


Inovações Disruptivas na Bioeconomia: A Confluência entre Nanotecnologia Verde, DES/NaDES e Modelos de Economia Circular

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.782122512086>

Victor Carlos Mello

Luisa Schuh

Leonardo Fróes de Azevedo Chang

Isadora Florêncio de Souza

Thalita do Espírito Santo Alves

Livia Marques Ferreira

Pedro Henrique Almeida de Jesus da Rocha

Verônica Carvalho de Lima

Marina Arantes Radicchi

Eliana Gris

Sônia Nair Bão

Este capítulo apresenta uma visão integrada sobre como a bioeconomia pode ser impulsionada por inovações como nanotecnologia verde e solventes eutéticos profundos (DES/NaDES), dentro de um paradigma de economia circular. Em linhas gerais, o material se divide em temas complementares, abordando (i) os conceitos fundamentais de nanotecnologia, bioeconomia e sustentabilidade; (ii) as aplicações concretas dessas abordagens em setores como químico, farmacêutico e agroindustrial; (iii) a relevância de solventes verdes (DES/NaDES) para processos de extração, purificação e estabilização de compostos bioativos; e (iv) a governança, os

riscos percebidos e as dinâmicas regulatórias envolvidas na adoção de tecnologias disruptivas.

Logo na Introdução, delinea-se a motivação global para a transição rumo a modelos produtivos mais sustentáveis, nos quais a bioeconomia ganha protagonismo como estratégia para reduzir a dependência de recursos fósseis e mitigar impactos ambientais. Em seguida, evidencia-se como a Nanotecnologia Verde — manipulação de matéria em escala nanométrica por rotas químicas menos poluentes — reforça tais objetivos, ao mesmo tempo em que oferece novos produtos e processos com maior eficiência e menor pegada de carbono.

A abordagem de Solventes Eutéticos Profundos (DES) e Solventes Naturais Eutéticos Profundos (NaDES), por sua vez, mostra como é possível reduzir ou eliminar solventes tóxicos em aplicações industriais. Esses sistemas verdes, de fácil síntese e alta versatilidade, revelam-se propícios para a extração de substâncias sensíveis (por exemplo, compostos fenólicos ou enzimas) em condições mais brandas, aumentando o rendimento e diminuindo a toxicidade nos efluentes. A aplicação desses solventes encaixa-se perfeitamente em rotas de Valorização de Coprodutos e Resíduos, refletindo o conceito de economia circular. Ao invés de descartar toneladas de subprodutos agroindustriais em aterros, torna-se viável convertê-los em insumos de alto valor agregado — como biomateriais, compostos bioativos, biocombustíveis ou ingredientes funcionais —, gerando oportunidades econômicas e benefícios ambientais.

Seguindo a lógica sistêmica, o texto discute como a Gestão de Riscos, Benefícios e Regulação é ponto crucial para legitimar essas inovações. Stakeholders podem ter percepções distintas: enquanto empresas veem ganho competitivo, grupos sociais e ambientes regulatórios demandam garantias de segurança e eficácia, seja no uso de nanoprodutos, seja na adoção de solventes inéditos. Assim, sugere-se que uma governança multissetorial e transparente — com participação ativa de governos, indústrias, academia e sociedade civil — venha a ser imprescindível para alinhar interesses e balizar práticas industriais mais sustentáveis.

A partir de estudos que analisam a diversidade de interpretações de bioeconomia, enfatiza-se que não existe um modelo único de transição sustentável, mas sim múltiplas rotas. Em várias localidades, a ênfase recai sobre nichos específicos — fármacos de base biotecnológica, químicos verdes, biorrefinarias integradas —, sempre refletindo a capacidade de inovação local, a disponibilidade de biomassas e as políticas de incentivo. Finalmente, o debate sobre especialização e diversificação em bioeconomia mostra-se relevante para que regiões ou países se fortaleçam em certos segmentos, ao mesmo tempo em que geram sinergias para outros setores.

Em conclusão, o texto reforça a tese de que a convergência entre nanotecnologia, DES/NaDES e economia circular constitui uma via promissora para minimizar a dependência de processos fossilizados e reduzir emissões de gases de efeito estufa. Contudo, a adoção plena dessas inovações exige um arcabouço regulatório sólido e transparência na comunicação de riscos e benefícios à sociedade, garantindo-se a legitimidade social e a viabilidade econômica de projetos baseados no reaproveitamento inteligente de recursos renováveis.

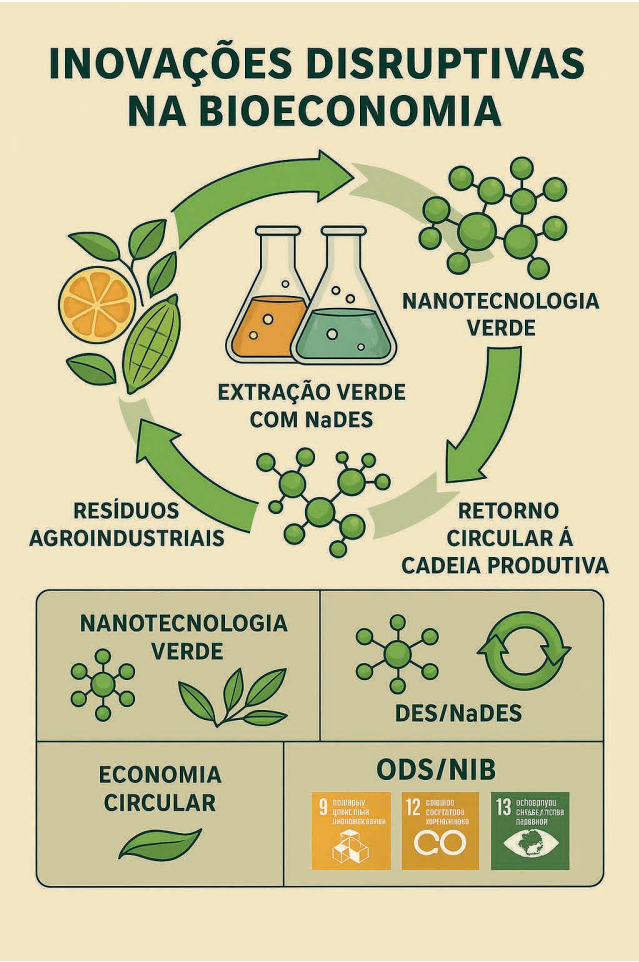


Figura 1: Representação gráfica do ciclo de inovação na bioeconomia nanoestruturada. O diagrama ilustra o fluxo integrado que conecta resíduos agroindustriais à extração verde com solventes eutéticos naturais (NaDES), culminando na aplicação de nanotecnologia verde para formulações sustentáveis e no retorno circular à cadeia

produtiva. A síntese conceitual abrange os pilares de nanotecnologia verde, economia circular e DES/NaDES, em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9, 12 e 13) e com as Missões 2 e 5 da Nova Indústria Brasil (NIB), voltadas à bioeconomia, descarbonização e autonomia tecnológica nacional.

INTRODUÇÃO

A convergência entre bioeconomia e nanotecnologia vem sendo amplamente debatida como um elemento crucial para a transição rumo a modelos de produção mais sustentáveis, circulares e inclusivos (ASSEY; MALASI, 2021). No cerne desse debate, encontra-se a busca por soluções que equilibrem a viabilidade econômica, a preservação ambiental e a justiça social. Por um lado, a bioeconomia emerge como uma estratégia fundamentada no uso renovável de recursos de base biológica — tais como biomassa agrícola, florestal e marinha —, com o objetivo de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (ANTONIOLI *et al.*, 2022). Por outro, a nanotecnologia, ao manipular materiais em escala atômica e molecular (1 a 100 nm), oferece oportunidades para criar produtos e processos mais eficientes, limpos e de elevado valor agregado (MALIK *et al.*, 2023). Essa união, embasada pelos princípios da economia circular, visa redirecionar e otimizar cadeias produtivas, de modo que os resíduos deixem de ser descartados e passem a ser reintroduzidos como insumos em novos processos (SUCHEK *et al.*, 2021).

O debate acerca desse potencial conjunto, entretanto, não é homogêneo. Conforme apontado por **Dieken *et al.* (2023)** em seu estudo sistemático sobre a multiplicidade de bioeconomias, diferentes grupos de interesse (stakeholders) — que incluem governos, indústrias, pesquisadores, ONGs, agricultores e consumidores — encaram o conceito de bioeconomia sob prismas diversos. Para alguns agentes, a bioeconomia representa uma via de crescimento econômico robusto, ancorada na inovação tecnológica e na exploração eficiente de biomassa (Debref *et al.*, 2022). Para outros, há o imperativo de preservar ecossistemas, preservar os modos de vida de comunidades tradicionais e assegurar soberania alimentar, de tal modo que a bioeconomia “ideal” seja aquela que privilegie a justiça social e a mitigação de impactos socioambientais (COSTA *et al.*, 2024). Nesse sentido, surge uma tensão entre visões focadas na expansão produtiva e perspectivas que ressaltam a necessidade de respeitar limites planetários e equidade na distribuição de benefícios.

Esses contrastes de percepção têm implicações diretas para o desenvolvimento de tecnologias nanotecnológicas e, também, para a adoção de solventes verdes, como os solventes eutéticos profundos (DES) e suas variantes naturais (NaDES) (Bragagnolo *et al.*, 2024). A nanotecnologia, notadamente em sua vertente “verde”, preconiza rotas de síntese baseadas na química verde, na redução de reagentes tóxicos e na integração de coprodutos industriais e agrícolas (CHEMAT *et al.*, 2019). Ela se conecta à bioeconomia ao substituir gradualmente insumos fósseis por recursos biológicos renováveis, ampliando o potencial de inovação em setores

como medicina, cosméticos, agricultura e energia (MALIK *et al.*, 2023). Ainda assim, o próprio fato de manipular a matéria em escala nanométrica levanta questões sobre segurança toxicológica, possíveis efeitos ecossistêmicos e desconfianças por parte de consumidores e organizações civis que demandam maior transparência na cadeia produtiva.

De maneira semelhante, os DES/NaDES – os quais são solventes que pela interação química de seus componentes, resultam em um líquido viscoso por diminuírem o ponto de fusão das suas matérias-primas ao serem combinados —, cuja maior vantagem reside em sua baixa toxicidade, alta biodegradabilidade e capacidade de solubilizar compostos de várias polaridades (DAI *et al.*, 2013; PRABHUNE; DEY, 2023), são considerados promissores para a química verde e os processos de extração de compostos naturais em biorrefinarias. Essas substâncias, ao substituírem solventes orgânicos tradicionais, podem reduzir drasticamente a pegada de carbono e o risco de contaminação ambiental (GONZÁLEZ-LAREDO *et al.*, 2023). Entretanto, tal substituição não é imune a questionamentos por parte de stakeholders que questionam a origem e a escala de produção dos precursores necessários para formular certos NaDES (SCHUH *et al.*, 2023). Além disso, **Lange (2022)** destacam a importância de analisar como as diferentes interpretações de bioeconomia — algumas mais voltadas ao crescimento e à competitividade, outras à preservação ambiental e à justiça social — podem influenciar a velocidade e a forma de adoção desses novos solventes em diferentes setores industriais.

