org/>

Recomenda-se:

- Ambientalizar o currículo de forma transversal, com revisão dos objetivos de aprendizagem das disciplinas para incluir dimensões sociais, políticas e éticas da química.
- Integrar os princípios da QS às disciplinas tradicionais da Química, como Química Orgânica, Inorgânica e Físico-Química, evitando sua concentração apenas em módulos eletivos ou complementares.
- Elaborar e distribuir materiais didáticos contextualizados, incluindo estudos de caso controversos, mapas conceituais sistêmicos, infográficos, vídeos e recursos interativos. Tais materiais podem dialogar com os desafios locais e globais, promovendo uma aprendizagem significativa.
- Incluir a perspectiva da ciência cidadã, incentivando os estudantes a gerar dados, observar fenômenos e propor soluções com base em seus próprios territórios (Golombic; Motion, 2021; Murray et al., 2024).

O currículo precisa refletir a complexidade do mundo contemporâneo, e isso exige coragem institucional e compromisso pedagógico.

3. Abordagens pedagógicas: do conteúdo à complexidade

Os dados da pesquisa revelaram que o uso de estudos de caso controversos, quando bem mediado, possibilita deslocamentos importantes na forma como os estudantes aprendem, se engajam e constroem conhecimento.

Com base nisso, recomenda-se:

- Adotar metodologias ativas que estimulem o protagonismo estudantil, como aprendizagem baseada em problemas (PBL), *design thinking*, mapas mentais, dramatizações e oficinas colaborativas.
- Utilizar controvérsias reais como ponto de partida para discussões em sala de aula, ampliando o repertório crítico dos estudantes e promovendo o reconhecimento da dimensão política e ética da ciência.
- Incentivar a criação de novos estudos de caso pelos próprios estudantes, como forma de aplicação e expansão dos conceitos aprendidos. Essa prática, como

mostrado nesta pesquisa, pode favorecer o pensamento sistêmico, o espírito investigativo e a capacidade de articulação entre teoria e prática.

- Explorar múltiplas linguagens, permitindo que os estudantes expressem seus aprendizados de formas variadas — como vídeos, podcasts, infográficos, colagens, textos opinativos — e não apenas em formatos tradicionais.

O ensino de Química não precisa estar limitado à bancada e à lousa. Ele pode ser um espaço de invenção e transformação.

4. Políticas institucionais e articulação com a comunidade

A sustentabilidade no ensino de Química não será alcançada apenas por iniciativas isoladas em sala de aula (Parga-Lozano; Pacheco De Carvalho, 2019). É importante um ecossistema institucional favorável, que valorize a inovação pedagógica e a construção coletiva do conhecimento.

Recomenda-se:

- Criar políticas institucionais de incentivo à inovação curricular, com apoio financeiro e pedagógico para docentes que queiram reformular suas disciplinas em direção à QS.
- Estabelecer parcerias entre universidades, escolas, comunidades e movimentos sociais, para o desenvolvimento de projetos integrados que levem o conhecimento químico ao enfrentamento de problemas reais.
- Reconhecer a extensão universitária como eixo formativo estratégico, permitindo que os estudantes experimentem, desde a graduação, o impacto social e ambiental de suas escolhas e práticas científicas.
- Implementar avaliação formativa e diagnóstica, que valorize os processos de aprendizagem, o pensamento crítico e a construção coletiva, e não apenas a reprodução de conteúdos.

A educação em Química, quando conectada com o território e com os desafios contemporâneos, torna-se uma ferramenta importante para a transição para a sustentabilidade, a cidadania e a inovação (Zuin; Kümmerer, 2021).

Por último, as recomendações aqui propostas não devem ser lidas como prescrições universais, mas como possibilidades construídas a partir de vivências concretas e reflexivas. Elas dialogam com os desafios enfrentados por educadores e educadoras que buscam uma prática mais crítica, integradora e transformadora.

Avançar na direção de uma educação em ciências e em química pautada pela sustentabilidade exige rupturas e reinvenções. Com base na análise realizada, observa-se que quando a ciência é ensinada com propósito, sensibilidade, complexidade, humildade e ética, se mostra também como construção humana em constante transformação, não apenas como um corpo de conhecimento, mas também como potência de mudança para o bem comum.

11. Referências

ANASTAS, Paul T.; WARNER, John Charles. **Green chemistry: theory and practice**. Oxford [England] ; New York: Oxford University Press, 1998.

ANASTAS, Paul T.; ZIMMERMAN, Julie B. The United Nations sustainability goals: How can sustainable chemistry contribute? **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 150–153, out. 2018.

ANDRADE, Rosivânia Silva; ZUIN, Vânia Gomes. A Experimentação na Educação em Química Verde: uma Análise de Propostas Didáticas Desenvolvidas por Licenciandos em Química de uma IES Federal Paulista. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, p. e25960, 29 out. 2021.

ANVISA. **Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos – PARA - Plano Plurianual 2017-2020 – Ciclo 2017/2018**. Brasília, DF: [S.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/agrotoxicos/programa-de-analise-de-residuos-em-alimentos/arquivos/3770json-file-1>>.

ARARIPE, Evelyn; ZUIN ZEIDLER, Vânia G. Advancing sustainable chemistry education: Insights from real-world case studies. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 9, p. 100436, 2024.

ARCHER, Catherine; DELMO, Kate. Play Is a Child's Work (on Instagram): A Case Study of the Use of Children as Paid Social Media Influencers to Market Toys. **M/C Journal**, v. 26, n. 2, 25 abr. 2023.

