

Programa Qui+S: Principais Desafios da Química para Impactar a Sustentabilidade no Brasil até 2050

Qui+S Program: Main Chemistry Challenges to Impact Sustainability in Brazil by 2050

Maryna M. Barros,^a Izadora R. S. Menezes,^a Ingrid F. Silva,^{a,b} Valeska P. S. R. Pardi,^a Izabella C. N. P. Andrade,^a Thais A. Silva,^a Germano M. C. Fagundes,^a Rochel M. Lago,^a Ana Paula C. Teixeira^{a,*}

^aUniversidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, CEP 31270-901, Belo Horizonte-MG, Brasil

^bMax Planck Institute of Colloids and Interfaces, Department of Colloid Chemistry, Am Mühlenberg 1, D-14476, Potsdam, Germany

*E-mail: anapct@ufmg.br

Submissão: 26 de Setembro de 2024

Aceite: 10 de Julho de 2025

Publicado online: 30 de Julho de 2025

Motivated by the International Year of Basic Sciences for Sustainable Development (IYBSSB) 2022-2023, the Brazilian Chemical Society (SBQ) launched the “Post 2022 Chemistry Movement – Sustainability and Sovereignty”. One of the activities of this Movement was the creation of the Qui+S Program, designed to promote sustainability in Brazil through chemistry. Part of the scope of the Qui+S program was to define the main challenges in chemistry that can impact sustainability in Brazil until 2050. Based on interviews with more than 70 professionals from industries, universities, government and other organizations in 11 states of Brazil and considering educational, economic and social/environmental criteria, 5 main challenges for chemistry and sustainability were defined: (1) Chemistry for climate change, (2) Chemistry for waste transformation, (3) Chemistry for sustainable water use, (4) Chemistry for development of sustainable materials and (5) Chemistry for sustainable food production. Each of these challenges were divided into 3 priority front actions. This work describes the process to define these 5 main challenges and the priority front actions.

Keywords: Sustainability; challenges; sustainable development; Qui+S.

1. Introdução

Os anos de 2022 e 2023 foram proclamados pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) e a Unesco como o Ano Internacional das Ciências Básicas para o Desenvolvimento Sustentável (IYBSSD 2022/2023 – *The International Year of Basic Sciences for Sustainable Development*).¹ Esse teve como objetivo incentivar contribuições das ciências básicas, como a Química, para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo um momento chave para mostrar a importância dessas ciências para o futuro.² Também em 2022, o Brasil comemorou o bicentenário da sua independência em meio a um cenário de dependência por insumos químicos produzidos em outros países.³ Nesse contexto, a Sociedade Brasileira de Química (SBQ) lançou o “Movimento Química Pós 2022 – Sustentabilidade e Soberania”.³

O Movimento busca promover reflexões sobre como a Química pode contribuir, de forma efetiva, para a Sustentabilidade e Soberania do Brasil. Para isso, essa iniciativa da SBQ é formada por diversas frentes como: lançamento de livros, Concurso Nacional de Redação, webnários e o desenvolvimento do Programa Qui+S: Química e seus atores para um Brasil Sustentável.³ Esse Programa, que se iniciou como um Plano de Ação, tem como objetivo propor e executar ações de curto, médio e longo prazo para promover, por meio da Química, a Sustentabilidade no país. Para tal, na primeira etapa, foram realizadas entrevistas com profissionais em posição de liderança de universidades, indústrias, governo, terceiro setor e outras organizações, em que foram levantadas diversas questões relacionadas à Química consideradas de suma relevância para o desenvolvimento sustentável do Brasil. A partir das diversas sugestões e reflexões das entrevistas, foram criados dois Objetivos da Química para o Desenvolvimento Sustentável (OQDS),⁴ conforme Figura 1. Todo o processo de desenvolvimento da primeira fase desse Programa foi relatado por Silva e colaboradores em uma publicação prévia.⁴

Em seguida, para que os projetos desenvolvidos dentro de cada um dos eixos dos OQDS não se tornassem ações isoladas, mantendo assim a coesão do Programa, deliberou-se que seriam escolhidos desafios direcionadores em ciência, tecnologia, inovação e educação (CTI&E) para orientar os projetos a serem desenvolvidos dentro dos eixos dos dois OQDS. Assim, o objetivo deste artigo é descrever o processo de escolha desses desafios e apresentar os resultados obtidos



Figura 1. Esquema representativo dos Objetivos da Química para o Desenvolvimento Sustentável (OQDS) do Programa e respectivos eixos de ação

durante esta etapa, trazendo, ao final, quais foram os desafios selecionados para orientar as próximas etapas do Programa.

2. Construção do Programa Qui+S: Química e seus Atores para um Brasil Sustentável

O Programa começou com a fase de estruturação (FASE 1) em meados de 2021. Nela, foram conduzidas entrevistas com vários profissionais de diferentes setores e, a partir do que foi discutido, foram definidos dois Objetivos da Química para o Desenvolvimento Sustentável (OQDS) e respectivas linhas de ação (Figura 1), que serviram como fundamento para a execução das próximas fases. Em seguida, entre junho e outubro de 2022, ocorreu a definição de desafios que direcionarão as ações e projetos a serem desenvolvidos dentro do Programa (FASE 2). Os detalhes e resultados dessa fase serão mostrados ao longo deste artigo. A partir de novembro de 2022, o projeto iniciou a FASE 3, em que foram definidos, com o auxílio de dois Grupos de Inteligência, os projetos e ações a serem executados até 2026 dentro do Qui+S (Figura 2).

3. Processo de Escolha dos Desafios Direcionadores da Química para Impactar a Sustentabilidade no Brasil no Programa Qui+S

A escolha dos desafios direcionadores da Química para impactar a Sustentabilidade no Brasil aconteceu em duas etapas: ETAPA 1 – Mapeamento de temas prioritários para o Brasil em Química e Sustentabilidade e ETAPA 2 – Definição e validação dos desafios com o Grupo de

Inteligência (GI), por meio de entrevistas.

Na ETAPA 1, a partir do trabalho feito durante a Estruturação do projeto (FASE 1) descrito por Silva *et al.* (2022),⁴ foram propostos nove temas preliminares para a escolha dos desafios direcionadores:

- Tema 1: Mudanças Climáticas (captura e uso de CO₂, descarbonização e pegada de carbono);
- Tema 2: Reaproveitamento de resíduos, Economia circular;
- Tema 3: Bioprodutos, Bioeconomia;
- Tema 4: Materiais renováveis, materiais sustentáveis e plásticos;
- Tema 5: Tratamento de efluentes e saneamento básico;
- Tema 6: Energias renováveis, biocombustíveis e hidrogênio;
- Tema 7: Uso sustentável de recursos minerais e naturais;
- Tema 8: Poluição da água, ar e solo;
- Tema 9: Agroquímica para produção sustentável de alimentos.

Utilizando esses temas propostos, o Grupo de Trabalho, descrito na Figura 4, realizou um mapeamento inicial buscando identificar quais seriam os mais relevantes para um Brasil sustentável. Isso foi feito por meio de entrevistas e questionários, organizados em três partes. Na primeira parte, o respondente fornecia algumas informações pessoais, como: profissão, área de formação e instituição a qual é vinculado(a). Já na segunda parte, o respondente era convidado a atribuir notas de **um (maior prioridade)** a **nove (menor prioridade)** para cada um dos nove temas citados anteriormente. E, por fim, na terceira parte era necessário atribuir notas de **um (maior prioridade)** a **nove (menor prioridade)** para cada um dos temas, considerando oito critérios relacionados a questões sociais, ambientais, econômicas e educacionais (Figura 3).

