

A pesquisa em Ensino de Química Verde: temas e tipologias de estudos

Green Chemistry Education research: themes and typologies of studies

Leonardo Victor Marcelino¹
Carlos Alberto Marques²

Resumo

A Química Verde emerge como uma resposta proativa da Química aos problemas do ambiente, buscando rotas sintéticas e produtos químicos inerentemente seguros. Ao tentar compatibilizar as interações entre homem e natureza, os valores do crescimento econômico podem se sobrepor ao valor ambiental, reforçando a necessidade de uma educação em QV crítica-humanizadora. Contudo, o ensino de QV tem se voltado principalmente para a criação de práticas laboratoriais verdes, de modo que vislumbrar alternativas para seu ensino pode ser uma tarefa difícil considerando o crescente número de publicações do campo. Assim, o objetivo do trabalho é investigar a literatura em ensino de QV, buscando traçar um panorama de temas da pesquisa, relacionados a conteúdos, objetivos ou estratégias de ensino recorrentes no campo, ampliando o rol de possibilidades para sua inclusão na educação. Para tanto, recorreremos à estudos métricos da informação, especialmente análise de acoplamento bibliográfico, para analisar mais de 1.200 trabalhos entre 1990 e junho de 2022. Cinco temas de pesquisa se destacaram: pensamento sistêmico, educação QV para sustentabilidade, sínteses orgânicas verdes, métricas e inserção da QV no ensino. As pesquisas apresentam duas naturezas: instrumentalizante e metacientífica. Maior articulação entre esses dois tipos é necessária para promover uma educação em QV efetiva e com objetivos didáticos condizentes com a educação crítica e humanizadora.

Palavras chave: Química Verde; sustentabilidade; bibliometria; pensamento sistêmico.

Abstract

Green Chemistry (GC) emerges as a proactive response from Chemistry to environmental problems, seeking inherently safe synthetic routes and chemicals. When trying to make human-environment interactions compatible, values of economic growth can override the environmental value, reinforcing the need for a critical-humanizing education. However, GC teaching has focused mainly on green laboratory practices. Finding alternative strategies for inserting GC in education can be a difficult task, with the growing number of publications in the field. Thus, the objective of this work is to investigate the literature on GC teaching, seeking to outline an overview of themes and teaching strategies, expanding possibilities of inserting GC in teaching. We resorted to metric studies of information, especially bibliographic coupling analysis, to analyze more than 1,200 works between 1990 and June 2022. Five research themes stood out: systems thinking, GC education for sustainability, green organic syntheses, metrics and insertion of GC in teaching. Research has two natures: instrumentalizing and meta-

¹ Universidade Federal de Santa Catarina | leovmarcelino@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina | carlos.marques@ufsc.br

scientific. Greater articulation between these two types is necessary to promote an effective GC education with didactic objectives consistent with critical and humanizing education.

Keywords: Green chemistry; sustainability; bibliometrics; systems thinking.

Introdução

De acordo com Anastas e Warner (1998, p.11) "Química Verde [QV] é a utilização de um conjunto de princípios que reduz ou elimina o uso ou a geração de substâncias perigosas na concepção, fabrico e aplicação de produtos químicos". A QV emergiu na década de 1990 como uma resposta proativa da Química aos problemas do ambiente, considerando que não bastava limitar e controlar a exposição e o descarte dos produtos químicos, sendo necessário desenvolver rotas sintéticas e produtos químicos inerentemente seguros (POLIAKOFF *et al.*, 2002). Desse modo, Marques e Machado (2019) mostram que a QV vem sendo progressivamente defendida como a "base molecular da sustentabilidade" (ANASTAS; ZIMMERMAN, 2016; MAHAFFY *et al.*, 2019), ainda que as possibilidades e limites dessa relação não sejam claros, mesmo entre pesquisadores químicos (MARQUES *et al.*, 2014; MARQUES; MACHADO, 2014).

A QV surgiu no rastro do movimento ambientalista estadunidense a partir da denúncia dos impactos ambientais da prática científico-tecnológica e da tomada de consciência da responsabilidade da ciência e tecnologia em desenvolver práticas mais seguras ao meio ambiente e sociedade em geral (EILKS; SJÖSTRÖM; ZUIN, 2017). Com o acirramento da crise ambiental de causa antropogênica, a Química tem sido conclamada a repensar suas práticas, desenvolvendo processos e substâncias mais seguras e eficientes, contribuindo com a busca da sustentabilidade (ALMEIDA *et al.*, 2019). Tal é o papel da Química, que ela é bastante citada no Relatório Brundlandt, seja por sua contribuição nas causas dos problemas ambientais ou pela sua possibilidade de enfrentamento desses problemas (MARQUES; MACHADO, 2021).

Para Marcelino (2020), o ambiente é um dos valores que orienta a racionalidade prática da QV, mas que está em forte tensão com valores de crescimento econômico, reproduzindo a luta entre preservação ambiental e geração de lucro. Para o autor, as estratégias da QV para compatibilizar ambiente e lucro podem incorrer na racionalidade instrumental, já que valores econômicos hegemônicos podem se sobrepor ao valor ambiental que não é criticamente refletido, reforçando a necessidade de uma educação em QV crítica e humanizadora (MARCELINO, 2020).

Marques *et al.* (2020) mostram uma tendência de crescimento em pesquisas sobre ensino da QV, especialmente na educação superior. Pesquisas têm demonstrado a predominância de propostas de ensino e relatos de experiência de ensino de QV por meio de atividades práticas de laboratório, geralmente pela substituição de experimentos tradicionais no currículo por suas variantes verdes (CHEN; JERONEN; WANG, 2020; FERK SAVEC; MLINAREC, 2021; MARQUES; MACHADO, 2021). Não menos frequente, essas propostas são voltadas ao ensino de Química Orgânica (COSTA; RIBEIRO; MACHADO, 2008).

Ainda que a prática laboratorial seja parte primordial da profissão do químico e da educação em Química em geral (DINIZ; BARROS; ASSIS, 2020), ela pode não transpassar toda a complexidade da Química. É necessário discutir o papel social da Química e a responsabilidade dos químicos (EILKS; SJÖSTRÖM; ZUIN, 2017), bem como desenvolver competências para que o sujeito não-químico/não-especialista possa usar a QV como ferramenta para agir na sociedade, exercendo sua cidadania (YAVUZKAYA; CUCLAS;

SJÖSTRÖM, 2022). Para Sjöström e Talanquer (2014), é necessário humanizar a Química (Verde), levando o ensino além da exploração das aplicações práticas, discutindo também a história do campo, os valores, os princípios e a forma como grupos sociais podem/puderam instrumentalizar a ciência para mover a sociedade.

Contudo, demarcar a pluralidade de estratégias de inserção da QV no ensino (além das atividades laboratoriais) pode ser uma tarefa difícil, com o crescente número de publicações do campo. Assim, o objetivo do trabalho é investigar a literatura em ensino de QV, buscando traçar um panorama de temas e estratégias de ensino. Com isso, esperamos ampliar a divulgação das possibilidades de se trabalhar a QV no ensino, procurando combater a incipiência da QV na educação, especialmente na formação do químico (ALMEIDA *et al.*, 2019). Para tanto, recorreremos à estudos métricos da informação, especialmente análise de acoplamento bibliográfico (KESSLER, 1963), para encontrar padrões no compartilhamento de referências do campo e traçar a topologia de temas de pesquisa.

Metodologia

No intuito de identificar temas da pesquisa em educação em Química Verde, recorreu-se à análise de acoplamento bibliográfico (KESSLER, 1963), uma técnica bibliométrica que compara a semelhança entre dois textos a partir do compartilhamento de referências idênticas. Quanto mais referências citadas dois artigos possuírem em comum, maior a sua proximidade em termos de conceitos, metodologias e práticas. Outros pesquisadores da área de ensino de ciências também utilizam técnicas bibliométricas, por exemplo, para analisar a formação de pesquisadores da área (GHENO *et al.*, 2021).

As informações a serem analisadas foram selecionadas da base de dados *Web of Science*. Na seção de pesquisa avançada, procuraram-se os trabalhos publicados até junho de 2022 (data em que a pesquisa foi realizada), considerando um conjunto de termos que descrevem a QV e o campo do ensino de química, dividido em quatro partes.³ O primeiro termo de busca trabalhos com o termo química (chem*) em qualquer parte dos registros da base de dados, associado à busca tópica (em títulos, resumos e palavras-chave) por termos historicamente relacionados à QV (sustentável, limpa e benigna) e ao campo do ensino (educação, ensino e aprendizagem). O segundo termo busca especificamente a frase "química verde" (green* chem*) e frases relacionadas ao campo do ensino (educação, ensino e aprendizagem) em títulos, resumos e palavras-chave. O terceiro termo busca, em revistas com as palavras "green* chem*" em seu título, trabalhos com os termos educação, ensino e aprendizagem em títulos, resumos e palavras-chave. Por fim, a quarta busca é direcionado a termos mais específicos da QV (catálise verde, solvente verde, etc.) associados ao campo do ensino. Os quatro termos são combinados com o operador OR, para retornar artigos que atendam a pelo menos um deles.