ARMAROLI, Nicola; BALZANI, Vincenzo. The Legacy of Fossil Fuels. **Chemistry – An Asian Journal**, v. 6, n. 3, p. 768–784, mar. 2011.

ARMSTRONG, Laura B. *et al.* Teaching students the complexity of green chemistry and assessing growth in attitudes and understanding. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 61–67, out. 2018.

AURISANO, Nicolò *et al.* Chemicals of concern in plastic toys. **Environment International**, v. 146, 2021.

AUSUBEL, David Paul. **Psychology of Meaningful Verbal Learning: An Introduction to School Learning**. New York: Grune & Stratton, 1963.

BAKER-SHELLEY, Alex; VAN ZEIJL-ROZEMA, Annemarie; MARTENS, Pim. Pathways of organisational transformation for sustainability: a university case-study synthesis presenting competencies for systemic change & rubrics of transformation. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 27, n. 8, p. 687–708, 16 nov. 2020.

BARBOSA LINS DE ALMEIDA, Danielle; TORRES, Polianna. UNVEILING THE LAYERS OF THE L.O.L. SURPRISE DOLL: A LINGUISTIC ANALYSIS THROUGH THE GRAMMAR OF VISUAL DESIGN. **PROLÍNGUA**, v. 14, n. 2, p. 101–113, 6 maio 2020.

BASSO, Cristiana *et al.* Interesse de vegetarianos ou veganos em adquirir hambúrgueres semelhantes à carne. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e5710917698, 21 jul. 2021.

BÉNÉ, Christophe *et al.* Global map and indicators of food system sustainability. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, p. 279, 25 nov. 2019.

BERNARDI, Flávia M.; PAZINATO, Maurícius S. The Case Study Method in Chemistry Teaching: A Systematic Review. **Journal of Chemical Education**, v. 99, n. 3, p. 1211–1219, 8 mar. 2022.

BHANDARI, Suneeta. APPLICATIONS OF GREEN CHEMISTRY PRINCIPLES IN AGRICULTURE. **Green Chemistry & Technology Letters**, v. 4, n. 2, p. 10–12, 29 set. 2018.

BIRD, Sharon R.; ERICKSON, Karla A. A Constructive Controversy Approach to “Case Studies”. **Teaching Sociology**, v. 38, n. 2, p. 119–131, abr. 2010.

BIRDMAN, Jodie; WIEK, Arnim; LANG, Daniel J. Developing key competencies in sustainability through project-based learning in graduate sustainability programs. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 23, n. 5, p. 1139–1157, 10 maio 2022.

BLATTI, Jillian L. *et al.* Systems Thinking in Science Education and Outreach toward a Sustainable Future. **Journal of Chemical Education**, v. 96, n. 12, p. 2852–2862, 10 dez. 2019.

BOMBARDI, Larissa Mies. **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia**. [S.l.]: Ffich/Usp, 2017.

BONNEY, Kevin M. Case Study Teaching Method Improves Student Performance and Perceptions of Learning Gains. **Journal of Microbiology & Biology Education**, v. 16, n. 1, p. 21–28, maio 2015.

BOWEN, Glenn A. Document Analysis as a Qualitative Research Method. **Qualitative Research Journal**, v. 9, n. 2, p. 27–40, 3 ago. 2009.

BRASIL. **Política Nacional do Meio Ambiente**. , 31 ago. 1981. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>

BRUM, Alissom; SCHIMIDT, Sarai. YouTubers mirins: pequenos vendedores e grandes negócios. *In: XVIII CONGRESSO DE CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO NA REGIÃO SUL. Anais...* Caxias do Sul, RS, Brazil: 17/06 2017. Disponível em: <<https://portalintercom.org.br/anais/sul2017/resumos/R55-0872-1.pdf>>

BRYANT, Christopher J. We Can't Keep Meating Like This: Attitudes towards Vegetarian and Vegan Diets in the United Kingdom. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6844, 2 dez. 2019.

BURMEISTER, Mareike; RAUCH, Franz; EILKS, Ingo. Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 13, n. 2, p. 59–68, 2012.

BURMEISTER, Mareike; SCHMIDT-JACOB, Sabine; EILKS, Ingo. German chemistry teachers' understanding of sustainability and education for sustainable development—An interview case study. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 14, n. 2, p. 169–176, 2013.

CARSON, Rachel. **Primavera Silenciosa**. [S.l.]: Editora Gaia, 2021.

CATTELAN, Alexandre José; DALL'AGNOL, Amélio. The rapid soybean growth in Brazil. **OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 25, n. 1, p. 1–12, 2018.

CELESTINO, Teresa. High School Sustainable and Green Chemistry: Historical–Epistemological and Pedagogical Considerations. **Sustainable Chemistry**, v. 4, n. 3, p. 304–320, 14 set. 2023.

CHKIRIDA, Soulayma; CHANTEUX, Géraldine; LU, Sherwin Hugo T. Worldwide Nurturing Green Chemistry Innovators: The 15th Green Chemistry Postgraduate Summer School 2023, dedicated to the memory of Prof. Pietro Tundo. **Chemistry International**, v. 46, n. 3, p. 38–42, 1 jul. 2024.

CORRÊA, Arlene G. *et al.* Green chemistry in Brazil. **Pure and Applied Chemistry**, v. 85, n. 8, p. 1643–1653, 10 jul. 2013.