Nesse contexto, a síntese de nanopartículas e nanomateriais utilizando coprodutos agrícolas ou resíduos industriais reforça a dimensão circular da bioeconomia: ao mesmo tempo em que se cria valor a partir de rejeitos antes descartados, diminui-se a extração de recursos não renováveis (MALIK *et al.*, 2023). Para muitos stakeholders, essa abordagem favorece a inclusão de produtores locais, estimula economias regionais e reduz a pressão sobre os ecossistemas. Ainda assim, **Puder (2023)** evidenciam que nem todos enxergam a mesma trajetória de desenvolvimento: enquanto algumas vozes defendem a intensificação tecnológica para ampliar a oferta de produtos bioeconômicos, outras ressaltam a necessidade de regulação, pesquisas de longo prazo e maior envolvimento comunitário para evitar o risco de “greenwashing” ou a simples substituição de uma fonte de extração por outra, sem mudanças estruturais na produção.

Ademais, a própria concepção de economia circular, embora amplamente difundida, também é interpretada de formas plurais. Em visões mais empresariais, a circularidade centra-se na eficiência de processos e na maximização de lucros, já para segmentos ambientalistas e organizações não governamentais, a circularidade deve servir de passo rumo a modelos de consumo mais reduzidos, baseados em cadeias curtas e na priorização de necessidades coletivas (MHATRE *et al.*, 2020).

apontam que esse contraste é perceptível em fóruns internacionais de discussão sobre bioeconomia, onde há tanto discursos entusiastas de revolução tecnológica e crescimento “verde” quanto alertas sobre desigualdades globais e possíveis impactos em populações rurais ou tradicionais.

Desse modo, a presente obra procura situar a discussão na confluência entre os avanços da nanotecnologia verde — especialmente no que tange à produção e aplicação de nanopartículas, aliada aos solventes eutéticos verdes — e a miríade de definições sobre bioeconomia que influenciam políticas públicas, estratégias empresariais, investigações acadêmicas e mobilizações sociais (SCHUH *et al.*, 2024). Acreditamos que a compreensão dessas múltiplas camadas seja fundamental para promover uma adoção responsável e inclusiva das inovações tecnológicas. Afinal, sem uma reflexão aprofundada sobre governança, percepção de riscos, distribuição de benefícios e engajamento dos diferentes grupos de interesse, corremos o risco de reproduzir desequilíbrios históricos, frustrando o potencial da bioeconomia em conciliar desenvolvimento econômico, conservação ambiental e equidade social (TAKAES SANTOS, 2020).

Nos capítulos e seções seguintes, examinaremos primeiramente as discussões à luz dos diferentes entendimentos de bioeconomia mencionados no estudo de Dieken *et al.* (2023). Em seguida, analisaremos o que se entende por nanotecnologia, suas aplicações e o papel da nanotecnologia verde. Em seguida, abordamos a relevância dos Solventes Eutéticos Profundos (DES) e dos Solventes Naturais Eutéticos Profundos (NaDES), explorando como a adoção dessas substâncias se conecta tanto aos princípios da química verde quanto à necessidade de tornar processos industriais menos dependentes de petróleo e solventes tóxicos. Posteriormente, discutimos a noção de economia circular e a importância de coprodutos e resíduos industriais na síntese de nanopartículas. Por fim, evidencia-se desafios e perspectivas futuras da intersecção da bioeconomia com essas novas tecnologias, além lançarmos luz à perspectiva industrial e social dos tópicos. Esperamos, assim, traçar um panorama abrangente que auxilie os leitores — sejam eles pesquisadores, tomadores de decisão, membros de ONGs ou estudantes — a navegar nesse cenário complexo de múltiplas bioeconomia e seus potenciais diálogos com a nanotecnologia sustentável.

A MULTIPLICIDADE DE DEFINIÇÕES DE BIOECONOMIA

A noção de “bioeconomia” tornou-se onipresente em discursos políticos, documentos de políticas públicas, planos de desenvolvimento industrial e debates acadêmicos sobre sustentabilidade. Embora existam definições oficiais e estratégias nacionais ou regionais que se valem desse conceito, a realidade é que cada grupo de interesse (stakeholder) pode compreendê-lo de maneira distinta, e até mesmo conflitante. Conforme ressaltado por Hausknost *et al.* 2017, a bioeconomia é moldada por percepções que vão desde uma visão focada no crescimento econômico a partir

de biomassa renovável, até concepções que priorizam a preservação ambiental e a equidade social. Essa multiplicidade de definições exerce influência direta sobre o modo como políticas, investimentos em pesquisa e adoção de novas tecnologias — incluindo a nanotecnologia — são encaminhadas em diferentes contextos.

Um Conceito em Constante Transformação

De acordo com **Dieken *et al.***, a bioeconomia não é um bloco monolítico. Em vez disso, ela se apresenta como um “guarda-chuva” que abriga interpretações variadas sobre a relação entre o ser humano, a natureza e a economia. No estudo sistemático conduzido pelos autores, emergem pelo menos quatro grandes perspectivas de stakeholders:

1. Governos e Agências Públicas:

- Geralmente enxergam a bioeconomia como uma estratégia competitiva para estimular a inovação, criar empregos e reposicionar a matriz produtiva rumo a alternativas renováveis.
- Muitos países desenvolvem “Estratégias Nacionais de Bioeconomia” ou “Planos de Ação” que incluem incentivos fiscais, subsídios e programas de pesquisa.
- A retórica de “liderança” e “vanguarda tecnológica” costuma permear tais documentos, reforçando a ideia de que investir em biotecnologias, nanotecnologias e químicos verdes ampliará a competitividade internacional.

2. Organizações Ambientais e ONG:

- Advertem para a necessidade de respeitar limites planetários e assegurar que a transição não resulte em simples substituição de uma fonte de extração por outra (por exemplo, de petróleo para monoculturas intensivas de biomassa).
- Podem questionar projetos de grande escala voltados a biocombustíveis, por temer impactos negativos sobre a biodiversidade, usos da terra e comunidades locais.
- Enfatizam princípios de justiça ecológica e ações concretas para mitigar as mudanças climáticas.

3. Indústria e Setor Empresarial:

- Geralmente encaram a bioeconomia como uma oportunidade de mercado e de diferenciação competitiva. Novos produtos “verdes” ou processos mais

limpos podem ter aceitação positiva entre consumidores ambientalmente conscientes.

- Buscam parcerias com universidades e institutos de pesquisa para desenvolver tecnologias de ponta, incluindo a aplicação de nanotecnologias e solventes verdes.
- Demonstram interesse prático em soluções capazes de reduzir custos de produção, reaproveitar resíduos e diversificar portfólio de produtos.

4. Academia e Comunidade Científica:

- Engloba pesquisadores que, por um lado, destacam a urgência de inovações disruptivas para enfrentar a crise climática e, por outro, alertam para os riscos de adoção precipitada de tecnologias pouco testadas.
- As discussões vão desde o princípio da precaução no uso de edição gênica ou nanotecnologias, até a defesa de estratégias de “bioeconomia circular”, baseadas em cadeias regionais e responsabilidade ambiental de longo prazo.
- Há também quem critique a bioeconomia como um conceito excessivamente amplo e vago, que corre o risco de ser cooptado por discursos de greenwashing.

Desse modo, o estudo de **Dieken et al. (2023)** revela que a bioeconomia se transforma e se reinventa conforme o grupo social ou econômico que a define, e conforme o contexto geográfico em questão. Em países com grandes reservas de biodiversidade, por exemplo, a retórica de “conservação” pode ser tão ou mais predominante do que a ênfase em “crescimento” (Tinch et al., 2018). Já em nações industrializadas, as políticas de bioeconomia podem se alinhar a uma agenda mais focada em inovação tecnológica e competitividade global, ainda que sob o rótulo de sustentabilidade (Srivastav et al., 2024).

Essa variabilidade de entendimentos não é apenas teórica. Ela se reflete em divergências quanto às rotas preferenciais para investimentos públicos e privados, na forma de regulação e fiscalização de novas tecnologias, bem como nos modelos de governança que definem a participação ou exclusão de determinados segmentos sociais, como povos indígenas, agricultores familiares e comunidades tradicionais (CIALDELLA et al., 2022). Em última instância, tais divergências repercutem na velocidade e na escala em que soluções da nanotecnologia verde e solventes eutéticos profundos (DES/NaDES) são efetivamente adotadas para tornar processos industriais mais circulares (NAM et al., 2023).

Convergências e Tensões

Ainda que **Dieken et al. (2023)** mostrem uma miríade de concepções sobre a bioeconomia, algumas convergências são identificáveis. De modo geral, há um consenso de que, no mínimo, a substituição de insumos fósseis por fontes renováveis é desejável, seja pelo imperativo climático ou pelas oportunidades de mercado que se abrem para produtos “bio-based” (LUIS DE OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2019). Também há percepção comum de que as tecnologias emergentes podem desempenhar papel-chave na viabilização de processos mais limpos e eficientes, embora a amplitude de aceitação de cada tecnologia (como nanotecnologia, edição genética, biologia sintética, etc.) varia muito conforme o stakeholder.

Porém, essa convivência de convergências e divergências se expressa em algumas tensões principais:

1. Escala de Produção vs. Conservação Ambiental

- Enquanto uma perspectiva entende a bioeconomia como meio para expandir a produção de biomassa em larga escala (inclusive via monoculturas intensivas), outra adverte para o perigo de erosão da biodiversidade, desmatamento e degradação de solos (FREITAS et al., 2021).
- Existe receio de que a pressão por matéria-prima renovável reproduza lógicas extrativistas, apenas trocando petróleo por biomassa agrícola ou florestal, sem alterar padrões de consumo e distribuição (WHITING et al., 2017).

2. Uso de Tecnologias Avançadas

- Tecnologias como edição gênica, nanotecnologia e biologia sintética encontram defensores entusiastas na indústria e em parte da academia, pois podem acelerar inovações em biocombustíveis, embalagens biodegradáveis, sistemas de liberação controlada e soluções de remediação ambiental (MALIK et al., 2023).
- Todavia, setores ambientalistas, movimentos sociais e até pesquisadores de áreas mais humanistas veem necessidade de precaução, ressaltando incertezas quanto à segurança de longo prazo e possíveis riscos de contaminação ambiental, além de impactos socioeconômicos assimétricos (VIANNA et al., 2022).

3. Distribuição de Benefícios e Justiça Social

- Em cenários de intensa inovação tecnológica, há o perigo de concentração de lucros e patentes em grandes corporações, enquanto comunidades camponesas ou rurais fornecem apenas a matéria-prima, sem participação nos ganhos (ANTONIOLI et al., 2022).

- Alguns stakeholders defendem um modelo de bioeconomia inclusiva, que privilegie pequenos produtores e garantias de renda para populações tradicionais que conservam e manejam a biodiversidade (GUILHERME DE QUEIROZ-STEIN *et al.*, 2023).
- A discussão sobre justiça no acesso a tecnologias e mercados é essencial, já que a adoção de insumos e processos “bio-based” não significa, por si só, redução de desigualdades sociais ou proteção efetiva de ecossistemas (SANTOS; SERAFIM; PINHEIRO, 2020).