³ Termos das busca: Busca #1: ((ALL=(chem*)) AND TS=(sustain* OR clean* OR benign)) AND TS=(educ* OR teach* OR learn*); Busca #2: ((TS="green* chem*") AND TS=(educ* OR teach* OR learn*)); Busca #3: SO=(green* chem*) AND TS=(educ* OR teach* OR learn*); Busca #4: (ALL=chem* AND TS=("green* catal*" OR "green* solvent*" OR "green* reaction" OR "green* process" OR "green* syntheses*" OR "green* product" OR "green* surfactant" OR "green* reactant")) AND TS=(educ* OR teach* OR learn*).

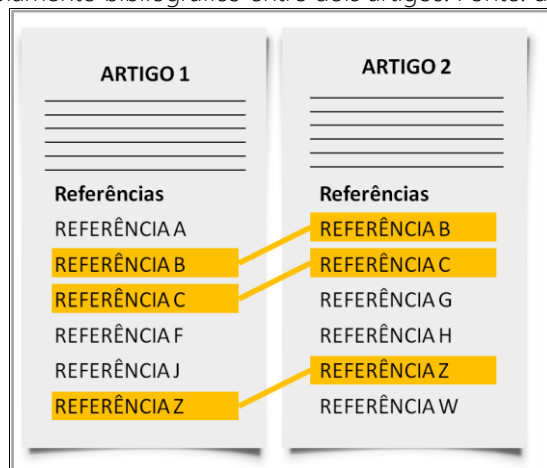
A busca selecionou um total de 1.275 registros, cujas informações bibliográficas foram exportadas do *Web of Science* em formato adequado para análises futuras (texto sem formatação). Após análises exploratórias com os dados gerados, percebeu-se a existências de marcações inválidas de referências citadas (*cited references*) nos registros do *Web of Science*, que eram escritas como “[no title captured]”. Essas referências foram apagadas do conjunto de dados, de forma a não gerar vínculos de acoplamento enganosos. Referências cujo autor estava marcado como “Anonymous” foram mantidas, já que os dados de veículo (título de revista, evento ou livro) e ano de publicação eram diferenciados entre os registros, sinalizando trabalhos distintos. De posse desses dados, realizou-se a análise de acoplamento, descrita a seguir.

Análise de Acoplamento

A análise de acoplamento bibliográfico surge em 1963 (KESSLER, 1963) e quantifica o grau de envolvimento entre duas publicações por meio da quantidade de referências citadas simultaneamente por esses artigos (GRÁCIO, 2016). Essa análise permite identificar núcleos de pesquisa, produções e autores importantes dentro da área.

A Figura 1 mostra a representação do acoplamento bibliográfico entre dois artigos. O Artigo 1 e o Artigo 2 estão acoplados por três referências: a Referência B, Referência C e Referência Z. Essas referências compartilhadas nos dizem quais são os conceitos e metodologias que aproximam esses dois artigos. Quanto mais referências forem compartilhadas, mais forte o acoplamento e mais forte a interação intelectual entre as produções.

Figura 1 — Acoplamento bibliográfico entre dois artigos. Fonte: dados da pesquisa.



Fonte: dados da pesquisa.

Para a análise de acoplamento, as informações bibliográficas desses registros foram baixadas do *Web of Science* e inseridas no VosViewer (versão 1.6.8.0), um software gratuito de análises bibliométricas. O tipo de análise selecionado foi o acoplamento bibliográfico (*bibliographic coupling*), usando como unidades de análise cada um dos registros (*documents*) e método de contagem integral (*full counting*). Não se estabeleceu um limiar de citações dos documentos, nem uma quantidade máxima de documentos a serem mostrados na análise, de forma a incorporar o máximo de informações na rede. Em seguida, editou-se a rede formada por meio do Gephi (versão 0.9.2), um software específico para edição da

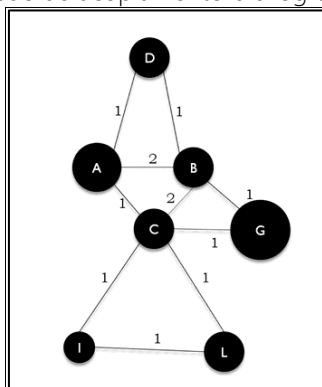
representação gráfica de redes. Filtrou-se no Gephi somente os trabalhos que compartilham 4 ou mais referências e que interconectam em uma única grande rede. Após análises por esses dois softwares, chegou-se a uma rede com 331 nós e 1671 relações entre eles (arestas), que foi subdividida em 12 agrupamentos (*clusters*) por meio de análise de modularidade no Gephi (valor de modularidade de 0,506).

Apresentação dos dados

Para representar as relações de acoplamento e coautoria, foram usadas representações de redes: os grafos. A teoria de redes é o estudo de grafos: estruturas que representam grupos de objetos inter-relacionados. Nas redes, os grafos representam inter-relações de objetos que recebem atributos, ou seja, objetos que possuem propriedades específicas além das relações que desempenham, em que os objetos (chamados de nós ou vértices) são representados por pontos ou círculos e as relações entre eles por meio de linhas (chamadas arestas ou *edges*) (PRICE, 1965). As propriedades extras dos nós podem ser expressas nos grafos por meio de cores, tamanhos e formas diferenciados.

Os grafos têm sido usados para análises textuais por meio de softwares específicos, demonstrando sua gama de possibilidades para a área de ensino de ciências (MAGNO; GONÇALVES, 2023). Na análise de acoplamento, cada nó representa um artigo do corpus de análise. Cada par de artigos podem ser relacionados por meio do número de referências que compartilham, representados por meio de uma linha que liga os dois nós e cuja espessura pode ser proporcional ao número de referências compartilhadas, isto é, ao peso da relação.

Figura 2 — Exemplo de uma rede de acoplamento bibliográfico. Fonte: dados da pesquisa.



Fonte: dados da pesquisa.

Por exemplo, na Figura 2 os círculos A e B representam artigos que possuem duas referências em comum; B e G apenas 1; A e I não apresentam ligações diretas entre eles. Outros fatores podem ser incluídos e representados na rede, como o número de citações de um artigo que pode ser representado no tamanho do nó. Na Figura 2, por exemplo, a referência G é a que teria maior número de citações, representado pelo maior raio de seu nó, seguida pela referência A e sendo a referência I a menos citada.

Temas da Pesquisa em Ensino de QV

O Quadro 1 apresenta a temática dos 12 agrupamentos (ou clusters) encontrados na análise. A relação dos trabalhos em cada cluster pode ser consultada em

<https://tinyurl.com/articles-in-cluster>. A partir da leitura dos títulos e resumos dos trabalhos presentes nos agrupamentos, reuniram-se termos, ideias ou metodologias recorrentes, possibilitando a inferência dos temas de pesquisa de cada cluster. Posteriormente, os títulos das referências mais compartilhadas nos agrupamentos corroboraram os temas identificados, conforme se verá mais à frente.

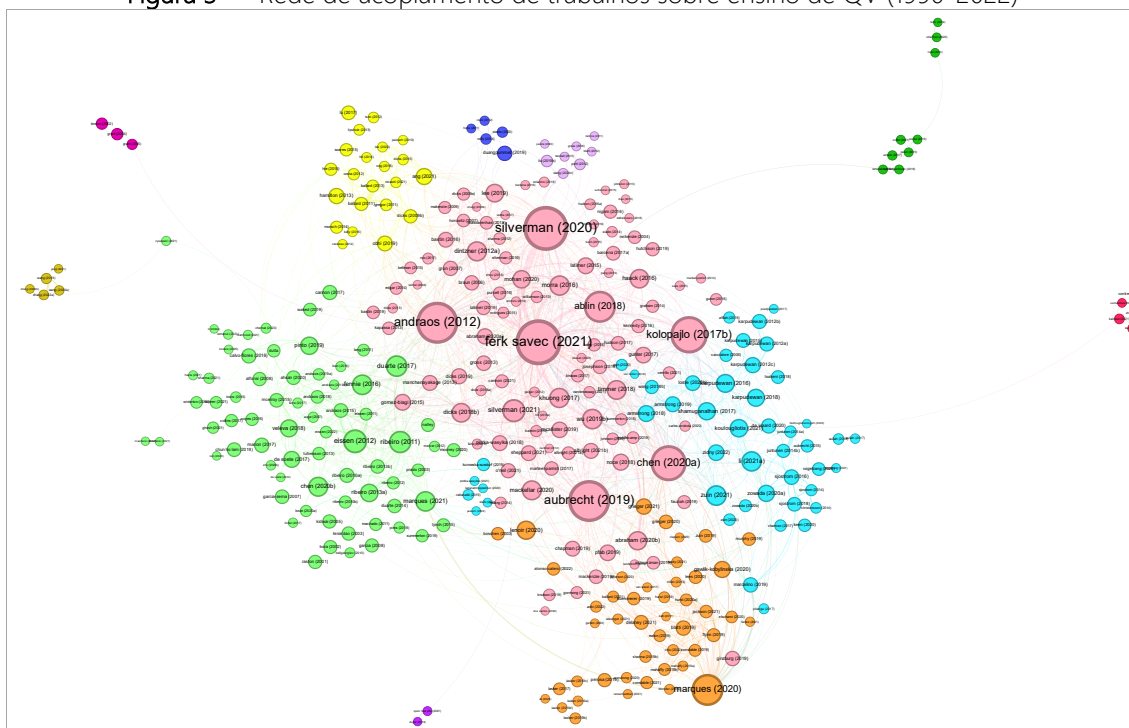
Quadro 1 — Temas dos agrupamentos da Análise de Acoplamento sobre ensino de Química Verde (1990-2022).