CORRÊA, Arlene G.; ZUIN, Vânia. **Química Verde: Fundamentos E Aplicações**. [S.l.]: Edufscar, 2012.

CULLEN, John; RICHARDSON, Sue; O'BRIEN, Rona. Exploring the teaching potential of empirically-based case studies. **Accounting Education**, v. 13, n. 2, p. 251–266, jun. 2004.

DAS, Soumen; KALITA, Pratul. The Future of Sustainable Toys. *In*: CHAKRABARTI, Amaresh; SINGH, Vishal (Orgs.). **Design in the Era of Industry 4.0, Volume 2**. Smart Innovation, Systems and Technologies. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. v. 342 p. 1053–1060.

DE PRETTO, Cristine *et al.* Possibilities for Producing Energy, Fuels, and Chemicals from Soybean: A Biorefinery Concept. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 10, p. 1703–1730, 2018.

DEMONBRUN, Robert; FINELLI, Cynthia; SHEKHAR, Prateek. Methods for Establishing Validity and Reliability of Observation Protocols. *In*: 2015 ASEE ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION. **2015 ASEE Annual Conference and Exposition Proceedings**. Seattle, Washington: ASEE Conferences, jun. 2015. Disponível em: <<http://peer.asee.org/24486>>. Acesso em: 21 mar. 2025

EILKS, Ingo; SJÖSTRÖM, Jesper; ZUIN, Vânia. The responsibility of Chemists for a better world: challenges and potentialities beyond the lab. **Revista Brasileira de Ensino de Química**, v. 12, n. 1, p. 97–105, 2017.

EILKS, Ingo; ZUIN, Vânia G. Editorial Overview: Green and Sustainable Chemistry Education (GSCE): Lessons to be learnt for a safer, healthier and fairer world today and tomorrow. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. A4–A6, 1 out. 2018.

ELLIOTT, Charlene. Eatertainment and the (Re)classification of children's foods. **Food, Culture and Society**, v. 13, n. 4, p. 539–553, 2010.

ELLSWORTH-KREBS, K. Just toys? From material sustainability to co-design and degrowth. *In*: **Flourish by Design**. 1. ed. London: Routledge, 2023.

ELSCHAMI, Myriam; KÜMMERER, Klaus. Design of a Master of Science Sustainable Chemistry. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 17, p. 100270, set. 2020.

Enchentes históricas, secas severas, biomas em risco: como as mudanças climáticas extremas ameaçam o Brasil. **Globo Repórter**, 10 maio 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/globo-reporter/noticia/2024/05/11/enchentes-historicas-secas-severas-biomas-em-risco-como-as-mudancas-climaticas-extremas-ameacam-o-brasil.ghtml>>. Acesso em: 11 jun. 2024

ETULAIN, Carlos *et al.* **Relatório de Acompanhamento Setorial: Indústria de Brinquedos**. [S.l.]: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI, 2011.

Disponível em: <https://www3.eco.unicamp.br/Neit/images/stories/arquivos/Relatorios_NEIT/Industria-de-Brinquedos-Agosto-de-2011.pdf>.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Annex XV restriction report – proposal for a restriction**. Helsinki: European Chemicals Agency, 4 jan. 2016. Disponível em: <<https://echa.europa.eu/documents/10162/2700f4f2-579a-1fbe-2c23-311706a3e958>>.

EUROPEAN COMMISSION. **Farm to Fork Strategy**. Disponível em: <https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en>.

EUROPEAN COMMISSION. The European Green Deal. **European Commission**, v. 53, n. 9, p. 24, 2019.

FABRIS, Samanta; FREIRE, Maria Teresa de Alvarenga; REYES, Felix G. R. Embalagens plásticas: tipos de materiais, contaminação de alimentos e aspectos de legislação. **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 19, n. 2, p. 59–70, 2006.

FACHINA, Stefania; ARARIPE, Evelyn; ZEIDLER, Vânia G. Zuin. Defining greener, healthier and more sustainable toys: A case study of L.O.L. Surprise! **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 41, p. 101661, out. 2024.

FAIRR. **Plant-based Profits: Investment Risks and Opportunities in Sustainable Food Systems**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.fairr.org/resources/reports/plant-based-profits-investment-risks-opportunities-sustainable-food-systems>>.

FAO. **Sustainable food systems: Concept and framework**. [S.l.]: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/ca2079en/CA2079EN.pdf>>.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction**. FAO, , 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>>

FAO; JECFA. **Combined Compendium of Food Additive Specifications: Methyl Cellulose**. JECFA, , 2006. Disponível em: <<https://www.fao.org/food/food-safety-quality/scientific-advice/jecfa/jecfa-additives/detail/it/c/134/>>

FELLER, Gavin; BURROUGHS, Benjamin. Branding Kidfluencers: Regulating Content and Advertising on YouTube. **Television & New Media**, v. 23, n. 6, p. 575–592, set. 2022.

FINELLI, Cynthia J. *et al.* A classroom observation instrument to assess student response to active learning. *In*: 2014 IEEE FRONTIERS IN EDUCATION CONFERENCE (FIE). **2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings**. Madrid, Spain: IEEE, out. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7044084/>>. Acesso em: 21 mar. 2025

FLYVBJERG, Bent. Five Misunderstandings About Case-Study Research. **Qualitative Inquiry**, v. 12, n. 2, p. 219–245, abr. 2006.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia do oprimido**. [S.l.]: Editora Paz e Terra, 2021.