Em resumo, a análise de **Dieken *et al.* (2023)** vai além de mapear concordâncias e divergências. Ela mostra como cada concepção de bioeconomia — seja mais produtivista, seja mais ecológica ou socialmente centrada — conduz a diferentes preferências em relação à adoção de inovações. E, assim, aquilo que para alguns grupos de stakeholders se configura como solução (p. ex., ampliação do uso de nanomateriais verdes para aumentar rendimentos agrícolas), pode ser visto por outros como ameaça (medo de riscos toxicológicos ou da concentração de poder econômico).

A multiplicidade de bioeconomias, portanto, não é apenas um dado de fato, mas um desafio prático para formuladores de políticas, pesquisadores e empresas que almejam desenvolver tecnologias sustentáveis e socialmente responsáveis. A abordagem recomendada por Dieken *et al.* (2023) é corroborada por outras literaturas sobre governança de inovações (CHEMAT *et al.*, 2019; USMANI *et al.*, 2023), onde defende-se construir espaços de diálogo que promovam a participação de todos os segmentos afetados, gerando transparência e confiança. Em última instância, a forma como a nanotecnologia e os solventes eutéticos profundos se encaixam nesses diferentes cenários de bioeconomia depende dessa concertação de interesses, que pode tanto impulsionar quanto frear a adoção de inovações em prol da economia circular (SCHUH *et al.*, 2024).

Assim, compreender como cada stakeholder atribui significado à bioeconomia ajuda a interpretar as decisões e tensões referentes a investimentos, regulação e aceitação de novas tecnologias (ASIN-GARCIA *et al.*, 2023). Para a nanotecnologia verde e para os DES/NaDES, a adequada contextualização na arena bioeconômica é um passo decisivo, pois permite identificar sinergias com políticas públicas, potenciais parceiros e possíveis resistências ou barreiras (SHUBHRAJYOTSNA AITHAL; AITHAL, 2021). Como veremos adiante, a percepção destes pontos ajuda a delinear caminhos para a consolidação efetiva de uma bioeconomia circular e inclusiva, na qual os benefícios das soluções nanotecnológicas, baseadas em coprodutos agrícolas e em solventes ecológicos, sejam efetivamente compartilhados e contribuam para a perenidade dos recursos naturais.

NANOTECNOLOGIA E NANOTECNOLOGIA VERDE

O cenário contemporâneo dos modelos de produção, caracterizados pelo alto consumo e extração de recursos ressaltam a necessidade emergente de busca e construção de formatos mais limpos de produção, baseados em tecnologias inovadoras que viabilizem a redução de impactos ambientais, a otimização do uso de recursos naturais e a promoção de uma economia circular, onde resíduos sejam minimizados e reintegrados como insumos em novos ciclos produtivos (ANTONIOLI *et al.*, 2022). Nesse contexto, a nanotecnologia surge como ferramenta estratégica e de alto caráter inovador para o desenvolvimento de materiais e processos mais eficientes, traçando caminhos para a circularidade e a sustentabilidade.

A Nanotecnologia é uma área da ciência que foi reconhecida a menos de um século, contudo, as pesquisas e avanços tecnológicos nessa área foram muitos, representando na atualidade uma das vertentes de maior interesse global, principalmente no que tange às temáticas baseadas em inovações tecnológicas. Assim, essa nova abordagem tecnológica vem contribuindo significativamente para o progresso científico em várias áreas do conhecimento (MALIK *et al.*, 2023).

O conceito de nanotecnologia é relativamente recente e teve suas bases estabelecidas por volta de 1959. Desde então, o termo passou por diversas redefinições e evoluções conceituais ao longo do tempo, refletindo o avanço das pesquisas e a ampliação de suas aplicações. Apesar das variadas conceituações, a nanotecnologia, em sua essência, envolve a manipulação de materiais em uma escala nanométrica, na qual fenômenos físicos, químicos e biológicos assumem características únicas (SILVA; PINTO, 2020). A maior área superficial, a possibilidade de modular propriedades eletrônicas e óticas e a maior reatividade química tornam os nanomateriais promissores para aplicações em setores diversos, como medicina, agricultura, indústria química, energia e meio ambiente (MALIK *et al.*, 2023). Na escala macroscópica, propriedades relacionadas ao volume, como massa e inércia, predominam devido à baixa razão entre área superficial e volume. Porém, em materiais nanométricos, essa razão se inverte, destacando os efeitos de superfície, especialmente a dissipação de energia, que ocorre preferencialmente pela superfície. Esse fenômeno torna as nanopartículas altamente interativas (CHERIYAMUNDATH *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a nanotecnologia surge como um componente fundamental na transição para modelos produtivos baseados na bioeconomia, pois oferece rotas de inovação capazes de aumentar a eficiência, reduzir custos, viabilizar a utilização de coprodutos agrícolas e, em certos casos, mitigar impactos ambientais por meio de processos mais limpos e seletivos (GALEMBECK, 2013).

No entanto, assim como a bioeconomia, a nanotecnologia não é isenta de controvérsias. Grupos de pesquisa, organizações ambientais e setores da sociedade civil expressam preocupações sobre riscos toxicológicos, contaminação de ecossistemas e desigualdades no acesso aos benefícios gerados (MALIK *et al.*, 2023). Para reduzir esses riscos e alinhar a nanotecnologia aos princípios da sustentabilidade, consolida-se o conceito de nanotecnologia verde, fortemente inspirado pelos doze princípios da química verde e pelas demandas da economia circular (GOTTARDO *et al.*, 2021). Essa vertente visa ao emprego de rotas de síntese ambientalmente benignas, na substituição de solventes e reagentes perigosos por alternativas não tóxicas e biodegradáveis, assim como no aproveitamento de resíduos e subprodutos agrícolas na produção de nanopartículas (CHEMAT *et al.*, 2019; ANTONIOLI *et al.*, 2022).

Apesar da ampla aplicação da nanotecnologia em distintos domínios do conhecimento, os processos de síntese e formulação de nanomateriais nem sempre se revelam tão sustentáveis quanto o ideal almejado, frequentemente resultando na geração de volumes expressivos de resíduos e na manifestação de potencial toxicidade biológica. Em virtude dessas implicações, observa-se um interesse crescente na avaliação da segurança ambiental e biológica associada à produção de nanomateriais, consolidando-se, assim, uma nova vertente denominada “Nanotecnologia Verde” (RAMANATHAN *et al.*, 2021).

A Nanotecnologia Verde configura-se como uma abordagem sustentável no campo da nanotecnologia, alicerçada nos preceitos da química verde. Seu escopo primordial consiste em fomentar processos de produção mais limpos e ambientalmente responsáveis, por meio do desenvolvimento de métodos de síntese que visem à eliminação ou à significativa redução do emprego de substâncias químicas potencialmente nocivas. Ademais, busca-se otimizar a eficiência dos métodos de síntese existentes, promovendo a redução da geração de resíduos, o uso racional de recursos naturais e a mitigação de impactos ambientais adversos (SRIVASTAVA *et al.*, 2022).

A nanotecnologia verde compartilha, portanto, a mesma lógica da bioeconomia circular: buscar não apenas a “eficiência produtiva”, mas também a regeneração de recursos e a minimização de externalidades negativas (BARBOSA *et al.*, 2021). Esse modelo busca minimizar o desperdício e a geração de novos materiais, promovendo processos de baixo custo e sustentáveis. Esse conceito se baseia em uma economia que valorize o reaproveitamento de resíduos e coprodutos, integrando-os como insumos em novos ciclos produtivos. Aplicar esses princípios à formulação de nanopartículas não apenas reduz impactos ambientais, mas também cria novas oportunidades para agregar valor a materiais previamente subutilizados, além de priorizar o uso de recursos renováveis e duráveis, conciliando sustentabilidade, bem-estar social e crescimento econômico (BALACEANU *et al.*, 2017; STAHEL, 2016).

Os coprodutos, comumente gerados em processos industriais ou agrícolas, podem ser uma fonte rica de compostos bioativos com propriedades únicas, capazes de atuar como precursores ou estabilizantes na síntese e formulação de nanopartículas (PREETHI *et al.*, 2024). Assim, estratégias como o uso de extratos vegetais repletos de compostos fenólicos para reduzir e estabilizar nanopartículas metálicas tornam-se altamente atrativas, pois dispensam reagentes químicos tóxicos e ampliam o valor agregado de matérias-primas que, de outra forma, seriam descartadas (MALIK *et al.*, 2023). Ademais, os Solventes Eutéticos Profundos (DES) e suas versões naturais (NaDES) vêm ganhando destaque como meios reacionais mais seguros, ao mesmo tempo em que minimizam a geração de resíduos perigosos (DAI *et al.*, 2013; USMANI *et al.*, 2023).

Resíduos da indústria alimentícia, como cascas e sementes de frutas, são ricos em polifenóis, flavonoides e ácidos graxos. Exemplos notáveis incluem a cera extraída da casca do tomate e da maçã, além dos óleos obtidos das sementes dessas frutas. A cera da casca de tomate ou de maçã pode ser utilizada na síntese de nanopartículas lipídicas, aplicadas em sistemas de liberação controlada de fármacos ou cosméticos. Já os óleos das sementes dessas frutas são ricos em ácidos graxos insaturados, que auxiliam na estabilização dessas formulações (SILVA *et al.*, 2022). Da mesma forma, extratos ricos em compostos fenólicos e provenientes de frutas nativas brasileiras, como a jabuticaba e o taperebá, apresentam potencial para atuar como agentes redutores e estabilizantes na síntese de nanopartículas, eliminando a necessidade de químicos sintéticos frequentemente utilizados nesses processos, além de agregar valor através do aproveitamento das propriedades inerentes destes compostos, como a atividade antimicrobiana e antioxidante (SEREJO *et al.*, 2024; SILVA MARTINS *et al.*, 2022).

A utilização de coprodutos na formulação de nanopartículas promove a economia circular ao fechar ciclos produtivos, transformando resíduos em recursos valiosos. Essa abordagem também impulsiona o desenvolvimento de soluções economicamente viáveis e socialmente inclusivas. A utilização de coprodutos locais em escala regional pode estimular economias circulares comunitárias, gerando renda e promovendo inovação sustentável, além de reduzir a dependência de matérias-primas virgens e minimizar a geração de resíduos (FERRAZ *et al.*, 2023).

Ao adotar uma abordagem que une nanotecnologia e circularidade, o reaproveitamento de coprodutos, como ceras, óleos e extratos, destaca-se como uma solução viável e inovadora para o desenvolvimento de nanopartículas. Mais do que uma alternativa técnica, essa estratégia é um passo importante para alinhar ciência, inovação e sustentabilidade, contribuindo para o enfrentamento de desafios globais e para a construção de um futuro mais responsável e consciente.

Esse alinhamento entre nanotecnologia, química verde e bioeconomia é especialmente relevante em cadeias produtivas que buscam se desvencilhar de combustíveis fósseis e adotar práticas de menor impacto ambiental, como na indústria farmacêutica e cosmética, na qual a síntese de fármacos e cosméticos “eco-friendly” pode atrair consumidores preocupados com sustentabilidade. Também na agricultura, o desenvolvimento de nano fertilizantes e defensivos agrícolas verdes — produzidos a partir de rotas biocompatíveis — pode reduzir a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além de melhorar a eficiência na liberação de nutrientes e moléculas ativas (MALIK *et al.*, 2023). Para stakeholders que concebem a bioeconomia como uma plataforma para inovação e competitividade industrial, esses avanços nanotecnológicos representam soluções promissoras para agregar valor aos produtos, tornando-os mais sofisticados e potencialmente mais lucrativos.