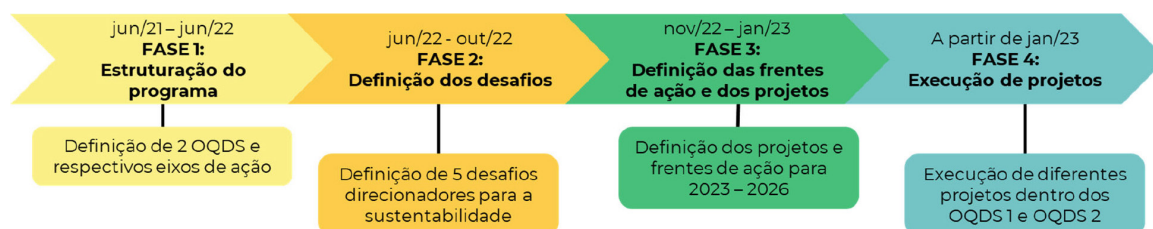


Figura 2. Fases do programa Qui+S

Critérios sobre educação	Critérios sobre economia	Critérios ambientais/sociais
CRITÉRIO 1 Permite ao professor de química e sala de aula (ensino básico) trabalhar com os alunos de forma dinâmica e contextualizada com o cotidiano	CRITÉRIO 4 É um tema de interesse das indústrias químicas e afins brasileiras	CRITÉRIO 7 Pode trazer um impacto ambiental relevante
CRITÉRIO 2 Possibilita as escolas fazerem projetos em química com o entorno (espaço e comunidade)	CRITÉRIO 5 Tema que o Brasil mais precisa desenvolver	CRITÉRIO 8 Pode trazer um impacto social relevante
CRITÉRIO 3 Pode ser usado para incrementar a formação do novo químico para sustentabilidade em universidades	CRITÉRIO 6 Pode trazer um impacto econômico relevante	

Figura 3. Critérios utilizados na priorização dos nove temas em Sustentabilidade

Depois do mapeamento concluído, realizou-se a ETAPA 2 – Definição e validação dos desafios com o Grupo de Inteligência por meio de entrevistas. Para isso, inicialmente foi montado um Grupo de Inteligência, descrito a seguir, composto por profissionais com ampla experiência de diferentes áreas de atuação: escolas de educação básica, universidades, indústrias, governos, terceiro setor e outras organizações.

Grupo de Inteligência (GI)

- **Ciro Mattos Marino** – ex-Presidente Executivo da Abiquim, Consultor sênior na área de Negócios, possui mais de trinta anos de experiência no setor químico, tendo ocupado cargos de liderança em várias empresas do setor;
- **Emanuel Manfred Freire Brandt** – Diretor Técnico da Brandt Meio ambiente, já foi docente na UFJF, PUC Minas e Professor Substituto na UFMG;
- **Layla Karoline Tito Alves** - Professora Efetiva da Rede Estadual de Ensino do Estado de Goiás, licenciada em Química e mestra em Educação em Ciências e Matemática pela Universidade Federal de Goiás (UFG);
- **Lucas Ferreira Folgado** - Consultor de Inovação e Negócios da Floresta e de Carbono do Fundo Vale, já trabalhou como Coordenador de soluções sustentáveis no IFood, fez parte da rede *Global Shapers* e possui experiência nas áreas de Empreendedorismo e Inovação;
- **Marcelo Gomes Speziali** - Professor Adjunto do Departamento de Química da UFOP em licença para atuar como Diretor de Ciência, Tecnologia e Inovação da FAPEMIG, foi Pesquisador visitante no MIT e já recebeu diversos prêmios nas áreas de Empreendedorismo, Modelo de Negócios e Negócios Inovadores;
- **Marlon Herbert Flora Barbosa Soares** – docente

no Instituto de Química da UFG, Coordenador do Laboratório de Educação Química e Atividades Lúdicas (LEQUAL), Pesquisador do Núcleo de Pesquisa em Ensino de Ciências (NUPEC) da UFG, tem ampla experiência na área de Ensino de Química;

- **Michelle Jakeline Cunha Rezende** – Professora Associada no Instituto de Química da UFRJ, é docente permanente na Pós-graduação em Química da UFRJ e no Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI), além de ser Coordenadora do Laboratório de Estudos para o Meio Ambiente e Energia (LEMAE-IQ/UFRJ);
- **Rafael Barreto Almada** – Presidente do Conselho Regional de Química do Rio de Janeiro (CRQ – RJ), foi Conselheiro do CRQ-RJ entre 2009 e 2017 e Conselheiro do Conselho Superior no MEC. No IFRJ, atuou como Vice Coordenador do curso técnico em Química, Conselheiro representante docente no Conselho Superior, Coordenador Geral de Programas e projetos, Pró-Reitor de Extensão e Reitor e atualmente é Professor na mesma instituição;
- **Thaynara Furtado Constantinov Leal** – atua na gestão de projetos para organizações públicas e privadas de adaptação e mitigação às mudanças climáticas. Desde 2015, presta assessoria como Analista em ações estratégicas globais e regionais para o desenvolvimento sustentável e na criação de projetos coletivos/colaborativos em Organizações Não Governamentais (ONGs);
- **Tereza Cristina Souza de Oliveira** - docente no Departamento de Química da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), coordena o Laboratório de Análise de Água e Qualidade Ambiental (LAQUA) da UFAM e trabalha com temas relacionados a recursos hídricos;

- Zuy Maria Magriotis – docente do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), ex-Diretora de meio ambiente da mesma universidade, possui experiência nas áreas de catálise, biocombustíveis, tratamento e aproveitamento de resíduos agroindustriais e adsorção de contaminantes em água. Foi uma das Coordenadoras da aplicação do *Greenmetrics*, índice que busca avaliar a Sustentabilidade de universidades.

Em seguida, foram realizados dois blocos de reuniões com o Conselho Consultivo e Grupo de Inteligência, descritos na Figura 4. No primeiro bloco, os resultados obtidos no mapeamento inicial e os nove temas foram discutidos com os profissionais, os quais fizeram considerações, sugestões e indicaram quais seriam os temas mais relevantes no contexto da Sustentabilidade no Brasil. Essas ponderações foram organizadas e analisadas pelo Grupo de Trabalho e deram origem aos desafios que irão direcionar as próximas etapas do Programa. Esses desafios foram validados em um segundo bloco de reuniões com o Conselho Consultivo e o Grupo de Inteligência, chegando-se então à versão final.

Cabe ressaltar que essa, assim como todas as outras etapas do processo de estruturação do Programa, foram conduzidas pelo Grupo de Trabalho do Qui+S, bem como validadas pelo Conselho Consultivo, composto por profissionais que são referências em Química e Sustentabilidade em nível nacional. A seguir, na Figura 4, são listados os profissionais que formaram cada um destes grupos.

4. Avaliação dos Resultados Obtidos no Mapeamento dos Temas Prioritários

Como resultado para a ETAPA 1 - Mapeamento de temas prioritários para o Brasil em Química e Sustentabilidade, considerando entrevistas e questionários, obtiveram-se 70 respostas de profissionais da academia, governo, indústria e outros setores (Figura 5) de 11 estados brasileiros: Alagoas, Bahia, Ceará, Goiás, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo. Analisando as notas atribuídas tanto na priorização geral quanto na priorização por critérios dos temas propostos foi possível perceber que cinco temas foram indicados como mais relevantes, isto é, receberam nota 1 por um número maior de respondentes. O tema apontado como de maior prioridade foi o **Tema 2: Reaproveitamento de resíduos, Economia circular**, classificado como o mais relevante por 18 respondentes, seguido pelos **Tema 1: Mudanças Climáticas (captura e uso de CO₂, descarbonização e pegada de carbono)** e **Tema 5: Tratamento de efluentes e saneamento básico**, classificados como mais relevantes por 12 pessoas cada um. Em terceiro lugar, o **Tema 6: Energias renováveis, biocombustíveis e hidrogênio** e o **Tema 7: Uso sustentável de recursos minerais e naturais**, com 9 votos cada um.