FREITAS, Denise *et al.* **A natureza dos argumentos na análise de temas controversos: estudo de caso na formação de pósgraduandos numa abordagem CTS**. UFSCar, , 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228372371_A_natureza_dos_argumentos_n_a_analise_de_temas_controversos_estudo_de_caso_na_formacao_de_posgraduandos_numa_abordagem_CTS/citations>

FRESÁN, Ujué *et al.* Meat analogs from different protein sources: A comparison of their sustainability and nutritional content. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 12, 2019.

FROMM, Jeff. L.O.L. Surprise! Unveils New Product Innovation: MGA CEO Discusses Sustainability. **Forbes News**, 15 fev. 2022.

GAO, Hui *et al.* Bisphenol A and Hormone-Associated Cancers: Current Progress and Perspectives. **Medicine**, v. 94, n. 1, p. e211, jan. 2015.

GERRING, John. What Is a Case Study and What Is It Good for? **American Political Science Review**, v. 98, n. 2, p. 341–354, maio 2004.

GERRING, John. **Case study research: principles and practices**. Second edition ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos E Técnicas De Pesquisa Social**. [S.l.]: Atlas, 2008.

GOLUMBIC, Yaela N.; MOTION, Alice. Expanding the Scope of Citizen Science: Learning and Engagement of Undergraduate Students in a Citizen Science Chemistry Lab. **Citizen Science: Theory and Practice**, v. 6, n. 1, p. 31, 1 dez. 2021.

GOMES ZUIN, Vânia. A inserção da Química Verde nos programas de pós-graduação em Química do Brasil: tendências e perspectivas. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, v. 10, n. 21, 14 fev. 2014.

GOMES ZUIN, Vânia; DE FREITAS, Denise. A utilização de temas controversos: estudo de caso na formação de licenciandos numa abordagem CTSA. **Ciência & Ensino**, v. 1, n. n. 2, 2007.

GRAZZIOTIN, Luciane Sgarbi; KLAUS, Viviane; PEREIRA, Ana Paula Marques. Documentary historical analysis and bibliographic research: study subjects and methodology. **Pro-Posições**, v. 33, p. e20200141, 2022.

GÜNTER, Tuğçe; AKKUZU, Nalan; ALPAT, Şenol. Understanding ‘green chemistry’ and ‘sustainability’: an example of problem-based learning (PBL)*. **Research in Science and Technological Education**, v. 35, n. 4, p. 500–520, 2017.

HAACK, Julie A.; HUTCHISON, James E. Green chemistry education: 25 years of progress and 25 years ahead. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 4, n. 11, p. 5889–5896, 7 nov. 2016.

HAMILTON, Lorna; CORBETT-WHITTIER, Connie. **Using Case Study in Education Research**. 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications Ltd, 2013.

HEIJNK, Vicky; ESPEY, Amelia; SCHUENEMANN, Franziska. A comparison of influencing factors on attitudes towards plant-based, insect-based and cultured meat alternatives in Germany. **Food Quality and Preference**, v. 110, p. 104966, ago. 2023.

HERREID, Clyde Freeman. What Makes a Good Case? **Journal of College Science Teaching**, v. 27, n. n3, p. 163–65, 1998.

HOBUSS, Steffi *et al.* Die Lehrstrategie am Beispiel der Leuphana Universität Lüneburg. *In*: BRÜNKEN, Roland *et al.* (Orgs.). **Hochschulen im Wandel**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. p. 49–74.

HUTZINGER, Otto. The greening of chemistry — Is it sustainable? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 6, n. 3, p. 123–123, set. 1999.

IBOPE. **Pesquisa de opinião pública sobre vegetarianismo**. [S.l.]: IBOPE Inteligência, abr. 2018. Disponível em: <https://old.svb.org.br/images/Documentos/JOB_0416_VEGETARIANISMO.pdf>.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 1 set. 2024.

IPES-FOOD. **The politics of protein: examining claims about livestock, fish, 'alternative proteins' and sustainability**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://ipes-food.org/wp-content/uploads/2024/03/PoliticsOfProtein.pdf>>.

IUPAC. **Systems Thinking in Chemistry for Sustainability: Toward 2030 and Beyond (STCS 2030+)**. Disponível em: <<https://iupac.org/project/2020-014-3-050/>>.

JACOBSON, Melanie H. *et al.* Urinary Bisphenols and Obesity Prevalence Among U.S. Children and Adolescents. **Journal of the Endocrine Society**, v. 3, n. 9, p. 1715–1726, 1 set. 2019.

JOHNSON, Filip; KJÄRSTAD, Jan; ROOTZÉN, Johan. The threat to climate change mitigation posed by the abundance of fossil fuels. **Climate Policy**, v. 19, n. 2, p. 258–274, 7 fev. 2019.

JÚNIOR, Carlos; JESUS, Dossil; JÚNIOR, Gildo. QUÍMICA VERDE E A TABELA PERIÓDICA DE ANASTAS E ZIMMERMAN: TRADUÇÃO E ALINHAMENTOS COM O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Química Nova**, 2022.

JUNTUNEN, M. K.; AKSELA, M. K. Education for sustainable development in chemistry – challenges, possibilities and pedagogical models in Finland and elsewhere. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 15, n. 4, p. 488–500, 2014.