Por outro lado, como destacado por Dieken *et al.* (2023), nem todos os segmentos sociais interpretam positivamente a inserção de nanotecnologia nos sistemas produtivos ligados à bioeconomia. Organizações ambientalistas, por exemplo, podem enxergar na expansão indiscriminada de certas aplicações nano um risco de contaminação ainda pouco compreendido, exigindo avaliações toxicológicas rigorosas (ANDREANI *et al.*, 2020). Movimentos de agricultores familiares e comunidades tradicionais, por sua vez, podem temer que a adoção maciça de tecnologias de ponta fique restrita a grandes corporações, levando à exclusão de pequenos produtores dos lucros da bioeconomia. Esses embates ressaltam a importância de políticas públicas, governança inclusiva e mecanismos de regulação e monitoramento para que a nanotecnologia verde se consolide como um fator de desenvolvimento equitativo.

Nesse sentido, a nanotecnologia verde não pode ser vista como uma solução isolada, mas sim como uma ferramenta complementar em um arranjo maior de práticas sustentáveis (MAKSIMOVIĆ; OMANOVIĆ-MIKLIČANIN, 2017). Seu sucesso depende de uma integração efetiva com outras dimensões da bioeconomia — como a proteção da biodiversidade, a distribuição equitativa de benefícios, a formação de capital humano especializado e a presença de marcos regulatórios adequados. Quando vista à luz das múltiplas definições de bioeconomia, a adoção da nanotecnologia verde pode tanto catalisar processos de inovação responsáveis (e alinhados a princípios ecológicos e sociais) quanto agravar desigualdades, se conduzida sem participação social nem diretrizes claras de sustentabilidade (SALAMANCA-BUENTELLO; DAAR, 2021).

Em suma, a nanotecnologia verde aporta meios concretos para viabilizar rotas de síntese e aplicações de alto desempenho, com redução de impactos ambientais, menor consumo de água e energia e um aproveitamento inteligente de resíduos. Sua convergência com a economia circular e com a ampla gama de percepções em torno da bioeconomia reforça a importância de um diálogo multissetorial, em que

academia, indústria, governos e sociedade civil trabalhem juntos para mapear riscos, compartilhar benefícios e consolidar caminhos duradouros de inovação sustentável.

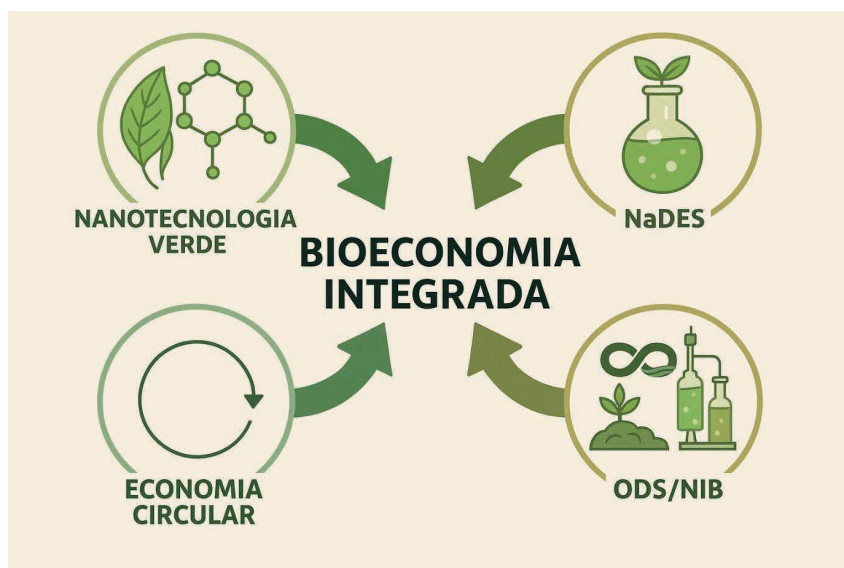


Figura 2: Cadeia de valor circular aplicada à bioeconomia nanoestruturada. Resíduos agroindustriais são convertidos em matérias-primas por extração verde com solventes eutéticos naturais (NaDES), gerando insumos para formulações lipídicas (SLN/NLC) de alto valor agregado. O ciclo se completa com o retorno sustentável à cadeia produtiva, promovendo descarbonização, redução de resíduos e integração à economia circular.

SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS (DES) E SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS NATURAIS NADES

Os solventes eutéticos profundos (DES, na sigla em inglês) surgem como uma das inovações mais promissoras no cenário da química verde e da bioeconomia (PERNA; VITALE; CAPRIATI, 2020). Formados pela interação de dois ou mais componentes por meio de ligações de hidrogênio — tipicamente um doador e umceptor de prótons —, os DES apresentam ponto de fusão significativamente menor do que a soma dos pontos de fusão de seus constituintes isolados (DAI *et al.*, 2013). Essa característica confere propriedades singulares, como estabilidade térmica, baixa volatilidade e alta capacidade de solubilização. Além disso, em oposição a muitos líquidos orgânicos convencionais, eles tendem a exibir toxicidade reduzida e podem ser produzidos a partir de matérias-primas abundantes e relativamente baratas, como o cloreto de colina e ácidos orgânicos de origem renovável (CHEMAT *et al.*, 2019).

NaDES: A Versão Natural dos DES

Dentro desse escopo, os solventes naturais eutéticos profundos (NaDES) representam uma evolução adicional dos DES, empregando substâncias encontradas em organismos vivos — aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares, colina etc. — para formar sistemas eutéticos (HUBER *et al.*, 2020). Segundo Schuh *et al.* (2023) em seu artigo “From Nature to Innovation: The Uncharted Potential of Natural Deep Eutectic Solvents”, os NaDES se inspiram em adaptações evolutivas de plantas e animais capazes de sobreviver em ambientes extremos (ex.: desertos, regiões árticas) graças a compostos que modulam o ponto de congelamento intracelular e previnem danos às estruturas celulares. Essa característica natural sugere um elevado grau de biocompatibilidade, somado à baixa ecotoxicidade.

Os NaDES combinam vantagens como:

1. Biodegradabilidade e Segurança: Por serem formulados com componentes naturais, têm maior probabilidade de se degradar rapidamente no ambiente, reduzindo riscos de poluição.
2. Flexibilidade de Propriedades: É possível modular a razão entre os constituintes para alterar viscosidade, polaridade e capacidade de solvatação, adaptando-os a aplicações específicas.
3. Síntese em Condições Brandas: Em geral, a preparação de NaDES dispensa alta pressão ou temperaturas elevadas, além de não exigir etapas complexas de purificação, alinhando-se à economia de energia e água.

Aplicações na Química Verde e na Bioeconomia

A expansão dos DES e NaDES na indústria reflete o potencial dessas substâncias para substituir solventes orgânicos voláteis e outros compostos tóxicos, atendendo às crescentes restrições ambientais e sanitárias (SCHUH *et al.*, 2023). Algumas aplicações destacadas incluem:

- Extração e Purificação de Compostos Naturais: Em processos de biorrefinaria, NaDES demonstram alta seletividade e eficiência na remoção de metabólitos vegetais, óleos essenciais e outros bioativos, reduzindo a pegada de solventes convencionais (CHEMAT *et al.*, 2019).

- Síntese e Modificação de Nanomateriais: Ao atuar como meio reacional e estabilizante, DES/NaDES podem contribuir para rotas de síntese mais limpas de

nanopartículas metálicas, poliméricas ou lipídicas, diminuindo o uso de reagentes perigosos (USMANI *et al.*, 2023).

- Reações Enzimáticas e Biocatálises: Graças à biocompatibilidade e capacidade de solvatação, os DES/NaDES podem viabilizar reações catalisadas por enzimas em ambiente não aquoso, otimizando conversões e reduzindo subprodutos indesejáveis (SED *et al.*, 2018).

- Criopreservação e Proteção de Estruturas Biológicas: Castro *et al.* (2018) mostraram que NaDES podem substituir crioprotetores tóxicos, como o DMSO, em aplicações que vão desde a preservação de células e tecidos até a conservação de germoplasma, crucial para a agricultura.

Integração com Nanotecnologia Verde

A sinergia entre DES/NaDES e nanotecnologia verde se revela particularmente promissora no âmbito da bioeconomia. Enquanto a nanotecnologia propõe inovações em escala atômica, os solventes eutéticos verdes fornecem uma plataforma de síntese e processamento alinhados aos princípios de sustentabilidade (LIU *et al.*, 2020). Alguns exemplos de convergência incluem:

1. Síntese de Nanopartículas Funcionalizadas: A presença de NaDES pode estabilizar aglomerados metálicos, prevenindo a aglomeração e permitindo a obtenção de partículas com dispersões mais homogêneas (DAI *et al.*, 2013). Isso facilita aplicações em catálise, sensores e eletrônica.

2. Uso de Coprodutos Agrícolas: Ao empregar resíduos vegetais como fontes de compostos redutores e estabilizantes, e simultaneamente recorrer a NaDES como meio reacional, obtém-se nanopartículas “bioinspiradas”, praticamente isentas de solventes tóxicos (MALIK *et al.*, 2023).

3. Formulações em Sistemas de Liberação Controlada: Nanoencapsulados podem combinar fármacos ou ativos nutracêuticos, carregados em matrizes que usam NaDES para aumentar a estabilidade e a solubilidade de compostos hidrofóbicos, reduzindo a demanda por solventes convencionais (PATEIRO *et al.*, 2021).

4. Remediação Ambiental: Em aplicações de tratamento de efluentes ou recuperação de metais valiosos, a junção de DES/NaDES com nanomateriais adsorventes ou catalíticos aprimora a eficiência do processo, com impacto reduzido sobre o meio ambiente (USMANI *et al.*, 2023).

Desafios e Futuras Perspectivas

Apesar de suas vantagens, a adoção em larga escala de DES e NaDES ainda enfrenta certos obstáculos:

- Escalonamento Industrial: A síntese de alguns NaDES requer matérias-primas naturais de alta pureza, o que pode encarecer a produção. A logística de obtenção e estocagem de grandes volumes de componentes naturais também pode se tornar complexa (ANTONIOLI *et al.*, 2022).

- Regulação e Segurança: Embora tenham baixa toxicidade em geral, há necessidade de pesquisas toxicológicas específicas para cada formulação, garantindo que não haja efeitos adversos em ecossistemas ou em organismos humanos (SCHUH *et al.*, 2023).

- Conscientização e Aceitação de Mercado: Empresas e consumidores podem hesitar em adotar solventes “não convencionais”, sobretudo em setores regulados como o farmacêutico, alimentício e cosmético. Estratégias de divulgação científica e demonstrações de viabilidade econômica são fundamentais para superar essa barreira (FABIO HENRIQUE VOIGT; PAULO; ALISON MARTINS MEURER, 2020).