O resultado para todos os temas é apresentado na Figura 6. Nessa, pode-se observar que o número de respondentes que classificou determinado tema como de maior prioridade (nota 1) é mostrado acima de sua respectiva

Escolha dos desafios direcionadores																								
Grupo de Trabalho	Conselho Consultivo	Grupo de Inteligência																						
Ana Paula de C. Teixeira UFMG	Evaldo F. Vilela ex-Presidente CNPq	<table><tr><th>Academia</th><th>Governo</th></tr><tr><td>Marlon H. F. B. Soares UFG</td><td>Marcelo G. Speziali FAPEMIG</td></tr><tr><td>Tereza Cristina S. de Oliveira UFAM</td><td></td></tr><tr><td>Zuy M. Magriotis UFLA</td><td></td></tr><tr><th>Indústria</th><td></td></tr><tr><td>Ciro M. Marino ex-Presidente Abiquim</td><td></td></tr><tr><td>Emanuel M. F. Brandt Brandt</td><td></td></tr><tr><th>3º setor e outras org.</th><td></td></tr><tr><td>Rafael B. Almada CRQ-RJ</td><td></td></tr><tr><td>Taynara F. C. Leal Global Shapers</td><td></td></tr><tr><td>Lucas F. Folgado Fundo Vale</td><td></td></tr></table>	Academia	Governo	Marlon H. F. B. Soares UFG	Marcelo G. Speziali FAPEMIG	Tereza Cristina S. de Oliveira UFAM		Zuy M. Magriotis UFLA		Indústria		Ciro M. Marino ex-Presidente Abiquim		Emanuel M. F. Brandt Brandt		3º setor e outras org.		Rafael B. Almada CRQ-RJ		Taynara F. C. Leal Global Shapers		Lucas F. Folgado Fundo Vale	
Academia	Governo																							
Marlon H. F. B. Soares UFG	Marcelo G. Speziali FAPEMIG																							
Tereza Cristina S. de Oliveira UFAM																								
Zuy M. Magriotis UFLA																								
Indústria																								
Ciro M. Marino ex-Presidente Abiquim																								
Emanuel M. F. Brandt Brandt																								
3º setor e outras org.																								
Rafael B. Almada CRQ-RJ																								
Taynara F. C. Leal Global Shapers																								
Lucas F. Folgado Fundo Vale																								
Ingrid F. Silva Max Planck	Fernando Galembeck UNICAMP	<table><tr><th>Educação básica</th></tr><tr><td>Layla K. T. Alves IFG</td></tr><tr><td>Michelle J. C. Rezende UFRJ e PROFQUI</td></tr></table>	Educação básica	Layla K. T. Alves IFG	Michelle J. C. Rezende UFRJ e PROFQUI																			
Educação básica																								
Layla K. T. Alves IFG																								
Michelle J. C. Rezende UFRJ e PROFQUI																								
Izadora R. S. de Menezes UFMG	Jailson B. de Andrade UFBA e SENAI CIMATEC																							
Maryna M. Barros UFMG	Mozart N. Ramos UFPE e USP																							
Rochel M. Lago UFMG	Pedro Wongtschowksi Grupo Ultra																							
	Romeu C. Rocha Filho UFSCar																							
	Shirley Nakagaki Presidente da SBQ e UFPR																							

Figura 4. Composição do Grupo de Trabalho, Conselho Consultivo e Grupo de Inteligência

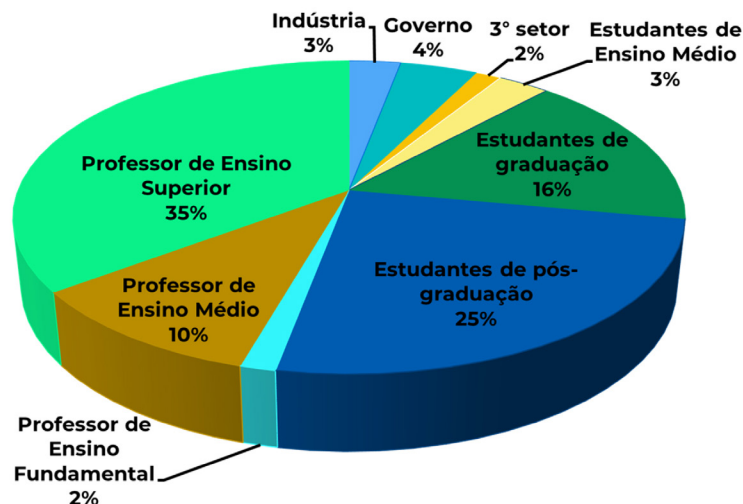


Figura 5. Perfil dos respondentes das entrevistas e questionários por área de atuação

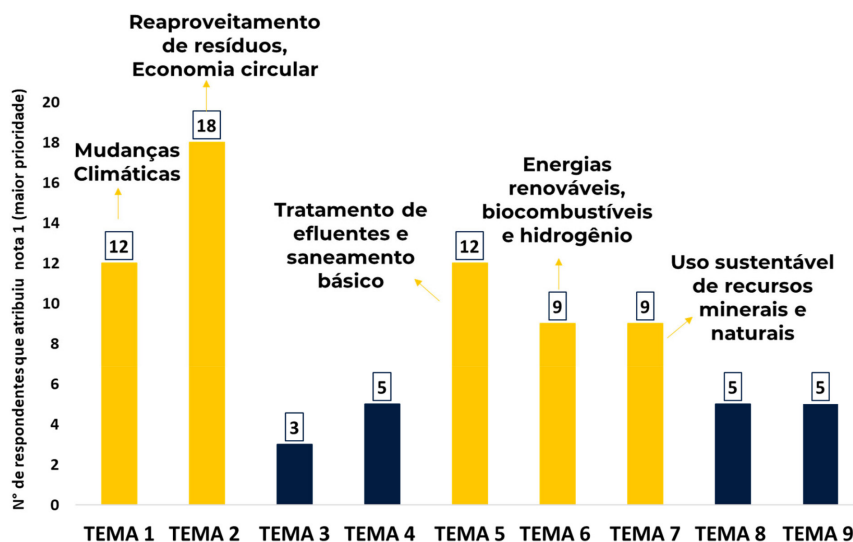


Figura 6. Resultado da priorização geral e por critérios dos nove temas propostos

barra. Cabe ressaltar que o questionário utilizado permitia que um mesmo respondente classificasse mais de um tema como de maior prioridade, ou seja, que o respondente atribuisse nota 1 a mais de um tema.

5. Definição dos Desafios Direcionadores para o Qui+S

Na ETAPA 2 - Definição e validação dos desafios com o Grupo de Inteligência (GI), foram realizadas várias reuniões com o Conselho Consultivo e o Grupo de Inteligência para a definição dos desafios. Durante as reuniões, os membros validaram os temas propostos, confirmando que estes englobam os principais tópicos ao se pensar em Química e sustentabilidade no contexto brasileiro, além de serem temas de grande interesse dentro de indústrias, universidades, governo e terceiro setor. Outro ponto ressaltado durante as conversas foi a grande

importância e impacto de todos os nove temas propostos, o que tornava difícil a escolha de apenas alguns para direcionar as próximas etapas do Programa. Além disso, havia o risco de restringir excessivamente o projeto, fazendo com que alguns atores importantes para a execução do Programa perdessem o interesse e motivação. Nesse sentido, sugeriu-se pensar em desafios mais abrangentes por meio do agrupamento de alguns temas, já que alguns deles estariam relacionados.

Além dessas, outras considerações mais pontuais foram feitas ao longo das reuniões, as quais foram organizadas e analisadas pelo Grupo de Trabalho. Depois da análise, algumas delas foram incorporadas aos temas inicialmente propostos, originando os cinco desafios direcionadores que irão orientar as próximas etapas do Programa (Figura 7). Para cada um dos desafios, foram propostas três linhas de ação, com base no que foi discutido durante as FASES 1 e 2 do projeto. Cabe ressaltar que a versão final dos desafios foi posteriormente validada com todos os profissionais



Figura 7. Desafios direcionadores do Programa Qui+S e respectivas linhas de ação

que fizeram parte do Conselho Consultivo e Grupo de Inteligência.