KAMIŃSKI, Mikołaj *et al.* Global and local diet popularity rankings, their secular trends, and seasonal variation in Google Trends data. **Nutrition**, v. 79–80, p. 110759, nov. 2020.

KARPUDEWAN, Mageswary. Exploring current and future adoption of green and sustainable criteria by Malaysian parents in toy selection. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 37, p. 101407, fev. 2024.

KEOLEIAN, Gregory A.; HELLER, Martin C. Beyond Meat's Beyond Burger Life Cycle Assessment: A detailed comparison between a plant-based and an animal-based protein source. 14 set. 2018.

KESTENBAUM, Richard. **How The Pandemic Has Changed The Toy Business And The Latest Trends In Toys**. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/richardkestenbaum/2021/04/20/how-the-pandemic-has-changed-the-toy-business-and-the-latest-trends-in-toys/>>. Acesso em: 12 maio. 2023.

KUMAR, Manoj *et al.* Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations. **Food Hydrocolloids**, v. 115, p. 106595, jun. 2021.

KUMAR, Pavan *et al.* Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 5, p. 923–932, 24 mar. 2017.

KÜMMERER, K. *et al.* Key Characteristics of Sustainable Chemistry. *In*: International Sustainable Chemistry Collaborative Centre (ISC3), 13 jan. 2021. Disponível em: <https://www.isc3.org/cms/wp-content/uploads/2022/06/ISC3_Sustainable_Chemistry_key_characteristics_20210113.pdf>. Acesso em: 12 maio. 2023

KÜMMERER, Klaus. Sustainable Chemistry: A Future Guiding Principle. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 56, n. 52, p. 16420–16421, 22 dez. 2017.

KÜMMERER, Klaus; CLARK, James. Green and Sustainable Chemistry. *In*: HEINRICHS, Harald *et al.* (Orgs.). **Sustainability Science**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016. p. 43–59.

LANDIM, Ana Paula Miguel *et al.* Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, n. spe, p. 82–92, 19 jan. 2016.

LAPOULE, Paul; LYNCH, Richard. The case study method: exploring the link between teaching and research. **Journal of Higher Education Policy and Management**, v. 40, n. 5, p. 485–500, 3 set. 2018.

LEVY, Jack S. Case Studies: Types, Designs, and Logics of Inference. **Conflict Management and Peace Science**, v. 25, n. 1, p. 1–18, fev. 2008.

LIEBER, Chavie. How L.O.L. Dolls Became the Dopamine Hit of a Generation. **The New York Times**, 16 abr. 2020.

MAAS, Gideon; JONES, Paul (ORGS.). **Systemic entrepreneurship: contemporary issues and case studies**. Basingstoke, Hampshire: Palgrave Macmillan, 2015.

MAHAFFY, Peter G. *et al.* Systems thinking for education about the molecular basis of sustainability. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 362–370, 13 maio 2019.

MARQUES, Carlos Alberto *et al.* Green chemistry teaching: a panorama from Brazilian authors. **ACTIO: Docência em Ciências**, v. 8, n. 3, p. 1, 19 dez. 2023.

MAXIMIANO, Flavio A. *et al.* Química Ambiental e Química Verde no conjunto do conhecimento químico: concepções de alunos de graduação em Química da Universidade de São Paulo. **Educación Química**, v. 20, n. 4, p. 398–404, out. 2009.

MENDES, Tiago *et al.* Diagnóstico termodinâmico em um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor utilizando modelos e técnicas de inteligência computacionais/ Thermodynamic diagnosis in a mechanical steam compression cooling system using computational intelligence models and techniques. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 34433–34448, 5 abr. 2021.

MONTEIRO, Carlos A. *et al.* Ultra-processed foods: what they are and how to identify them. **Public Health Nutrition**, v. 22, n. 5, p. 936–941, abr. 2019.

MORAES, Roque; GALIAZZI, Maria do Carmo. Análise textual discursiva: processo reconstrutivo de múltiplas faces. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 12, n. 1, p. 117–128, abr. 2006.

MURRAY, Claire A. *et al.* Project M: investigating the effect of additives on calcium carbonate crystallisation through a school citizen science program. **CrystEngComm**, v. 26, n. 6, p. 753–763, 2024.

NASATTO, Pauline *et al.* Methylcellulose, a Cellulose Derivative with Original Physical Properties and Extended Applications. **Polymers**, v. 7, n. 5, p. 777–803, 24 abr. 2015.

NASCIMENTO, Rhaysa Myrelle Farias Do; LEITE, Bruno Silva. Design Thinking Como Estratégia de Ensino e Aprendizagem em Química Sustentável no Ensino Médio. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, p. e51171, 30 maio 2024.

OCAÑA-FERNÁNDEZ, Yolvi; FUSTER-GUILLÉN, Doris. The bibliographical review as a research methodology. **Revista Tempos e Espaços em Educação**, v. 14, n. 33, p. e15614, 1 maio 2021.

OECD. **Risk management, risk reduction and sustainable chemistry**. Disponível em: <<https://www.oecd.org/en/topics/risk-management-risk-reduction-and-sustainable-chemistry.html>>.

O'LEARY, Matt. **Classroom Observation: A Guide to the Effective Observation of Teaching and Learning**. 2. ed. Second edition. | New York: Routledge, 2020.: Routledge, 2020.

OLIVEIRA, Marta Regina Furlan De; SOUZA, Ravelli Henrique De; ARAUJO, Karina De Toledo. Brinquedo sem brincadeira: reflexões sobre a indústria do brincar na infância contemporânea. **Doxa: Revista Brasileira de Psicologia e Educação**, v. 21, n. 1, p. 28–43, 1 fev. 2019.