No entanto, à medida que as restrições ambientais e a pressão social por processos sustentáveis aumentam, bem como a ampliação de pesquisas demonstrando a eficácia de DES/NaDES, a tendência é de crescimento de seu uso. Schuh *et al.* (2023) salientam que estamos apenas começando a explorar todo o potencial desses solventes, tanto na indústria quanto na academia. Sua aplicação em conjunto com a nanotecnologia verde e com os princípios da bioeconomia circular pode, de fato, abrir caminhos para inovações de alto valor agregado, conciliando competitividade e baixo impacto ambiental.

Como será explorado em seções futuras, a integração desses solventes eutéticos à produção nanotecnológica e ao reaproveitamento de resíduos industriais e agrícolas é um ponto crucial para a consolidação de uma bioeconomia inclusiva e regenerativa. Em última análise, o sucesso dessa estratégia dependerá de políticas de incentivo, mecanismos de regulação claros e do engajamento de todos os stakeholders — dos pesquisadores às comunidades que fornecem matéria-prima, passando por investidores, indústrias e o público consumidor.

COPRODUTOS AGRÍCOLAS, RESÍDUOS INDUSTRIAIS E VALORIZAÇÃO NA ECONOMIA CIRCULAR

A transição para uma economia bio-baseada e circular depende fortemente do reaproveitamento de coprodutos agrícolas e resíduos industriais, os quais podem ser convertidos em insumos de alto valor agregado (MUSCAT *et al.*, 2021). Nesse contexto, a interseção entre bioeconomia, nanotecnologia e solventes eutéticos

profundos (DES/NaDES) se mostra uma rota promissora para criar cadeias produtivas que minimizem o desperdício de matérias-primas e gerem novos produtos para indústrias como a alimentícia, cosmética, farmacêutica e de biomateriais (MALIK *et al.*, 2023).

Geração de Resíduos e Oportunidades de Valorização

Estima-se que uma fração considerável da produção agrícola global seja desperdiçada ao longo da cadeia de suprimento, do campo até o consumidor final (OSORIO *et al.*, 2021). Esses coprodutos incluem cascas, sementes, bagaços, talos, folhas e até mesmo resíduos líquidos resultantes de processos industriais (e.g., soro de leite, vinhaça). Em paralelo, resíduos industriais — por exemplo, lodo de estações de tratamento, borra de cervejarias ou subprodutos de refinarias de óleo — podem conter compostos bioativos, nutrientes ou polímeros de interesse para a produção de novos materiais (ANTONIOLI *et al.*, 2022).

Em um modelo linear de produção, tais resíduos são frequentemente descartados em aterros ou utilizados de forma subótima (PAL *et al.*, 2024). A adoção de práticas circulares, porém, estimula o reaproveitamento desses subprodutos em ciclos de processamento capazes de extrair compostos de interesse, tais como polifenóis, fibras, lipídios, proteínas, enzimas e pigmentos naturais (VILLEGAS-YARLEQUÉ *et al.*, 2023). Além disso, a conversão de resíduos em biogás e biofertilizantes também contribui para a autonomia energética e para a melhoria da saúde do solo (OSORIO *et al.*, 2021).

Rotas de Transformação: Do Desperdício ao Produto de Alto Valor

Para converter coprodutos agrícolas e resíduos industriais em matérias-primas valiosas, diversas rotas tecnológicas podem ser implementadas, integrando conceitos de nanotecnologia, biotecnologia e química verde. Dentre elas, destacam-se:

1. **Extração de Bioativos via DES/NaDES:** A substituição de solventes tóxicos por DES ou NaDES aumenta a seletividade e a eficiência na extração de compostos bioativos, como ácidos fenólicos, flavonoides e óleos essenciais (SCHUH *et al.*, 2023). Esses compostos podem ser aplicados como antioxidantes, corantes ou insumos funcionais na indústria alimentícia, cosmética e farmacêutica (CHEMAT *et al.*, 2019).
2. **Síntese de Nanomateriais a partir de Resíduos:** Polímeros naturais (por exemplo, celulose, quitina e pectina), abundantes em bagaços de frutas e resíduos de processamento, podem ser convertidos em nanoestruturas (nanofibras, nanopartículas poliméricas) com múltiplas aplicações — de

filmes biodegradáveis à liberação controlada de compostos bioativos (MALIK *et al.*, 2023).

3. **Fermentação e Biotransformação:** O uso de rotas fermentativas empregando micro-organismos selecionados permite a produção de enzimas, bioplásticos (como PHA) ou ácidos orgânicos (por exemplo, ácido láctico, succínico) a partir de resíduos ricos em carboidratos e proteínas. Esses subprodutos podem funcionar como fonte de carbono ou nitrogênio para microrganismos, agregando valor econômico (PAL *et al.*, 2024).
4. **Biorrefinarias Integradas:** A abordagem de biorrefinaria prevê o fracionamento sequencial de biomassas/resíduos, gerando múltiplos produtos (combustíveis, químicos finos e biomateriais) de maneira análoga às refinarias de petróleo, mas baseadas em recursos renováveis (VILLEGAS-YARLEQUÉ *et al.*, 2023). Esse conceito visa maximizar a eficiência no uso de cada fração do resíduo e criar cadeias de valor diversificadas.
5. **Conversão em Biogás e Biofertilizantes:** Em processos de digestão anaeróbia, a matéria orgânica presente em efluentes e resíduos agroindustriais é convertida em biogás (metano e CO₂) e biofertilizantes ricos em nutrientes. Tal abordagem reduz custos energéticos e fecha o ciclo de nutrientes na agricultura, reintegrando elementos minerais ao solo (OSORIO *et al.*, 2021).

Impactos e Benefícios na Bioeconomia

A valorização de coprodutos e resíduos promove ganhos expressivos em sustentabilidade ambiental, competitividade industrial e inclusão socioeconômica:

- **Redução de Impacto Ambiental:** O desvio de toneladas de resíduos de aterros sanitários e a diminuição da queima de biomassa reduzem emissões de gases de efeito estufa e a poluição de solos e corpos hídricos (ANTONIOLI *et al.*, 2022).
- **Otimização de Recursos Naturais:** Substituir insumos de origem fóssil por coprodutos renováveis diminui a pressão sobre recursos não renováveis, aproximando as cadeias produtivas de um modelo regenerativo (MALIK *et al.*, 2023).
- **Geração de Renda e Empregos:** A implementação de projetos de valorização de resíduos pode impulsionar a criação de polos de inovação e cooperativas de agricultores, beneficiando comunidades rurais e fortalecendo a economia local (PAL *et al.*, 2024).

- **Segurança Alimentar e Nutricional:** Parte dos coprodutos pode ser reprocessada em ingredientes de alto valor nutricional (proteínas, fibras funcionais) para uso na produção de alimentos fortificados, reduzindo o desperdício e contribuindo para a segurança alimentar (VILLEGAS-YARLEQUÉ *et al.*, 2023).

Desafios e Perspectivas Futuras

Apesar do potencial transformador na economia circular, a implementação em larga escala de processos de valorização de resíduos ainda enfrenta barreiras:

1. **Regulação e Padrões de Qualidade:** As legislações específicas para comercialização de ingredientes obtidos de coprodutos ou resíduos podem ser restritivas, exigindo padrões de pureza e segurança. É fundamental harmonizar normas que estimulem práticas de reuso sem comprometer a saúde humana (ALBUQUERQUE *et al.*, 2020).
2. **Escalonamento Industrial:** O desenvolvimento de infraestrutura e tecnologia para converter grandes volumes de resíduos em produtos uniformes e de alta qualidade demanda investimentos consideráveis e parcerias público-privadas (ANTONIOLI *et al.*, 2022).
3. **Manejo e Logística:** A coleta, o transporte e o armazenamento de resíduos agrícolas ou industriais podem acarretar custos elevados, sobretudo em regiões onde a produção é dispersa. Inovações em logística e criação de cadeias integradas de biorrefinarias são caminhos promissores (PAL *et al.*, 2024).
4. **Aceitação do Consumidor e Inserção em Mercados:** Mesmo com avanços tecnológicos, produtos obtidos de “resíduos” podem enfrentar resistência do mercado. Campanhas de conscientização, rotulagem transparente e demonstrações de segurança e eficácia são essenciais para consolidar a confiança dos consumidores (OSORIO *et al.*, 2021).

Para o futuro, tendências apontam para a adoção crescente de tecnologias de triagem avançada, processos de fermentação customizados e emprego de DES/NaDES como alternativa a solventes tóxicos, viabilizando a extração, concentração e purificação de compostos valiosos com menor impacto ambiental (SCHUH *et al.*, 2023). A junção de conhecimentos em nanotecnologia, biotecnologia e química verde abre caminho para produtos inovadores que estimulem a economia circular, ao mesmo tempo em que aliviam a pressão sobre recursos naturais finitos (MALIK *et al.*, 2023).

O uso de coprodutos agrícolas e resíduos industriais como base para o desenvolvimento de novos materiais, ingredientes e fontes de energia é um pilar da bioeconomia circular. Integrando essa abordagem a processos nanotecnológicos e solventes eutéticos profundos sustentáveis, cria-se um ecossistema de inovação

no qual o desperdício torna-se insumo, fomentando o crescimento econômico e a mitigação de impactos ambientais. Entretanto, o pleno aproveitamento desse potencial depende de políticas públicas favoráveis, maior cooperação entre setores e conscientização social quanto aos benefícios socioambientais de um modelo produtivo verdadeiramente circular.



Figura 3: Etapas de valorização de resíduos agroindustriais por rotas biotecnológicas integradas. O fluxo inclui a transformação de biomassa residual em compostos bioativos e nanomateriais, mediada por micro-organismos, biocatalisadores e processos de biorefinaria. Essa abordagem integra a lógica de bioproduct design, conectando a biotecnologia industrial à produção de ingredientes sustentáveis para cosméticos e fármacos.

PERCEPÇÕES SOBRE RISCOS, BENEFÍCIOS E REGULAÇÃO

A implementação de soluções bioeconômicas tem sido identificada como um vetor relevante de inovação e competitividade, sobretudo em setores químicos e farmacêuticos. No entanto, os processos que envolvem novas tecnologias — sejam elas biotecnologias avançadas, rotações industriais baseadas em biomassa ou abordagens de economia circular — também trazem consigo preocupações a respeito de riscos, governança e benefícios efetivos para a sociedade (FISCHER *et al.*, 2023; LOSACKER *et al.*, 2023). Este tópico discute como diferentes atores percebem os riscos e as oportunidades da bioeconomia e como as regulações podem mediar a adoção de inovações de forma sustentável.

Riscos Percebidos e Desafios de Aceitação

Embora o potencial de biotecnologias e processos baseados em biomassa na área química e farmacêutica seja reconhecido, há uma série de incertezas quanto aos riscos envolvidos. Alguns aspectos-chave incluem:

1. Segurança e Efetividade de Bioprodutos

- Especialmente no setor farmacêutico, a introdução de fármacos de base biológica envolve longos processos de validação científica e regulatória, com foco em eficácia terapêutica, possível toxicidade e eventuais efeitos ambientais decorrentes de resíduos ou emissões (FISCHER *et al.*, 2023).
- A percepção pública sobre novos tratamentos de base biotecnológica pode ser fortemente influenciada por escândalos passados na indústria farmacêutica, elevando o escrutínio e a demanda por transparência (VAN DEN BOGAERT *et al.*, 2018).