Clus.	Tamanho	Tema Citante
1	46	Pensamento Sistêmico
2	6	Sínteses em fluxo contínuo
3	22	Sínteses orgânicas verdes (Suzuki-Miyura); sínteses orgânicas em água; reação "click"
4	71	Métricas; avaliação de eficiência (de massa, ambiental, toxicidade); avaliação de indicadores de sustentabilidade; guia de escolhas de solventes (geralmente para indústria farmacêutica)
5	5	Aprendizagem de máquina para avaliação de impactos
6	47	Educação para sustentabilidade; educação ambiental; pesticidas como conteúdo
7	9	Nanopartículas (metálicas) na QV
8	2	<i>Carbon Dots</i> (quântica e aprendizagem de máquinas para avaliação de impactos)
9	3	Particularidades da Química Industrial
10	107	Inserção da QV no ensino (foco no laboratório de Química orgânica)
11	8	Biodiesel; ultrassom; captura de CO ₂ .
12	5	Esterificação (laboratório de Química Orgânica); micro-ondas

Fonte: dados da pesquisa.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra as relações de acoplamento dentre os textos analisados por meio de um grafo, a representação visual de uma rede, e pode ser acessada em alta resolução em <https://tinyurl.com/figura-clusters>. A Figura 4 simplifica as relações, dando ênfase à interação entre os agrupamentos. O cluster 10 – Inserção da QV no Ensino está no centro da rede, servindo como mediação entre os demais agrupamentos, o que pode indicar um núcleo de discussões que gera temas e estratégias específicas para o ensino de QV. Os agrupamentos 1 – Pensamento Sistêmico, 3 – Sínteses Orgânicas Verdes, 4 – Métricas e 6 – Educação para Sustentabilidade circundam o cluster 10 formando uma rede complexa. Os demais clusters apresentam ligações pontuais com apenas um agrupamento, geralmente o 10.

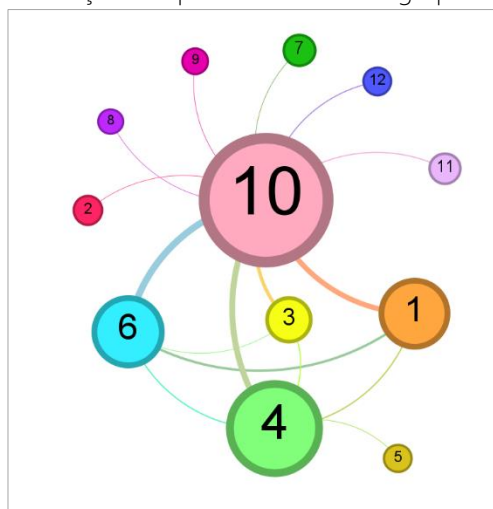
Figura 3 — Rede de acoplamento de trabalhos sobre ensino de QV (1990-2022)



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Cores representam os agrupamentos (clusters). As linhas representam relações de acoplamento. Tamanho dos nós (círculos) é proporcional ao número de acoplamentos do documento.

Figura 4 — Relações simplificadas entre os agrupamentos.



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Cores representam os agrupamentos (clusters). As linhas representam relações de acoplamento. Tamanho dos nós (círculos) é proporcional ao tamanho dos agrupamentos.

Apresentam-se abaixo os clusters com mais de dez integrantes, recorrendo aos trabalhos com maior número de acoplamentos (*total link score*) como exemplares dos principais temas e estratégias abordados no agrupamento. Também se apresentam os textos que mais são

compartilhados nas referências e a porcentagem de trabalhos que os citam dentro do cluster. A referência completa para os textos é apresentada em Apêndice A, sendo citada por ordem numérica, entre colchetes. Tal medida foi necessária para acomodar o grande número de citações/referências na extensão máxima permitida.

Agrupamento 10 - Inserção da QV no ensino

O cluster 10 é o maior agrupamento, com 107 trabalhos, abordando de forma mais abrangente a inserção da QV na educação em Química. Entre os trabalhos com maior número de referências acopladas, destacam-se revisões de literatura sobre o ensino experimental de QV [1], sobre práticas efetivas no ensino de QV na educação superior [2], sobre ensino de QV para a sustentabilidade [3], laboratório de ensino de Química Orgânica [4] e sobre inserção da QV em atividades de ensino [5]. Outros trabalhos destacados discutem a inserção curricular da QV, tanto para desenvolver pensamento sistêmico e habilidades para segurança [6], quanto para disciplina de laboratório introdutório em Química Orgânica [7]. Alguns artigos abordam questões relativas a processos de ensino e aprendizagem de QV, como métricas [8] e atividades de apresentação e escrita no laboratório [9].

Importante ressaltar que, para Kolopajlo [5], as atividades investigativas são um dos aspectos relevantes da pedagogia da QV. Segundo o autor, especialmente em atividades de Química Orgânica, o ensino por meio de investigação é bastante frequente na literatura sobre ensino de QV, contribuindo para pensar quais são os aspectos da verdura química e sua intensidade.

Entre as referências mais compartilhadas pelo cluster 10 estão os livros *Green Chemistry: theory and practice* [10], citado por 36% dos trabalhos, e *Green Organic Chemistry: strategies, tools and laboratory* [11], citado por 21% dos textos, mesma quantidade de citação ao artigo *Green chemistry teaching in higher education: a review of effective practices* [2]. Enquanto o livro de Anastas e Warner [10] pode ser considerado um marco teórico e geral dos fundamentos da QV, o artigo de Andraos e Dicks [2] abrange, de forma igualmente geral, o ensino da QV, revelando o caráter mais amplo e central do cluster 10. O grande número de citações ao livro de Doxsee e Hutchison [11] reforça a importância da síntese orgânica nas discussões da QV e seu ensino.

Agrupamento 4 - Métricas

O segundo maior agrupamento, Cluster 4, aborda mais especificamente o ensino da QV *por meio de e para* a aplicação de métricas. Alguns trabalhos abordam a importância de indicadores de sustentabilidade e da produção sustentável [12–14], avaliação de verdura química na indústria farmacêutica [15–17], economia circular [3,14], métricas holísticas [18,19], comparação da verdura de procedimentos sintéticos [20–22], métricas de massa [23,24] e avaliação de aspectos toxicológicos [25].

O livro de Anastas e Warner [10] também é o mais citado nesse cluster, por 42% dos trabalhos. Em seguida, artigos específicos de métricas são citados, como: *The atom economy—a search for synthetic efficiency* [26], referência que cunha o conceito de economia atômica, presente em 31% dos textos, e; *Metrics to 'green' chemistry—which are the best?* [27], um comparativo de métricas referenciado por 25% dos textos. Outros trabalhos citados por 20% dos componentes do cluster versam sobre como escolher métricas adequadas para a QV [28–30].

Agrupamento 6 – Educação para Sustentabilidade

O Cluster 6, com 47 trabalhos, aborda temas relacionados à educação para sustentabilidade e educação ambiental. Entre os trabalhos com maior acoplamento, destacam-se produções voltadas à inserção da QV e educação para sustentabilidade na educação básica [31–33], pesquisas sobre diagnóstico e transformação das percepções e atitudes de estudantes sobre QV, ambiente [34,35] e economia circular [36], bem como questões sociais e humanísticas no ensino de QV e para sustentabilidade [37–40].

O artigo de Burmeister, Rauch e Eilks [41], *Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education*, aparece em 57% dos trabalhos desse cluster, ultrapassando o livro de Anastas e Warner [10], com 38%, revelando a forte vinculação desse agrupamento com a educação para sustentabilidade. O terceiro trabalho mais citado (25%) aborda especificamente o papel da QV e da ESD na educação em Química [42], seguido por um artigo sobre a defesa da formação para a eco-reflexividade na educação científica [38], argumentando sobre a importância do ambiente como objetivo socialmente compartilhado.