OZTURK, Oguz K.; HAMAKER, Bruce R. Texturization of plant protein-based meat alternatives: Processing, base proteins, and other constructional ingredients. **Future Foods**, v. 8, p. 100248, dez. 2023.

PADILHA, Valquiria; PALOS, Ana Cristina Pires; VEIGA, Carlos Veloso Da. The importance of digital influencers for consumption desire formation in young portuguese people. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 44, n. 1, p. e61488, 26 jul. 2022.

PARGA LOZANO, Diana Lineth. Conocimiento didáctico del contenido sobre la química verde: el caso de los profesores universitarios de química. **TED: Tecné, Episteme y Didaxis**, v. 38, n. 38, 2 mar. 2015.

PARGA-LOZANO, Diana Lineth; PACHECO DE CARVALHO, Washington Luiz. A pesquisa sobre ambientalização curricular. **Tecné, Episteme y Didaxis: TED**, n. 46, 1 jun. 2019.

PASCHALIDOU, Katerina; SALTA, Katerina; KOULOUGLIOTIS, Dionysios. Exploring the connections between systems thinking and green chemistry in the context of chemistry education: A scoping review. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 29, p. 100788, out. 2022.

PEREIRA, J. G. N.; LIMA, M. L. S. de O.; SAMPAIO, C. de G. Avanços e Desafios da Educação em Química Verde (EQV) no Brasil: Uma Revisão Sistemática da Literatura. **Revista Cocar**, 39. v. 21, 2024.

PFEILER, Tamara M.; EGLOFF, Boris. Examining the “Veggie” personality: Results from a representative German sample. **Appetite**, v. 120, p. 246–255, jan. 2018.

PITANGA, Ângelo Francklin. **CRISE DA MODERNIDADE, EDUCAÇÃO AMBIENTAL, EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E EDUCAÇÃO EM**

QUÍMICA VERDE: (RE)PENSANDO PARADIGMAS. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 18, n. 3, p. 141–159, dez. 2016.

POORE, J.; NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. **Science**, v. 360, n. 6392, p. 987 LP – 992, 1 jun. 2018.

PREECE, K. E. *et al.* Pilot-scale ultrasound-assisted extraction of protein from soybean processing materials shows it is not recommended for industrial usage. **Journal of Food Engineering**, v. 206, p. 1–12, ago. 2017.

RAJÃO, Raoni *et al.* The rotten apples of Brazil's agribusiness. **Science**, v. 369, n. 6501, p. 246–248, 2020.

REIS, Pedro; GALVÃO, Cecília. Socio-scientific controversies and students' conceptions about scientists. **International Journal of Science Education**, v. 26, n. 13, p. 1621–1633, out. 2004.

REZENDE, Claudia M.; ZUIN, Vânia G. Green Chemistry: Convergences and Potential in the Brazilian Scenario. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, 2014.

RITCHIE, Hannah. **Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?** Disponível em: <<https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>>.

RITZER, George. **Enchanting a disenchanted world: revolutionizing the means of consumption**. 2nd ed ed. Thousand Oaks, Calif: Pine Forge Press, 2005.

RODRIGUES DE ALMEIDA, Queli Aparecida *et al.* Química Verde nos cursos de Licenciatura em Química do Brasil: mapeamento e importância na prática docente. **Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas**, v. 15, n. 34, p. 178, 31 dez. 2019.

SÁEZ BONDÍA, M. J.; CORTÉS GRACIA, A. L. Action research in education: a set of case studies? **Educational Action Research**, v. 30, n. 5, p. 850–864, 20 out. 2022.

SAINI, Akanksha *et al.* Do environment-friendly toys have a future? An empirical assessment of buyers' green toys decision-making. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, n. 3, p. 5869–5889, 22 jan. 2023.

SAMMUR, Jullie Tenório Ed Din *et al.* UNBOXING NO CIBERESPAÇO: INFLUENCIA DOS VÍDEOS LOL SURPRISE DOLLS NOS HÁBITOS DE CONSUMO INFANTIL. *In*: VANESSA CRISTINA DE ABREU TORRES HRENECHEN (Ed.). **Ciências da Comunicação 2**. 1. ed. [S.l.]: Atena Editora, 2019. p. 141–148.

SANTO, Raychel E. *et al.* Considering Plant-Based Meat Substitutes and Cell-Based Meats: A Public Health and Food Systems Perspective. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 134, 31 ago. 2020.

SANTOS, Boaventura de Sousa. **A cruel pedagogia do vírus**. São Paulo: Boitempo, 2021.

SANTOS, Deborah; LIMA, Lilian; JUNIOR, Gildo. A FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE QUÍMICA, MUDANÇAS NA REGULAMENTAÇÃO E OS IMPACTOS NA ESTRUTURA EM CURSOS DE LICENCIATURA EM QUÍMICA. **Química Nova**, 2020.

SATIJA, Ambika *et al.* Plant-Based Dietary Patterns and Incidence of Type 2 Diabetes in US Men and Women: Results from Three Prospective Cohort Studies. **PLOS Medicine**, v. 13(6), 14 jun. 2016.

SATIJA, Ambika *et al.* Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults. **Journal of the American College of Cardiology**, v. 70, n. 4, p. 411–422, jul. 2017.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. [S.l.]: Cortez Editora, 2021.