5.1. Desafio 1: Química para o combate à Mudança Climática

As Mudanças Climáticas podem ser definidas com alterações nos padrões de temperatura e clima do planeta no longo prazo.⁵ Essas mudanças podem ocorrer naturalmente, por exemplo, em decorrência de variações no ciclo solar.⁶ Porém, atualmente, sabe-se que algumas atividades humanas têm intensificado essas alterações.⁷ Isso porque atividades como o desmatamento e a queima de combustíveis fósseis geram emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e o aumento da concentração desses gases na atmosfera provoca um aumento na temperatura do planeta, resultando em Mudanças Climáticas.⁸ Por causa disso, episódios de seca, derretimento das calotas polares, inundações e outros eventos se tornam cada vez mais recorrentes, afetando milhares de pessoas e gerando prejuízos econômicos significativos.⁹

Observa-se então a necessidade de buscar soluções e alternativas para mitigar esses impactos. Nesse sentido, a temática Mudança Climática tem sido bastante discutida atualmente, inclusive dentro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima, especificamente, trata de medidas para combater a mudança do clima e seus impactos.¹⁰ Além desse, esse tema também está presente, mesmo que indiretamente, em outros Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Isso porque ao se propor metas para tornar cidades sustentáveis ou promover o uso

de energia limpa, por exemplo, também se está propondo alternativas para mitigar a Mudança Climática e seus impactos.

Assim, foram propostas três linhas de ação a serem exploradas dentro desse desafio:

- **Captura e uso de CO₂:** o dióxido de carbono é um dos principais GEEs e é emitido em atividades como a queima de combustíveis fósseis.¹¹ Por causa disso, um dos caminhos possíveis para mitigação das mudanças climáticas envolve a captura e uso deste gás.^{12,13} Nesse sentido, a literatura traz opções para o armazenamento e captura do CO₂, porém também é necessário desenvolver formas de transformar este gás em produtos duráveis e de maior valor agregado.¹⁴⁻¹⁶ Assim, essa linha de ação está focada em processos e tecnologias para o sequestro, armazenamento e transformação de CO₂, de forma eficiente, em produtos ou subprodutos, permitindo que ele possa ser utilizado posteriormente.
- **H₂ Verde:** outra alternativa para conter o avanço da Mudança Climática é o desenvolvimento e uso de fontes renováveis de energia em substituição aos combustíveis fósseis. Um exemplo é o H₂ verde ou hidrogênio renovável, o qual se refere ao hidrogênio que é produzido por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis.¹⁷ Esse tipo de hidrogênio já é apontado como a maior aposta para uma produção industrial mais sustentável,¹⁸ porém, atualmente, é pouco usado, já que cerca de 98% do hidrogênio utilizado como combustível é proveniente de fontes não renováveis.¹⁹ Juntamente a isso, existem alguns desafios a serem enfrentados, como o armazenamento e transporte do hidrogênio,

que necessitam de cuidados específicos.¹⁸ Deste modo, o foco está na produção, armazenamento e usos do H₂ verde nessa linha de ação.

- **Biocombustíveis:** os biocombustíveis podem ser definidos como todo combustível produzido a partir de matéria-prima renovável, sobretudo de origem vegetal.²⁰ Ao se pensar no uso e produção desses combustíveis no cenário mundial, o Brasil possui um papel relevante, visto que é o segundo maior produtor mundial de etanol, sendo responsável por 27% do volume global no ano de 2021.²¹ Cabe ressaltar que os biocombustíveis são alternativas que podem ser menos poluentes e podem ser utilizados para substituir os combustíveis fósseis.²² Apesar disso, ainda se observa que o mundo continua bastante dependente dos combustíveis fósseis. Assim, essa linha de ação está relacionada ao desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de combustíveis produzidos a partir de diferentes matérias-primas renováveis como, por exemplo, a biomassa.

5.2. Desafio 2: Química para a transformação de resíduos

Em praticamente todas as atividades industriais ou domésticas é gerado algum tipo de resíduo. Estima-se, por exemplo, que são produzidos cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano no mundo.²³ Cabe ressaltar que este é um assunto de grande relevância já que a má gestão de resíduos pode trazer diversos problemas, como: propagação de doenças, poluição de oceanos, inundações e outros, afetando todo o mundo.²⁴

Uma alternativa possível é realizar o tratamento dos resíduos e reintroduzi-los na economia, com valor agregado. Alguns tipos de resíduo, como vidro, já possuem os processos de reciclagem bastante difundidos,²³ mas podem ser aprimorados. Outros resíduos, como os industriais, possuem uma composição mais específica, demandando abordagens distintas em seu tratamento.²⁵

É importante ressaltar que esse tema também está presente nos ODS. Isso porque, apesar de não existir um Objetivo de Desenvolvimento Sustentável voltado exclusivamente para a temática resíduos, ela é contemplada dentro das metas de diversos ODS. Um exemplo é ODS 14 – Vida na água, que possui metas voltadas para conservação e uso sustentável de oceanos, mares e recursos marinhos e tem como um de seus indicadores a densidade de detritos plásticos.²⁶

Desta forma, como linhas de ação para esse desafio foram propostos, de acordo com a composição material dos resíduos, três linhas de ação:

- **Transformação de resíduos plásticos:** os plásticos são um tipo de polímero com grande variedade de propriedades, o que permite que sejam utilizados em diversas aplicações.²⁷ Eles podem ser obtidos a partir de recursos como a madeira e o carvão, porém, as principais matérias-primas utilizadas são o petróleo e o gás natural.²⁸ Esse tipo de resíduo merece atenção já que pode levar

milhares de anos para se decompor no ambiente, além de ser gerado em grande quantidade: foram gerados 353 milhões de toneladas de resíduos plásticos no mundo em 2019.²⁹ Cabe ressaltar que a reciclagem desses resíduos pode ser muito desafiadora, fazendo com que muitos países coletem os resíduos plásticos sem possuírem a capacidade de processá-los.²³ Desta forma, essa linha de ação está relacionada ao desenvolvimento de processos de melhoria na reciclagem ou novas tecnologias que utilizem resíduos plásticos.

- **Transformação de resíduos minerais:** os resíduos minerais podem ser gerados em diferentes atividades humanas, sendo resultantes tanto de processos de mineração quanto do descarte de equipamentos eletrônicos. Por causa disso, observam-se grandes volumes desse tipo de resíduo: foram geradas aproximadamente 1,6 milhão de toneladas nas atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios apenas em 2020.³⁰ Faz-se necessário então modificar os processos de mineração para reduzir o volume de rejeitos e desenvolver processos de enriquecimento e/ou novas aplicações dos resíduos. A mineração urbana e a extração de metais do lixo eletrônico também podem ser exploradas. Visto que esse tipo de resíduo é gerado em um volume expressivo: foram geradas 53,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico no mundo apenas em 2019.³¹ Assim, essa linha de ação está focada no desenvolvimento de tecnologias e/ou processos que utilizem resíduos minerais como matéria-prima.
- **Transformação de resíduos de biomassa:** a biomassa pode ser definida como todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada para produzir energia.³² Ela pode ter origem em diversos materiais, como: lenha, resíduos agroflorestais, alimentícios e outros e é utilizada para produzir diversos produtos como, por exemplo, biocombustíveis.³² Por causa disso, seus resíduos têm grande diversidade de composição, tornando sua utilização desafiadora. Deste modo, essa linha de ação está relacionada ao desenvolvimento de tecnologias e/ou processos que utilizem resíduos de biomassa.

5.3. Desafio 3: Química para o uso sustentável da água

A água é um dos recursos fundamentais para a vida, mais especificamente, é um recurso essencial para a saúde, bem-estar e produtividade da sociedade.³³ A demanda por água está associada ao crescimento populacional, urbanização e crescente uso na agricultura, indústria e no setor energético.³⁴ Porém, em geral, este recurso não é utilizado de maneira adequada, resultando em situações de poluição e escassez, uma vez que é um recurso insubstituível e que é renovável apenas quando bem administrado.³⁵ Além de décadas de mau uso das fontes de água, as Mudanças Climáticas têm causado insuficiência desse recurso em algumas regiões do mundo.