A sustentabilidade passou a ser incorporada mais fortemente à QV a partir da década de 2010 (MARQUES; MACHADO, 2021), ressaltando o papel da Química na transformação de materiais e a responsabilidade do químico por desenvolver uma prática menos poluente e mais segura. Mais recentemente, a QV tem sido chamada de a base molecular da sustentabilidade, mas tem-se criticado o seu foco estrito na sustentabilidade ambiental, em detrimento do eixo econômico e social (MARCELINO; MARQUES; SJÖSTRÖM, 2019). Mesmo as métricas propostas para e pela QV se baseiam em indicadores de impactos ambientais e de risco à saúde, faltando maiores desenvolvimentos em métricas que incorporem a dimensão econômica e social (MARCELINO; MARQUES; SJÖSTRÖM, 2019).

Agrupamento 1 – Pensamento Sistêmico

Os três trabalhos com maior acoplamento do cluster 1 são revisões de literatura sobre estratégias de ensino da QV, com destaque para o pensamento sistêmico [43,44], ou dos marcos teóricos da QV [45]. Importante destacar a presença das tecnologias digitais de informação e comunicação para o ensino de QV e promoção do pensamento sistêmico: Grieger e Leontyev [46,47] abordam o uso de infográficos e criação de vídeos instrucionais pelos alunos para comparação de velocidade de reações, bem como diversas ferramentas digitais para gestão das atividades de ensino, comunicação entre alunos e professores e análises colaborativas de textos; Gawlik-Kobylnska, Walkowiak e Maciejewski [44] abordam as possibilidades de ambientes virtuais de aprendizagem para gestão das atividades, conteúdos e interações *de* e *para* o ensino, ressaltando as possibilidades de realidade virtual e realidade aumentada para lidar com situações perigosas ou muito onerosas; Lees *et al.* [48] apresentam um jogo digital (*Green Tycoon*) no ensino de QV usado para definir os 12 Princípios e aplicá-los em processos industriais considerando o pensamento sistêmico e a tomada de decisão. Embora Perosa, Gonella e Spagnolo [49] não especifiquem o uso de ferramentas digitais, eles abordam o uso de diagramas sistêmicos para discutir aspectos energéticos e termodinâmicos na produção do vidro de Murano como uma possibilidade para a promoção do pensamento sistêmico no ensino de QV.

Outros trabalhos no cluster 1 abordam a promoção do pensamento sistêmico em contextos específicos da educação química. Blatti *et al.* [50] abordam a importância de temas interdisciplinares (mudanças climáticas, energias renováveis, nanotecnologias, por exemplo)

para divulgar a química para a comunidade por meio de atividades de extensão universitária. Delaney, Ferguson e Schultz [51] tratam de um curso de formação de professores (secundários e universitários) sobre a promoção do pensamento sistêmico no ensino de química.

Entre os oito trabalhos citados por pelo menos 20% dos integrantes do cluster 1, sete têm como autores membros do projeto *Systems Thinking in Chemistry Education* (STICE) (IUPAC, 2019), iniciativa do *International Organization for Chemical Sciences in Development* (IOCD), fundada na UNESCO em 1981 com o intuito de promover a aplicação das ciências químicas na busca pelo desenvolvimento sustentável e crescimento econômico, sendo o pensamento sistêmico um de seus principais projetos. O trabalho restante [52] aborda avanços necessários e nascentes na QV à época da escrita do texto, como o pensamento sistêmico (para pensar as moléculas em interações com contextos reais) e a aprendizagem de máquinas (para planejar, identificar e caracterizar propriedades de moléculas novas).

Agrupamento 3 – Sínteses Orgânicas Verdes

O Cluster 3 aborda o esverdeamento de sínteses orgânicas, seja pelo uso de catalisadores metálicos; pelo uso de água como solvente; ativação por micro-ondas; ou condições ambiente de temperatura e pressão. Destacam-se as reações de acoplamento do tipo Suzuki-Miyaura, geralmente catalisadas por metais, realizadas com solvente aquoso ou com ativação por micro-ondas [53–57], de forma similar às reações de Wittig [58,59]. Procedimentos de metátese de olefinas e reações “click”, procedimentos agraciados com o prêmio Nobel nos últimos anos, também são discutidos em versões verdes, sendo realizados em condições ambiente e solvente aquoso [60,61].

Obhi *et al.* [62] abordam o uso da estratégia estudo de caso para comparar as possibilidades de dois tipos de reação, substituição aromática nucleofílica e reação de Buchwald–Hartwig; Ong, Chang e Hoang [63] desenvolvem uma atividade de ensino baseado em problema, em que os alunos têm de propor um processo para sintetizar uma substância. Esses dois trabalhos exemplificam a importância dada pelo cluster 3 às estratégias de ensino por investigação e na simulação da realidade.

O artigo de Aktoudianakis *et al.* [64] descreve o uso de água como solvente para esverdear a reação de Suzuki em laboratórios de ensino de Química Orgânica, sendo citado por 72% dos trabalhos do cluster 3. Callam e Lowary [65], citados em 50% dos trabalhos, focalizam as possibilidades das reações de Suzuki-Miyaura para ensinar as possibilidades dos metais de transição como catalisadores. Hamilton *et al.* [56], citado por 45% dos textos no agrupamento, propõem um procedimento simples para reações de Suzuki-Miyaura em laboratórios de ensino, considerando pressão atmosférica, nenhum solvente orgânico para extração do produto, bem como baixa concentração de catalisador. Novak *et al.* [66] e Costa *et al.* [67], citados em 45% e 40% dos trabalhos, focalizam no ensino por investigação e por interpretação de papéis para ensino de versões verde da reação de Suzuki-Miyaura.

Esses foram os maiores grupos identificados na pesquisa. Os demais agrupamentos apresentam menos de 10 trabalhos cada, podendo se aproximar mais de produção restrita de um grupo de pesquisa do que grandes tendências compartilhadas por vários grupos da área. Esses agrupamentos abordam: sínteses em fluxo contínuo, aprendizagem de máquinas para avaliação de impacto, nanopartículas metálicas, biodiesel e captura de CO₂, uso de micro-ondas em reações de esterificação.

Distribuição temporal dos temas de pesquisa

A Figura 4 mostra o ano de publicação dos trabalhos pertencentes aos agrupamentos. Ressalta-se que a figura não pretende mostrar os temas mais relevantes ou em maior destaque em determinado tempo, mas a formação de uma comunidade (ou grupo de trabalhos/pesquisadores) que compartilha referências e, portanto, tem interesses no mesmo tema em determinado ano. É possível que existam pesquisas sobre o tema em períodos não demonstrados na figura.

Figura 4 — Distribuição dos números de trabalhos por ano de publicação em agrupamentos formados na Análise de Acoplamento sobre ensino de QV (1990-2022)

Ano	Cluster											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2001				2								
2002				1					1			
2003	1			2								
2004									1	2		
2005				1					1			
2006						1				1		
2007				2						2		
2008				2								
2009			1							2		
2010				3								
2011			2	4							1	1
2012			3	3		3				5	2	1
2013			3	3						8		
2014			2	2		4	1			5		1
2015			3	3		2	2			8	1	
2016			1	5		2	1			11	1	
2017	3		1	7		5	1			9		
2018		1	1	5		7				10		
2019	18	1	2	6	1	5	1	1		23	1	1
2020	12	1	1	9	1	10	1			11	2	1
2021	9	3	2	8	1	6	2	1		10		
2022	3			3	2	2						
Total	46	6	22	71	5	47	9	2	3	107	8	5

Fonte: dados da pesquisa.

A maior parte dos trabalhos foi publicada nos últimos cinco anos, em que se destacam (em número de trabalhos) os temas 1 – Pensamento Sistêmico, 6 – Educação para Sustentabilidade, 4 – Métricas e 10 – Inserção da QV no Ensino. Poucos trabalhos compartilhavam mais do que quatro referências antes de 2010.

Interessante notar um trabalho em 2003 no agrupamento 1 – Pensamento Sistêmico, muito antes da difusão do termo pela IOCD. Esse trabalho se acopla a outros do agrupamento por meio de trabalhos fundamentais e gerais da QV (por exemplo, [10,68]), abordando a ideia de química sustentável (*sustainable chemistry*).

Também no cluster 6 – Educação para Sustentabilidade, o trabalho em 2006 se acopla aos demais por textos gerais da QV (por exemplo, [10,69]) e do seu ensino [70].

O agrupamento 9 – Química Industrial possui apenas três trabalhos publicados entre 2002 e 2005 por praticamente o mesmo grupo de autores (Grant, S; Freer, AA; Winfield, JM; Lennon, D). Isso demonstra que esse agrupamento é mais o reflexo de um grupo de pesquisa

específico do que uma linha de interesse da comunidade. Esse dado também justifica porque não se realizaram análises de clusters muito pequenos.