SJÖSTRÖM, Jesper *et al.* Use of the concept of Bildung in the international science education literature, its potential, and implications for teaching and learning. **Studies in Science Education**, v. 53, n. 2, p. 165–192, 3 jul. 2017.

SJÖSTRÖM, Jesper; EILKS, Ingo; ZUIN, Vânia G. Towards Eco-reflexive Science Education: A Critical Reflection About Educational Implications of Green Chemistry. **Science and Education**, v. 25, n. 3–4, p. 321–341, 2016.

SJÖSTRÖM, Jesper; TALANQUER, Vicente. Eco-reflexive chemical thinking and action. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 16–20, 1 out. 2018.

SNYDER, Hannah. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333–339, nov. 2019.

SOUZA, Marcela Tavares De; SILVA, Michelly Dias Da; CARVALHO, Rachel De. Integrative review: what is it? How to do it? **Einstein (São Paulo)**, v. 8, n. 1, p. 102–106, mar. 2010.

STERLING, Stephen R. **Sustainable education: re-visioning learning and change**. Totnes: Green Books for the Schumacher Society, 2001.

SUBHAN, Fatheema B.; CHAN, Catherine B. Review of Dietary Practices of the 21st Century: Facts and Fallacies. **Canadian Journal of Diabetes**, v. 40, n. 4, p. 348–354, ago. 2016.

SUI, Xiaonan; ZHANG, Tianyi; JIANG, Lianzhou. Soy Protein: Molecular Structure Revisited and Recent Advances in Processing Technologies. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 119–147, 25 mar. 2021.

TOZONI-REIS, Marília Freitas De Campos; CAMPOS, Luciana Maria Lunardi. Educação ambiental escolar, formação humana e formação de professores: articulações necessárias. **Educar em Revista**, n. spe3, p. 145–162, 2014.

TU, Jui-Che *et al.* Analyzing Decision-Making Factors of Green Design for Kid's Toys Based on the Concept of Product Lifecycle. **Processes**, v. 10, n. 8, p. 1523, 3 ago. 2022.

UN ENVIRONMENT. **Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development**. [S.l.]: United Nations Environment Programme, 2019.

UNEP. **About Montreal Protocol**. Disponível em: <<https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol>>.

UNESCO. **Education for sustainable development: a roadmap**. [S.l.]: UNESCO, 2020.

UNFCCC. **ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement text English**. Paris: [S.n.]. . Acesso em: 26 jan. 2021.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>.

VIEIRA, Marisa Sartori; LEME, Patricia Cristina Silva; ZUIN, Vânia Gomes. Students' Views of Environmental Issues: The Experience of a Federal Brazilian University. *In*: LEAL FILHO, Walter (Org.). **Transformative Approaches to Sustainable Development at Universities**. World Sustainability Series. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 525–540.

VILSMAIER, Ulli; LANG, Daniel J. Making a difference by marking the difference: constituting in-between spaces for sustainability learning. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 16, p. 51–55, out. 2015.

WANG, Mei-Yan; LI, Xiao-Ya; HE, Liang-Nian. Green chemistry education and activity in China. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 123–129, out. 2018.

WANG, Yufei; QIAN, Haifeng. Phthalates and Their Impacts on Human Health. **Healthcare**, v. 9, n. 5, p. 603, 18 maio 2021.

WATERS, James. A model of the dynamics of household vegetarian and vegan rates in the U.K. **Appetite**, v. 127, p. 364–372, ago. 2018.

YIN, Robert K. **Case study research: design and methods**. 5. edition ed. Los Angeles London New Delhi Singapore Washington, DC: SAGE, 2014.

ZANDONAI, Dorai P. *et al.* Green Chemistry and the Training of Chemists: a Report of a Didactic Experience Outside the Learning Laboratory. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, 2014.

ZANOTTI, Karine *et al.* Green and Sustainable Extraction of High-Value Compounds: Protein from Food Supply Chain Waste. *In: SZEKELY, Gyorgy; ZHAO, Dan (Orgs.). Sustainable Separation Engineering*. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2022. p. 63–104.

ZAPPI, Daniela C. *et al.* Growing knowledge: an overview of Seed Plant diversity in Brazil. **Rodriguésia**, v. 66, n. 4, p. 1085–1113, 2015.

ZEIDLER, Dana L. *et al.* Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. **Science Education**, v. 89, n. 3, p. 357–377, maio 2005.

ZUIN, V.; PACCA, J. A ambientalização curricular e a formação inicial de professores de química: um estudo de caso brasileiro. *In: VIII CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE INVESTIGACIÓN EN DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS. Anais...* Barcelona: Enseñanza de las Ciencias, 2009. Disponível em: <<http://ensciencias.uab.es/congreso09/numeroextra/art-2323-2326.pdf>>

ZUIN, Vânia G. Circularity in green chemical products, processes and services: Innovative routes based on integrated eco-design and solution systems. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 2, p. 40–44, 2016.

ZUIN, Vânia G. *et al.* Integrating Green and Sustainable Chemistry into Undergraduate Teaching Laboratories: Closing and Assessing the Loop on the Basis of a Citrus Biorefinery Approach for the Biocircular Economy in Brazil. **Journal of Chemical Education**, v. 96, n. 12, p. 2975–2983, 10 dez. 2019.

ZUIN, Vânia G. *et al.* Education in green chemistry and in sustainable chemistry: perspectives towards sustainability. **Green Chemistry**, v. 23, n. 4, p. 1594–1608, 2021a.