Deste modo, considerando esse grande problema, novas soluções devem ser propostas. A água desempenha um papel central nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. O ODS 6 – Água potável e Saneamento, especificamente, visa garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos até 2030.³⁶ Além disso, a água está interligada a outros ODS, como a erradicação da pobreza, a promoção da saúde, a segurança alimentar, a energia limpa e o combate às Mudanças Climáticas. Assim, a Química pode contribuir para o cumprimento das metas e na transição para o uso sustentável da água de acordo com as seguintes linhas de ação:

- **Tratamento de efluentes industriais e domésticos:** todos os dias, aproximadamente 2 milhões de toneladas de efluentes industriais, agrícolas e domésticos são despejados em cursos d'água no mundo todo, sendo que 80% dos efluentes produzidos em países em desenvolvimento são descartados sem tratamento adequado.³⁷ Isso impacta diretamente os ecossistemas aquáticos, a saúde humana e o acesso a fontes de água potável e segura. Assim, se faz necessário processos de tratamento dos efluentes a serem descartados e das fontes de água já contaminadas. Considerando os diferentes tipos de processos de geração do efluente, tem-se uma grande variedade na composição, que deve ser avaliada cuidadosamente para a escolha do método mais eficiente. De forma geral, a eliminação de poluentes é realizada por meio de processos físicos, químicos e/ou biológicos, que combinados visam remover sólidos, matéria orgânica, nutrientes e contaminantes solúveis (metais, compostos orgânicos e outros). Nas últimas décadas, foram relatadas diversas tecnologias para o tratamento de efluentes, tais como: flotação, oxidação, extração por solvente, adsorção, troca iônica, filtração por membrana, biodegradação e fito-remediação.³⁸ No entanto, é possível trabalhar para aumentar a eficiência, acessibilidade e vantagens econômicas destes tratamentos, especialmente para os poluentes resistentes e emergentes.
- **Reuso de água:** milhões de pessoas no mundo vivem em situação de escassez de água devido à má gestão e distribuição desse recurso.³⁹ É cada vez mais necessário o desenvolvimento de soluções que permitam o processo de reuso da água. A água de reuso é aquela resultante do tratamento de efluentes e que será reutilizada em atividades em que a água potável não é requisitada como, por exemplo, a limpeza urbana e agricultura.⁴⁰ Assim, fontes de água fresca e potável podem ser racionadas. Entretanto, as aplicações da água de reuso devem ser cuidadosamente selecionadas de acordo com sua origem, uma vez que a composição de poluentes e agentes tóxicos podem representar risco à saúde humana e ao ecossistema.⁴¹ Portanto, os processos de geração de água de reuso, assim como o monitoramento de sua qualidade e usos práticos devem ser desenvolvidos detalhadamente.
- **Monitoramento da qualidade da água:** além do

desenvolvimento de tecnologias para tratamento e reuso da água, é crucial monitorar a qualidade da água afim de garantir a segurança ao se utilizá-la. É necessário avançar a discussão dos aspectos relacionados à amostragem de água para análise, além de considerações regulatórias e forenses em investigações sobre qualidade e pureza da água.⁴² O monitoramento deve considerar as contaminações microbianas e químicas, englobando compostos inorgânicos, radionuclídeos, compostos voláteis e semivoláteis, desinfetantes, herbicidas e produtos farmacêuticos, incluindo desreguladores endócrinos.⁴² Além disso, também deve-se considerar a concentração que os contaminantes estão presentes, uma vez que certos compostos podem ter ação prejudicial à saúde mesmo a níveis abaixo de parte-por-milhão (ppm).⁴³ Assim, essa linha de ação tem como foco o desenvolvimento e aprimoramento de processos para o monitoramento da qualidade da água.

5.4. Desafio 4: Química para o desenvolvimento de materiais para a sustentabilidade

O desenvolvimento de materiais que tragam impactos positivos dentro do contexto da Sustentabilidade e que permitam substituir materiais que são prejudiciais ao meio ambiente é extremamente relevante na nossa sociedade. Um material sustentável é uma substância ou recurso que é obtido, produzido e utilizado de forma responsável, visando minimizar seu impacto negativo no meio ambiente e na sociedade, ao mesmo tempo em que promove o equilíbrio ecológico de longo prazo e a equidade social.⁴⁴ Esses materiais são normalmente selecionados com base em sua avaliação do ciclo de vida, que considera: impactos ambientais, sociais e econômicos, desde a extração ou criação até o descarte ou reciclagem.⁴⁵ Materiais sustentáveis buscam reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa, o consumo de energia, o uso de água e a geração de resíduos ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, alguns tipos de materiais também podem contribuir para o desenvolvimento sustentável por causa de sua finalidade como, por exemplo, materiais relacionados a energia limpa.^{46,47}

Com o crescente aumento no consumo mundial de materiais, os ODS certamente se correlacionam com essa problemática. Em especial, o ODS 12 - Consumo e produção responsáveis que visa assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis⁴⁸ e o ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura que propõe a construção de infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação.⁴⁹ Ademais, o ODS 7 - Energia limpa e acessível,⁵⁰ o ODS 6 - Água potável e saneamento, dentre outros dependem do desenvolvimento de materiais eficientes para tais aplicações e, para isso, são necessárias inovações e desenvolvimento tecnológico. Deste modo, as linhas de ação a serem exploradas dentro desse desafio são:

- **Materiais renováveis/sustentáveis:** relaciona-se ao desenvolvimento de materiais a partir de recursos

renováveis extraídos de maneira responsável ou obtidos por meio de reciclagem/reaproveitamento/ressignificação de resíduos. Eles devem ser eficientes em sua aplicação, ter baixo risco a saúde humana, causar baixo impacto ao meio-ambiente, serem resistentes, duráveis e com mínima necessidade de manutenção.⁴⁵ O ciclo de vida desses materiais deve estar alinhado aos princípios de Sustentabilidade, visando substituir materiais com ciclo de vida menos sustentáveis. Materiais biodegradáveis também se enquadram nessa categoria por reduzir o impacto ambiental do seu descarte. Alguns exemplos de materiais que precisam de avanço no desenvolvimento de alternativas sustentáveis são materiais poliméricos,⁵¹ têxteis⁵² e para a construção civil.⁵³

- **Materiais para geração e armazenamento de energia limpa:** em 2020, 30% do consumo de energia elétrica mundial veio de fontes renováveis de energia, um aumento de 5,3% desde 2015.⁵⁴ É crucial para a transição energética, o desenvolvimento de materiais eficientes e economicamente viáveis para a geração, armazenamento e até mesmo economia de energia. A geração de energia elétrica solar depende da otimização de células solares, que chegou ao desenvolvimento de três gerações de tecnologias.^{55,56} A energia solar também pode ser convertida em energia térmica através de coletores solares, uma alternativa acessível.⁵⁷ Outras fontes renováveis de geração de energia também dependem do desenvolvimento de materiais adequados, como compósitos para as pás de turbinas⁵⁸ e materiais geradores de energia como os triboelétricos⁵⁹ e piezoelétricos.⁶⁰ Já o armazenamento de energia limpa depende do avanço de baterias e supercapacitores sustentáveis.^{61,62} Assim, essa linha de ação está voltada para o desenvolvimento de materiais para geração e armazenamento de energia limpa.
- **Materiais baseados em biorrecursos:** Os materiais baseados em biorrecursos, ou bioprodutos, são aqueles materiais produzidos a partir de recursos biológicos como, por exemplo, algas, vegetais, fungos, produtos animais, microrganismos, biomassa e outros.⁶³ Destacam-se compostos da Química fina e de alto valor agregado como: cosméticos, óleos essenciais, compostos farmacêuticos, biopesticidas, substâncias químicas de interesse industrial, dentre outros. Cabe ressaltar que eles devem ser extraídos e processados de maneira sustentável e podem envolver processos biológicos como: fermentação ou processos enzimáticos.⁶³ Os conceitos de biorefinaria e bioeconomia estão intimamente correlacionados a produção de materiais baseados em biorrecursos. A biorefinaria é uma instalação industrial que integra diversos processos de conversão de biomassa em produtos químicos, visando substituir as refinarias de petróleo.⁶⁴⁻⁶⁶ A bioeconomia é um modelo de produção industrial e econômico baseado nos biorrecursos e nos princípios de Sustentabilidade.⁶⁷

Assim, o desenvolvimento de materiais baseados em biorrecursos visando a substituição dos compostos oriundos de recursos fósseis se faz necessária para o avanço do desenvolvimento sustentável, sendo este o foco desta linha de ação.