O cluster 4 – Avaliações de Eficiência conta com vários trabalhos anteriores a 2010. Tais trabalhos abordam características gerais da QV e as suas possibilidades para o ensino e pesquisa [71–73]. Há um foco nas possibilidades de inovação da QV para a engenharia, química medicinal e tecnologias [13,74,75]. Há também trabalhos que revisam a presença da QV em regiões e países específicos [76–78]. Esses trabalhos parecem ter o papel de divulgação e argumentação em favor das possibilidades da QV, o que explica o papel desse agrupamento na constituição do cluster 10, a ser tratada a frente.

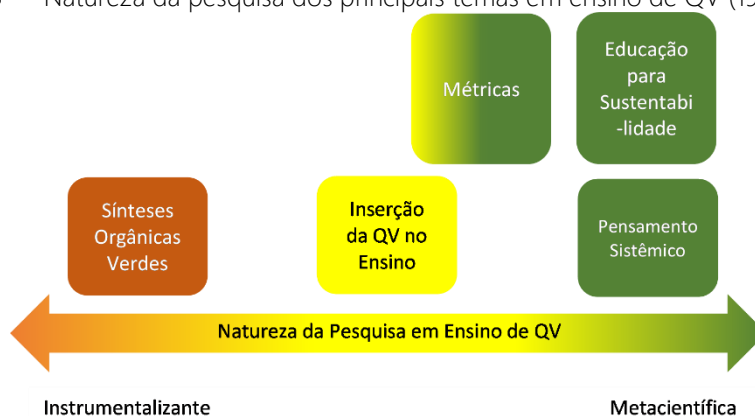
O cluster 10 - Inserção da QV no Ensino também possui trabalhos publicados antes de 2010. Esses textos tratam da necessidade e dos avanços na integração da QV ao ensino de forma mais geral [79–81], bem como de estratégias específicas para incluir a QV em práticas do laboratório de ensino de Química Orgânica [82–85].

Até 2015 o cluster 10 referenciou muitas informações previamente citadas pelos cluster 3 e cluster 4, demonstrando a importância de questões mais voltadas ao laboratório (especialmente de Química Orgânica) e eficiência das reações. Igualmente, o cluster 3 e 4 compartilham, até hoje, de muitas informações apresentadas previamente pelo cluster 10. Contudo, nos últimos anos o cluster 10 tem interagido mais com os clusters 1 e 6, demonstrando que o tema da sustentabilidade e pensamento sistêmico têm dominado as discussões no ensino de QV.

Tipologias da Pesquisa em Ensino de QV

Com base nos temas e estratégias dos agrupamentos, pode-se perceber a existência de tipos de pesquisas, chamadas neste trabalho de instrumentalizantes e metacientíficas, conforme a Figura 5 mostra.

Figura 5 — Natureza da pesquisa dos principais temas em ensino de QV (1990-2022).



Fonte: dados da pesquisa.

As pesquisas instrumentalizantes são aquelas que se dedicam mais à implementação de práticas e procedimentos verdes em atividades de ensino de Química, seja em laboratórios de ensino ou transversalmente aos currículos. Esse comportamento pode ser caracterizado como instrumentalizante no sentido de dar ferramentas para professores, alunos e químicos realizarem a QV, bem como de desenvolver estratégias para realizar a QV em atividades de ensino. O cluster 3 apresenta fortemente essa característica, dedicando-se ao

desenvolvimento de processos reacionais mais verdes que possam ser desenvolvidos em laboratórios de ensino de Química Orgânica, ensinando, ao mesmo tempo, paradigmas reacionais clássicos (como os de Suzuki-Miyaura, Sonogashira e Wittig) e princípios da QV por meio de alterações e incrementos nessas reações paradigmáticas. O cluster 10 incorpora alguns trabalhos mais instrumentalizantes, ao abordar a inserção da QV de forma pontual em laboratórios de ensino ou como conteúdo em disciplinas, mas também reflete de forma mais ampla sobre o ensino de QV, colocando-o na transição com outro perfil de publicação sobre ensino de QV: as metacientíficas.

Pesquisas metacientíficas apresentaram trabalhos e agrupamentos que propuseram trabalhos mais reflexivos sobre o campo de ensino da QV, propondo conteúdos e estratégias que são ausentes ou incipientes, mas que necessitam estar mais presentes no ensino de Química. Sjöström (2007) já anunciava que o caráter metacientífico é inerente à própria QV, vista como uma discussão da natureza da Química em seus aspectos históricos, sociológicos e epistêmicos. É um tipo de pesquisa que reflete sobre a natureza do campo e sua evolução, uma reflexão sobre a própria ciência da QV. Esse é o caso do cluster 4-Métricas que, embora tenha trabalhos instrumentalizantes, se ocupa também em discutir a importância das avaliações de eficiência para a QV e seu ensino, bem como a complexidade da seleção das métricas, indicadores e dimensões a serem avaliadas.

Os cluster 1 e 6 são outros bons representantes da forma metacientífica de pesquisa. O cluster 1 apresenta e defende a necessidade de promover uma nova forma de racionalidade na QV e no seu ensino, o pensamento sistêmico, para que se possa alcançar a sustentabilidade. A educação para sustentabilidade é o tema do cluster 6, propondo uma finalidade socialmente justificada para a pesquisa em QV e o seu ensino. Essa aproximação temática entre os agrupamentos (a sustentabilidade) é refletida no grande número de acoplamentos entre eles, mostrando que compartilham de muitos pressupostos teórico-metodológicos. O cluster 10, em especial, é o grande divulgador de referências que são utilizadas pelos cluster 1 e cluster 6, reforçando a localização do cluster 10 entre as formas instrumentalizante e metacientífica, bem como seu papel como mediador entre essas formas de pesquisa.

Conclusão

O emprego de técnicas bibliométricas, mais especificamente da análise de acoplamento bibliográfico, possibilitou identificar o compartilhamento de alguns elementos teórico-metodológicos entre os documentos analisados. A organização dos trabalhos em torno de temas e objetivos específicos, como métricas, sínteses orgânicas, pensamento sistêmico e sustentabilidade, indica a emergência de determinadas linhas de pesquisa específicas ao ensino de QV. Esses temas convocam, em alguns momentos, estratégias de ensino específicas, como o uso de ensino por investigação para abordar sínteses orgânicas. Análises mais aprofundadas dos textos são necessárias para elucidar essas relações.

Nos últimos anos, a pesquisa em ensino de QV tem focalizado e compartilhado referências em torno do objetivo da educação para sustentabilidade, como visto nos agrupamentos 1 – Pensamento Sistêmico e 6 – Educação para Sustentabilidade. Dentre esses trabalhos, surgem preocupações com o entendimento da complexidade da vida cotidiana e da sociedade industrial, buscando a formação de um sujeito socialmente engajado na busca

de práticas sustentáveis. Essa defesa de maior participação social corrobora as discussões da educação humanizadora.

Identificamos elementos de dois tipos de pesquisa: instrumentalizante e metacientífica. É necessário fortalecer a integração entre esses dois tipos de investigação, dando materialidade (propostas efetivas de ensino) para os temas de sustentabilidade, métricas e pensamento sistêmico, bem como complexificando os objetivos didáticos de propostas práticas de laboratório.

Esta pesquisa contou com trabalhos disponíveis no *Web of Science*, o que em certa medida limita a amostra, pois depende dos registros nela contidos, os quais devem atender aos requisitos da própria base de dados. Contudo, a pesquisa nos mostra como se pode utilizar corretamente as ferramentas e técnicas bibliométricas para conduzir análise em situações em que o número de artigos e informações sejam muito elevados. Por fim, embora essa investigação não tenha conseguido abranger a totalidade de produções sobre ensino de QV, certamente representa um avanço na abrangência da amostra utilizada.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) – projeto n. 402462/2021-1.

Referências

- ABLIN, L. Engaging Students with the Real World in a Green Organic Chemistry Laboratory Group Project: A Presentation and Writing Assignment in a Laboratory Class. *Journal of Chemical Education*, v. 95, n. 5, p. 817–822, 8 maio 2018.
- ALMEIDA, Q. A. R. DE *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. 178–187, 31 dez. 2019.
- ANASTAS, P. T. Green chemistry design, innovation, solutions and a cohesive system. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 1, n. 1, p. 3–4, mar. 2007.
- ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York, N.Y.: Oxford University Press, 1998.
- ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. The Molecular Basis of Sustainability. *Chem*, v. 1, n. 1, p. 10–12, jul. 2016.
- CHEN, M.; JERONEN, E.; WANG, A. What Lies Behind Teaching and Learning Green Chemistry to Promote Sustainability Education? A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 21, p. 7876, 27 out. 2020.
- DINIZ, N. DE P.; BARROS, D. F. DE; ASSIS, A. Aprimoramento da argumentação por meio de atividades experimentais com abordagem sociocultural no ensino de corrosão. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, v. 16, n. 37, p. 270–288, 30 dez. 2020.