2. Complexidade da Cadeia de Valor

- Em um contexto de transição sustentável, bioprocessos muitas vezes exigem instalações específicas e parcerias multissetoriais, podendo gerar dependência de insumos únicos ou de alta complexidade (LOSACKER *et al.*, 2023).
- Situações de variação na oferta de biomassa ou incertezas logísticas podem impactar a estabilidade produtiva, levantando preocupações sobre segurança de suprimento e custos (KUMAR; VERMA, 2021).

3. Percepção Pública e Comunidade Científica

- A adoção de inovações disruptivas costuma enfrentar resistência inicial: parte da sociedade pode questionar eventuais riscos à saúde ou ao meio ambiente, especialmente se não houver clareza sobre metodologias de avaliação (LOSACKER *et al.*, 2023).
- Do lado científico, a falta de padronização na caracterização de tecnologias bioeconômicas (p. ex., rotas químicas vs. biotecnológicas) pode dificultar a comparação de impactos e a definição de critérios de segurança.

Benefícios Potenciais e Oportunidades

Apesar dos desafios, o desenvolvimento de uma bioeconomia forte e diversificada oferece oportunidades em vários níveis:

1. Competitividade Industrial e Diversificação Tecnológica

- Em países que investem em P&D&I voltado a biotecnologias avançadas, há potencial de consolidação de polos de inovação com foco em processos químicos verdes e fármacos de base biológica (FISCHER *et al.*, 2023).
- Tal diversificação reduz a dependência de cadeias petroquímicas tradicionais e pode fomentar a criação de empregos de alta qualificação.

2. Sustentabilidade e Redução de Emissões

- A conversão de biomassa em insumos químicos, por rotas de fermentação ou outras tecnologias limpas, tende a emitir menos gases de efeito estufa em comparação à produção a partir de combustíveis fósseis (LOSACKER *et al.*, 2023).
- Ao mesmo tempo, a reutilização de resíduos agrícolas e o aproveitamento de coprodutos industriais reforçam o caráter circular da bioeconomia, trazendo benefícios ambientais adicionais (BRANDÃO; GONÇALVES; SANTOS, 2021).

3. Sinergia com Políticas de Transição Sustentável

- O alinhamento às metas de desenvolvimento sustentável e à transição energética global faz da bioeconomia um campo prioritário, recebendo subsídios e incentivos em muitos países (FISCHER *et al.*, 2023).
- No setor farmacêutico, a perspectiva de fármacos baseados em processos de engenharia genética e síntese verde pode reduzir custos de produção e baratear tratamentos, ampliando o acesso à saúde (JOHNSON, 2024).

Quadro Regulatório e Governança

A regulação é determinante para equilibrar as incertezas de riscos, os benefícios potenciais e a legitimidade social das inovações. As pesquisas de **FISCHER *et al.* (2023)** e **LOSACKER *et al.* (2023)** apontam que as estruturas de governança precisam lidar com:

1. Coordenação Intersetorial

- A bioeconomia engloba setores historicamente pouco integrados, como o químico, o agro e o farmacêutico. Portanto, normas devem ser harmonizadas para garantir padrões de segurança, rastreabilidade e certificação de origem da matéria-prima biológica (LORENZO; SCHMIDT, 2018).
- A ausência de coordenação pode gerar lacunas ou sobreposições regulatórias, dificultando o escalonamento de processos inovadores.

2. Estratégias Nacionais de Especialização

- Países tendem a focar em nichos específicos de especialização, seja em químicos finos, biocombustíveis ou insumos farmacêuticos, conforme seus recursos de biomassa e capacidade de inovação (FISCHER *et al.*, 2023).
- Políticas de incentivo, subsídios e apoio à pesquisa variam e podem tornar determinadas vertentes da bioeconomia mais atrativas, influenciando a evolução do mercado e a percepção de riscos (SANTOS, 2015).

3. Participação de Stakeholders

- Mecanismos participativos, como consultas públicas e fóruns multilaterais, são cruciais para legitimar decisões sobre biotecnologias emergentes e sua inserção no mercado, reduzindo a resistência social (LOSACKER *et al.*, 2023).
- Sem essa participação, há risco de conflitos entre a indústria, a sociedade civil e grupos ambientalistas, o que pode atrasar ou inviabilizar projetos promissores.

Caminhos para Fortalecimento de Confiança e Transparência

A construção de uma bioeconomia robusta e bem aceita socialmente exige estratégias que promovam confiança e abertura nas diferentes frentes:

- **Transparência de Dados e Padronização**
 - O estabelecimento de protocolos claros para avaliação de riscos, segurança e desempenho dos processos bioeconômicos eleva a confiança do consumidor e do investidor (FISCHER *et al.*, 2023).
 - Iniciativas de padronização podem unificar métricas de sustentabilidade e, assim, facilitar comparações entre tecnologias.
- **Incentivo à Pesquisa e Formação de Capital Humano**
 - A formação de equipes multidisciplinares especializadas em química verde, engenharia de bioprocessos e ciências regulatórias pode suprir lacunas de conhecimento e conduzir a inovações mais seguras e eficazes (LOSACKER *et al.*, 2023).
 - Programas de cooperação entre universidades, centros de pesquisa e empresas incentivam a difusão de conhecimento e reduzem custos de desenvolvimento tecnológico.
- **Comunicação Eficaz com a Sociedade**

- É fundamental esclarecer quais os benefícios sociais e ambientais decorrentes de novas rotas bioeconômicas, bem como os mecanismos de mitigação de riscos adotados (FISCHER *et al.*, 2023).
- Engajar a sociedade civil na definição de prioridades de P&D&I e na regulação de produtos com base biológica tende a aumentar a legitimidade dos processos de inovação.

A adoção de tecnologias bioeconômicas em setores químicos e farmacêuticos evoca tanto oportunidades quanto incertezas. Se, por um lado, há potencial para fortalecer a competitividade industrial, reduzir emissões e impulsionar a transição sustentável, por outro, existem preocupações sobre segurança, escalabilidade, aceitação social e regulação. Estudos recentes (FISCHER *et al.*, 2023; LOSACKER *et al.*, 2023) demonstram que a harmonização dessas tensões requer uma governança flexível, capaz de integrar atores múltiplos, bem como estratégias nacionais de especialização alinhadas aos recursos de cada país. Nesse sentido, a abordagem participativa e a busca pela transparência surgem como pilares indispensáveis para equilibrar riscos e benefícios, consolidando a bioeconomia como uma via promissora de inovação e sustentabilidade no cenário global.

ESPECIALIZAÇÃO NACIONAL, DIVERSIFICAÇÃO E INOVAÇÃO NA BIOECONOMIA: LIÇÕES DOS SETORES QUÍMICO, FARMACÊUTICO E DAS TRANSIÇÕES SUSTENTÁVEIS

A expansão da bioeconomia em escala global tem sido acompanhada por variações significativas em termos de especialização produtiva, capacidades tecnológicas e rotas de inovação adotadas por diferentes países (FISCHER *et al.*, 2023; LOSACKER *et al.*, 2023). Enquanto alguns polos nacionais concentram-se em áreas específicas, como a química verde ou a produção de biofármacos, outros adotam estratégias de diversificação que envolvem múltiplos segmentos industriais, laboratórios de pesquisa e parcerias intersetoriais (PIORSKI; XAVIER, 2018). Nesse sentido, compreender como esses processos de especialização e diversificação se estruturam oferece elementos valiosos para delinear políticas públicas, arranjos institucionais e modelos de governança capazes de acelerar a transição para uma bioeconomia mais inclusiva e sustentável.

Nacionalização de Capacidades e Rotas de Especialização

No panorama internacional, observa-se que países com tradição nos setores químico e farmacêutico tendem a apresentar vantagens competitivas na adoção de tecnologias bio-baseadas (FISCHER *et al.*, 2023). Tais vantagens se manifestam por meio de:

1. Infraestrutura de P&D&I Consolidada

- Universidades, centros de pesquisa e indústrias com larga experiência em sínteses químicas e processos biotecnológicos geram um ecossistema propício para a transição rumo a rotas de produção mais limpas.
- A disponibilidade de equipamentos avançados e laboratórios de análise de alta complexidade eleva o potencial de inovação e a qualidade dos protótipos e produtos gerados.

2. Cadeias de Valor Verticalizadas

- Integração entre produção de matérias-primas, processamento industrial e formulação de produtos finais facilita o escalonamento rápido de tecnologias emergentes, do laboratório ao mercado.
- Em mercados já consolidados (por exemplo, farmacêuticos), a adoção de ingredientes ou rotas de síntese bio-baseadas pode ser acelerada pela sinergia com marcos regulatórios, redes de suprimento e práticas de propriedade intelectual já estabelecidas.

3. Efetividade de Clusters e Parques Tecnológicos

- Regiões especializadas em química fina ou fármacos frequentemente contam com clusters industriais que fomentam a cooperação entre empresas, startups e institutos de pesquisa, favorecendo a troca de conhecimento e a formação de mão de obra qualificada.

Estratégias de Diversificação e Inovação na Bioeconomia

Em paralelo à especialização, muitos países buscam diversificar suas atividades na bioeconomia, combinando setores tradicionais (agrícola, florestal) com áreas de ponta (nanotecnologia, biologia sintética e química verde) (FISCHER *et al.*, 2023; LOSACKER *et al.*, 2023a). Esse movimento de diversificação se traduz em:

1. Expansão para Novos Nichos

- Desenvolvimento de bioplásticos a partir de resíduos agrícolas ou de microorganismos modificados geneticamente, endereçando problemas de poluição e criando oportunidades de mercado em embalagens sustentáveis (PASSOS; RAMOS; ELISABETE FROLLINI, 2020).
- Aplicação de rotas biotecnológicas na síntese de componentes farmacêuticos, suprimindo demandas globais por fármacos mais seguros e de menor impacto ambiental (IBRAHIM; ARAUJO, 2021).

2. Plataformas de Inovação Abertas

- Mecanismos de inovação aberta (open innovation) permitem que instituições públicas, setor privado e organizações sem fins lucrativos codesenvolvam tecnologias e processos, diminuindo custos e riscos (FERREIRA; DENNER, 2018).
 - Parcerias transnacionais — especialmente no contexto de acordos internacionais sobre mudanças climáticas e proteção da biodiversidade — viabilizam pesquisas colaborativas em energias renováveis, química sustentável e bioprodutos de alto valor agregado (PLUMMER *et al.*, 2022).
3. Articulação com Transições Sustentáveis
- Em consonância com o conceito de *sustainability transitions*, as inovações no campo da bioeconomia — sejam elas produtos, processos ou modelos de negócio — estão cada vez mais inseridas em mudanças sociotécnicas amplas, que incluem transformações culturais, institucionais e políticas (LOSACKER *et al.*, 2023b).
 - O sucesso de uma transição sustentável depende de arranjos de governança flexíveis, capazes de integrar múltiplos stakeholders e de incorporar preocupações com equidade social, proteção ambiental e viabilidade econômica de longo prazo (SCHILLING; WYSS; BINDER, 2018).