5.5. Desafio 5: Química para a produção sustentável de alimentos

O agronegócio tem grande importância econômica para o Brasil, tendo sido responsável por 25% do PIB de 2022.⁶⁸ Por isso, iniciativas sustentáveis para a produção de alimentos são cruciais para auxiliar na transição para um país sustentável. Nesse sentido, a Química pode contribuir para a implementação de uma agricultura de baixa emissão de carbono, com responsabilidade na preservação da fauna, flora e recursos naturais em toda cadeia de produção e distribuição. Sendo assim, é interessante o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas a agroquímica para o aperfeiçoamento de práticas agrícolas desde o preparo e condicionamento do solo, plantio, controle de pragas, até a colheita e distribuição, considerando fatores sociais, de eficiência energética e de aproveitamento inteligente e prudente dos recursos naturais.^{69,70}

Por se tratar de um tema bastante relevante, ele também é contemplado dentro dos ODS. O ODS2 - Fome zero e agricultura sustentável, que visa erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável, é intimamente correlacionado a este desafio.⁷¹ Em 2022, aproximadamente 30% da população mundial não tinha acesso adequado a refeições, enquanto 9,2% da população mundial enfrentou fome crônica.⁷² É importante salientar que para alcançar a meta de Zero Fome em 2030, deve-se investir em agricultura sustentável e revolucionar os sistemas de comida. Assim, as linhas de ação a serem exploradas dentro desse desafio são:

- **Aproveitamento de recursos naturais na nutrição de plantas e animais:** a produção eficiente de alimentos é dependente da nutrição adequada de plantas e animais. Para tal, fertilizantes sustentáveis, fixação de nutrientes e condicionamento sustentável do solo devem ser implementados.⁷³ As práticas de plantio com baixa emissão de carbono, de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, agricultura orgânica, uso sustentável dos recursos hídricos e outras iniciativas contribuem para uma agricultura sustentável e devem ser mais exploradas.⁷⁴
- **Controle de pragas:** de similar relevância para a eficiência da produção de alimentos, lavouras fazem uso de defensores químicos (agrotóxicos) para o controle de pragas. Entretanto, é de conhecimento geral, a alta toxicidade de alguns desses produtos para o meio ambiente e a humanidade, especialmente se usados de maneira irresponsável.⁷⁵ Novos defensores sustentáveis e seguros para o meio ambiente devem ser inseridos no mercado,⁷⁶ assim como tecnologias no tratamento

de resíduos gerados durante o uso deles e no processo responsável de descarte das embalagens.⁷⁷ Inovações no controle de pragas sem uso de defensores químicos também têm alto potencial.⁷⁸

- **Pós-colheita:** o processo de colheita envolve força humana e maquinário específico que utilizam combustíveis fósseis.⁷⁹ Juntamente a isso, observa-se que a colheita gera vários resíduos, que podem ser utilizados e/ou aplicados em outras áreas.⁸⁰ A distribuição dos alimentos colhidos também deve ser um ponto de atenção, já que, em muitos casos, produtos químicos são usados para garantir a preservação do alimento no transporte.⁸¹ Sendo assim, práticas sustentáveis de colheita e produtos sustentáveis para a preservação e transporte devem ser explorados, sendo esse o foco desta linha de ação.

Por fim, é importante lembrar que os cinco desafios selecionados irão direcionar uma série de ações ao longo dos próximos anos para impulsionar o Brasil em esfera mundial no quesito da Sustentabilidade por meio da Química. Essas ações começaram a ser realizadas no início de 2023 por meio da execução de projetos pilotos em polos regionais do país e posteriormente serão replicadas para escala estadual em todo o Brasil.

Dentro do OQDS 1, cinco projetos e ações estão em desenvolvimento e execução. Dentre eles, destaca-se um curso de formação continuada para professores da educação básica, que possui sugestões de práticas para que alguns dos desafios direcionadores descritos nesse trabalho possam ser discutidos em sala de aula. Já no OQDS 2, quatro ações e projetos estão em execução e desenvolvimento, destacando-se a série de webnários Qui+S: Conexões para Sustentabilidade, que tem como objetivo promover conexão entre universidades e indústrias na expectativa de que seja possível desenvolver soluções sustentáveis. Para isso, já foram realizados três webnários: o primeiro ocorreu no dia 23/08/2023 e discutiu os desafios da Sustentabilidade na indústria do plástico no Brasil, o segundo foi realizado no dia 28/09/2023 sobre o tema tratamento de efluentes industriais no Brasil e o último aconteceu no dia 01/11/2023 e falou sobre materiais para geração e armazenamento de energia limpa no Brasil, conforme as artes de divulgação mostradas

na Figura 8. Outra iniciativa do OQDS 2 que merece destaque é o programa Escale-se Summit, um programa de aceleração e escalonamento de tecnologias nas áreas dos cinco desafios direcionadores do Qui+S, desenvolvido em parceria com o Escalab, um centro de escalonamento de tecnologias e modelagem de negócios do INCT MIDAS-UFMG, CFQ, FAPEMIG e empresas parceiras.

6. Conclusões

Foram definidos cinco desafios direcionadores, com três linhas de ação cada, que irão ser o foco de trabalho das ações desenvolvidas nos próximos anos do Programa Qui+S: Química e seus atores para um Brasil Sustentável. Esse Programa é fruto da continuidade do envolvimento da SBQ com a questão da Sustentabilidade e da contribuição da Química para o desenvolvimento sustentável.

Espera-se que os desafios selecionados e todo o trabalho do Programa impulsionem o Brasil a ser um dos líderes mundiais em temas de extrema relevância para a sociedade como, por exemplo, o combate às Mudanças Climáticas, tornando-se um país sustentável. Juntamente a isso, busca-se obter soluções e impactar positivamente questões como: o uso sustentável da água e a produção sustentável de alimentos, que afetam a poluição não apenas do país, mas do mundo.

Para isso, a partir dos cinco desafios escolhidos já estão em desenvolvimento ações dentro do OQDS 1, voltadas para a educação básica, e do OQDS 2, voltadas para P&D em indústrias e universidades. Espera-se que nas próximas etapas do Programa seja possível replicar essas ações para outros lugares do Brasil e envolver outras áreas das ciências, que são igualmente importantes para que o país alcance a Sustentabilidade.

Agradecimentos

SBQ, UFMG, Capes, CNPq, Fapemig, INCT Midas, Escalab, Abiquim, Ultra, CFQ, UFLA, UFSCar, UFAM, PROFQUI, UFG, UFPR.



Figura 8. Artes de divulgação dos webnários Qui+S: conexões para Sustentabilidade

Contribuições dos Autores

Maryna M. Barros: Curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração de projetos, Validação, Visualização, Redação do rascunho original, Redação-revisão e edição.

Izadora R. S. Menezes: Curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração de projetos, Validação, Visualização, Redação do rascunho original, Redação-revisão e edição.