- EILKS, I.; SJÖSTRÖM, J.; ZUIN, V. G. The responsibility of Chemists for a better world: challenges and potentialities beyond the lab. *Revista Brasileira de Ensino de Química*;1, v. 12, p. 97–105, 2017.
- FERK SAVEC, V.; MLINAREC, K. Experimental Work in Science Education from Green Chemistry Perspectives: A Systematic Literature Review Using PRISMA. *Sustainability*, v. 13, n. 23, p. 12977, 23 nov. 2021.
- GHENO, E. M. *et al.* Formação de recursos humanos e produção científica em Educação em Ciências. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, v. 17, n. 38, p. 191–208, 2 jul. 2021.
- IUPAC. *Project n. 2009-014-2-300*. Sustainable Education and Environmental Development (Seed) in Latin America: project detail. Durham: IUPAC, 2009. Disponível em: <https://iupac.org/project/2009-014-2-300>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- MACHADO, A. A. S. C. *Introdução às Métricas da Química Verde: uma visão sistêmica*. 1. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014.
- MAGNO, C. M. V.; GONÇALVES, T. V. O. O testemunho em pesquisa narrativa e a análise textual discursiva associada ao IRAMUTEQ. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, v. 19, n. 42, 19 jun. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/revistaamazonia/article/view/12980>. Acesso em: 28 jul. 2023.
- MAHAFFY, P. G. *et al.* Integrating the Molecular Basis of Sustainability into General Chemistry through Systems Thinking. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 12, p. 2730–2741, 10 dez. 2019.
- MARCELINO, L. V. *Os Tipos de Racionalidade na Química Verde e suas Relações com o Ensino*. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) — Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- MARCELINO, L. V.; MARQUES, C. A. Abordagens educacionais das biotecnologias no ensino de ciências através de uma análise em periódicos da área. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 22, n. 1, p. 61–77, 18 abr. 2017a.
- MARCELINO, L. V.; MARQUES, C. A.; PINTO, A. L. Intellectual authorities and hubs of Green Chemistry. *TransInformação*, v. 32, n. e200031, 2020.
- MARCELINO, L. V.; PINTO, A. L.; MARQUES, C. A. Intellectual Authorities and Hubs of Green Chemistry. In: MUGNAINI, R. (Ed.). *Data and Information in Online Environments*. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020a. v. 319p. 190–210.
- MARCELINO, L. V.; PINTO, A. L.; MARQUES, C. A. Scientific specialties in Green Chemistry. *Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication*, v. 1, n. 1, 21 jun. 2020b.
- MARCELINO, L. V.; SJÖSTRÖM, J.; MARQUES, C. A. Socio-Problematization of Green Chemistry: Enriching Systems Thinking and Social Sustainability by Education. *Sustainability*, v. 11, n. 24, p. 7123, 12 dez. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/24/7123>. Acesso em: 17 dez. 2019.

MARQUES, C. A. *et al.* Compreensões de Pesquisadores Químicos sobre Sustentabilidade Ambiental: possíveis influências na formação de professores de Química. *Revista Brasileira de Ensino de Química*, v. 9, n. 2, p. 79–91, 2014.

MARQUES, C. A.; MACHADO, A. A. S. C. An Integrated Vision of the Green Chemistry Evolution along 25 Years. *Foundations of Chemistry*, v. 23, p. 299–328, 18 jun. 2021.

MARQUES, C. A.; MACHADO, A. A. S. C. Environmental Sustainability: implications and limitations to Green Chemistry. *Foundations of Chemistry*, v. 16, n. 2, p. 125–147, 1 jul. 2014.

SJÖSTRÖM, J. The discourse of chemistry (and beyond). *HYLE: International Journal for Philosophy of Chemistry*, v. 13, n. 2, p. 83–97, 2007.

SJÖSTRÖM, J.; TALANQUER, V. Humanizing Chemistry Education: From Simple Contextualization to Multifaceted Problematization. *Journal of Chemical Education*, v. 91, n. 8, p. 1125–1131, 12 ago. 2014.

YAVUZKAYA, M.; CLUCAS, P.; SJÖSTRÖM, J. ChemoKnowings as Part of 21st Century Bildung and Subject Didaktik. *Frontiers in Education*, v. 7, 2022.

A pesquisa em Ensino de Química Verde: temas e tipologias de estudos

Green Chemistry Education research: themes and typologies of studies

Leonardo Victor Marcelino⁴

Carlos Alberto Marques⁵

Apêndice A – Principais artigos na análise de Acoplamento de trabalhos sobre Ensino de QV.

- [1] FERK SAVEC, V.; MLINAREC, K. Experimental Work in Science Education from Green Chemistry Perspectives: A Systematic Literature Review Using PRISMA. *Sustainability*, v. 13, n. 23, p. 12977, 23 nov. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/23/12977>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- [2] ANDRAOS, J.; DICKS, A. P. Green chemistry teaching in higher education: a review of effective practices. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 13, n. 2, p. 69–79, 2012.
- [3] CHEN, M.; JERONEN, E.; WANG, A. What Lies Behind Teaching and Learning Greer Chemistry to Promote Sustainability Education? A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 21, p. 7876, 27 out. 2020.
- [4] MORRA, B.; DICKS, A. P. *Recent Progress in Green Undergraduate Organic Laboratory Design*. Em: FAHEY, J. T.; MAELIA, L. E. ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 2016. p. 7–32.
- [5] KOLOPAJLO, L. Green Chemistry Pedagogy. *Physical Sciences Reviews*, v. 2, n. 2, 28 fev. 2017.
- [6] AUBRECHT, K. B.; BOURGEOIS, M.; BRUSH, E. J.; MACKELLAR, J.; WISSINGER, J. E. Integrating Green Chemistry in the Curriculum: Building Student Skills in Systems Thinking, Safety, and Sustainability. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 12, p. 2872–2880, 10 dez. 2019.
- [7] WU, N.; KUBO, T.; SEKONI, K. N.; HALL, A. O.; PHADKE, S.; ZURCHER, D. M.; WALLACE, R. L.; KOTHARI, D. B.; MCNEIL, A. J. Student-Designed Green Chemistry Experiment for a Large-Enrollment, Introductory Organic Laboratory Course. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 11, p. 2420–2425, 12 nov. 2019.

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina | leovmarcelino@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Santa Catarina | carlos.marques@ufsc.br

- [8] SILVERMAN, J. R. Exploring Sustainability Metrics in General Chemistry Using Intensive and Extensive Properties of Matter. *Journal of Chemical Education*, v. 98, n. 9, p. 2741–2745, set. 2021.
- [9] ABLIN, L. Engaging Students with the Real World in a Green Organic Chemistry Laboratory Group Project: A Presentation and Writing Assignment in a Laboratory Class. *Journal of Chemical Education*, v. 95, n. 5, p. 817–822, 8 maio 2018.
- [10] ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York, N.Y: Oxford University Press, 1998.
- [11] DOXSEE, K. M.; HUTCHISON, J. E. *Green organic chemistry: strategies, tools, and laboratory experiments*. 1st ed. ed. Southbank, Vic., Australia; United States: Thomson-Brooks/Cole, 2004.
- [12] EISSEN, M. Sustainable Production of Chemicals – an Educational Perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 13, n. 2, p. 103–111, 12 abr. 2012.
- [13] GARCÍA-SERNA, J.; PÉREZ-BARRIGÓN, L.; COCERO, M. J. New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. *Chemical Engineering Journal*, v. 133, n. 1, p. 7–30, 15 set. 2007.
- [14] MARION, P.; BERNELA, B.; PICCIRILLI, A.; ESTRINE, B.; PATOUILARD, N.; GUILBOT, J.; JÉRÔME, F. Sustainable Chemistry: How to Produce Better and More from Less? *Green Chemistry*, v. 19, n. 21, p. 4973–4989, 30 out. 2017.
- [15] AHSAN, H.; ISLAM, S. U.; AHMED, M. B.; LEE, Y. S.; SONN, J. K. Significance of Green Synthetic Chemistry from a Pharmaceutical Perspective. *Current Pharmaceutical Design*, v. 26, n. 45, p. 5767–5782, 1 dez. 2020.
- [16] SOETE, W. D.; JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; DAHLIN, P.; DEWULF, J. Challenges and Recommendations for Environmental Sustainability Assessments of Pharmaceutical Products in the Healthcare Sector. *Green Chemistry*, v. 19, n. 15, p. 3493–3509, 31 jul. 2017.
- [17] VELEVA, V. R.; CUE, B. W. Jr.; TODOROVA, S. Benchmarking Green Chemistry Adoption by the Global Pharmaceutical Supply Chain. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, n. 1, p. 2–14, 2 jan. 2018.
- [18] MCELROY, C. R.; CONSTANTINOU, A.; JONES, L. C.; SUMMERTON, L.; CLARK, J. H. Towards a Holistic Approach to Metrics for the 21st Century Pharmaceutical Industry. *Green Chemistry*, v. 17, n. 5, p. 3111–3121, 12 maio 2015.
- [19] RIBEIRO, M. G. T. C.; COSTA, D. A.; MACHADO, A. A. S. C. “Green Star”: a holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 3, n. 2, p. 149–159, 1 jun. 2010.
- [20] DUARTE, R. C. C.; RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Reaction Scale and Green Chemistry: Microscale or Macroscale, Which Is Greener? *Journal of Chemical Education*, v. 94, n. 9, p. 1255–1264, set. 2017.
- [21] FENNIE, M. W.; ROTH, J. M. Comparing Amide-Forming Reactions Using Green Chemistry Metrics in an Undergraduate Organic Laboratory. *Journal of Chemical Education*, v. 93, n. 10, p. 1788–1793, 11 out. 2016 .