Desafios de Governança e Políticas de Incentivo

A diversificação ou a concentração em nichos específicos da bioeconomia suscita tensões e desafios nos âmbitos regulatório e político. Conforme destacam LOSACKER *et al.* (2023b), as políticas públicas de fomento à inovação devem equilibrar incentivos para setores consolidados e estímulos para setores emergentes, evitando desigualdades regionais ou a concentração excessiva de poder nas mãos de grandes corporações. Alguns pontos-chave incluem:

1. Sustentabilidade x Competitividade

- Promover padrões rigorosos de sustentabilidade ambiental e social, ao mesmo tempo em que se garante competitividade econômica no mercado global.
- Harmonizar regulações nacionais e regionais, de forma que barreiras protecionistas não travem a difusão de inovações ou impeçam a entrada de pequenas e médias empresas.

2. Formação e Capacitação Profissional

- A adoção de tecnologias bio baseadas em química e fármacos requer competências multidisciplinares (engenharia de bioprocessos, biologia molecular, química verde etc.).
- Políticas de educação e capacitação contínua tornam-se cruciais para a formação de uma força de trabalho apta a lidar com processos complexos e a desenvolver soluções de alto valor agregado.

3. Regimes de Propriedade Intelectual

- Na bioeconomia, a proteção de patentes e know-how em biotecnologia e fármacos pode se mostrar sensível, especialmente em se tratando de inovações que derivam de biodiversidade ou conhecimento tradicional.
- É essencial alinhar mecanismos de compartilhamento de benefícios (benefit-sharing) e garantir que grupos locais ou países de origem não sejam excluídos dos ganhos gerados pelas inovações.

4. Inclusão Social e Territorial

A implementação de projetos bio-baseados, se focados apenas em regiões ricas ou clusters consolidados, pode acentuar desigualdades.

Incentivos específicos para regiões menos industrializadas, bem como parcerias público-privadas que envolvam pequenos produtores, são estratégias de democratização econômica e social (LOSACKER *et al.*, 2023b).

Cenários de Futuro e Recomendações

1. Integração de Tecnologias Digitais

- A Indústria 4.0 e ferramentas de inteligência artificial podem otimizar cadeias produtivas bio-baseadas, reduzindo custos e melhorando a rastreabilidade de insumos e processos (SILVA; SEHNEM, 2022).
- A sinergia entre digitalização e biotecnologia tende a tornar possível a criação de plataformas virtuais de inovação, unindo pesquisadores, indústrias e governos em tempo real (KRIEGMAN *et al.*, 2020).

2. Biorrefinarias Flexíveis

- Infraestruturas escaláveis, capazes de processar diferentes tipos de biomassa (resíduos agrícolas, algas e microorganismos), reforçam a robustez das cadeias de suprimento e a capacidade de resposta às variações de mercado (ASSIRELLI; SANTANGELO, 2018).

- A flexibilidade de processos também contribui para a adaptação a mudanças climáticas e desafios geopolíticos, garantindo segurança no fornecimento de bioinsumos (FISCHER *et al.*, 2023).

3. Governança Inclusiva e Redes de Cooperação

- Políticas orientadas à co-criação de inovação (living labs, hubs regionais) permitem que diversas vozes sejam consideradas na formulação de estratégias de transição, maximizando a legitimidade e o engajamento das comunidades afetadas (COMPAGNUCCI *et al.*, 2021).
- A cooperação internacional, por meio de consórcios ou programas de financiamento coletivo, pode impulsionar a troca de boas práticas e harmonizar padrões de sustentabilidade e qualidade (LOSACKER *et al.*, 2023b).

A evolução das tecnologias bio baseadas nos setores químico e farmacêutico, bem como a articulação dessas soluções com os objetivos de uma transição sustentável, moldam os caminhos da bioeconomia global. Uma dessas vias para tal realidade almejada é a especialização nacional em áreas-chave ou a diversificação para múltiplos nichos, sendo inegável que a governança adequada e políticas de incentivo bem estruturadas desempenham papel central na consolidação dessa nova fronteira tecnológica (FISCHER *et al.*, 2023; LOSACKER *et al.*, 2023b). A capacidade de cada país em harmonizar competitividade econômica, sustentabilidade ambiental e equidade social determinará, em larga medida, o sucesso e a legitimidade das inovações bio-econômicas nas próximas décadas.



Figura 4: Matriz de sustentabilidade e complexidade tecnológica dos produtos

bioeconômicos. O eixo horizontal representa o avanço tecnológico (de baixo a alto TRL), enquanto o eixo vertical indica o nível de sustentabilidade (baixo a alto). As posições exemplificam categorias de produtos como bioenergia, bioplásticos, cosméticos e biofertilizantes, destacando as plataformas nanoestruturadas (NLC, NaDES, QbD, IA) como convergência de alta sustentabilidade e alta complexidade.

CONCLUSÃO

A interseção entre nanotecnologia, solventes eutéticos profundos (DES/NaDES) e a bioeconomia revela-se como um poderoso eixo para a transformação dos modelos de produção e consumo, direcionando-os à sustentabilidade e à circularidade. Inicialmente, a nanotecnologia verde despontou como uma forma de manipular materiais em escala atômica para desenvolver produtos mais eficientes, limpos e alinhados aos princípios da química verde. Em paralelo, os DES/NaDES surgiram como solventes capazes de otimizar processos industriais — em especial de extração e purificação —, reduzindo a dependência de substâncias tóxicas e favorecendo a biorremediação em setores como alimentos, fármacos e cosméticos. A convergência dessas inovações com a noção de economia circular amplia as possibilidades de valorização de resíduos agroindustriais, gerando novos produtos de alto valor agregado e minimizando passivos ambientais.

A discussão sobre riscos, percepções e regulação evidencia que a adoção de tecnologias disruptivas desperta tanto expectativas positivas — como redução de emissões, competitividade industrial e diversificação econômica — quanto receios, ligados a possíveis efeitos toxicológicos, incertezas regulatórias e barreiras de aceitação social. Nesse sentido, a governança participativa, pautada em transparência e em metodologias de avaliação robustas (por exemplo, análise de ciclo de vida), emerge como fator decisivo para legitimar processos inovadores. Por sua vez, as estratégias nacionais de especialização — em áreas como química, farmacêutica e biotecnologia — podem impulsionar polos de excelência, consolidando cadeias de valor que se beneficiam dos recursos de biomassa locais e das parcerias multissetoriais.

Por fim, o debate em torno das “múltiplas bioeconomias” destaca que não há uma única via para a transição sustentável: diferentes stakeholders — governos, universidades, indústrias, comunidades rurais e sociedade civil — interpretam e priorizam objetivos de forma heterogênea. Ainda assim, o potencial de sinergias entre nanotecnologia, DES/NaDES e economia circular apresenta uma janela singular de oportunidades para conciliar prosperidade econômica com justiça social e preservação ambiental. A consolidação definitiva dessas rotas depende do amadurecimento regulatório, de incentivos à pesquisa e do envolvimento ativo de todos os agentes, criando, assim, um ecossistema de inovação capaz de “fechar o ciclo” e reduzir efetivamente a pegada ambiental da atividade produtiva.

REFERÊNCIAS

Albuquerque, T. G. et al. Compliance of declared vs. analysed values with EU tolerance limits for mandatory nutrients in prepacked foods. *Food Chemistry*, v. 302, p. 125330–125330, 1 jan. 2020.

Andreani, T. et al. Ecotoxicity to Freshwater Organisms and Cytotoxicity of Nanomaterials: Are We Generating Sufficient Data for Their Risk Assessment? *Nanomaterials*, v. 11, n. 1, p. 66–66, 30 dez. 2020.

Antonioli, D. et al. Sustainable production: The economic returns of circular economy practices. *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 5, p. 2603–2617, 2022.

Asin-Garcia, E. et al. Exploring the Impact of Tensions in Stakeholder Norms on Designing for Value Change: The Case of Biosafety in Industrial Biotechnology. *Science and Engineering Ethics*, v. 29, n. 2, 7 mar. 2023.

Assey, G. E.; Malasi, W. S. Advances in Nanomaterials Sciences and Nanotechnology for Sustainable Development: A Review. *Tanzania Journal of Science*, v. 47, n. 4, p. 1450–1463, 28 out. 2021.

Assirelli, A.; Santangelo, E. An extractor for unloading the wet biomass stored in silo-bag. *Industrial Crops and Products*, v. 123, p. 128–134, nov. 2018.

Balaceanu, Cristina et al. Perspectives on eco economics. Circular economy and smart economy. *Academic Journal of Economic Studies*, v. 3, n. 4, p. 105–109, 2017.

Barbosa, M. De O. et al. Bioeconomia: Um novo caminho para a sustentabilidade na Amazônia? *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, p. e41101018545, 5 ago. 2021.

Bragagnolo, F. et al. REVISITING NATURAL DEEP EUTECTIC SOLVENTS (NADES) AS EXTRACTION MEDIA AND READY-TO-USE PURPOSES. *TrAC. Trends in analytical chemistry*, p. 117726–117726, 1 abr. 2024.

Brandão, A. S.; Gonçalves, A.; Santos, J. M. R. C. A. Circular bioeconomy strategies: From scientific research to commercially viable products. *Journal of Cleaner Production*, v. 295, p. 126407, maio 2021.

Castro, V. I. B. et al. Natural deep eutectic systems as alternative nontoxic cryoprotective agents. *Cryobiology*, v. 83, p. 15–26, 2018.

Chemat, F. et al. Review of Alternative Solvents for Green Extraction of Food and Natural Products: Panorama, Principles, Applications and Prospects. *Molecules*, v. 24, n. 16, p. 3007, 2019.

Cheriyamundath, Sanith; Vavilala, Sirisha L. Nanotechnology-based wastewater treatment. *Water and Environment Journal*, v. 35, n. 1, p. 123-132, 2021.

Choi, Y. H.; Verpoorte, R. Metabolomics: What You See is What You Extract. *Phytochemical Analysis*, v. 25, n. 4, p. 289–290, 2014.

Cialdella, N. et al. Comunidades tradicionais tecendo o desenvolvimento territorial: três experiências de interações entre sociobiodiversidade, mercados, políticas públicas e ação coletiva. *Geo UERJ*, n. 40, p. e64997, 5 fev. 2022.

Costa, E. et al. Bioeconomy in the Amazon: Lessons and gaps from thirty years of non-timber forest products research. *Journal of Environmental Management*, v. 370, p. 122420–122420, 10 set. 2024.

Compagnucci, L. et al. Living Labs and user engagement for innovation and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 289, p. 125721, mar. 2021.

Dai, Y. et al. Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Analytica Chimica Acta*, v. 766, p. 61–68, 2013.

Debref, Romain., et al. « For an Institutional Approach to the Bioeconomy: Innovation, Green Growth and the Rise of New Development Models ». *Journal of Innovation Economics & Management*, 2022/2 N° 38, 2022. p.1-9.

Dieken, S.; Dallendörfer, M.; Henseleit, M.; Siekmann, F.; Venghaus, S. The multitudes of bioeconomies: A systematic review of stakeholders' bioeconomy perceptions. *Sustainable Production and Consumption*, v. 27, p. 1703–1717, 2021.

Fabio Henrique Voigt; Paulo, J.; Alison Martins Meurer. Nível de evidenciação de custos e investimentos ambientais e legibilidade dos relatórios da administração de empresas do setor de papel e celulose. 23 dez. 2020.