Ingrid F. Silva: Curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia e Redação do rascunho original

Valeska P. S. R. Pardi: Curadoria de dados, Pesquisa, Visualização e Redação do rascunho original,

Izabella C. N. P. Andrade: Visualização e Pesquisa.

Thais A. Silva: Visualização e Pesquisa.

Germano M. C. Fagundes: Visualização e Pesquisa.

Rochel M. Lago: Conceituação, Curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração de projetos, Aquisição de financiamento para análise formal, Validação, Redação do rascunho original, Redação-revisão e edição.

Ana Paula C. Teixeira: Conceituação, Curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração de projetos, Aquisição de financiamento para análise formal, Validação, Redação do rascunho original, Redação-revisão e edição.

Referências Bibliográficas

1. *International Year of Basic Sciences for Sustainable Development*. Disponível em: <<https://www.unesco.org/en/years/basic-sciences>>. Acesso em: novembro 2022.
2. *International Year of Basic Sciences for Sustainable Development: 2022-2023*. Disponível em: <<https://council.science/our-work/basic-science/>>. Acesso em: novembro 2022.
3. Movimento Química Pós 2022 – Sustentabilidade e Soberania. Disponível em: <www.sbg.org.br/mqp2022/>. Acesso em: novembro 2022.
4. Silva, I. F.; Nascimento, P. H. P.; Lago, R. M.; Ramos, M. N.; Galembeck, F.; Rocha Filho, R. C.; Teixeira, A. P. C.; Movimento Química Pós 2022: Construção De Um Plano De Ação Para Que A Química E Seus Atores Impactem A Sustentabilidade E Soberania No Brasil. *Química Nova* **2022**, *45*, 4. [Crossref]
5. Alley, R. B.; Marotzke, J.; Nordhaus, W. D.; Overpeck, J. T.; Peteet, D. M.; Pielke, R. A.; Pierrehumbert, R. T.; Rhines, P. B.; Stocker, T. F.; Talley, L. D.; Wallace, J. M.; Abrupt Climate Change. *Science* **2003**, *299*, 2005. [Crossref]
6. Moss, R. H.; Edmonds, J. A.; Hibbard, K. A.; Manning, M. R.; Rose, S. K.; van Vuuren, D. P.; Carter, T. R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G. A.; Mitchell, J. F. B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S. J.; Stouffer, R. J.; Thomson, A. M.; Weyant, J. P.; Wilbanks, T. J.; The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **2010**, *463*, 747. [Crossref]
7. Hegerl, G. C.; von Storch, H.; Hasselmann, K.; Santer, B. D.; Cubasch, U.; Jones, P. D.; Detecting Greenhouse-Gas-Induced Climate Change with an Optimal Fingerprint Method. *Journal of Climate* **1996**, *9*, 2281. [Crossref]
8. Höök, M.; Tang, X.; Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy* **2013**, *52*, 797. [Crossref]
9. Wuebbles, D. J.; Easterling, D. R.; Hayhoe, T. Knutson, R. E. Kopp, J. P. Kossin, K. E. Kunkel, A. N. LeGrande, C. Mears, W. V. Sweet, P. C. Taylor, R. S. Vose, and M. F. Wehner; Em *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment*; Wuebbles, D. J.; Fahey, D. W.; Hibbard, K. A.; Dokken, D. J.; Stewart, B. C.; Maycock, T. K., eds.; U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 2017, cap. 1.
10. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Objetivo 13. Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=13>>. Acesso em: julho 2023.
11. Rahman, F. A.; Aziz, M. M. A.; Saidur, R.; Bakar, W. A. W. A.; Hainin, M. R.; Putrajaya, R.; Hassan, N. A.; Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable Sustainable Energy Reviews* **2017**, *71*, 112. [Crossref]
12. Miranda, J. L.; Moura, L. C.; de Ferreira, de H. B. P.; Abreu, T. P.; O Antropoceno e o CO₂: Processos de Captura e Conversão. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1915. [Crossref]
13. Singh, G.; Lee, J.; Karakoti, A.; Bahadur, R.; Yi, J.; Zhao, D.; AlBahily, K.; Vinu, A.; Emerging trends in porous materials for CO₂ capture and conversion. *Chemical Society Reviews* **2020**, *49*, 4360. [Crossref]
14. Simões, A. L. A.; Rodrigues, J. S.; Araujo, M. H.; Vieira, S. S.; A Química Envolvida na Conversão do CO₂: Desafios e Oportunidades. *Revista Virtual de Química* **2022**, *14*, 468. [Crossref]
15. Peters, M.; Köhler, B.; Kuckshinrichs, W.; Leitner, W.; Markewitz, P.; Müller, T. E.; Chemical Technologies for Exploiting and Recycling Carbon Dioxide into the Value Chain. *ChemSusChem* **2011**, *4*, 1216. [Crossref]
16. Song, Q. W.; Zhou, Z. H.; He, L. N.; Efficient, selective and sustainable catalysis of carbon dioxide. *Green Chemistry* **2017**, *19*, 3707. [Crossref]
17. Abbasi, T.; Abbasi, S. A.; ‘Renewable’ hydrogen: Prospects and challenges. *Renewable Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 3034. [Crossref]
18. de Castro, N.; Braga, S. L.; Pradelle, F.; Chaves, A. C.; Chantre, C. Org. *A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil*. 1. ed., Rio de Janeiro: E-papers, 2023.
19. International Energy Agency (IEA), *The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities*, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>. Acesso em: junho 2023.
20. Mota, C. J. A.; Monteiro, R. S.; Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis. *Química Nova* **2013**, *36*, 1483. [Crossref]
21. *Annual Ethanol Production*. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: maio 2023.