ZUIN, Vânia G. *et al.* Alternative Products Selling Sustainability? A Brazilian Case Study on Materials and Processes to Produce Plant-Based Hamburger Patties. **Sustainable Chemistry**, v. 3, n. 3, p. 415–429, 8 set. 2022.

ZUIN, Vânia G.; KÜMMERER, Klaus. Towards more sustainable curricula. **Nature Reviews Chemistry**, v. 5, n. 2, p. 76–77, 21 fev. 2021.

ZUIN, Vânia Gomes. **A inserção da dimensão ambiental na formação de professores de química**. [S.l.]: Átomo, 2011.

ZUIN, Vânia Gomes; ARARIPE, Evelyn; FACHINA, Stefania. **Plasticized childhood: The impact of plastic toy advertising to children on their health and the environment**. São Paulo: Alana Institute, 2020. Disponível em: <<https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge-centre/resources/plasticized-childhood-impact-plastic-toy-advertising-children-their>>.

ZUIN, Vânia Gomes; FARIAS, Carmen R.; FREITAS, Denise De. A ambientalização curricular na formação inicial de professores de Química: considerações sobre uma experiência brasileira. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 2, 2009.

ZUIN, Vânia Gomes; MARQUES, Carlos Alberto. Green Chemistry Education in Brazil: Contemporary Tendencies and Reflections at Secondary School Level. *In*: ZUIN, Vânia; MAMMINO, Liliana (Orgs.). **Worldwide Trends in Green Chemistry Education**. [S.l.]: The Royal Society of Chemistry, 2015. p. 27–44.

ZUIN, Vânia Gomes; PACCA, Jesuína Lopes De Almeida. Formación docente en química y ambientación curricular: estudio de caso en una institución de enseñanza superior brasileña. **Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas**, v. 31, n. 1, p. 79–93, 11 dez. 2012.

ZUIN, Vânia; MAMMINO, Liliana (ORGS.). **Worldwide Trends in Green Chemistry Education**. [S.l.]: The Royal Society of Chemistry, 2015.

ZUIN ZEIDLER, Vânia G. Defining sustainable chemistry—an opportune exercise? **Science**, v. 382, n. 6667, p. eadk7430, 13 out. 2023.

ZUIN ZEIDLER, Vânia G. Sustainable chemistry and food systems lessons—the same procedure as every year? **Science**, v. 383, n. 6683, p. eado2352, 9 fev. 2024.

APÊNDICE

A. *Caminho de Análise e Categorização*

Etapas da Análise Textual Discursiva

1. Unitarização (Unidades de sentido):

Os relatórios produzidos pela pesquisadora foram lidos de forma flutuante e recursiva. A partir dessa leitura, foram destacados fragmentos de texto que expressavam sentidos relevantes ao objetivo da pesquisa, especialmente no que tange ao aprendizado, às percepções e às conexões feitas pelos estudantes entre química, sustentabilidade e pensamento sistêmico. Esses fragmentos foram codificados no MAXQDA como unidades de sentido.

Exemplo de unidade de sentido:

“Eu nunca tinha pensado que o impacto por trás dos brinquedos vai além dos materiais que usamos”

2. Categorização (Agrupamento de núcleos de sentido):

As unidades de sentido foram agrupadas por afinidade semântica e temática. Esses agrupamentos deram origem a núcleos de sentido provisórios, que foram comparados e refinados ao longo de sucessivas leituras. A organização dessas unidades foi feita com apoio do sistema de códigos do MAXQDA, que permitiu visualizar frequência e co-ocorrência entre diferentes temas.

Exemplo de agrupamento de unidades com sentido semelhante:

- Incômodo pessoal com os estudos de caso;
- Reconhecimento de impactos ocultos;
- Reflexões sobre cotidiano e consumo;
- Surpresa ou choque com descobertas feitas durante o estudo de caso.

Esses elementos formaram parte do núcleo que resultaria na categoria “Controvérsia positiva: ‘isso não é sobre você’”.

3. Metatextos (Interpretação consolidada dos sentidos emergentes):

Para cada núcleo de sentido, foram produzidos metatextos interpretativos, que consolidavam as compreensões construídas a partir da análise dos dados e dialogavam com o referencial teórico. Esses metatextos funcionaram como síntese hermenêutica, permitindo a reconstrução dos dados em uma perspectiva crítica e sistêmica.

Exemplo de trecho interpretativo (metatexto):

“Ao se depararem com temas controversos que tangem diretamente seu cotidiano, os estudantes parecem experimentar um deslocamento de perspectiva. A química, antes percebida como distante, se torna parte de suas histórias, suas memórias e seus hábitos. Esse confronto com a realidade, por vezes desconfortável, favorece o engajamento com o conteúdo de forma crítica.”

Tabela: Exemplo de Caminho Analítico de uma Categoria

Etapa	Exemplo
Unidade de sentido	“Eu nunca tinha pensado que o impacto por trás dos brinquedos vai além dos materiais que usamos”
Núcleo de sentido	Relação entre química, química sustentável e transdisciplinaridade
Metatexto	Os estudantes demonstram surpresa ao perceber que as soluções para a agenda de brinquedos, a partir da QS, vai além da Química e demonstraram muita surpresa sobre o impacto do marketing sobre brinquedos na saúde das crianças e seus respectivos problemas ambientais.
Categoria final	Repensando a prática