- [22] RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Metal-Acetylacetonate Synthesis Experiments: Which Is Greener? *Journal of Chemical Education*, v. 88, n. 7, p. 947–953, jul. 2011.
- [23] ANDRAOS, J.; HENT, A. Simplified Application of Material Efficiency Green Metrics to Synthesis Plans: Pedagogical Case Studies Selected from Organic Syntheses. *Journal of Chemical Education*, v. 92, n. 11, p. 1820–1830, 10 nov. 2015.
- [24] LAM, C. H.; ESCANDE, V.; MELLOR, K. E.; ZIMMERMAN, J. B.; ANASTAS, P. T. Teaching Atom Economy and E-Factor Concepts through a Green Laboratory Experiment: Aerobic Oxidative Cleavage of Meso -Hydrobenzoin to Benzaldehyde Using a Heterogeneous Catalyst. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 4, p. 761–765, 9 abr. 2019.
- [25] CANNON, A. S.; FINSTER, D.; RAYNIE, D.; WARNER, J. C. Models for integrating toxicology concepts into chemistry courses and programs. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 10, n. 4, p. 436–443, 2 out. 2017.
- [26] TROST, B. The atom economy: a search for synthetic efficiency. *Science*, v. 254, n. 5037, p. 1471–1477, 6 dez. 1991.
- [27] CONSTABLE, D. J. C.; CURZONS, A. D.; CUNNINGHAM, V. L. Metrics to 'green' chemistry—which are the best? *Green Chemistry*, v. 4, n. 6, p. 521–527, 5 dez. 2002.
- [28] SHELDON, R. A. Organic synthesis - past, present and future. (advantages of incorporating catalysis to organic synthesis). *Chemistry and Industry*, 7 dez. 1992.
- [29] CURZONS, A. D. et al. So you think your process is green, how do you know? — Using principles of sustainability to determine what is green – a corporate perspective. *Green Chemistry*, v. 3, n. 1, p. 1–6, 2001.
- [30] JIMENEZ-GONZALEZ, C. et al. Using the Right Green Yardstick: why process mass intensity is used in the pharmaceutical industry to drive more sustainable processes *Organic Process Research & Development*, v. 15, n. 4, p. 912–917, 15 jul. 2011.
- [31] KARPUDEWAN, M.; ROTH, W. M.; SINNIHAH, D. The Role of Green Chemistry Activities in Fostering Secondary School Students' Understanding of Acid-Base Concepts and Argumentation Skills. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 17, n. 4, p. 893–901, out. 2016.
- [32] KOULOGLIOTIS, D.; ANTONOGLIOU, L.; SALTA, K. Probing Greek Secondary School Students' Awareness of Green Chemistry Principles Infused in Context-Based Projects Related to Socio-Scientific Issues. *International Journal of Science Education*, v. 43, n. 2, p. 298–313, 2021.
- [33] WAARD, E. F. de; PRINS, G. T.; JOOLINGEN, W. R. van. Pre-University Students' Perceptions about the Life Cycle of Bioplastics and Fossil-Based Plastics. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 21, n. 3, p. 908–921, 1 jul. 2020.
- [34] ARMSTRONG, L. B.; RIVAS, M. C.; ZHOU, Z.; IRIE, L. M.; KERSTIENS, G. A.; ROBAK, M. T.; DOUSKEY, M. C.; BARANGER, A. M. Developing a Green Chemistry Focused General Chemistry Laboratory Curriculum: What Do Students Understand and

- Value about Green Chemistry? *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 11, p. 2410–2419, 12 nov. 2019.
- [35] ARMSTRONG, L. B.; RIVAS, M. C.; ZHOU, Z.; IRIE, L. M.; KERSTIENS, G. A.; ROBAK, M. T.; DOUSKEY, M. C.; BARANGER, A. M. Developing a Green Chemistry Focused General Chemistry Laboratory Curriculum: What Do Students Understand and Value about Green Chemistry? *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 11, p. 2410–2419, 12 nov. 2019.
- [36] LOSTE, N.; CHINARRO, D.; GOMEZ, M.; ROLDÁN, E.; GINER, B. Assessing Awareness of Green Chemistry as a Tool for Advancing Sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 256, p. 120392, 20 maio 2020.
- [37] MARCELINO, L. V.; SJÖSTRÖM, J.; MARQUES, C. A. Socio-Problematization of Green Chemistry: Enriching Systems Thinking and Social Sustainability by Education. *Sustainability*, v. 11, n. 24, p. 7123, 12 dez. 2019.
- [38] SJÖSTRÖM, J.; EILKS, I.; ZUIN, V. G. Towards Eco-Reflexive Science Education: A Critical Reflection About Educational Implications of Green Chemistry. *Science & Education-Netherlands*, v. 25, n. 3–4, p. 321–341, maio 2016.
- [39] ZOWADA, C.; FRERICHS, N.; ZUIN, V. G.; EILKS, I. Developing a Lesson Plan on Conventional and Green Pesticides in Chemistry Education – a Project of Participatory Action Research. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 21, n. 1, p. 141–153, 2020.
- [40] ZUIN, V. G.; EILKS, I.; ELSCHAMI, M.; KÜMMERER, K. Education in Green Chemistry and in Sustainable Chemistry: Perspectives towards Sustainability. *Green Chemistry*, v. 23, n. 4, p. 1594–1608, 2021.
- [41] BURMEISTER, M.; RAUCH, F.; EILKS, I. Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 13, n. 2, p. 59–68, 2012.
- [42] EILKS, I.; RAUCH, F. Sustainable development and green chemistry in chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 13, n. 2, p. 57–58, 2012.
- [43] MARQUES, C. A. et al. Green Chemistry Teaching for Sustainability in Papers Published by the Journal of Chemical Education. *Química Nova*, v. 43, n. 10, p. 1510–1521, 2020.
- [44] GAWLIK-KOBYLINSKA, M.; WALKOWIAK, W.; MACIEJEWSKI, P. Improvement of a sustainable world through the application of innovative didactic tools in green chemistry teaching: a review. *Journal of Chemical Education*, v. 97, n. 4, p. 916–924, 2020.
- [45] LENOIR, D.; SCHRAMM, K.-W.; LALAH, J. O. Green Chemistry: Some important forerunners and current issues. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 18, p. 100313, 1 dez. 2020.
- [46] GRIEGER, K.; LEONTYEV, A. Promoting Student Awareness of Green Chemistry Principles via Student-Generated Presentation Videos. *Journal of Chemical Education*, v. 97, n. 9, p. 2657–2663, 8 set. 2020.