22. Demirbas, A.; Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management* **2008**, *49*, 2106. [Crossref]
23. Kaza, S.; Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F.; *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development Series, Washington DC: World Bank, 2018. [Crossref]
24. United Nations Environment Programme (UNEP). *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. Nairobi, 2021.
25. U. S. Environmental Protection Agency (US EPA). *Decision-makers guide to solid waste management*. 2nd ed., Office of Solid Waste and Emergency Response, 1992.
26. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Objetivo 14. Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=14>>. Acesso em: junho 2023.
27. Callister Jr., W. D. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 7ª ed.; Rio de Janeiro: LTC, 2008.
28. Michaeli, W.; Grief, H.; Kaufmann, H.; Vossebürger, F. J.; *Tecnologia dos plásticos*, 1ª ed, 7ª reimpressão, São Paulo: Blucher, 1995.
29. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*, **2022**. [Link]
30. Inventário Nacional de Resíduos Sólidos. 1. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/relatorios/inventario-nacional/>>. Acesso em: novembro 2023.
31. Forti, V.; Baldé C. P.; Kuehr R.; Bel G.; The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/ Geneva/Rotterdam. [Link]
32. Marafon, A. C.; Santiago, A. D.; Amaral, A. F. C.; Bierhals, A. N.; Paiva, H. L.; Guimarães, V. S.; *Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros* **2016**. [Link]
33. *Water Facts*, Disponível em: <<https://www.unwater.org/water-facts>>. Acesso em: maio 2023.
34. *Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all*. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>>. Acesso em: agosto 2023.
35. *Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all – Overview*. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals/goal6>>. Acesso em: agosto 2023.
36. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Objetivo 6. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>>. Acesso em: agosto 2023.
37. *Implementing improvements in water quality and protecting ecosystem services*. Disponível em: <https://www.un.org/waterforlifedecade/waterandsustainabledevelopment2015/images/water_quality_eng.pdf>. Acesso em: agosto 2023.
38. Crini, G.; Lichtfouse, E.; Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters* **2019**, *17*, 145. [Crossref]
39. *Water scarcity*. Disponível em: <<https://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en>>. Acesso em: agosto 2023.
40. Moura, P. G.; Aranha, F. N.; Handam, N. B.; Martin, L. E.; Salles, M. J.; Carvajal, E.; Jardim, R.; Sotero-Martins, A.; Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental* **2020**, *25*, 791. [Crossref]
41. Shevah, Y.; Water scarcity, water reuse, and environmental safety. *Pure and Applied Chemistry* **2014**, *86*, 1205. [Crossref]
42. Ahuja, S.; *Comprehensive Water Quality and Purification*, Waltham, USA: Elsevier, 2014.
43. Ahuja, S.; Em *Handbook of Water Purity and Quality*; Ahuja, S., ed.; Londres, Reino Unido: Elsevier, 2021, cap. 1.
44. Bontempi, E.; Sorrentino, G. P.; Zanoletti, A.; Alessandri, I.; Depero, L. E.; Caneschi, A.; Sustainable Materials and their Contribution to the Sustainable Development Goals (SDGs): A Critical Review Based on an Italian Example. *Molecules* **2021**, *26*, 1407. [Crossref]
45. Taylor, C.; Gully, B.; Sánchez, A.; Rode, E.; Agarwal, A.; Towards Materials Sustainability through Materials Stewardship. *Sustainability* **2016**, *8*, 1001. [Crossref]
46. Zhang, Q.; Uchaker, E.; Candelaria, S. L.; Cao, G.; Nanomaterials for energy conversion and storage. *Chemical Society Reviews* **2013**, *42*, 3127. [Crossref]
47. Chen, X.; Li, C.; Grätzel, M.; Kostecki, R.; Mao, S. S.; Nanomaterials for renewable energy production and storage. *Chemical Society Reviews* **2012**, *41*, 7909. [Crossref]
48. *Goal 12: Ensure sustainable consumption and production patterns*. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>>. Acesso em: agosto 2023.
49. *Goal 9: Build resiliente infrastructure, promote sustainable industrialization and foster innovation*. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/infrastructure-industrialization/>>. Acesso em: agosto 2023.
50. *Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy*. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>>. Acesso em: agosto 2023.
51. Zhu, Y.; Romain, C.; Williams, C. K.; Sustainable polymers from renewable resources. *Nature* **2016**, *540*, 354. [Crossref]
52. Schiros, T. N.; Mosher, C. Z.; Zhu, Y.; Bina, T.; Gomez, V.; Lee, C. L.; Lu, H. H.; Obermeyer, A. C.; Bioengineering textiles across scales for a sustainable circular economy. *Chem* **2021**, *7*, 2913. [Crossref]
53. Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J. A.; The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. *Construction and Building Materials* **2013**, *40*, 729. [Crossref]
54. *Goal 7 – Affordable and clean energy*. Disponível em: <<https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/Goal-07/>>. Acesso em: agosto 2023.
55. Abdin, Z.; Alim, M. A.; Saidur, R.; Islam, M. R.; Rashmi, W.; Mekhilef, S.; Wadi, A.; Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, *26*, 837. [Crossref]
56. Parida, B.; Iniyar, S.; Goic, R.; A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 1625. [Crossref]
57. Ahmadi, M. H.; Ghazvini, M.; Alhuyi Nazari, M.; Ahmadi, M. A.; Pourfayaz, F.; Lorenzini, G.; Ming, T.; Renewable energy

- harvesting with the application of nanotechnology: A review. *International Journal of Energy Research* **2019**, *43*, 1387. [Crossref]
58. Mishnaevsky, L.; Branner, K.; Petersen, H.; Beauson, J.; McGugan, M.; Sørensen, B.; Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials* **2017**, *10*, 1285. [Crossref]
 59. Chen, A.; Zhang, C.; Zhu, G.; Wang, Z. L.; Polymer Materials for High-Performance Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Science* **2020**, *7*, 2000186. [Crossref]
 60. Safaei, M.; Sodano, H. A.; Anton, S. R.; A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018). *Smart Materials and Structures* **2019**, *28*, 113001. [Crossref]
 61. Kousksou, T.; Bruel, P.; Jamil, A.; El Rhafiki, T.; Zeraoui, Y.; Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2014**, *120*, 59. [Crossref]
 62. Wang, F.; Wu, X.; Yuan, X.; Liu, Z.; Zhang, Y.; Fu, L.; Zhu, Y.; Zhou, Q.; Wu, Y.; Huang, W.; Latest advances in supercapacitors: from new electrode materials to novel device designs. *Chemical Society Reviews* **2017**, *46*, 6816. [Crossref]
 63. Coutinho, P.; Bomtempo, J. V.; Roadmap tecnológico em matérias-primas renováveis: uma base para a construção de políticas e estratégias no Brasil. *Química Nova* **2011**, *34*, 910. [Crossref]
 64. Kamm, B.; Kamm, M.; Principles of biorefineries. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2004**, *64*, 137. [Crossref]
 65. Demirbas, A.; Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management* **2009**, *50*, 2782. [Crossref]
 66. De Jong, E.; Jungmeier, G.; Em *Industrial Biorefineries and White Biotechnology*; Pandey, A.; Höfer, R.; Taherzadeh, M.; Nampoothiri, K.M.; Larroche, C, eds.; Amsterdam, Holanda: Elsevier, 2015, cap. 1.
 67. Temas: Bioeconomia. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-bioeconomia/sobre-o-tema>>. Acesso em: agosto 2023.
 68. Panorama do Agro. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>>. Acesso em: agosto 2023.
 69. Pretty, J.; Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **2008**, *363*, 447. [Crossref]
 70. Çakmakçı, R.; Salık, M. A.; Çakmakçı, S.; Assessment and Principles of Environmentally Sustainable Food and Agriculture Systems. *Agriculture* **2023**, *13*, 1073. [Crossref]
 71. Objetivo 2 - Fome zero e agricultura sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>>. Acesso em: agosto 2023.
 72. Goal 2: Zero hunger. Disponível em: <<https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/goal-02/>>. Acesso em: agosto 2023.
 73. Babcock-Jackson, L.; Kononova, T.; Krogman, J. P.; Bird, R.; Díaz, L. L.; Sustainable Fertilizers: Publication Landscape on Wastes as Nutrient Sources, Wastewater Treatment Processes for Nutrient Recovery, Biorefineries, and Green Ammonia Synthesis. *Journal of Agricultural Food Chemistry* **2023**, *71*, 8265. [Crossref]
 74. Wijerathna-Yapa, A.; Pathirana, R.; Sustainable Agro-Food Systems for Addressing Climate Change and Food Security. *Agriculture* **2022**, *12*, 1554. [Crossref]
 75. Carvalho, F. P.; Pesticides, environment, and food safety. *Food Energy Security* **2017**, *6*, 48. [Crossref]
 76. Souto, A. L.; Sylvestre, M.; Tölke, E. D.; Tavares, J. F.; Barbosa-Filho, J. M.; Cebrián-Torrejón, G.; Plant-Derived Pesticides as an Alternative to Pest Management and Sustainable Agricultural Production: Prospects, Applications and Challenges. *Molecules* **2021**, *26*, 4835. [Crossref]
 77. Marican, A.; Durán-Lara, E. F.; A review on pesticide removal through different processes. *Environmental Science and Pollution Research* **2018**, *25*, 2051. [Crossref]
 78. Hillocks, R. J.; Farming with fewer pesticides: EU pesticide review and resulting challenges for UK agriculture. *Crop Protection* **2012**, *31*, 85. [Crossref]
 79. Chel, A.; Kaushik, G.; Renewable energy for sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development* **2011**, *31*, 91. [Crossref]
 80. Medina, J.; Monreal, C.; Barea, J. M.; Arriagada, C.; Borie, F.; Cornejo, P.; Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: A review. *Waste Management* **2015**, *42*, 41. [Crossref]
 81. Linares-Morales, J. R.; Gutiérrez-Méndez, N.; Rivera-Chavira, B. E.; Pérez-Vega, S. B.; Nevárez-Moorillón, G. V.; Biocontrol Processes in Fruits and Fresh Produce, the Use of Lactic Acid Bacteria as a Sustainable Option. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **2018**, *2*, 1. [Crossref]