Ferraz, Diogo; Pyka, Andreas. Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-22, 2023.

Ferreira, L.; Denner, C. Open Innovation in the Public Sector. *Springer proceedings in*

complexity, p. 458–466, 1 jan. 2018.

Fischer, L.; Losacker, S.; Wydra, S. National specialization and diversification in the bioeconomy: Insights from biobased technologies in chemical and pharmaceutical sectors, 2023.

Freitas, E. N. DE et al. Challenges of Biomass Utilization for Bioenergy in a Climate Change Scenario. *Biology*, v. 10, n. 12, p. 1277, 1 dez. 2021.

Galembeck, F. Inovação para a sustentabilidade. *Química Nova*, v. 36, n. 10, p. 1600–1604, 2013.

González-laredo, R. F. et al. Natural deep eutectic solvents (NaDES) as an emerging technology for the valorisation of natural products and agro-food residues: a review. *International journal of food science & technology*, v. 58, n. 12, p. 6660–6673, 30 ago. 2023.

Gottardo, S. et al. Towards safe and sustainable innovation in nanotechnology: State-of-play for smart nanomaterials. *NanoImpact*, v. 21, p. 100297, 1 jan. 2021.

Guilherme De Queiroz-Stein et al. Disputing the bioeconomy-biodiversity nexus in Brazil: Coalitions, discourses and policies. *Forest Policy and Economics*, v. 158, p. 103101–103101, 3 dez. 2023.

Hausknost, D. et al. A Transition to Which Bioeconomy? An Exploration of Diverging Techno-Political Choices. *Sustainability*, v. 9, n. 4, p. 669, 23 abr. 2017.

Huber, V. et al. Natural deep eutectic solvents: From simple systems to complex colloidal mixtures. *Advances in botanical research*, p. 17–40, 13 out. 2020.

Ibrahim, T.; Araujo, C. A. S. Biopharmaceutical supply Chain challenges in developing countries: an exploratory analysis. *Supply Chain Forum: An International Journal*, p. 1–16, 6 jul. 2021.

Johnson, B. Reducing the costs of blockbuster gene and cell therapies in the Global South. *Nature Biotechnology*, v. 42, n. 1, p. 8–12, 1 jan. 2024.

Kriegman, S. et al. A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 4, p. 1853–1859, 28 jan. 2020.

Kumar, B.; Verma, P. Biomass-based biorefineries: An important architype towards a circular economy. *Fuel*, v. 288, p. 119622, mar. 2021.

Lange, L. Business Models, Including Higher Value Products for the New Circular, Resource-Efficient Biobased Industry. *Frontiers in Sustainability*, v. 3, 15 mar. 2022.

Liu, C. et al. Production of lignin-containing cellulose nanofibers using deep eutectic solvents for UV-absorbing polymer reinforcement. *Carbohydrate Polymers*, v. 246, p. 116548–116548, 6 jun. 2020.

Lorenzo, V.; Schmidt, M. Biological standards for the Knowledge-Based BioEconomy: What is at stake. *New Biotechnology*, v. 40, p. 170–180, jan. 2018.

Losacker, S.; Heiden, S.; Liefner, I.; Lucas, H. Rethinking bioeconomy innovation in sustainability transitions, 2023.

Luis De Oliveira Júnior, A. et al. The influence of partial replacement of natural sand aggregates by grits residues on the mechanical properties of an ecological mortar. *Journal of Building Engineering*, v. 26, p. 100912, nov. 2019.

Maksimović, M.; Omanović-Miklićanin, E. Towards green nanotechnology: maximizing benefits and minimizing harm. *IFMBE Proceedings*, p. 164–170, 2017.

Malik, S.; Muhammad, K.; Waheed, Y. Nanotechnology: A revolution in modern industry. *Molecules*, v. 28, n. 2, p. 661, 2023.

Mhatre, P. et al. Circular economy in built environment – Literature review and theory development. *Journal of Building Engineering*, v. 35, p. 101995, nov. 2020.

Muscat, A. et al. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*, v. 2, n. 8, p. 561–566, ago. 2021.

Nam, N. N. et al. Design Strategy and Application of Deep Eutectic Solvents for Green Synthesis of Nanomaterials. *Nanomaterials*, v. 13, n. 7, p. 1164–1164, 24 mar. 2023.

Osorio, L. L. D. R.; Flórez-López, E.; Grande-Tovar, C. D. The Potential of Selected Agri-Food Loss and Waste to Contribute to a Circular Economy: Applications in the Food, Cosmetic and Pharmaceutical Industries. *Molecules*, v. 26, p. 515, 2021.

Pal, P.; Singh, A. K.; Srivastava, R. K.; Rathore, S. S.; Sahoo, U. K.; Subudhi, S.; Sarangi, P. K.; Prus, P. Circular Bioeconomy in Action: Transforming Food Wastes into Renewable Food Resources. *Foods*, v. 13, p. 3007, 2024.

Passos, R.; Ramos, L. A.; Elisabete Frollini. Bio-based electrospun mats composed of aligned and nonaligned fibers from cellulose nanocrystals, castor oil, and recycled PET. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 163, p. 878–887, 10 jul. 2020.

Pateiro, M. et al. Nanoencapsulation of Promising Bioactive Compounds to Improve Their Absorption, Stability, Functionality and the Appearance of the Final Food Products. *Molecules*, v. 26, n. 6, p. 1547, 11 mar. 2021.

Perna, F. M.; Vitale, P.; Capriati, V. Deep eutectic solvents and their applications as green solvents. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 21, p. 27–33, fev. 2020.

Piorski, K. A. O. Da S.; Xavier, C. L. Especialização em recursos naturais e cadeias globais de valor (1995 e 2009)*. *Economia e Sociedade*, v. 27, n. 1, p. 89–127, abr. 2018.

Prabhune, A.; DEY, R. Green and sustainable solvents of the future: Deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, v. 379, p. 121676, jun. 2023.

Puder, J.; Tittor, A. Bioeconomy as a promise of development? The cases of Argentina and Malaysia. v. 18, n. 2, p. 617–631, 30 jan. 2023.

Ramanathan, Santheraleka et al. Nanoparticle synthetic methods: strength and limitations. In: *Nanoparticles in Analytical and Medical Devices*. Elsevier, 2021. p. 31-43.

Salamanca-Buentello, F.; Daar, A. S. Nanotechnology, Equity and Global Health. *Nature Nanotechnology*, v. 16, p. 1–4, 29 mar. 2021.

Santos, A. BIOTECNOLOGIA E BIOSSEGURANÇA – ASPECTOS DE UMA ESTRATÉGIA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. *Revista Internacional de Ciências*, v. 5, n. 1, 7 jul. 2015.

Santos, L. S.; Serafim, M. C.; Pinheiro, D. M. DESAFIOS À COMPREENSÃO DO COMÉRCIO JUSTO COMO MODELO ECONÔMICO VIÁVEL: UM OLHAR A PARTIR DA SOCIOLOGIA ECONÔMICA PARA OS ESTUDOS ORGANIZACIONAIS. *Reuna*, v. 25, n. 1, p. 73–89, 4 maio 2020.

Schuh, L. et al. From Nature to Innovation: The Uncharted Potential of Natural Deep Eutectic Solvents. *Molecules*, v. 28, n. 22, p. 7653, 2023.

Schuh, L. et al. Integrating Natural Deep Eutectic Solvents into Nanostructured Lipid Carriers: An Industrial Look. *Pharmaceuticals*, v. 17, n. 7, p. 855, 28 jun. 2024.

Sed, G. et al. A novel switchable-hydrophilicity, natural deep eutectic solvent (NaDES)-based system for bio-safe biorefinery. *RSC Advances*, v. 8, n. 65, p. 37092–37097, 1 nov. 2018.

Serejo, Raissa C. et al. An Innovative Green Eco-Friendly Method for the Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using *Plinia cauliflora* Extract. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 35, n. 11, p. e-20240097, 2024.

Shubhrajyotsna Aithal; Aithal, P. S. Green and Eco-friendly Nanotechnology – Concepts and Industrial Prospects. Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research), 3 fev. 2021.

SILVA, LUCIANO PAULINO et al. Sustainable exploitation of agricultural, forestry, and food residues for green nanotechnology applications. In: *Biogenic Nanomaterials*. Apple Academic Press, 2022. p. 301-344.

Silva, T. D. P.; Pinto, G. S. NANOTECNOLOGIA E SUA INFLUÊNCIA NA EVOLUÇÃO DA MEDICINA. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 2, p. 269–280, 18 dez. 2020.

Silva, T. H. H.; Sehnm, S. Industry 4.0 and the Circular Economy: Integration Opportunities Generated by Startups. *Logistics*, v. 6, n. 1, p. 14, 7 fev. 2022.

Suchek, N. et al. Innovation and the Circular economy: a Systematic Literature Review. *Business Strategy and the Environment*, v. 30, n. 8, p. 3686–3702, 25 maio 2021.

Srivastav, A.L., Bagherian, A. & Ghosh, D. The circular bioeconomy: pathways to sustainability and resource optimization. *Clean Techn Environ Policy* (2024).

Srivastava, Shilpi et al. Green nanotechnology: an overview. *Green nanoparticles: the future of nanobiotechnology*, p. 1-13, 2022.

Stahel, W. R. The circular economy. *Nature*, v. 531, n. 7595, p. 435–438, 24 mar. 2016

Takaes Santos, I. Confronting governance challenges of the resource nexus through reflexivity: A cross-case comparison of biofuels policies in Germany and Brazil. *Energy Research & Social Science*, v. 65, p. 101464, jul. 2020.

Tinch, R., Bugter, R., Blicharska, M. et al. Arguments for biodiversity conservation: factors influencing their observed effectiveness in European case studies. *Biodivers Conserv* 27, 1763–1788 (2018).

Usmani, Z. et al. Biobased natural deep eutectic system as versatile solvents: Structure, interaction and advanced applications. *Science of The Total Environment*, v. 881, p. 163002, 2023.

Van Den Bogaert, S. et al. In the land of pharma: A qualitative analysis of the reputational discourse of the pharmaceutical industry. *Public Relations Inquiry*, v. 7, n. 2, p. 127–147, maio 2018.

Vianna, M. P. et al. Diversity regained: Precautionary approaches to COVID-19 as a phenomenon of the total environment. *The Science of The Total Environment*, v. 825, p. 154029–154029, 22 fev. 2022.

Villegas-Yarlequé, M.; Tirado-Kulieva, V. A.; Seminario-Sanz, R. S.; Camacho-Orbegoso, E. W.; Calderón-Castillo, B.; Bruno-Coveñas, P. Bibliometric analysis and text mining to reveal research trends on fruit by-products under circular economy strategies. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 35, p. 101232, 2023.

Wei, X.; Luo, J.; Pu, A.; Liu, Q.; Zhang, L.; Wu, S.; Long, Y.; Leng, Y.; Dong, Z.; Wan, X. From Biotechnology to Bioeconomy: A Review of Development Dynamics and Pathways. *Sustainability*, v. 14, p. 10413, 2022.

Whiting, K. et al. Exergy Replacement Cost of Fossil Fuels: Closing the Carbon Cycle. *Energies*, v. 10, n. 7, p. 979, 12 jul. 2017.