- [47] GRIEGER, K.; LEONTYEV, A. Student-Generated Infographics for Learning Green Chemistry and Developing Professional Skills. *Journal of Chemical Education*, v. 98, n. 9, p. 2881–2891, set. 2021.
- [48] LEES, M. et al. Green Tycoon: A Mobile Application Game to Introduce Biorefining Principles in Green Chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 97, n. 7, p. 2014–2019, jul. 2020.
- [49] PEROSA, A.; GONELLA, F.; SPAGNOLO, S. Systems Thinking: Adopting an Emergy Perspective as a Tool for Teaching Green Chemistry. *Journal of Chemical Education* v. 96, n. 12, p. 2784–2793, 10 dez. 2019.
- [50] BLATTI, J. 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, dez. 2019.
- [51] DELANEY, S.; FERGUSON, J. P.; SCHULTS, M. Exploring opportunities to incorporate systems thinking into secondary and tertiary chemistry education through practitioner perspectives. *International Journal of Science Education*, v. 43, n. 16, p. 2618–2639, 2021.
- [52] CONSTABLE, D. J. C. The practice of chemistry still needs to change. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 7, p. 60–62, out. 2017.
- [53] ANG, J. W. J. Integrating Green Chemistry into Teaching Laboratories: Aqueous Suzuki-Miyaura Cross-Coupling Reaction Using a Recyclable Fluorous Precatalyst. *Journal of Chemical Education*, v. 98, n. 1, p. 203–207, jan. 2021.
- [54] BALLARD, C. E. Green Oxidative Homocoupling of 1-Methylimidazole. *Journal of Chemical Education*, v. 90, n. 10, p. 1368–1372, 8 out. 2013..
- [55] DICKS, A. P. A review of aqueous organic reactions for the undergraduate teaching laboratory. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 2, n. 1, p. 9–21, 1 mar. 2009a.
- [56] HAMILTON, A. E.; BUXTON, A. M.; PEEPLES, C. J.; CHALKER, J. M. An Operationally Simple Aqueous Suzuki-Miyaura Cross-Coupling Reaction for an Undergraduate Organic Chemistry Laboratory. *Journal of Chemical Education*, v. 90, n. 11, p. 1509–1513, 12 nov. 2013.
- [57] SOARES, P.; FERNANDES, C.; CHAVARRIA, D.; BORGES, F. Microwave-Assisted Synthesis of 5-Phenyl-2-Hydroxyacetophenone Derivatives by a Green Suzuki Coupling Reaction. *Journal of Chemical Education*, v. 92, n. 3, p. 575–578, 10 mar. 2015.
- [58] KELLY, M. J. B.; FALLOT, L. B.; GUSTAFSON, J. L.; BERGDAHL, B. M. Water Mediated Wittig Reactions of Aldehydes in the Teaching Laboratory: Using Sodium Bicarbonate for the in Situ Formation of Stabilized Ylides. *Journal of Chemical Education*, v. 93, n. 9, p. 1631–1636, 13 set. 2016.
- [59] MORSCH, L. A.; DEAK, L.; TIBURZI, D.; SCHUSTER, H.; MEYER, B. Green Aqueous Wittig Reaction: Teaching Green Chemistry in Organic Teaching Laboratories. *Journal of Chemical Education*, v. 91, n. 4, p. 611–614, 8 abr. 2014.

- [60] ISON, E. A.; ISON, A. Synthesis of Well-Defined Copper N-Heterocyclic Carbene Complexes and Their Use as Catalysts for a "Click Reaction": A Multistep Experiment That Emphasizes the Role of Catalysis in Green Chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 89, n. 12, p. 1575–1577, 13 nov. 2012.
- [61] LIPSHUTZ, B. H.; BOŠKOVIĆ, Z.; CROWE, C. S.; DAVIS, V. K.; WHITTEMORE, H. C.; VOSBURG, D. A.; WENZEL, A. G. "Click" and Olefin Metathesis Chemistry in Water at Room Temperature Enabled by Biodegradable Micelles. *Journal of Chemical Education*, v. 90, n. 11, p. 1514–1517, 12 nov. 2013.
- [62] OBHI, N. K.; MALLOV, I.; BORDUAS-DEDEKIND, N.; ROUSSEAU, S. A. L.; DICKS, A. P. Comparing Industrial Amination Reactions in a Combined Class and Laboratory Green Chemistry Assignment. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 1, p. 93–99, 8 jan. 2019.
- [63] ONG, J.-Y.; CHAN, S.-C.; HOANG, T.-G. Empowering students to design and evaluate synthesis procedures: a Sonogashira coupling project for advanced teaching lab. *Journal of Chemical Education*, v. 95, n. 6, p. 1078–1081, 2018.
- [64] AKTOUDIANAKIS, E.; CHAN, E.; EDWARD, A. R.; JAROSZ, I.; LEE, V.; MUI, L.; THATIPAMALA, S. S.; DICKS, A. P. "Greening Up" the Suzuki Reaction. *Journal of Chemical Education*, v. 85, n. 4, p. 555, abr. 2008.
- [65] CALLAM, C. S.; LOWARY, T. L. Suzuki Cross-Coupling Reactions: Synthesis of Unsymmetrical Biaryls in the Organic Laboratory. *Journal of Chemical Education*, v. 78, n. 7, p. 947, jul. 2001.
- [66] NOVAK, M.; WANG, Y. T.; AMBROGIO, W.; TODD, A. M. A Research Project in the Organic Instructional Laboratory Involving the Suzuki-Miyaura Cross Coupling Reaction. *The Chemical Educator*, v. 12, n. 6, p. 414–418, 2007.
- [67] COSTA, N. E.; PELOTTE, A. L.; SIMARD, J. M.; SYVINSKI, C. A.; DEVEAU, A. M. Discovering Green, Aqueous Suzuki Coupling Reactions: Synthesis of Ethyl (4-Phenylphenyl)acetate, a Biaryl with Anti-Arthritic Potential. *Journal of Chemical Education*, v. 89, n. 8, p. 1064–1067, 10 jul. 2012.
- [68] ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. (ed.). *Green Chemistry: Designing Chemistry for the Environment*. Washington, DC: American Chemical Society, 1996. 238 p.
- [69] CANN, M. C. *Real World Cases in Green Chemistry*, v. II. [s.l.] ACS, 2000.
- [70] HJERESSEN, D. L.; BOESE, J. M.; SCHUTT, D. L. Green Chemistry and Education. *Journal of Chemical Education*, v. 77, n. 12, p. 1543, 1 dez. 2000.
- [71] AUGÉ, J. La chimie au coeur du développement durable : un message à faire passer dans l'enseignement et la société. *L'Actualité Chimique*, n. 314, p. 44–50, dez. 2007.
- [72] PRADO, A. G. S. Química verde, os desafios da química do novo milênio. *Química Nova*, v. 26, n. 5, p. 738–744, out. 2003.
- [73] RASTON, C. L.; SCOTT, J. L. Teaching green chemistry. Third-year-level module and beyond. *Pure and Applied Chemistry*, v. 73, n. 8, p. 1257–1260, 2001.

- [74] ALFONSI, K.; COLBERG, J.; DUNN, P. J.; FEVIG, T.; JENNINGS, S.; JOHNSON, T. A.; KLEINE, H. P.; KNIGHT, C.; NAGY, M. A.; PERRY, D. A.; STEFANIAK, M. Green Chemistry Tools to Influence a Medicinal Chemistry and Research Chemistry Based Organisation. *Green Chemistry*, v. 10, n. 1, p. 31–36, 3 jan. 2008. Acesso em: 23 jan. 2023.
- [75] GHOSH, A.; GUPTA, S. S.; BARTOS, M. J.; HANGUN, Y.; VUOCOLO, L. D.; STEINHOFF, B. A.; NOSER, C. A.; HORNER, D.; MAYER, S.; INDERHEES, K.; HORWITZ, C. P.; SPATZ, J.; RYABOV, A. D.; MONDAL, S.; COLLINS, T. J. Green chemistry. Sustaining a high-technology civilization. *Pure and Applied Chemistry*, v. 73, n. 1, p. 113–118, 2001.
- [76] KIDWAI, M.; THAKUR, R. Green Chemistry in Sustainable National Development. *Cheminform*, v. 37, n. 40, 3 out. 2006.
- [77] BORA, U.; CHAUDHURI, M. K.; DEHURY, S. K. Green chemistry in Indian context – Challenges, mandates and chances of success. *Current Science*, v. 82, n. 12, p. 1427–1436, 2002.
- [78] GARCÍA, V.; PONGRÁCZ, E.; PHILLIPS, P.; KEISKI, R. Factors Affecting Resource Use Optimisation of the Chemical Industry in the Northern Ostrobothnia Region of Finland. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 18, p. 1987–1994, 1 dez. 2008.
- [79] GRON, L. U. Sustaining the green revolution through education. *Chimica Oggi*, v. 25, n. 6, p. 11–13, 2007.
- [80] KITCHENS, C.; CHARNEY, R.; NAISTAT, D.; FARRUGIA, J.; CLARENS, A.; O'NEIL, A.; LISOWSKI, C.; BRAUN, B. Completing Our Education. Green Chemistry in the Curriculum. *Journal of Chemical Education*, v. 83, n. 8, p. 1126, 1 ago. 2006.
- [81] LEITNER, W. Focus on Education in Green Chemistry. *Green Chemistry*, v. 6, n. 8, p. 351, 2004.
- [82] DICKS, A. P. Solvent-free reactivity in the undergraduate organic laboratory. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 2, n. 2, p. 87–100, 1 jun. 2009b.
- [83] HOROWITZ, G. The State of Organic Teaching Laboratories. *Journal of Chemical Education*, v. 84, n. 2, p. 346, 1 fev. 2007.
- [84] MCKENZIE, L. C.; HUFFMAN, L. M.; HUTCHISON, J. E.; ROGERS, C. E.; GOODWIN, T. E.; SPESSARD, G. O. Greener Solutions for the Organic Chemistry Teaching Lab: Exploring the Advantages of Alternative Reaction Media. *Journal of Chemical Education*, v. 86, n. 4, p. 488, abr. 2009.
- [85] MCKENZIE, L. C.; THOMPSON, J. E.; SULLIVAN, R.; HUTCHISON, J. E. Green Chemical Processing in the Teaching Laboratory: A Convenient Liquid CO₂ Extraction of Natural Products. *Green Chemistry*, v. 6, n. 8, p. 355–358, 10 set. 2004